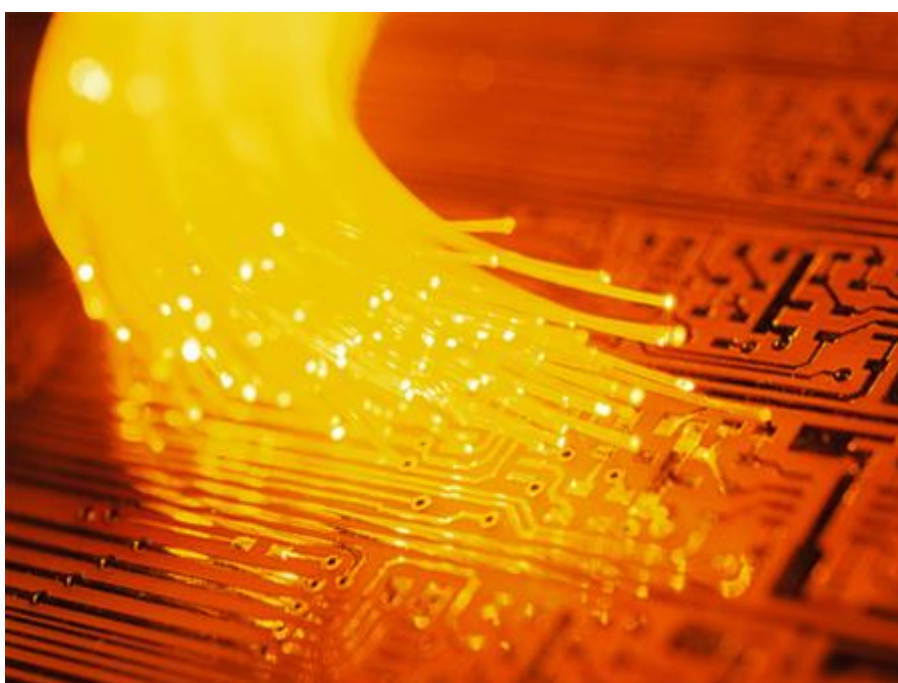


Rapporteur : Antonin MILZA

## LA TV NUMERIQUE EN FRANCE



20/09/2012

Qualité de service et qualité d'expérience

## La TV numérique en France

QUALITE DE SERVICE ET QUALITE D'EXPERIENCE

# Contexte

Nous connaissons depuis les années 2003 un fort développement des offres *Triple Play* (Internet, TV, téléphone) sur le marché de l'internet fixe français. Ces dernières donnent, en particulier, accès à un bouquet de chaînes de télévision inclus dans l'abonnement mensuel (comprenant entre autre les chaînes de la TNT), et dont la transmission se fait sur un réseau utilisant le protocole IP (*Internet Protocol*). Ce mode de diffusion de la télévision est plus généralement appelé IP-TV (pour TV par IP).

Une récente étude<sup>1</sup> du Conseil Supérieur de l'Audiovisuel (CSA) sur l'équipement des foyers français concernant la réception de la télévision numérique montre que l'IPTV touche aujourd'hui 8,2 millions de foyers. Loin derrière le satellite en 2007, avec moins de 13% des foyers équipés, la télévision par IP (technologie xDSL et fibre) a depuis connu une croissance continue. Aujourd'hui, quasiment 40% des foyers français regardent la télévision par IP, contre 22,5 % pour le satellite (payant et gratuit) soit une augmentation de plus 200% en à peine 5 ans.

Ce succès de l'IPTV peut aisément s'expliquer par la forte progression du dégroupage total pour l'ADSL de ces dernières années, avec, début 2012, 10,283 millions<sup>2</sup> de foyers français dégroupés. Néanmoins cette forte croissance de l'IPTV doit être nuancée du fait d'une importante disparité géographique : l'IPTV est principalement utilisée dans les villes de plus de 200 000 habitants et dans l'agglomération parisienne. À rebours, les zones rurales et les petites villes avantagent de très loin la TNT ainsi que le satellite. Cette disparité d'utilisation de l'IPTV sur le territoire révèle en réalité une très grande hétérogénéité de qualité de service de l'IPTV selon les régions, l'éloignement et les fournisseurs d'accès.

La télévision hertzienne terrestre avait habitué les consommateurs à une qualité de service quasi homogène sur l'ensemble du territoire national. Aujourd'hui, l'IPTV marque une rupture importante avec le passé, car le consommateur peut difficilement savoir, a priori, quelle sera la qualité de réception du service TV auquel il s'abonne.

En plus de la télévision par IP (utilisant les technologies xDSL et fibre) le consommateur peut recevoir la télévision numérique par l'intermédiaire du réseau câblé, des ondes hertziennes (TNT) ou encore du satellite. Ces différentes technologies ont chacune leurs propres spécificités, avantages, et inconvénients pour la transmission de la télévision numérique chez le consommateur.

---

<sup>1</sup> L'observatoire de l'équipement des foyers pour la réception de la télévision numérique a rendu publics le 27 juin 2012 une étude sur l'équipement des foyers français pour la réception de la télévision numérique. Le rapport est disponible à l'adresse suivante : <http://www.csa.fr/Etudes-et-publications/Les-observatoires/L-observatoire-de-l-equipement-des-foyers-pour-la-reception-de-la-television-numerique/Les-resultats-de-la-huitieme-vague-d-etude-Second-semester-2011>.

<sup>2</sup> Résultat de l'observatoire des marchés des communications électroniques de l'ARCEP au 1er trimestre 2012.

Dans ce contexte d'incertitude, ce rapport se propose de cibler la problématique de la qualité de service (ou QoS) et de la Qualité d'Expérience utilisateur (QoE) des offres IPTV en France, afin de pouvoir, à terme, informer et guider le consommateur dans son choix.

# Synthèse

Il existe aujourd'hui de nombreuses technologies permettant le transport numérique de la télévision : Les technologies traditionnelles que sont les ondes hertziennes (la TNT), le câble (utilisant la norme de diffusion DVB-C) et le satellite, mais également des technologies beaucoup plus récentes, actuellement en pleine croissance, qui utilisent le réseau internet et la technologie IP pour transmettre les flux TV (DSL et fibre). Cette multiplicité des technologies existantes pour la transmission de la télévision numérique entraîne d'importantes différences en termes de qualité de service TV indépendamment de la région où se trouve l'abonné. Nous nous intéresserons à étudier et comparer ces différentes technologies.

Nous verrons en particulier qu'avec les lignes xDSL la transmission peut rapidement se dégrader avec la distance : plus la ligne de cuivre est longue plus le débit disponible pour chez l'abonné sera faible. Après une certaine distance, le débit nécessaire à la réception du service de TV numérique n'est plus disponible, et l'abonné ne pourra plus obtenir le signal. Ainsi pour ce type de technologie il nous faudra étudier la qualité du service IPTV pour chaque opérateur en fonction de la longueur de ligne. Aujourd'hui nous savons déterminer avec précision l'affaiblissement d'une ligne (donc le débit théorique maximum pour l'abonné) en fonction de l'éloignement<sup>1</sup>. Par contre il est très difficile de décrire la dégradation du service TV avec la distance. Le plus souvent, les FAI se contentent, au moment de l'abonnement de déclarer le consommateur éligible, ou non, au service TV, sachant qu'un abonné trop éloigné, typiquement au-dessus d'un affaiblissement de 50dB, est déclaré inéligible au service TV de l'opérateur. A contrario, les technologies câble et FTTx permettent de s'abstraire de la problématique d'éloignement

L'information fournie aujourd'hui au consommateur donne ainsi l'impression d'un problème binaire : le service est disponible, ou il ne l'est pas du tout. En réalité, si un abonné peut effectivement recevoir le signal TV, cela ne signifie pas que le service sera de qualité optimale. On constate souvent avec la télévision numérique des artefacts sur l'image (freeze, pixellisation, etc.), des chaînes parfois indisponibles, une fluidité du service médiocre ou encore une qualité d'image peu satisfaisante. Pour le consommateur le confort d'utilisation du service TV est essentiel, ainsi celui-ci a besoin de pouvoir comparer la qualité du service TV entre les différentes technologies de transmission et entre les différents opérateurs. L'ensemble des facteurs influant sur la qualité perçue par l'utilisateur permet de définir globalement une Qualité de Service (QoS) et une Qualité d'Expérience utilisateur (QoE).

Après une étude comparative des différents moyens de diffusion de la télévision numérique aujourd'hui (Partie I) nous définirons les éléments fondamentaux de la QoS et de la QoE afin de

---

<sup>1</sup> Cf paragraphe 1.3.1.7.

déterminer les facteurs fondamentaux que maîtrisent les opérateurs et qui leur permettent d'influer sur la qualité TV et leur politique d'éligibilité (Partie II).

# Remerciements

Votre rapporteur tient à remercier les personnes suivantes :

Christophe BERGE

J. CRESTEL

Jean-François DURAND

Christopher ESSONE ONDO ULRICH

Alain GOURET

Thierry JOLLY

G. LE LAY

H. MAUDIER

Olivier MELLINA-GOTTARDO

Marc MILANINI

Thomas SANGOUARD

E. WYCKENS

Ainsi que tout le personnel de la DGCCRF et du bureau 6B.

Enfin, un merci tout particulier à Matthieu DECONINCK qui m'a encadré pendant mon stage à la DGCCRF.

# Définitions, abréviations et acronymes

**ADSL** : L'Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) est une technique de communication numérique de la famille xDSL. Elle permet d'utiliser une ligne téléphonique pour transmettre et recevoir des données numériques de manière indépendante du service téléphonique conventionnel.

**ADSL 2+** : C'est une évolution de la technique ADSL, elle exploite plus de fréquences porteuses pour les données (jusqu'à 2,2 MHz). Cela se traduit par une augmentation du débit maximal possible.

**Affaiblissement** : L'affaiblissement de propagation, aussi connu comme affaiblissement de parcours ou par son nom anglais de « path loss », caractérise l'affaiblissement que subit une onde électromagnétique lorsqu'elle parcourt une distance. Cet affaiblissement est dû à la dispersion de la puissance, mais également aux obstacles rencontrés sur le chemin : édifices, murs, meubles, et autres bloquant le signal. Ce phénomène d'affaiblissement est une limitation fondamentale pour la diffusion de l'information en générale et particulièrement de la télévision numérique. L'affaiblissement est très présent sur certain réseau (comme le réseau cuivre du téléphone) et beaucoup moins sur d'autre (les réseaux en fibre optique).

**Blu-ray** : Le disque Blu-ray ou Blu-ray Disc (abréviation officielle BD) est un format de disque numérique breveté et commercialisé par l'industriel japonais Sony permettant de stocker et restituer des vidéogrammes en Haute Définition. Sa dénomination provient du type de rayon laser qu'il exploite, de couleur spectrale proche du bleu.

**Débit IP et débit ATM** : Le débit ATM est mesuré directement sur le réseau, après le DSLAM. Le débit IP est quant à lui mesuré entre le DSLAM et l'abonné. Le débit IP est toujours inférieur au débit ATM. La différence de méthodes montre un écart de 25% entre le débit IP et le débit ATM. Le débit IP est plus proche du débit réel dont dispose l'abonné que le débit ATM.

**DSLAM** : Il contient les modems DSL opérateurs situés en vis à vis de l'ensemble des modems DSL des utilisateurs qui lui sont reliés. C'est un multiplexeur. Il est situé à la frontière entre la boucle locale et le réseau de l'opérateur proprement dit. Chaque DSLAM regroupe environ 1000 abonnés.

**DVB** : Le DVB (Abréviation de Digital Video Broadcasting) est un système de diffusion de vidéo en mode numérique. Cette technologie comprend une lettre supplémentaire pour définir le type de diffusion, C (DVB-C câble), T (DVB-T terrestre ou plus communément appelé TNT), S (DVB-S satellite).

**DVD** : Le DVD (Digital Versatile Disc) est un disque optique numérique exploité pour la sauvegarde et le stockage de données, notamment la vidéo. C'est l'ancêtre du Blu-ray.

**Encodage :** De façon générale un codage permet de passer d'une représentation des données vers une autre. L'encodage est l'action de coder. Par exemple l'encodage numérique est l'action de passer d'une représentation de l'information analogique à une représentation numérique. Concernant l'information numérique, il existe là encore plusieurs façons d'encoder l'information. Aujourd'hui pour encoder la vidéo on utilise le plus souvent le MPEG-2 et le MPEG-4.

**FTTx :** Le FTTx (*fiber to the...*) consiste à amener la fibre optique au plus près de l'utilisateur, afin d'augmenter la qualité de service (en particulier le débit) dont celui-ci pourra bénéficier. Le débit fourni via une fibre optique est indépendant de la distance pour les applications qui nous intéressent ici, alors que le débit fourni par d'autres supports de l'information comme la paire de cuivres dépend de la longueur de la ligne (phénomène d'affaiblissement du signal).

**IP :** IP signifie "Internet Protocol", protocole Internet. Il représente le protocole réseau le plus répandu. Il permet de découper l'information à transmettre en paquets, de les adresser, de les transporter indépendamment les uns des autres et de recomposer le message initial à l'arrivée.

**IPTV :** La télévision IP, ou télévision sur IP, ou l'IPTV (de l'anglais Internet Protocol Television) est une forme de télévision diffusée sur un réseau utilisant le protocole IP (Internet Protocol).

**MPEG :** MPEG (Moving Picture Experts Group) est un groupe d'experts de l'ISO (Organisation internationale de normalisation) travaillant sur les technologies de l'information. Ce groupe est chargé du développement de normes internationales pour la compression, la décompression, le traitement et le codage de la vidéo, de l'audio et de leur combinaison, de façon à satisfaire une large gamme d'applications.

**MPEG2 :** norme de seconde génération applicable au codage de l'audio et la vidéo, ainsi que leur transport pour la télévision numérique : télévision numérique par satellite, télévision numérique par câble, télévision numérique terrestre.

**MPEG-2 TS (Transport Stream):** Le protocole MPEG Transport Stream (flux de transport MPEG, en abrégé MPEG-TS, TS ou TP) est une norme du Moving Picture Experts Group, qui définit les aspects de transport à travers des réseaux pour la télévision numérique. Son but premier est de permettre le multiplexage de vidéo et d'audio. Un flux MPEG-TS peut comprendre plusieurs programmes audio/vidéo, ainsi que des données de description de programmes et de service. MPEG-TS comprend des fonctionnalités de correction d'erreur pour le transport sur média non sûr, et est largement utilisé pour la télévision numérique terrestre, par câble ou par satellite.

**MPEG4 :** Evolution du MPEG-2. Le MPEG-4 permet de transporter une même quantité d'information que le MPEG-2 en divisant la taille que ces informations prennent par deux.



**Multiplexage** : Le multiplexage est une technique qui consiste à faire passer plusieurs informations à travers un seul support de transmission. Elle permet de partager une même ressource entre plusieurs utilisateurs.

**NRA** : Le NRA (Nœud de Raccordement des Abonnés) désigne les centraux téléphoniques où aboutissent les lignes des abonnés. C'est dans ces locaux que les lignes des abonnés sont dégroupées, les signaux ADSL étant renvoyés vers les équipements de l'autre opérateur.

**Triple play** : Le triple play (néologisme venant de l'anglais triple play au baseball) est, dans l'industrie des télécommunications, une offre commerciale dans laquelle un opérateur propose à ses abonnés (à l'ADSL, au câble, ou plus récemment à la fibre optique) un ensemble de trois services dans le cadre d'un contrat unique : l'accès à l'internet à haut voire très haut débit, la téléphonie fixe et mobile (de nos jours le plus souvent sous forme de voix sur IP), la télévision (par ADSL ou par câble) avec parfois des services de vidéo à la demande. Ce service est fourni au moyen de terminaux spécifiques appelés communément les « box ».

**xDSL** : Digital Subscriber Line, DSL ou encore xDSL (que l'on peut traduire par « ligne numérique d'abonné ») renvoie à l'ensemble des techniques mises en place pour un transport numérique de l'information sur une ligne de raccordement filaire téléphonique.

**QoS** : La qualité de service ou Quality of service (QoS) est la capacité à véhiculer dans de bonnes conditions un type de trafic donné (par exemple des flux vidéo de télévision numérique), en termes de disponibilité, débit, délais de transmission, gigue, taux de perte de paquet.

**QoE** : La Qualité d'Expérience (QoE, Quality of Experience ou encore Qualité d'Expérience utilisateur), est une mesure subjective de l'adéquation d'un service par rapport à ce qu'en attend un client. Elle mesure le "rendu" de l'utilisation d'un service (navigation internet, appel téléphonique, émission TV...). Les systèmes de mesure de la Qualité d'Expérience essaient de mesurer les facteurs influant sur la qualité perçue par l'utilisateur (par exemple: le temps de zapping TV, les dégradations sur l'image). La QoE (Qualité d'Expérience) est en partie liée avec la Qualité de service (ou QoS), qui mesure des paramètres techniques et objectifs.

|        |   |
|--------|---|
| ADSL   | Asymmetric Digital Subscriber Line  |
| ARCEP  | Autorité de régulation des communications électroniques et des postes                     |
| AC-3   | Dolby digital audio (Advanced Codec 3)  |
| AVC    | Advanced Video Codec  |
| CBR    | Constant Bit Rate   |
| CSA    | Conseil Supérieur de l'Audiovisuel  |
| DGCCRF | Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes. |

|        |   |
|--------|---|
| DSCQS  | Double-Stimulus Continuous Quality-Scale method     |
| DSL    | Digital Subscriber Line                             |
| DSLAM  | Digital Subscriber Line Access Multiplexer          |
| DVB    | Digital Video Broadcast                             |
| DVD    | Digital Video Disk                                  |
| FEC    | Forward Error Correction                            |
| FPS    | Frames Per Second                                   |
| FR     | Full Reference                                      |
| FTTB   | Fiber To The Building                               |
| FTTH   | Fiber To The Home                                   |
| FTTLA  | Fiber To The Last Amplifier                         |
| H264   | MPEG-4 AVC  |
| HD     | High Defenition                                     |
| HDTV   | High Defenition TeleVision                          |
| HG     | Home Gateway  |
| IP     | Internet Protocol                                   |
| IPTV   | Internet Protocol TeleVision                        |
| MOS    | Mean Opinion Score                                  |
| MP3    | MPEG-1 audio layer 3                                |
| MPEG   | Moving Pictures Expert Group                        |
| MTU    | Maximum Transmission Unit                           |
| NR     | No Reference  |
| NRA    | Nœud de Raccordement d'Abonnés                      |
| NRO    | Nœud de Raccordement Optique                        |
| PAL    | Phase Alternating Line                              |
| PC     | Personal Computer                                   |
| QoE    | Quality of Experience                               |
| QoS    | Quality of Service                                  |
| RTP    | Real-time transport protocol                        |
| SAMVIQ | Subjective Assessment Methodology for Video Quality |
| SD     | Standard Definition                                 |
| SDTV   | Standard Definition TeleVision                      |
| SECAM  | SEquentiel Couleur A Mémoire                        |
| SSCQE  | Single Stimulus Continuous Quality Evaluation       |
| STB    | Set-Top Box   |
| TCP    | Transmission Control Protocol                       |
| TNT    | Télévision Numérique Terrestre                      |
| TV     | Télévision  |
| UDP    | User Datagram Protocol                              |
| UHF    | Ultra hautes Fréquences                             |
| VHF    | Very High Frequency                                 |
| VDSL   | Very High Bit rate Digital Subscriber Line          |
| VOD    | Video On Demand                                     |

## I. TABLE OF CONTENTS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>II. LA DIFFUSION DE LA TELEVISION NUMERIQUE .....</b>  | <b>11</b> |
| 1. Introduction .....   | 11        |
| a. L'analogique et le numérique : quelles différences ? .....   | 11        |
| b. Le passage au « tout numérique » en France .....   | 19        |
| c. Plusieurs manières de coder en numérique : la compression.....   | 20        |
| d. Les différents modes de transmission d'un signal de télévision numérique.....                                | 23        |
| 2. La télévision traditionnelle.....  | 25        |
| a. La télévision numérique terrestre (TNT).....   | 25        |
| b. La télévision numérique par câble. ....  | 27        |
| c. Télévision numérique par satellite .....   | 30        |
| 3. La télévision sur IP .....   | 31        |
| a. La télévision numérique par DSL .....  | 31        |
| b. La télévision numérique par fibre jusqu'à l'abonné.....  | 38        |
| 4. Conclusion sur les différentes technologies de diffusion de la télévision numérique.....                     | 40        |
| <b>III. LA QUALITE DE LA TELEVISION NUMERIQUE .....</b>   | <b>42</b> |
| 1. Qualité de Service et Qualité d'expérience utilisateur (QoS et QoE) .....                                    | 42        |
| 2. Paramètres techniques de QoS. ....   | 43        |
| c. Facteurs de qualité associés à la source.....  | 44        |
| d. Facteurs de qualité associés à l'encodage .....  | 44        |
| e. Facteurs de qualité associés à la transmission sur le réseau .....   | 48        |
| f. Facteurs de qualité associés à la boucle locale. ....  | 51        |
| g. Facteurs de qualité associés à l'installation terminale de l'abonné.....                                     | 52        |
| h. Conclusion.....  | 54        |
| 3. Paramètres techniques de QoE. ....   | 57        |
| 4. Conclusion générale sur la qualité TV .....  | 59        |
| <b>IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>   | <b>60</b> |
| <b>V. ANNEXES .....</b>   | <b>61</b> |
| 1. État des lieux en matière d'évaluation de la QoE du service de TV numérique. ....                            | 61        |
| a. Stratégies subjectives.....  | 61        |
| b. Stratégies objectives.....   | 64        |
| c. Conclusion.....  | 66        |
| 2. Les artéfacts.....   | 67        |
| 3. Tableau récapitulatif des offres de TV numérique en France métropolitaine et des facteurs QoS associés. .... | 68        |

## II. La diffusion de la télévision numérique

### 1. Introduction

Dans ce premier chapitre, nous allons nous intéresser aux différents moyens permettant aujourd'hui de proposer un service de télévision numérique aux consommateurs. Nous commencerons d'abord par revenir sur la mutation qu'a connu la télévision ces dernières années avec le passage du l'analogique au numérique. Ce sera alors l'occasion d'aborder certains concepts clefs, tel que la compression des données, qui seront tout à fait indispensable pour comprendre le deuxième chapitre de ce rapport concernant la qualité de la télévision numérique (cf. II. La qualité de la télévision numérique). Puis, nous étudierons un par un chaque médium de diffusion de la TV numérique pour en faire ressortir les différences et spécificités majeures.

#### ***a. L'analogique et le numérique : quelles différences ?***

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>i. <b>L'Échantillonnage</b></li><li>ii. <b>La quantification</b></li><li>iii. <b>Récapitulatif</b></li></ul> |
|--|

Revenons tout d'abord sur les notions d'information analogique et d'information numérique.. Ce préalable, est indispensable pour bien comprendre les avantages et les spécificités du numérique. Ainsi, dans un premier temps, nous expliquerons comment à partir d'un signal analogique on peut obtenir un signal numérique. Cela nous permettra alors d'expliquer pourquoi les données codées sous forme numérique présentent de nombreux avantages par rapport à l'analogique pour la transmission d'un signal TV. Dans un deuxième temps nous développerons l'un des éléments essentiels participant à la « révolution du numérique », la notion de compression, c'est-à-dire la possibilité de faire prendre moins de place à l'information. Nous verrons que c'est cette capacité de compression qui permet aujourd'hui de transmettre et de diffuser la télévision numérique plus efficacement et à un nombre croissant de consommateur.

Commençons tous de suite par décrire brièvement les concepts d'information analogique et d'information numérique. L'analogique et le numérique sont deux procédés différents pour coder l'information (de type vidéo par exemple). L'analogique est né avec le début de l'électricité tandis que le numérique est apparu plus récemment avec l'ère de l'informatique. Analogique vient de l'adjectif « analogue ». Cela fait référence au fait la mesure analogique d'une valeur physique naturelle (par exemple une tension électrique ou un transfert de chaleur) varie de manière *analogue* à la source. Par exemple, les sons que perçoivent nos oreilles résultent des vibrations des molécules de l'air : pour transporter et reproduire le son, on transforme les vibrations de l'air en vibrations électriques. On peut stocker et transporter le signal électro-acoustique de différentes manières comme le téléphone, la cassette magnétique ou le disque microsillon. Lorsqu'on enregistre un signal audio à l'aide d'un micro, le signal obtenu sur le support d'enregistrement, suivra les mêmes amplitudes et les mêmes variations que l'onde sonore : les variations de pression acoustique caractéristiques d'une onde sonore seront traduites en variations d'un signal électrique<sup>1</sup>. Un signal analogique est représenté par un nombre réel qui varie de façon continue. Il existe une infinité de valeurs pour une grandeur analogique (le signal peut prendre n'importe quelle valeur réelle<sup>2</sup>).

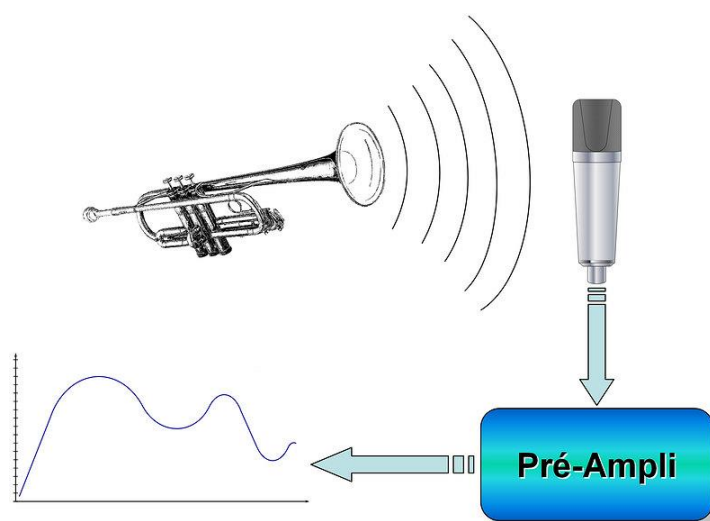


FIGURE II-1 LORS DE LA CAPTATION D'UN SON, LE MICRO RECUEILLE UN SIGNAL ANALOGIQUE (CONTINU). IL EN VA DE MEME LORSQU'ON FILME UN PLATEAU TV AVEC UNE CAMERA.

Au lieu de manipuler les données sous formes analogiques, on peut coder les variations du signal sous forme numérique. Le terme « numérique » provient du latin « *numerus* » et signifie que l'on représente l'information sous forme de nombre. Le codage numérique est binaire. C'est-à-dire que l'information n'a que deux formes, le 0 ou le 1 qui sont les éléments binaires (bits). Une information numérique (en anglais « *digital* ») est une information ayant été quantifiée et échantillonnée<sup>3</sup> : les

<sup>1</sup> Sur un vinyle, c'est la profondeur du sillon qui représente les variations des ondes sonores du son original

<sup>2</sup> En mathématiques, un nombre réel est un nombre qui peut être représenté par une partie entière et une liste finie ou infinie de décimales.

<sup>3</sup> Nous verrons dans la suite la signification précise de ces deux notions.

données numériques ne peuvent prendre qu'un nombre fini de valeurs et elles varient de manière discrète c'est-à-dire seulement à certains instants, ce qui s'oppose à la variation continue de l'information analogique. Le numérique est donc un codage du signal analogique. Nous allons voir comment on peut, à partir d'un signal analogique d'origine, coder l'information sous forme numérique. On utilise pour cela un convertisseur analogique/numérique. Son rôle est de traduire le signal continu en une séquence de nombres binaires, c'est ce qu'on appelle la numérisation. Après cette conversion, comme nous l'avons déjà expliqué, le signal n'est plus qu'une suite de « 0 » et de « 1 » c'est-à-dire un signal à deux amplitudes au lieu d'une infinité en analogique<sup>1</sup>. Nous allons voir que la numérisation est constituée de deux étapes fondamentales : l'échantillonnage et la quantification.

### i. L'Échantillonnage :

L'échantillonnage consiste à prélever périodiquement des échantillons d'un signal analogique. Autrement dit, on capture des valeurs à intervalle de temps régulier

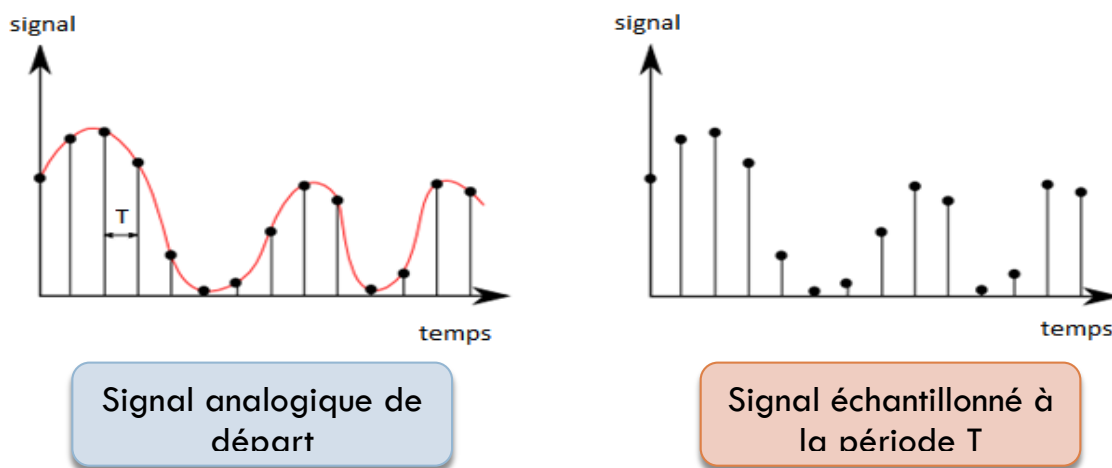
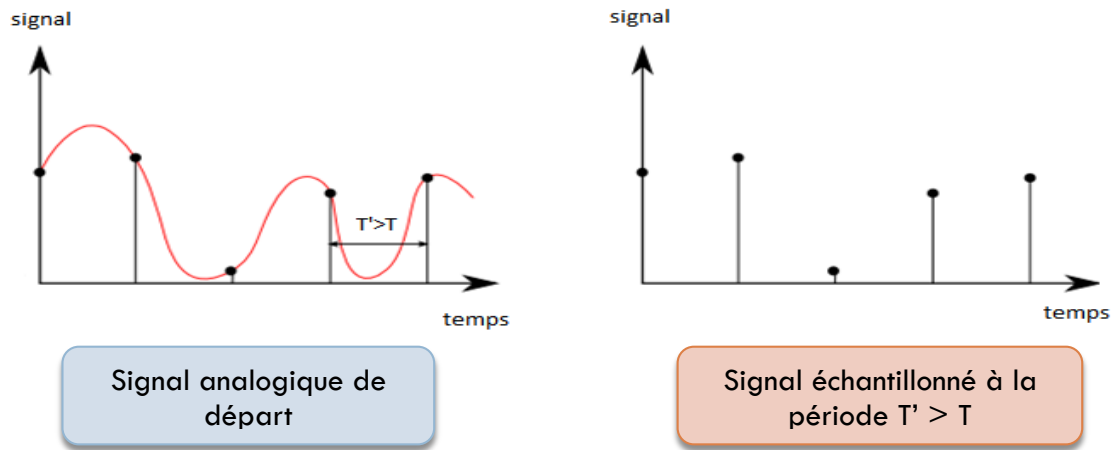


FIGURE II-2 UN SIGNAL QUELCONQUE EST ÉCHANTILLONNÉ À INTERVALLES DE TEMPS RÉGULIERS DE PÉRIODE  $T$  (À GAUCHE) AFIN DE GÉNÉRER DE COURTES IMPULSIONS (À DROITE) DONT LES AMPLITUDES REPRÉSENTENT L'AMPLITUDE INSTANTANÉE DU SIGNAL

Nous voyons qu'avec notre période d'échantillonnage  $T$  ci-dessus, on arrive à reproduire les variations du signal d'origine. Nous n'avons plus un signal continu, mais on voit bien qu'il est possible de « deviner » la forme du signal avec seulement quelques échantillons. Comme nous le verrons, c'est l'une des forces de la numérisation. On arrive à retrouver la même information avec moins de données, d'où un gain potentiel de place énorme. Néanmoins, arrive-t-on vraiment toujours à retrouver les variations

<sup>1</sup> Intuitivement on a donc l'impression qu'un signal numérisé sera toujours de moins bonne qualité que le signal analogique d'origine. Nous allons voir que les choses sont plus compliquées.

du signal d'origine après échantillonnage ? Voici un deuxième exemple, cette fois-ci nous allons échantillonner notre signal d'origine, mais en prélevant moins de valeurs (c'est-à-dire en choisissant une période d'échantillonnage,  $T'$  plus grande)



**FIGURE II-3 LE MEME SIGNAL QUE PRECEDEMMENT, MAIS ECHANTILLONNE CETTE FOIS-CI A INTERVALS DE TEMPS REGULIERS DE PERIODE  $T' > T$ . LA PHASE D'ECHANTILLONNAGE NE DONNE PAS LE MEME RESULTAT SELON LA FAÇON DONT ON CHOISIT LA PERIODE DE PRELEVEMENT DES DONNEES.**

Dans ce second exemple, il est clair que les échantillons recueillis ne sont pas suffisants pour reconstruire le signal d'origine : on a perdu trop d'information et le signal ainsi échantillonné n'est pas satisfaisant. Ainsi, afin de représenter les détails fins d'un signal, il est nécessaire de prélever suffisamment d'échantillons à chaque seconde. Mais que signifie « suffisamment » ? Comment choisir une bonne fréquence d'échantillonnage ? C'est le théorème de Shannon qui nous donne la réponse. Il stipule que pour reconstruire un signal de sortie de manière fidèle au signal d'entrée, il faut choisir une fréquence d'échantillonnage au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale contenue dans le signal d'entrée<sup>1</sup>. Si cette règle n'est pas respectée, des fréquences parasites qui n'appartiennent pas au signal de départ apparaissent. Ce phénomène est le repliement spectral.

Venons-en maintenant à la deuxième étape de la numérisation.

## ii. La quantification

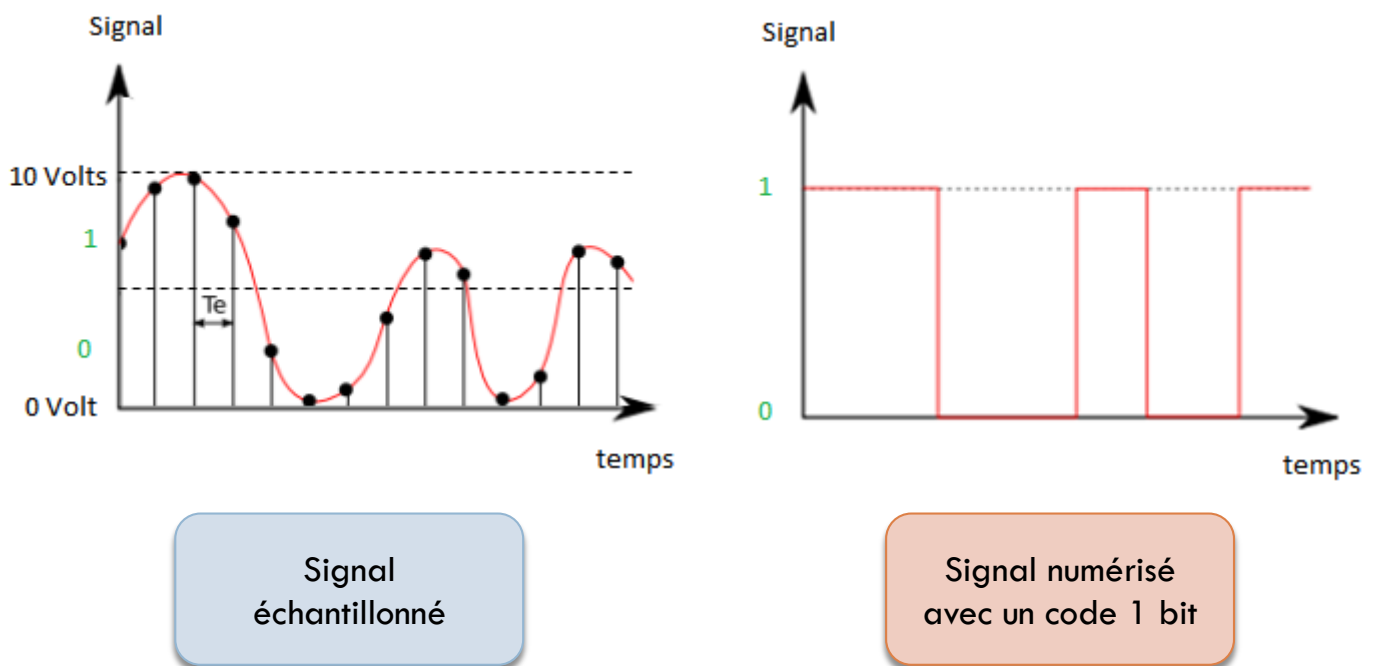
L'échantillonnage consiste à prélever périodiquement des échantillons d'un signal analogique. La quantification consiste à affecter une valeur numérique à chaque échantillon prélevé. La précision ou

<sup>1</sup> En réalité, dans le cas général, la fréquence d'échantillonnage doit être deux fois supérieure à la bande passante du signal d'entrée et non pas à sa fréquence maximale. Néanmoins, nous ne rentrerons pas les détails ici, et la version du théorème que nous avons énoncé nous suffit amplement.

résolution du signal obtenu en sortie va dépendre de la nature de la quantification. Avant d'aller plus loin, nous avons besoin de revenir sur la notion de bit d'information que nous avons introduite précédemment.

Bit signifie « binary digit », c'est-à-dire 0 ou 1 en numérotation binaire. C'est la plus petite unité d'information numérique manipulable. Avec un bit, il est possible d'obtenir deux états : soit 1, soit 0. Ainsi on peut comprendre aisément que deux bits rendent possible l'obtention de 4 états différents ( $2^2$ ) : 00, 01, 10 et 11. Et trois bits rendent possible l'obtention de 8 états différents : 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 et 111. Avec quatre bits, il est possible d'obtenir  $2^4$  soit 16 états différents ( $2^2 \times 2^2$ ) et avec sept bits,  $2^7$  soit 128 états différents. Ainsi, pour un groupe de  $n$  bits, il est possible de représenter  $2^n$  valeurs.

En fait, la limite théorique de la résolution de quantification est définie par le nombre de bits du convertisseur analogique numérique. L'exemple de la figure 3.3 montre un signal analogique codé sur 1 bit, seules deux valeurs sont possibles pour ce bit soit « 0 » soit « 1 » : tous les points échantillonnés dont l'amplitude est inférieure à 5V sont codés par un « 0 » et les autres par un « 1 ». Dans le cas d'un codage 1 bit, la précision est très faible et ne permet pas un résultat satisfaisant.



**FIGURE II-4 QUANTIFICATION DU SIGNAL PREALABLEMENT ECHANTILLONNE AVEC CODE SUR 1 BIT. LA RESOLUTION EST ICI TRES MAUVAISE. ON A PERDU TOUTES LES PETITES NUANCES DU SIGNAL D'ORIGINE.**

Essayons maintenant de coder le signal analogique sur 2 bits. Dans cet exemple, le signal a une amplitude de 10 volts :



- De 0 à 2,5 V, le code sera « 00 »
- De 2,5 V à 5 V, le code sera « 01 »
- De 5 V à 7,5 V, le code sera « 10 »
- De 7,5 V à 10 V, le code sera « 11 »

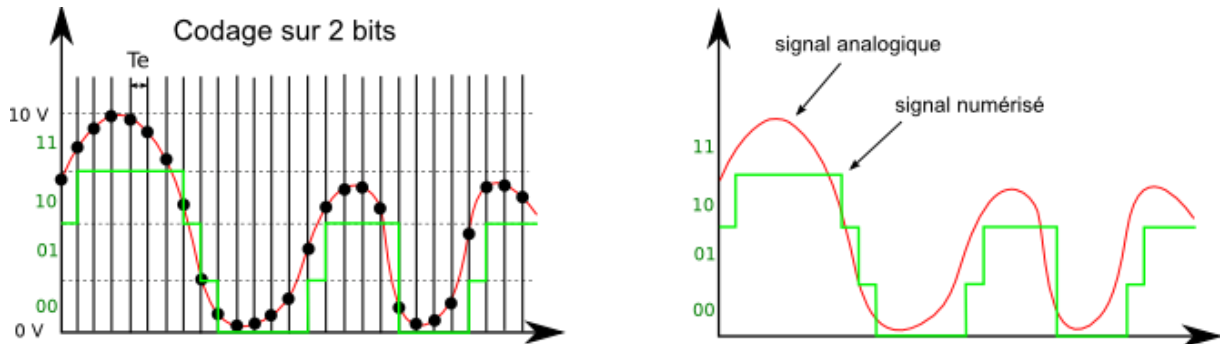


FIGURE II-5 QUANTIFICATION 2 BITS. LA RESOLUTION S'AMELIORE, MAIS N'EST PAS ENCORE SUFFISANTE POUR PROFITER DE TOUTES LES VARIATIONS D'UN MORCEAU DE MUSIQUE PAR EXEMPLE.

Cette fois le signal numérisé (en vert) est bien plus fidèle au signal analogique que dans le cas d'un codage 1 bit, car on peut donner  $2^2=4$  valeurs différentes aux amplitudes des points échantillonnés au lieu de seulement 2 avec le codage 1 bit. Il apparaît clairement qu'une erreur intervient dans la quantification, puisqu'on dispose d'un nombre limité de niveaux (les valeurs différentes pour représenter l'amplitude du signal à chaque instant). Néanmoins on peut réduire cette erreur : plus le nombre de bits par échantillon est important, et plus l'erreur est petite (voir figure 3.6). En fait plus le nombre de bits sera important et meilleure sera la précision (mais le signal occupera alors plus de mémoire). À titre d'exemple le CD audio utilise un codage 16 bits. Un quantificateur 16 bits permettra une quantification avec  $2^{16} = 65\,536$  valeurs possibles. Il faut donc trouver le bon compromis entre qualité du signal numérique et taille des informations.

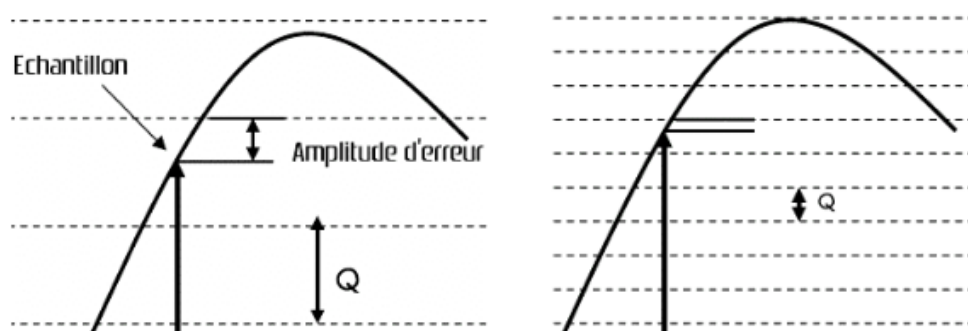


FIGURE II-6 À GAUCHE LE NOMBRE D'INTERVALLES EST FAIBLE ET L'ERREUR EST IMPORTANTE ALORS QU'À DROITE LE NOMBRE D'INTERVALLES EST PLUS GRAND ET L'ERREUR DEVIENT PLUS PETITE.

Nous avons vu avec les deux étapes que sont l'échantillonnage et la quantification, que le passage au numérique s'accompagne d'une perte d'information intrinsèque puisque du signal analogique ne sont conservés que des échantillons (en nombre fini). L'enjeu est donc de prendre suffisamment d'échantillons avec une cadence acceptable pour reconstruire au mieux le signal de départ tout en gardant un signal qui ne soit pas trop gourmand en espace. On a alors l'impression que le numérique sera toujours de moins bonne qualité que l'analogique, pourtant aujourd'hui on n'arrête pas de vanter la qualité des données numérique (les chaînes en haute définition, etc.). Quelle est la vérité ? En fait tout dépend de quoi on parle. Prenons l'exemple d'un signal vidéo pour notre explication et imaginons la situation suivante : un signal vient d'être enregistré en analogique, il n'a subi aucune transmission ni modification et on le regarde au même endroit et juste après son acquisition. Alors oui, il sera toujours de meilleure qualité que son homologue numérique (du fait de nos conclusions précédentes). Mais en réalité la situation que l'on vient de décrire est impossible dans la pratique. Lorsqu'on regarde un film à la télévision, le flux vidéo a été transporté depuis la régie de la chaîne à travers le réseau et la boucle locale. Bref, on n'arrête pas de manipuler, modifier, échanger et transmettre l'information. Nous allons voir que cela pose plusieurs problèmes.

Premièrement, plus une donnée est lourde (dans le sens où elle est gourmande en espace) plus il est difficile de la transmettre et de l'échanger, car les capacités de bande passante<sup>1</sup> sont limitées. Or, les informations analogiques sont extrêmement volumineuses (car le signal en analogique est continue, donc constitué d'une infinité de valeurs). Ainsi, il est difficile de transporter des données sous forme analogique. Au contraire, le passage au numérique permet de garder une très bonne qualité de signal (de son ou d'image par exemple) tout en diminuant drastiquement la taille prise par l'information.

Mais ce n'est pas tout, pendant la transmission le signal a forcément subi des dégradations. Les signaux analogiques sont extrêmement sensibles à leur environnement et le bruit ainsi généré altère la qualité de l'information de manière définitive. Au contraire, le numérique est quasiment insensible aux perturbations du monde extérieur<sup>2</sup>. Ainsi les informations codées en numérique ont beaucoup moins tendance à se détériorer avec le temps. Il y a donc un avantage de robustesse avec le numérique. De plus, lors de la transmission du signal, l'information numérisée peut être contrôlée par des programmes de détections d'erreurs assurant une grande fiabilité au message. Ainsi même si des erreurs se produisent lors de la transmission<sup>3</sup>, il est de toute façon très facile de les corriger, contrairement à l'analogique. Le numérique a donc l'avantage de garantir la fiabilité des informations transmises.

---

<sup>1</sup> En télécommunication, la bande passante fait référence au débit d'information que l'on est capable de faire circuler à chaque instant dans un réseau. Par exemple le débit théorique maximum, ou bande passante, que l'on peut recevoir avec une connexion ADSL2+ est d'environ 20 Mbit/s.

<sup>2</sup> En effet, dans la représentation logique, le décodeur doit séparer les niveaux 0 des 1. Il faudrait qu'un signal soit fortement perturbé pour que des

problèmes apparaissent, pour qu'un 0 soit pris pour un 1 (et réciproquement). C'est donc rarement le cas.

<sup>3</sup> Ce qui arrive fréquemment néanmoins.

Ces différences entre analogique et numérique montrent que les informations numérisées, sont beaucoup plus pratiques et adaptées à l'utilisation moderne de l'information. Mais ce n'est pas le seul avantages du numérique sur l'analogique. Un des avantages les plus importants du numérique, est sa reproductibilité. Un signal numérique est beaucoup plus facile à reproduire qu'un signal analogique. La copie d'une cassette audio, d'une VHS ou encore d'un vinyle provoque une diminution de la qualité du signal. À l'inverse la copie numérique produit un clone parfait de l'original. Cela vient du fait qu'un signal numérique n'est qu'un code constitué d'un nombre fini de « 0 » et de « 1 ». Pour « cloner » un fichier numérique, il suffit donc de recopier un à un les bits d'informations. Il arrive parfois que l'on se trompe, que l'on prenne un « 0 » pour un « 1 » ou l'inverse, mais des systèmes de détection des erreurs (comme les sommes de contrôle<sup>1</sup>) permettent de toute façon de détecter ces erreurs. Il suffit alors tout simplement de retransmettre le message à copier jusqu'à temps que la copie soit exacte. À l'inverse un signal analogique est infiniment plus compliqué à copier, car il faut reproduire à l'identique un signal continu (donc constitué d'une infinité de valeurs) pouvant prendre n'importe quelle amplitude (et non pas seulement une valeur binaire 0 ou 1). Reproduire à l'identique un signal analogique est une tâche aussi utopique que de vouloir imiter parfaitement la réalité...

### iii. Récapitulatif









|  | Numérique   | Analogique  |
|--|---|---|
| Résolution et qualité théorique maximum            |  |  |
| Qualité réelle après transmission et/ou traitement |  |  |
| Espace de stockage nécessaire                      |  |  |
| Reproductibilité                                   |  |  |

FIGURE II-7 TABLEAU RECAPITULATIF ANALOGIQUE/NUMERIQUE

Le numérique consiste en résumé à ne garder que l'information essentielle contenu dans l'analogique. Le numérique permet :

1. De mieux lutter contre les perturbations.
2. D'arbitrer entre « taille des données » et « qualité ».
3. De permettre la reproduction fidèle et parfaite de l'information.

<sup>1</sup> La somme de contrôle (le terme anglais checksum est également employé), parfois appelée « empreinte », est un nombre qu'on ajoute à un message à transmettre pour permettre au récepteur de vérifier que le message reçu est bien celui qui a été envoyé. L'ajout d'une somme de contrôle à un message est une forme de contrôle par redondance.

Nous avons expliqué que l'information numérique prend de manière générale moins de place que l'information analogique. Nous allons maintenant nous intéresser de plus près à la possibilité de pouvoir diminuer encore l'espace de stockage pris par les données, même après numérisation.

### ***b. Le passage au « tout numérique » en France***

L'existence d'une appétence des téléspectateurs pour plus de qualité est universellement avérée. Elle est illustrée par le remarquable succès du DVD puis du Blu-Ray ainsi que par les films en haute définition et en 3D projetés au cinéma ces dernières années. Les consommateurs, de plus en plus habitués à une très bonne qualité audiovisuelle souhaitent retrouver cette dernière sur leur télévision. C'est la demande d'une augmentation de la qualité du signal TV qui a motivé en grande partie le passage de la télévision analogique à la télévision numérique. En France, il existait, jusqu'au 29 novembre 2011<sup>1</sup>, deux modes de réception de la télévision par la voie hertzienne terrestre : la télévision analogique, qui constitue historiquement le premier mode de diffusion, et la télévision numérique terrestre (TNT), qui apparaît au milieu des années 2000. Depuis son lancement en mars 2005, la TNT, qui ne diffère de la télévision hertzienne traditionnelle que de par la nature numérique des informations qu'elle transmet, connaît un très grand succès du fait de qualité audiovisuelle largement supérieure.

Le passage à la TV « tout numérique » consiste en l'arrêt de la diffusion analogique des chaînes reçues par l'antenne (TF1, France 2, France 3, Canal Plus, France 5/Arte et M6) et le remplacement de cette diffusion hertzienne analogique par la TNT. Ce passage se fait progressivement en France, région par région. Il a démarré en 2009 et s'est terminé le 29 novembre 2011. Une partie des fréquences libérées sera utilisée pour permettre l'accès à l'internet mobile à très haut débit sur tout le territoire métropolitain, et notamment sur les 70 % du territoire moins densément peuplés qui n'auraient pas, en leur absence, bénéficié de ces services. Ce succès de la TNT, remplaçante de télévision hertzienne analogique, illustre l'intérêt pour le consommateur d'une diffusion numérique de la télévision, du fait en particulier d'une augmentation de la qualité audiovisuelle. Néanmoins le passage de l'analogique au numérique s'accompagne de certains inconvénients. En particulier la qualité ressentie par le consommateur dépend grandement du choix de la technologie de transmission et de l'opérateur.

---

<sup>1</sup> Date du passage au « tout numérique » en France.

### **c. Plusieurs manières de coder en numérique : la compression**

En théorie de l'information, la compression des données (ou codage de source) est une technique qui permet de réduire la taille (en nombre de bits) que prend l'information, grâce à des algorithmes. C'est l'une des propriétés les plus fondamentales de la théorie de l'information numérique : on peut en effet représenter l'information sous différentes formes (qu'on appelle des codages), et ces représentations peuvent être plus ou moins efficaces. On peut en effet trouver des façons de coder l'information qui soit particulièrement performantes, dans le sens où elles permettent de rendre la représentation compressée plus courte que la représentation originale tout en contenant les mêmes informations. Dit d'une autre manière, on peut réussir à réduire l'espace qu'une donnée (morceau de musique, films, etc.) prend sur un disque dur, tout en en conservant l'information<sup>1</sup>. La compression est extrêmement utile dans le monde dans lequel nous vivons aujourd'hui. A taille de données constante, elle permet de réduire les espaces de stockage nécessaires ou les capacités de transmission nécessaires. Il existe deux types d'algorithme de compression : les algorithmes sans pertes, et les algorithmes avec pertes.

La compression sans perte est une compression sans aucune altération du contenu. Les techniques de compression sans perte exploitent le plus souvent la redondance statistique (les données peuvent parfois présenter la même information plusieurs fois) pour représenter les informations de manière plus condensée et concise. Sur une image par exemple, il arrive que plusieurs pixels voisins aient la même couleur. Ainsi au lieu de donner individuellement la couleur de chacun d'eux « pixel rouge, pixel rouge, pixel rouge... » on dira qu'il y a « 42 pixels rouges ». C'est ce qu'on appelle le codage RLE (run-length encoding, appelé en français le codage par plages). De manière plus générale, les autres techniques de compression sans perte sont des techniques de compression entropique. Ces algorithmes sont basés sur une étude statistique de l'information à compresser de manière à encoder les caractères très récurrents sur très peu de bits. Les algorithmes entropiques les plus connus sont l'algorithme de Huffman et le codage par dictionnaire (algorithme LZ77<sup>2</sup>).

Pour la compression avec perte, l'information contenue dans les données avant et après compression (et décompression) est sensiblement différente. En fait le principe des codages avec perte consiste à exploiter les faiblesses de l'homme. En effet, notre ouïe et notre vue ne sont pas parfaites et de nombreuses informations contenues dans les fichiers audio ou vidéo sont souvent inutiles, car imperceptibles par nos sens. De plus, une altération moindre de la qualité audio ou vidéo peut permettre de très importants taux de compression (supérieurs à 10). Nous verrons tout au long de ce

---

<sup>1</sup> Dans le sens où l'opération inverse doit être possible (la décompression).

<sup>2</sup> Le lecteur intéressé pourra trouver des explications détaillées concernant l'algorithme de Huffman et l'algorithme LZ77 aux pages suivantes : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Codage\\_de\\_Huffman](http://fr.wikipedia.org/wiki/Codage_de_Huffman) et <http://fr.wikipedia.org/wiki/LZ77>.

rapport que la télévision numérique utilise toujours des techniques de compression avec perte : MPEG-2 et MPEG-4 en particulier. Nous nous apercevrons par ailleurs que toute la complexité de la compression aujourd'hui correspond à un arbitrage entre taille des données et qualité.

Pour conclure sur cette partie essentielle qu'est la compression des flux TV, essayons d'illustrer ce concept sur un exemple simple pour bien en percevoir l'intérêt. Il est en effet pertinent de chercher à calculer l'espace mémoire nécessaire pour stocker un fichier vidéo comme un film ou un programme TV. Pour cela nous devons préalablement rappeler ce qu'est une vidéo. Une vidéo est une succession d'images à une certaine vitesse, on parle de cadence. L'œil humain a comme caractéristique d'être capable de distinguer environ 20 images par seconde. Ainsi, en affichant plus de 20 images par seconde, il est possible de tromper l'œil et de lui faire croire à une image animée. C'est sur ce principe que repose la vidéo. On caractérise la fluidité d'une vidéo par le nombre d'images par secondes (en anglais frame rate), exprimé en FPS (Frames per second, en français trames par seconde). Pour recevoir un flux TV en numérique et en définition standard, mais non compressé, il faudrait disposer d'une bande passante minimum de 216 Mbit/s<sup>1</sup>. Nous verrons dans la suite du rapport que la plupart des consommateurs qui reçoivent la télévision par internet dispose d'à peine 20 Mbit/s. Sans la compression, la transmission de la télévision numérique au plus grand nombre serait donc impossible.



FIGURE II-8 : VIDEO ENCODEE EN MPEG-4 A 8 MBIT/S (A GAUCHE) ET EN MPEG-4 A 1.2 MBIT/S (A DROITE).

Voici un tableau récapitulatif des formats et codecs de compression vidéo les plus couramment rencontrés aujourd'hui :

<sup>1</sup> Considérons une vidéo numérique non compressée dont les images sont codées dans le format à 24 bits ayant une définition de 640 par 480 et un FPS de 30 images/s. La définition nous permet de calculer le nombre de pixels,  $640 \times 480 = 307\,200$ . L'encodage est de 24 bits soit 3 octets. Ainsi le poids pour stocker une seule seconde de cette vidéo (soit 30 images) est  $307\,200 \times 3 \times 30$  octets soit environ 27 Mo. Pour recevoir un tel flux TV il faudrait donc disposer d'une bande passante minimum de 216 Mbit/s (et encore ne s'agit même pas d'une vidéo en HD dont la définition peut aller jusqu'à 1920 par 1200...).

| Nom du format ou du codec vidéo | Descriptif   |
|---------------------------------|--|
| MPEG-1 <sup>1</sup>             | Standard pour la compression des données vidéo et des canaux audio associés (jusqu'à 2 canaux pour une écoute stéréo). Il permet le stockage de vidéos à un débit de 1.5Mbps dans une qualité proche des cassettes VHS   |
| MPEG-2 <sup>2</sup>             | Standard dédié originalement à la télévision numérique (HDTV) offrant une qualité élevée à un débit pouvant aller jusqu'à 40 Mb/s, et 5 canaux audio surround. Le MPEG-2 permet de plus une identification et une protection contre le piratage. Il s'agit du format utilisé par les DVD vidéo.  |
| MPEG-4 <sup>3</sup>             | Standard destiné à permettre le codage de données multimédia sous forme d'objets numériques, afin d'obtenir une plus grande interactivité, ce qui rend son usage particulièrement adapté au Web et aux périphériques mobiles. Évolution du MPEG-2. Le MPEG-4 permet de transporter une même quantité d'information que le MPEG-2 en divisant la taille que ces informations prennent par deux. |
| DivX et Xdiv                    | Codec vidéo basé sur le MPEG-4 permettant d'obtenir des vidéos compressées très peu volumineuses avec une perte de qualité très raisonnable. Ainsi le format DivX permet de stocker un film complet de plusieurs heures sur un CD-ROM de 650 ou 700 Mo   |
| MKV et AVI                      | Les formats MKV (Matroska Video) et AVI (Audio Video Interleave) sont des formats vidéo entièrement libres. Plus exactement il s'agit de conteneurs (d'où le nom Matroska, en référence aux poupées russes) permettant de contenir de la vidéo (DivX, Xvid, etc.), du son (MP3, AAC, etc.), ainsi que des sous-titres (pour le MKV) dans un même fichier.                                      |

FIGURE II-9 : TABLEAU RECAPITULATIF DES DIFFERENTS FORMAT ET CODEC DE COMPRESSION VIDEO

<sup>1</sup> Plus précisément le MPEG-1 Part 2. cf. : [http://en.wikipedia.org/wiki/MPEG-1\\_Part\\_2#Part\\_2:\\_Video](http://en.wikipedia.org/wiki/MPEG-1_Part_2#Part_2:_Video).

<sup>2</sup> Plus précisément le MPEG-2 Part 2 (ou H.262). cf. : [http://en.wikipedia.org/wiki/H.262/MPEG-2\\_Part\\_2](http://en.wikipedia.org/wiki/H.262/MPEG-2_Part_2).

<sup>3</sup> Plus précisément le MPEG-4 Part 2 et le H.264/MPEG-4 AVC. cf. : [http://en.wikipedia.org/wiki/MPEG-4\\_Part\\_2e](http://en.wikipedia.org/wiki/MPEG-4_Part_2e) et [http://en.wikipedia.org/wiki/H.264/MPEG-4\\_AVC](http://en.wikipedia.org/wiki/H.264/MPEG-4_AVC).

## d. Les différents modes de transmission d'un signal de télévision numérique

**La Télévision numérique terrestre (ou TNT, utilisant la norme DVB-T)** est une des plus anciennes méthodes pour recevoir un signal numérique. Elle est dite « aérienne », car elle passe par une antenne radioélectrique pour sa transmission. Outre la TNT, la télévision numérique peut être reçue par les téléspectateurs via quatre vecteurs de diffusion. Il faut bien distinguer le support physique de l'information (par exemple la fibre optique) de la technologie de transmission utilisée (par exemple le protocole IP ou la norme DVB-C).

**Le satellite (utilisant la norme DVB-S)** bénéficie d'un atout considérable : au moyen d'une parabole tout bâtiment, collectif ou individuel peut recevoir les émissions satellitaires. C'est encore aujourd'hui en France un système de diffusion important de la télévision numérique (20% des foyers<sup>1</sup> équipés en 2011). Néanmoins la parabole et son installation ont un coût non négligeable pour le consommateur (souvent supérieur à 200 euros). Dans les zones urbaines, la réception satellitaire est parfois interdite par des contraintes administratives visant à protéger le paysage. Le satellite dispose d'une capacité importante ; les opérateurs satellitaires présentent chacun des bouquets de plusieurs centaines de chaînes.

**Le câble (utilisant la norme DVB-C)** est essentiellement un vecteur urbain. Les éventuelles contraintes administratives urbaines restreignant l'accès à la réception satellitaire jouent en sa faveur. Comme le satellite, le câble dispose d'une capacité de transport de plusieurs centaines de chaînes. La télévision par câble peut être diffusée soit par l'intermédiaire du câble coaxial, soit par fibre optique jusqu'à l'immeuble (FTTB) depuis la rénovation du réseau national par Numéricâble. Numéricâble rassemble 99,6 % des réseaux câblés français. En 2009, 9,6 millions de logements<sup>2</sup> sont raccordables au câble en France, dans plus de 1 200 communes, soit près de 32 % des foyers français.

**Les technologies xDSL (utilisant le protocole IP)** utilisent la ligne téléphonique. Elles apportent généralement de manière simultanée le téléphone, la connexion à l'internet en haut débit et la télévision (les offres Triple Play). La télévision par ADSL a été lancée en MPEG-2<sup>3</sup> vers le début des années 2000 et utilise désormais quasiment exclusivement la norme MPEG-4<sup>4</sup>. La couverture des technologies xDSL (et en particulier de l'ADSL) est leur plus grand avantage puisqu'en 2012, 98.9%

<sup>1</sup> L'observatoire de l'équipement des foyers pour la réception de la télévision numérique a rendu public le 27 juin 2012 une étude sur l'équipement des foyers français pour la réception de la télévision numérique. Le rapport est disponible à l'adresse suivante : <http://www.csa.fr/Etudes-et-publications/Les-observatoires/L-observatoire-de-l-equipement-des-foyers-pour-la-reception-de-la-television-numerique/Les-resultats-de-la-huitieme-vague-d-etude-Second-semester-2011>.

<sup>2</sup> Chiffres disponibles sur le site de Numéricâble à l'adresse suivante : <http://www.numericable.fr/corporate/>

<sup>3</sup> Cf. Définitions, abréviations et acronymes en début de rapport.

<sup>4</sup> Cf. Définitions, abréviations et acronymes en début de rapport.



des foyers en métropole peuvent profiter d'une ligne haut débit en ADSL. Nous verrons dans la suite que l'éligibilité au service TV par l'intermédiaire des technologies xDSL pose un certain nombre de difficultés, car elle fait intervenir la notion de *longueur de ligne*.

**Les technologies fibre jusqu'à l'abonné (utilisant le protocole IP)** utilisent des fibres optiques pour raccorder partiellement ou totalement les abonnés<sup>1</sup>. L'objectif est d'apporter une meilleure qualité de service et un meilleur débit chez l'abonné. Ces technologies permettent d'offrir à l'abonnée des chaînes en SD<sup>2</sup> et HD<sup>3</sup> encodées avec des débits beaucoup plus importants qu'avec les technologies xDSL. Ce dernier vecteur de diffusion, encore très récent, n'est pas présent sur la figure 1.1, car sa couverture au niveau national ne concerne que 1.8 millions de logements<sup>4</sup> soit moins de 6% des foyers.

Le Conseil Supérieur de l'Audiovisuel a publié le 27 juin 2012 une étude sur l'équipement des foyers français pour la réception de la télévision numérique. Et si la TNT concerne déjà 16,3 millions de foyers, soit plus de 60 % des foyers, l'ADSL est de très loin le second mode de réception de la télévision numérique avec 8,2 millions de foyers. Comme nous allons le voir, chacun des modes de transmissions précédents présente ses propres avantages, inconvénients et spécificités.

---

<sup>1</sup> Contrairement à la télévision par câble (utilisant également un support physique en fibre optique) qui repose sur les normes DVB-C, la FTTx reposent sur le protocole IP.

<sup>2</sup> Définition standard.

<sup>3</sup> Haute définition.

<sup>4</sup> Hors réseau Numéricâble. Source : Rapport du Centre d'analyse stratégique publié le 27 mars 2012 et disponible à l'adresse suivante : [www.strategie.gouv.fr/system/files/2012-03-27-rapport\\_thd\\_idate.pdf](http://www.strategie.gouv.fr/system/files/2012-03-27-rapport_thd_idate.pdf)

## En 3 ans, tous les modes de réception numérique se sont développés. 61 % des foyers sont désormais équipés en TNT (adaptateur et antenne)

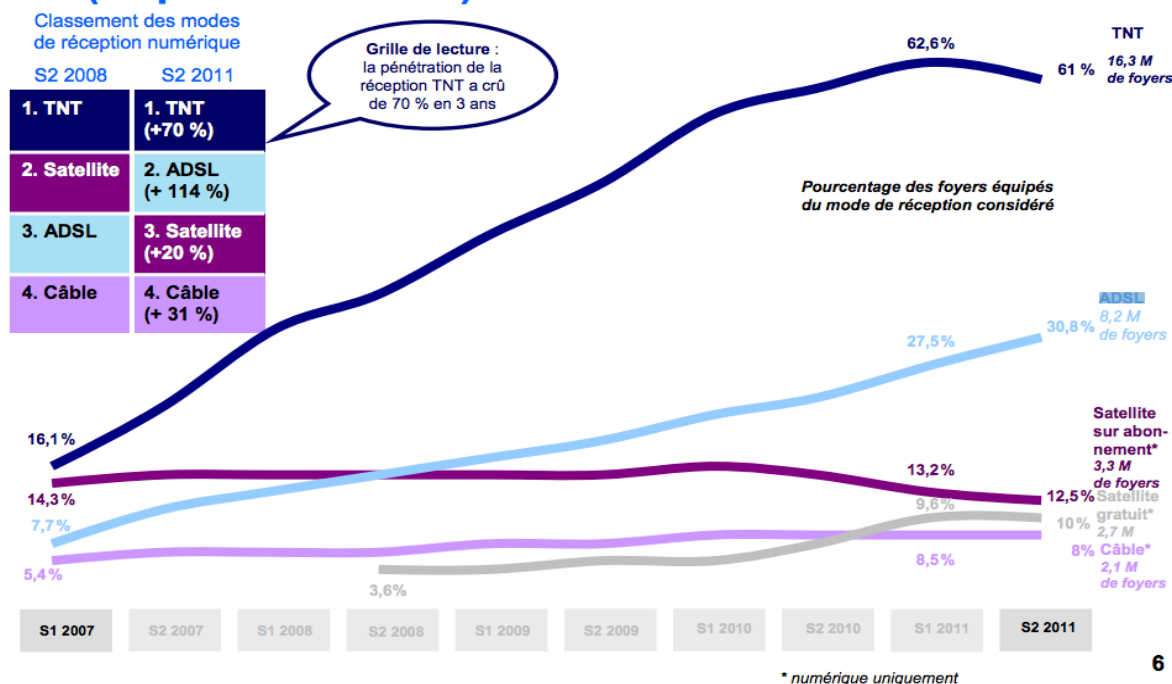


FIGURE II-10 : TENDANCE ET CLASSEMENT DES PRINCIPAUX MODES DE RECEPTION NUMERIQUE EN FRANCE ENTRE 2007 ET 2011  
(SOURCE : ARCEP)

## 2. La télévision traditionnelle

### a. La télévision numérique terrestre (TNT)

La télévision numérique terrestre (TNT) utilise les bandes de fréquences auparavant allouées à la télévision analogique (bande III en VHF<sup>1</sup>, bandes IV et V en UHF<sup>2</sup>). En France la transmission se fait selon la norme DVB-T<sup>3</sup>. La télévision numérique est reçue soit par un tuner intégré à un téléviseur récent, soit par un boîtier décodeur numérique (en anglais set-top box) relié à un téléviseur plus ancien. La télévision analogique terrestre et la TNT utilisent le même support physique de l'information : les ondes hertziennes mais la seconde utilise le numérique pour « coder » et transporter l'information. Les données aux deux bouts de la chaîne étant numériques (cf. figure 1.2), on peut profiter des traitements numériques des données décrits précédemment :

<sup>1</sup> Very High Frequency

<sup>2</sup> Ultra High Frequency

<sup>3</sup> Le DVB-T pour Digital Video Broadcasting – Terrestrial est une norme de diffusion de la télévision numérique par liaisons hertziennes terrestres.

- compression des fichiers pour réduire leur taille (ce qui permet par exemple de mettre plusieurs programmes dans un seul canal de fréquence<sup>1</sup> . On parle de multiplexage).
- code correcteurs d'erreurs (on ajoute quelques données à la source, le récepteur les utilise pour détecter et corriger les erreurs introduites par le transport de l'information). On parle de redondance.

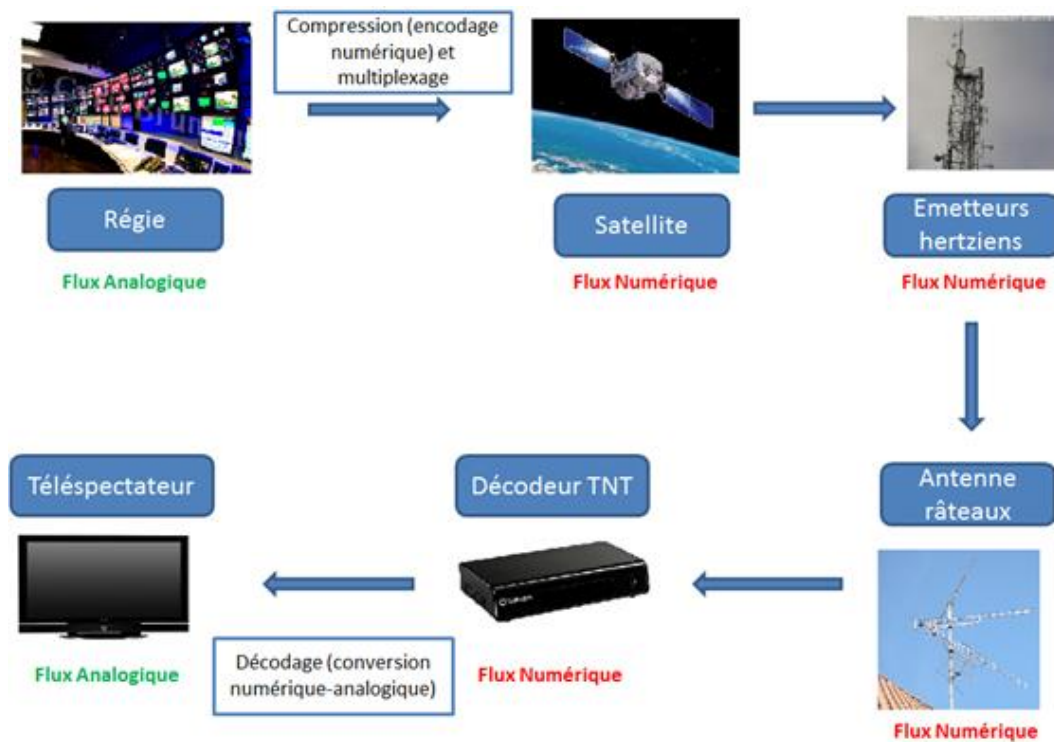


FIGURE II-11 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA TNT (SOURCE : ARCEP)

L'avantage essentiel de la TNT est donc de pouvoir profiter des caractéristiques du numériques : très peu sensible aux perturbations, très bonne robustesse lors de la transmission (erreurs détectables et réparables) et surtout excellente capacité de compression de l'information permettant de proposer aux consommateurs un nombre bien plus important de chaînes TV qu'en analogique avec le même spectre de fréquence et avec une meilleure qualité (existence de programme et de chaîne en haute définition).

Ses inconvénients principaux proviennent de la nature de l'information numérique et de la compression des données qui nécessite un temps d'encodage (analogique vers numérique) et de décodage (dans le sens inverse). Ainsi, le changement de chaîne (zapping) est plus lent en raison des retards dus au décodage des signaux numériques et lors de la diffusion d'événements en direct (par exemple les événements sportifs), le son et l'image ont un temps de retard (de l'ordre d'une à quelque

<sup>1</sup> Partie du spectre des fréquences comprises entre deux fréquences spécifiées et destinée à être utilisée pour une transmission.

dizaine de secondes dans certains cas) par rapport à la télévision analogique. Surtout nous verrons dans la suite de ce rapport (cf. II. La qualité de la télévision numérique) que la transmission du signal numérique souffre de l'effet de falaise : jusqu'à un certain point l'image peut apparaître constellée de petits carrés et peut se figer, mais pour une dégradation du signal plus importante, le récepteur ne parvient plus du tout à décoder le signal. Ainsi, certaines chaînes qui étaient reçues correctement en analogique peuvent se trouver inaccessibles en numérique dans certaines zones dites zones blanches.

### **b. La télévision numérique par câble.**

La télévision par câble permet la transmission de programmes via un réseau de fibres optiques et de câbles coaxiaux<sup>1</sup> (sur la partie terminale). Les données sont diffusées à l'aide de la norme DVB-C. Captés à partir des antennes hertziennes (TNT) et des satellites, les programmes sont ensuite distribués par un réseau unique, le « backbone », qui est constitué de liaisons de fibres optiques de 10 à 40 Gbit/s raccordées à toutes les communes câblées. Ces programmes comprennent les chaînes locales et nationales de la TNT, mais également les bouquets de chaînes satellites (Canalsat). Pour recevoir la télévision par câble, il faut habiter un logement situé dans une zone câblée (immeuble ou logement individuel). C'est aujourd'hui l'inconvénient majeur du câble pour la réception de la télévision numérique : cette technologie est aujourd'hui disponible pour moins d'un foyer sur deux en France<sup>2</sup>.

Numéricâble est le principal câblo-opérateur de télévision et fournisseur d'accès à Internet par câble en France métropolitaine. L'entreprise est née en juillet 2007, de la fusion des réseaux historiques concurrents Noos et NC Numéricâble. Le déploiement de Numéricâble est un vaste ensemble d'anciens réseaux indépendants qui ont tous été ou sont en cours d'uniformisation en un seul réseau unique interconnecté et sécurisé. En plus de la télévision, qui occupe une bande passante de plusieurs centaines de Mbit/s sur le câble jusqu'à l'abonné, Numéricâble commercialise des offres d'accès à internet. Il permet le déploiement de l'offre « Triple-play » sur tout le territoire. Les débits de 30 Mbit/s ou 100 Mbit/s proposés dans les offres de Numéricâble sont accessibles sur tout le réseau sans restriction de distance par rapport aux sites techniques contrairement aux technologies xDSL pour lesquelles la longueur de ligne a une importance considérable sur la qualité de la ligne.

<sup>1</sup> Un câble coaxial se présente sous forme d'un conducteur central (à base de cuivre), entouré d'un isolant puis d'une gaine conductrice (tressée ou enroulée) qui fait office de blindage. Il offre ainsi un débit plus élevé et une moindre sensibilité aux perturbations électromagnétiques que la paire de cuivres.

<sup>2</sup> En 2009, « 9,6 millions de logements » sont raccordables au câble en France, dans plus de 1 200 communes, soit près de 32 % des foyers français.

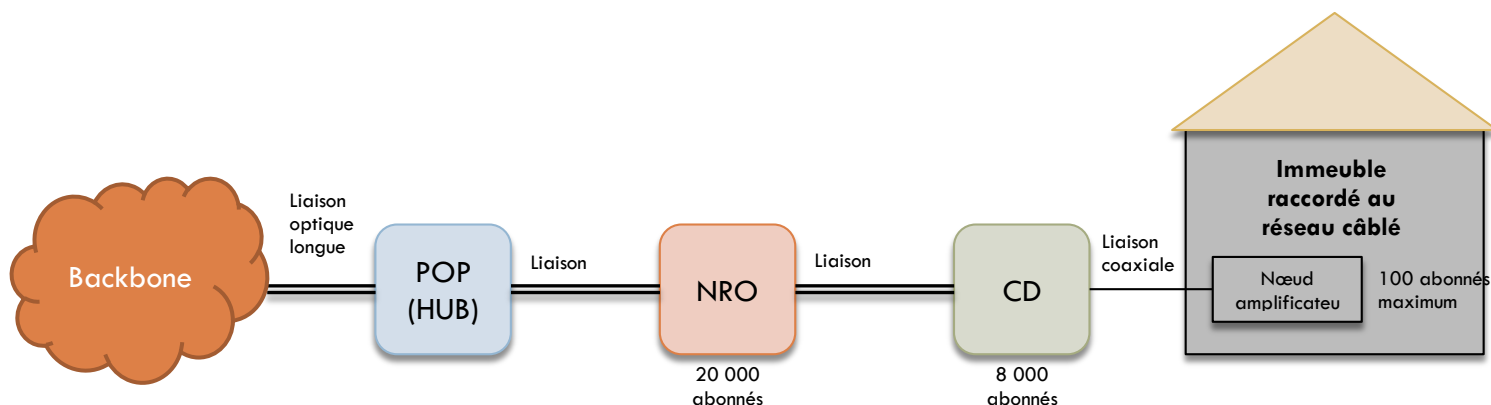


FIGURE II-12 : SCHEMA DE RACCORDEMENT DE L'ABONNE AVEC LA TECHNOLOGIE CABLE AU RESEAU (LE « BACKBONE »).

SOURCE : NUMERICABLE.

Le câble est une technologie différente des technologies xDSL (laquelle repose sur le protocole IP). Il permet de fournir un service de télévision numérique aux consommateurs par l'intermédiaire de fréquence radio (RF) et transmet par des signaux à travers des câbles coaxiaux et fibres optiques. Le câble coaxial est nettement moins soumis aux perturbations que la paire de cuivres grâce à son blindage et permet ainsi d'utiliser des bandes de fréquences bien plus élevées que la paire de cuivres. Alors que la bande passante du DSL est comprise entre 0.4 Mhz et 2.2 Mhz du fait des perturbations, celle du câble est 500 fois plus étendue avec un spectre de fréquence compris entre 0 et 1 Ghz. Or, le débit théorique maximum<sup>1</sup> est proportionnel à la bande passante (laquelle s'exprime en Hz). Ainsi le câble coaxial permet en théorie d'atteindre des débits supérieurs à 1 Gbit/s. Ceci permet au câble d'utiliser une technologie de multidiffusion appelée DVB (Digital Video Broadcasting) qui envoie en permanence tous les flux vidéo à tous les abonnés, contrairement à la TV par DSL où le DSLAM envoie un seul flux TV à l'abonné.

<sup>1</sup> C'est-à-dire le débit ATM idéal de la ligne sans aucune congestion exprimé en bit/s.

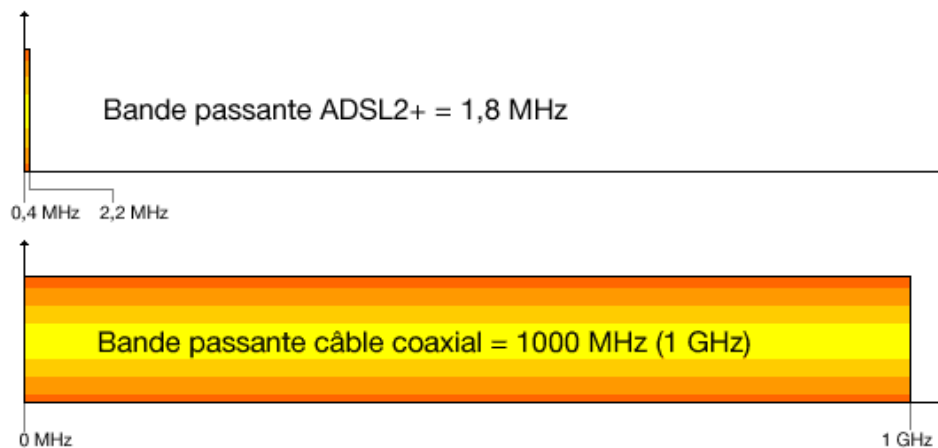
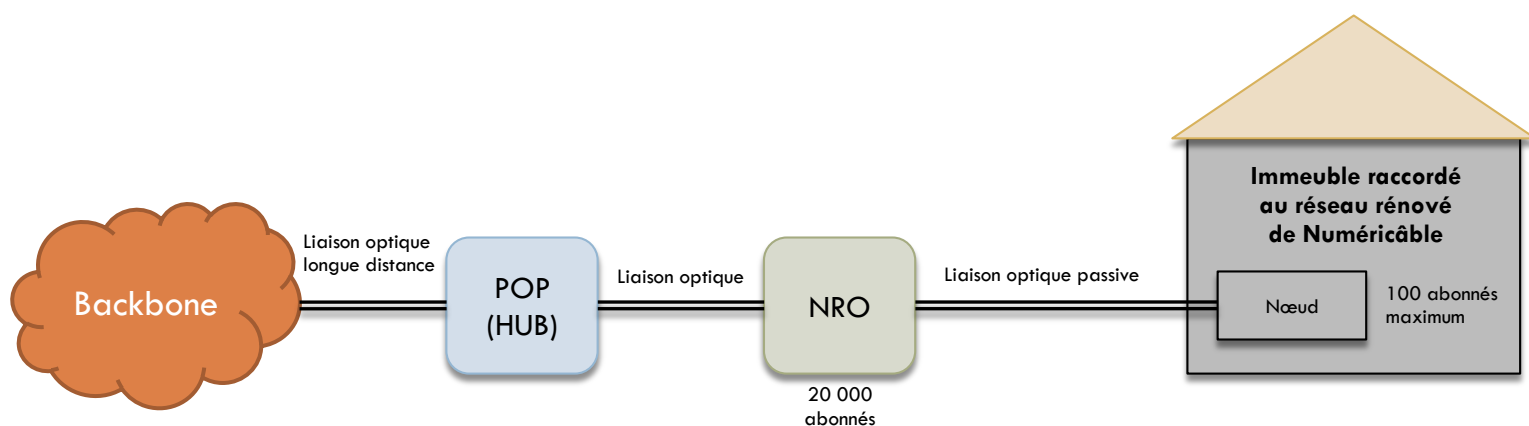


FIGURE II-13 : SPECTRE DE FREQUENCES POUR L'ADSL2+ ET LE CABLE (SOURCE : NUMERICABLE).

Ainsi avec la technologie câble chaque abonné reçoit environ 480 Mbit/s de flux TV en permanence. On peut ainsi encoder les flux TV avec des débits beaucoup plus élevés qu'avec les technologies xDSL. Une chaîne encodée en 2 ou 2.5 Mbit/s sur une ligne ADSL est typiquement encodée sur le réseau câblé en 6 ou 7 Mbit/s. De plus, il n'y a pas de mutualisation entre le service TV, le haut débit et la téléphonie. Chaque service utilise sa propre bande passante sans interférer sur les autres produits de l'offre. Néanmoins confronté au vieillissement de son réseau et à une concurrence farouche avec la TNT, le satellite et le DSL, le câblo-opérateur doit miser sur le très haut débit, ce qui nécessite de considérables investissements pour la réalisation des réseaux en fibre optique. Les investissements permettent de rénover le réseau existant en fibre optique distribué jusqu'en pied d'immeuble. Cette technologie (Fiber To The Bulding – FTTB) permet de fournir une série de services payants haut de gamme : Internet 100 Mb/s, TVHD (jusqu'à 14Mbit/s), VOD individualisée, forfaits téléphoniques...

FIGURE II-14 : SCHEMA DE RACCORDEMENT DE L'ABONNE AVEC LA TECHNOLOGIE CABLE APRES LA RENOVATION DU RESEAU.  
SOURCE : NUMERICABLE

### **c. Télévision numérique par satellite**

La télévision par satellite consiste à émettre depuis un satellite en orbite géostationnaire (à 35 850 km, qui se déplace à la même vitesse que la rotation de la Terre, donc qui paraît « immobile » depuis le sol) des programmes de radio et de télévision, analogiques et numériques, payants (cryptés) ou gratuits (en clair). Chaque canal ou « répéteur » (ou encore, transpondeur) est utilisé pour transmettre un multiplexage<sup>1</sup> de six à dix programmes de télévision, selon le taux de compression utilisé (et plusieurs programmes radiophoniques), selon la norme DVB-S (Digital Video Broadcasting appliquée à la diffusion satellite).

Le codage vidéo est effectué en MPEG-4 (principalement pour la diffusion en Haute Définition) ou en MPEG-2. Le service public français a retenu le satellite Atlantic Bird 3 de l'opérateur Eutelsat pour couvrir les zones non desservies en TNT.

Le plus gros désavantage de la télévision numérique par satellite vient du coût de la parabole pour le consommateur et de son installation. Son plus gros avantage est d'être une formule théoriquement accessible à tous, puisqu'elle offre un taux de couverture du territoire proche de 100 %. Elle est compatible avec tous les téléviseurs.

---

<sup>1</sup> Le multiplexage est une technique qui consiste à faire passer plusieurs informations à travers un seul support de transmission. Elle permet de partager une même ressource entre plusieurs utilisateurs.

### 3. La télévision sur IP

Nous allons voir dans cette partie deux variantes d'utilisation du protocole IP pour la transmission de la télévision numérique. Nous verrons que si ces deux variantes ne diffèrent que par la boucle locale qu'elles utilisent, celles-ci sont d'efficacité bien différente en ce qui concerne le service de télévision numérique. Nous verrons comment le protocole IP normalise la façon dont on transmet les flux TV jusqu'aux consommateurs.

#### a. La télévision numérique par DSL

- i. **Formats de codage de la télévision numérique sur IP**
- ii. **Une contrainte physique caractéristique du DSL : l'atténuation**
- iii. **Autres facteurs de perte de débit utile.**
- iv. **Les variantes du xDSL.**

Les technologies xDSL<sup>1</sup> sont basées sur le transport d'informations numériques sur la ligne de cuivre assurant la desserte téléphonique. Le signal se propage dans les larges bandes de fréquences hautes, inutilisées par le transport de la voix en téléphonie traditionnelle. Compte tenu de l'étendue du réseau téléphonique existant, le DSL a permis à l'opérateur historique France Telecom et à ses concurrents de proposer du haut débit rapidement et à moindre coût sur un réseau existant.

En pratique, le déploiement du DSL nécessite la mise en place d'un équipement spécifique, le DSLAM<sup>2</sup>, au niveau du répartiteur téléphonique - également appelé nœud de répartition d'abonnés (NRA<sup>3</sup>) - lieu de convergence des lignes téléphoniques d'un quartier ou d'une petite commune. En amont, le DSLAM est relié à l'internet par le réseau national de l'opérateur. En aval, il est relié aux abonnés par les lignes téléphoniques. La diffusion par ligne téléphonique (xDSL et le plus souvent ADSL2+) utilise un mode de transport de l'information basé sur le protocole IP (Internet Protocole).

Si l'opérateur qui fournit le service xDSL en *triple play* (*Internet, TV, téléphone*) n'est pas l'opérateur de télécommunications historique possédant la boucle locale, il procède à ce qu'on appelle le dégroupage de la ligne, qui peut être partiel (si l'abonné conserve un service de téléphonie classique

<sup>1</sup> Digital Subscriber Line, DSL ou encore xDSL (que l'on peut traduire par « ligne numérique d'abonné ») renvoie à l'ensemble des techniques mises en place pour un transport numérique de l'information sur une ligne de raccordement filaire téléphonique.

<sup>2</sup> Le DSLAM est le sigle de l'anglais « Digital Subscriber Line Access Multiplexer », soit en français, « Multiplexeur d'Accès à la Ligne d'Abonné Numérique » (ou plus simplement : « Multiplexeur d'accès DSL »).

<sup>3</sup> Les NRA sont les centraux téléphoniques de l'opérateur historique France Télécom dans lesquels aboutissent les lignes téléphoniques des abonnés, quel que soit leur fournisseur d'accès ADSL.



chez l'opérateur historique) ou total (s'il abandonne ce service). En effet, aujourd'hui, grâce au dégroupage, des opérateurs autres que l'opérateur historique, qu'on appelle les opérateurs alternatifs, peuvent proposer des offres DSL aux consommateurs. Le dégroupage permet aux opérateurs alternatifs de bénéficier d'un accès direct à l'utilisateur final. Ils sont en mesure de contrôler de bout en bout le réseau et de fournir ainsi un service différencié de celui de l'opérateur historique. France Telecom a l'obligation de fournir à tout opérateur alternatif un accès direct à sa boucle locale (contre rémunération régulée au niveau des coûts). Cet accès consiste uniquement à fournir les paires de cuivre qui vont du répartiteur (le NRA) vers l'abonné final mais aussi une salle de colocalisation qui permettra aux opérateurs concurrents d'installer leurs équipements (les DSLAM).

L'augmentation des performances des technologies xDSL, en particulier avec le lancement en 2004 de l'ADSL2+ en France et le succès qu'elle a rencontré à la suite de la réduction des tarifs d'abonnement provoquée par l'ouverture à la concurrence, ont permis d'en faire un nouveau canal de diffusion de masse. En France c'est l'opérateur Free qui a lancé en 2003 le premier bouquet de télévision par ADSL à grande échelle au moyen de sa « Freebox », terminal multiservice et multifonction qui permet l'accès internet haut débit (initialement jusqu'à 8Mb/s puis 20 Mb/s<sup>1</sup> en 2004 avec l'ADSL 2+), la téléphonie sur IP (VoIP) et l'accès à la télévision (IPTV). France Telecom (Orange) puis Neuf Telecom (aujourd'hui SFR) ont suivi rapidement avec une approche un peu différente, en séparant le modem permettant d'accéder à l'internet et décodeur pour la télévision numérique. Le Freebox 5 lancée en 2006, puis la Freebox révolution (v6) lancée en 2010 a suivi le même découpage en deux boîtiers.

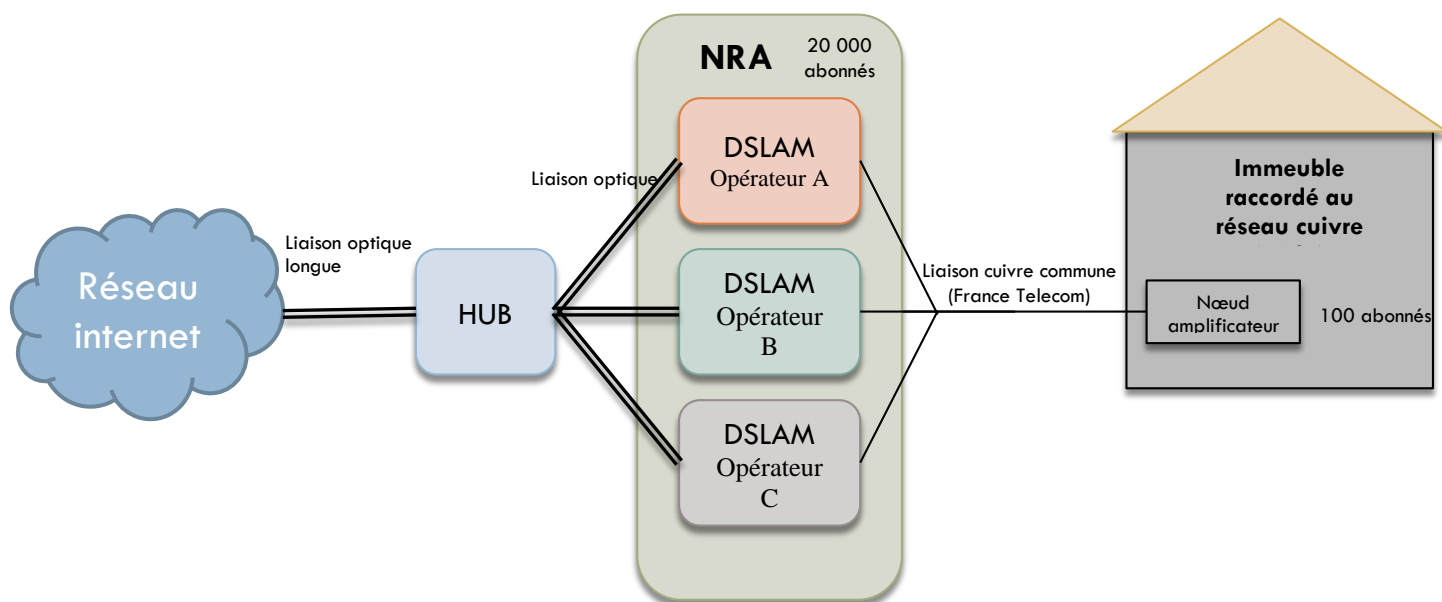


FIGURE II-15 : SCHEMA DE RACCORDEMENT DE L'ABONNE AVEC LES TECHNOLOGIES DSL (BOUCLE LOCALE CUIVRE)

<sup>1</sup> Débit IP

Au niveau de l'accès de l'abonné, la technologie de télévision sur IP se distingue des moyens de diffusions traditionnels (terrestre, câble, satellite) par le fait que l'ensemble des chaînes accessibles n'est pas transmis simultanément jusqu'à l'abonné, en raison de la bande passante insuffisante de la ligne téléphonique (cf.

Une contrainte physique caractéristique du DSL : l'atténuation). On ne transmet donc à un moment donné sur la ligne de l'abonné que le programme qu'il veut regarder, la télévision se faisant au niveau du DSLAM. La TV sur IP permet aussi la fourniture de programmes vidéo réellement à la demande (*Vidéo On Demand*, VOD), car on est capable d'envoyer un programme particulier à un seul abonné au moment où il l'a demandé, sans encombrer tout le réseau avec ce programme.

#### **i. Formats de codage de la télévision numérique sur IP**

Les premières réalisations de télévision sur IP par ADSL ont utilisé pratiquement toutes un codage vidéo MPEG-2 avec un débit de l'ordre de 3 Mbit/s, ce qui permet, selon les caractéristiques de la ligne téléphonique, d'offrir le service de télévision jusqu'à une distance d'environ 2500 à 3000 m du DSLAM (cf.

Une contrainte physique caractéristique du DSL : l'atténuation). La fourchette de débit adoptée est un compromis : elle correspond à la fois à la desserte d'un pourcentage significatif de la population (ceux qui résident en deçà du rayon critique de 2,5 Km autour du central) et au maintien d'un niveau de qualité satisfaisant pour les images (avec un débit plus faible, le rayon de distribution serait plus important, le nombre de téléspectateurs potentiels plus élevé, mais ce serait au préjudice de la qualité des images pour l'ensemble des abonnés).

Jusqu'à fin 2005, il n'y avait guère d'autre option économique que le MPEG-2 en raison de la non-disponibilité de codeurs temps réels efficaces et de décodeurs abordables pour des formats de compressions plus efficaces (H264, WMV9...). À partir de 2006 il est devenu possible de mettre en œuvre ces nouveaux formats de codage à bon marché, ce qui a permis de diviser par deux le débit nécessaire au codage vidéo à qualité égale grâce au MPEG-4.

Ainsi deux stratégies peuvent être employées par les opérateurs utilisant le MPEG-4 pour encoder leur flux TV :

- Garder une qualité d'image identique, mais en réduisant le débit d'encodage à 1.5 Mbit/s afin d'offrir le service de télévision sur IP à un plus grand nombre de foyers raccordés (ligne de moins de 4000m environ).
- Garder un débit identique de 2 à 3 Mb/s réservé au service de télévision par IP afin de transmettre simultanément plusieurs programmes à définition standard (Picture In Picture, enregistrer une chaîne pendant qu'on en regarde une autre...) ou un programme en haute définition, et plus généralement afin d'améliorer la qualité d'image du flux TV.

Les technologies d'encodage (MPEG-2 et MPEG-4) utilisés sur le DSL sont les mêmes que celles employées pour les autres modes de diffusion de télévision numérique (comme le câble par exemple). Concernant la compression en MPEG-2, la grande différence du DSL par rapport au câble réside au niveau des débits adoptés pour l'encodage des flux TV. Alors même que les débits moyens sont compris entre 2.5 et 4 Mbit/s, mais peuvent atteindre souvent 7 à 8 Mbit/s pour les canaux de diffusion traditionnels (Satellite ou câble) on ne dépassera pas 3,5 ou 4 Mbit/s (suivant les choix de l'opérateur) pour les programmes diffusés par l'ADSL. A ces valeurs, volontairement limitées à la source, correspondront des images de qualité inférieure notamment pour celles présentant de nombreux détails ou des mouvements complexes et rapides, mais qui présentent l'avantage d'être compatible avec les performances d'un réseau DSL (cf. La qualité de la télévision numérique).

D'une manière générale, la transmission de programmes de télévision en DSL relève d'un compromis entre, d'une part le débit propre aux programmes télévisuels que l'on souhaite diffuser (plusieurs Mbit/s sont nécessaires, sachant que plus le débit est élevé et meilleure est la qualité des images) et d'autre part de la bande passante du réseau de distribution DSL qui est par nature même limitée et qui plus est variable en fonction de la distance. Des gels d'images peuvent apparaître lorsque le débit nécessaire au programme télévisuel tend vers les capacités maximums du réseau ou lorsque des données sont perdues.

## **ii. Une contrainte physique caractéristique du DSL : l'atténuation**

Le signal DSL étant un courant électrique, il s'affaiblit progressivement en circulant sur le câble téléphonique, un affaiblissement d'autant plus rapide que la fréquence du signal est élevée. Plus le câble est long et plus son calibre est réduit, plus la puissance reçue et donc le débit de la connexion sont faibles. Si l'affaiblissement (exprimé en décibels, dB) est trop important, le service DSL sera dégradé (débit très faible, déconnexions intermittentes), voire indisponible (aucun accès DSL = la zone blanche). Le débit maximum auquel peut réellement prétendre un abonné dépend directement du niveau d'atténuation sur sa ligne : à un niveau d'atténuation correspond un débit maximum.

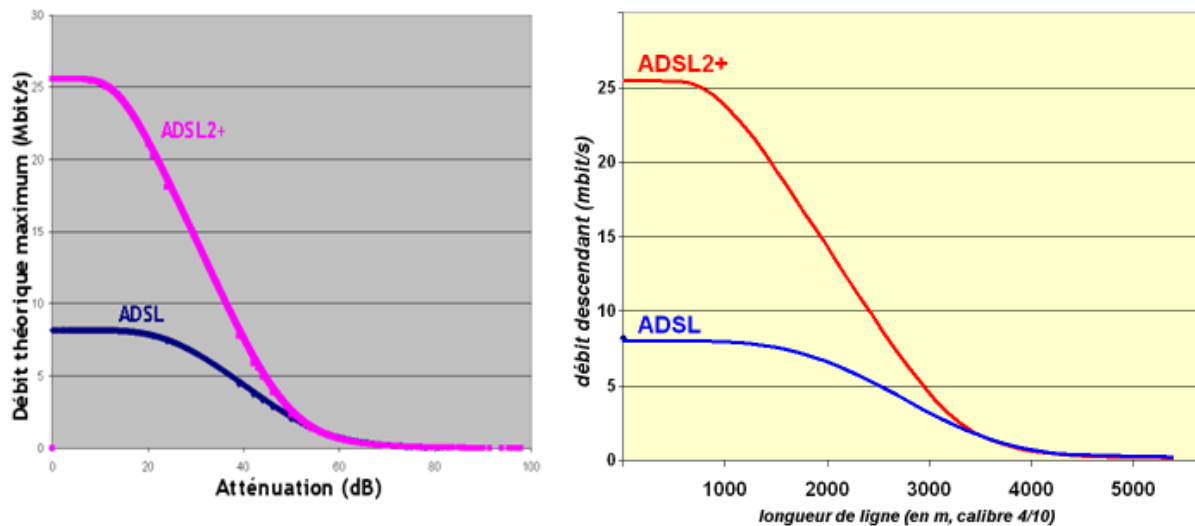


FIGURE II-16 : DEBIT THEORIQUE MAXIMUM (DESCENDANT) EN FONCTION DE L'ATTENUATION DE LA LIGNE (A GAUCHE) ET EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE LIGNE (A DROITE). SOURCE : ARCEP

En réalité, il faut également prendre en compte le calibre des fils de cuivre. Ce critère est déterminant : en fonction du calibre, la portée du signal peut être multipliée par deux. Il existe ainsi des abonnés ADSL dont la ligne fait plus de 9km, grâce à des calibres plus larges que la moyenne. Ainsi, deux lignes de longueur différentes peuvent donner un même débit, si leurs calibres sont différents. Par exemple, avec la formule de calcul ARCEP<sup>1</sup>, une ligne de 1,9km et de calibre 4/10 permet un débit identique à celui d'une ligne de 2,8km de calibre 6/10 : les deux correspondent en effet à un même niveau d'affaiblissement de 30 dB (soit un débit maximum de 7 Mbit/s en ADSL et 14 Mbit/s en ADSL2+).

Pour l'ARCEP, l'affaiblissement d'une ligne au regard de son calibre et de sa longueur est estimé en utilisant les règles suivantes : 15 dB par km pour un calibre de 4/10 ; 12.4 dB par km pour un calibre de 5/10 ; 10.3 dB par km pour un calibre de 6/10 et 7.9 dB par km pour un calibre de 8/10. L'atténuation totale est égale à la somme des atténuations linéiques multipliées par les longueurs par calibre fourni dans la base de données, à laquelle il convient, de rajouter un affaiblissement estimé à 1.5 dB pour les connexions (branchement, etc.) soit la formule suivante :

$$\text{Atténuation} = (\text{longueur à 4/10}) \times 15 + (\text{longueur à 5/10}) \times 12,4 + (\text{longueur à 6/10}) \times 10,3 + (\text{longueur à 8/10}) \times 7,9 + 1,5$$

<sup>1</sup> <http://www.arcep.fr/index.php?id=6988>

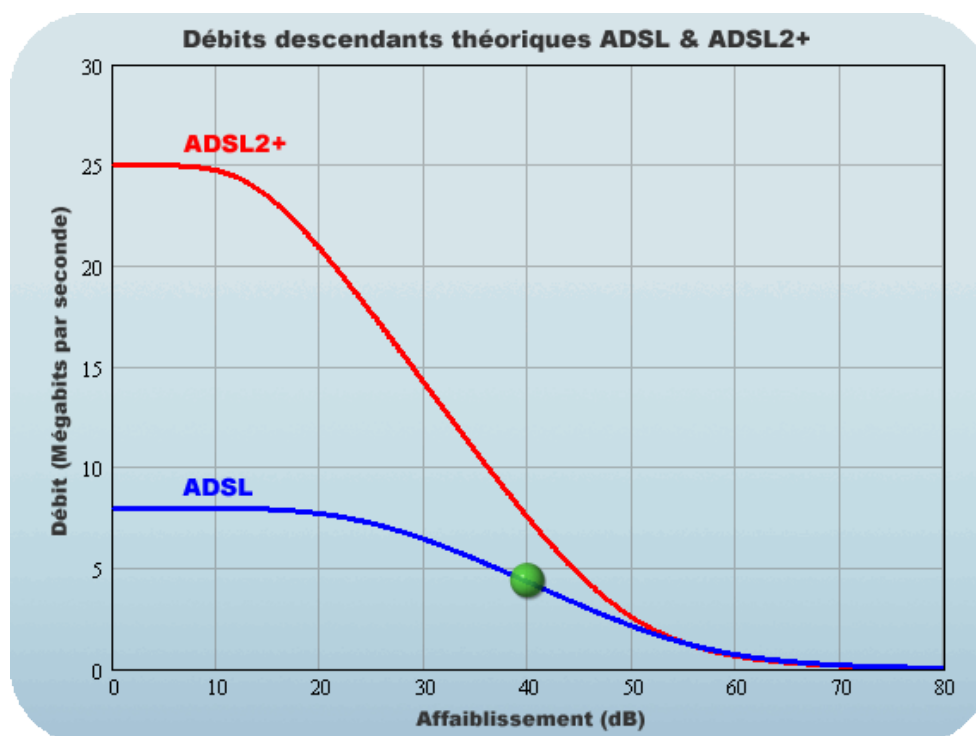


FIGURE II-17 : DÉBIT THÉORIQUE MAXIMUM (DESCENDANT) EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE LIGNE (SOURCE : DEGROUPE TEST)

### iii. Autres facteurs de perte de débit utile.

En plus de l'atténuation du signal du fait de la longueur de la ligne, il existe d'autres facteurs qui peuvent détériorer la qualité de la ligne ADSL :

- Le bruit (bruit d'écho, bruit impulsif) et les interférences radio générées par des émetteurs proches des lignes téléphoniques. Le bruit peut-être généré par les néons, les moteurs, les relais... Le niveau de bruit dépendra du niveau du perturbateur électromagnétique et de sa position par rapport au câble.
- La distorsion du signal à l'intérieur des câbles : la distance, le nombre de points de coupure et le faible diamètre des paires de cuivres peuvent déformer le signal. La distorsion temporelle est particulièrement importante à haut débit et est traitée par le codage et la correction d'erreur<sup>1</sup>.
- La diaphonie : Cette perturbation désigne l'interférence électromagnétique entre paires appartenant à un même câble de transport.

Il ne s'agit pas de facteurs d'atténuation dans le sens où ces phénomènes n'ont pas pour effet de diminuer la puissance du signal transporté. En revanche, ils ont pour effet de rendre ce signal moins « lisible » ; afin de pallier à ces effets « parasites », des mécanismes de correction d'erreurs et de

<sup>1</sup> La correction d'erreur (ou FEC) est traitée plus en détail dans le chapitre suivant.

renvoi des informations doivent être mis en place. Ceux-ci ont pour effet de consommer du débit utile, donc finalement de diminuer le débit tel qu'il est perçu par l'utilisateur.

#### iv. Les variantes du xDSL.

##### *La plus ancienne : l'ADSL*

La première version déployée dans le début des années 2000 est l'ADSL (asymmetric DSL) : elle offre un assez bon compromis entre performances et coût, et elle est bien adaptée à une clientèle grand public. Toutefois, l'ADSL présente plusieurs inconvénients :

- la portée maximale est d'environ 5km (pour des lignes en calibre 4/10) ; certaines lignes ne sont pas éligibles
- le débit est limité à 8 Mbit/s (ATM), valeur maximale possible uniquement sur les lignes courtes, inférieures à 2km
- le débit est asymétrique : les données circulent plus rapidement vers l'abonné (débit descendant) que vers l'internet (débit montant).

Afin de pallier ces différentes limites techniques, d'autres variantes DSL ont été développées depuis.

##### *Un débit plus élevé : ADSL2+ et VDSL*

L'ADSL2+, version améliorée de l'ADSL, utilise une bande de fréquence élargie. Elle permet un débit maximal de 25 Mbit/s (ATM). Mais plus la ligne est longue, plus le gain de débit de l'ADSL2+ par rapport à l'ADSL se réduit (gain insignifiant à partir de 3 km en calibre 4/10), car les fréquences hautes s'atténuent plus rapidement.

Avec une bande de fréquence encore plus large et un encodage plus efficace, le VDSL (very high bitrate DSL) et le VDSL2 (portée et débit largement supérieurs) offrent des débits plus élevés, ainsi qu'une possibilité de symétrie. En France, le VDSL devrait être commercialisé dans les mois à venir<sup>1</sup>.

##### *L'augmentation de portée : le ReADSL*

---

<sup>1</sup> Pendant très longtemps l'ARCEP n'a pas autorisé le déploiement du VDSL du fait de la forte fracture numérique que celui entraînerait : très haut débit pour les abonnés proches du DSLAM et débit identique à ceux de l'ADSL2+ pour les autres (cf. figure 1.6). De plus, la commercialisation du VDSL pourrait encore ralentir le déploiement des réseaux FTTx.

Le ReADSL (reach-extended ADSL) permet d'augmenter la portée du signal ADSL d'environ 5 à 10%, en injectant davantage de puissance dans les bandes de fréquences les plus basses. Le débit reste toutefois très limité (offres à 512 kbit/s). Le ReADSL sert donc principalement à fournir un service minimum à des abonnés qui se trouvent justes en limite extérieure de la zone de couverture normale de l'ADSL. Le ReADSL est par exemple proposé chez Orange ainsi que chez Free pour les abonnés ne pouvant être dégroupés en ADSL2+.

### **La symétrie avec le SDSL**

Le SDSL (symetric DSL) permet des débits symétriques. Sa portée est cependant plus réduite que celle de l'ADSL : pour un débit de 2 Mbit/s, la ligne ne doit pas faire plus de 2km, contre 3,5km en ADSL. Le SDSL est donc bien adapté aux applications qui ont autant besoin d'envoyer que de recevoir des données (par exemple, le fonctionnement en réseau de sites d'entreprise distants), et qui ne sont pas trop éloignées du répartiteur téléphonique. Accessoirement, le SDSL est utilisé pour relier à internet des points d'accès WiFi, par exemple pour couvrir des zones blanches ; en ce cas le SDSL sert de lien de collecte, le Wi-Fi assurant la desserte. Les caractéristiques du SDSL et son coût en font une technologie qui vise principalement une clientèle professionnelle.

## **b. La télévision numérique par fibre jusqu'à l'abonné**

La télévision numérique jusqu'à l'abonné ou FTTH utilise le même protocole IP que le DSL. Ainsi les formats de codage et la méthode de transport sont identiques à ceux de la télévision par DSL<sup>1</sup>. Par ailleurs, la TV numérique sur IP utilise le même support physique de l'information que le câble (la fibre optique) la différence provient de la norme de diffusion utilisée, DVB-C dans le cas du câble, IP dans le cas du FTTH. Il faut ainsi prendre garde à la confusion entre support physique de transmission de l'information et la technologie (ou norme) de diffusion. Aujourd'hui depuis la rénovation de son réseau, Numéricâble utilise un réseau de fibre optique qui va quasiment jusqu'à l'abonné, tout comme la FTTH, mais la façon de transmettre l'information est en réalité très différente (cf. La télévision numérique par câble.) Ces différences ne semblent pas, à ce stade, pouvoir se traduire par un niveau de QoS différent pour le consommateur.

La fibre optique est capable d'acheminer de très hauts débits, environ 100 fois plus élevés que le réseau actuel en cuivre<sup>2</sup>. Mais la différence essentielle avec le DSL provient de l'absence d'atténuation

---

<sup>1</sup> Cf. paragraphes I.5 et I.6

<sup>2</sup> Les premières offres FTTx proposent des débits descendants de l'ordre de 50 à 100 Mbit/s, mais en théorie, rien n'empêche les opérateurs d'augmenter ces débits jusqu'à plusieurs Gbit/s.

avec la distance. Ainsi un abonné à 10km du NRO<sup>1</sup> aura la même qualité de ligne et le même débit qu'un abonné à moins de 100 mètres du NRO. De plus la fibre est insensible aux perturbations électromagnétiques, ce qui garantit une meilleure qualité TV.

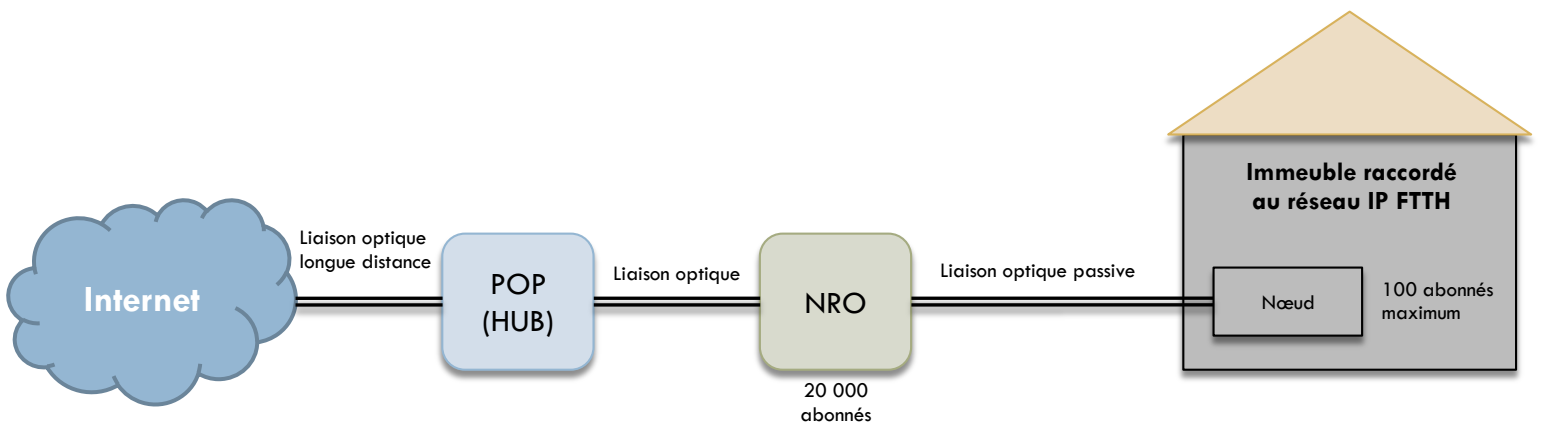


FIGURE II-18 SCHEMA DE RACCORDEMENT DE L'ABONNE AVEC LES TECHNOLOGIES FTTX

La FTTx permet donc de diffuser des flux TV avec des débits d'encodage beaucoup plus élevé (typiquement de l'ordre de 8 Mbit/s pour des chaînes SD et 16 Mbit/s) pour tous les abonnés sans aucune atténuation et quasiment aucune dégradation pour le téléspectateur. La fibre jusqu'à l'abonné permet de s'abstraire du compromis insolvable entre débit d'encodage (et donc qualité) et desserte du service TV à un pourcentage significatif de la population auquel sont confrontés les opérateurs en xDSL. La fibre jusqu'à l'abonné permet la desserte du service TV à 100% des abonnés raccordé avec une qualité vidéo optimale pour tous

<sup>1</sup> Nœud de Raccordement Optique.



## 4. Conclusion sur les différentes technologies de diffusion de la télévision numérique

| Support de diffusion   | Terminal de réception                                   | Avantages   | Inconvénients  | Prix   |
|------------------------|---|---|--|--|
| TNT (DVB)              | Téléviseur + décodeur (intégrés dans les modèles neufs) | Simplicité (pas d'abonnement, la plupart des nouveaux téléviseurs sont compatibles directement).<br>Taux de couverture de la population de plus de 90%.   | Moins de chaînes : 19 chaînes contre plus d'une centaine sur les autres médiums de diffusions.<br>Moins de services interactifs (pas de TV de rattrapage par exemple) que pour les offres câble, DSL et Satellite.   | Gratuit (hors achat d'un décodeur pour adapter un téléviseur ancien)   |
| TV par Satellite (DVB) | Parabole + Téléviseur + décodeur                        | Couverture proche de 100% du territoire et des foyers.  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessite une antenne spécifique (prix et encombrement).</li> <li>• Services interactifs supérieur à la TNT, mais souvent inférieur à ceux proposés par le câble et le DSL.</li> <li>• Les offres « triple play » par satellite sont chères et limitées par rapport à celles proposées par câble et DSL, obligeant le consommateur à séparer son abonnement TV de son abonnement internet.</li> </ul> | Installation de l'antenne et du décodeur, abonnement possible pour les chaînes payantes (canal+, etc.)                       |
| TV par câble (DVB)     | Téléviseur + décodeur                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• bande passante 500 fois plus importante que le DSL</li> <li>• Bande passante dédiée au service de télévision.</li> <li>• Le câble coaxial est nettement moins soumis aux perturbations que la paire de cuivre ce qui limite les « artefacts »<sup>1</sup> sur l'image TV.</li> <li>• Beaucoup services interactifs (vidéo à la demande, enregistrement numérique multiple, Time Shifting, etc.)</li> </ul> | Couverture de l'ordre de 32% des foyers  | Abonnement, à partir de 20 euros par mois pour la TV seule et à partir de 30 euros pour du « triple play ». Décodeur fourni. |

<sup>1</sup> Cf. II.2.c Facteurs de qualité associés à la transmission sur le réseau et Annexe III.2

| Support de diffusion | Terminal de réception | Avantages   | Inconvénients   | Coût   |
|----------------------|-----------------------|---|---|--|
| TV par xDSL (IP)     | Téléviseur + décodeur | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'antenne extérieure, couplage internet et téléphone.</li> <li>• Beaucoup services interactifs (TV de rattrapage, vidéo à la demande, enregistrement numérique, « Time Shifting », etc.)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réception de la télévision conditionnée par la longueur de la ligne (éligibilité).</li> <li>• Bruit, distorsion et affaiblissement sur la ligne de cuivre entraînent une détérioration du signal TV (freezes, pixellisation, etc.)</li> <li>• Bande passante limitée obligeant à compresser les flux TV avec de faible débit d'encodage.</li> <li>• Bande passante pour la TV mutualisée avec les autres services (VoIP, Internet).</li> </ul> | Abonnement ADSL, à partir de 32 euros par mois pour une offre Triple Play. |
| TV par FTTx (IP)     | Téléviseur + décodeur | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'antenne extérieure, couplage internet et téléphone.</li> <li>• Qualité de service<sup>1</sup> TV excellente est quasi continue (pas de bruit, ni d'affaiblissement).</li> <li>• Très haut débit et bande passante toujours garantie.</li> <li>• Possibilité d'encoder les chaînes avec des débits beaucoup plus importants (par exemple 8Mbit/s pour une chaîne SD et 16 Mbit/s pour de la HD).</li> </ul> | Couverture de la population nationale pour le moment extrêmement limité.  | Abonnement FTTH et FTTB entre 32 et 50 euros par mois.                     |

FIGURE II-19 : TABLEAU RECAPITULATIF DES DIFFERENDS MOYENS DE TRANSMISSIONS DE LA TELEVISION NUMERIQUE

<sup>1</sup> Cf. II.1 QoS et QoE

## III. La qualité de la télévision numérique

### 1. Qualité de Service et Qualité d'expérience utilisateur (QoS et QoE)

D'un point de vue historique, le sigle QoS<sup>1</sup> est apparu dans les années 90 pour désigner un ensemble de techniques réseaux garantissant l'acheminement des trafics sensibles comme la voix ou les applications multimédia de manière fiable. En effet il est bien difficile de transmettre ce type de contenus avec les méthodes traditionnelles de « best effort »<sup>2</sup> utilisé pour les flux internet. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les FAI ont mis en place un service différencié pour distinguer le flux TV du flux internet sur les offres « Triple Play » permettant ainsi de transmettre en priorité les flux TV à l'abonnée. La QoS prend en considération des paramètres objectifs lesquels peuvent être mesurés et si besoin améliorés. Pour le transport de la TV numérique, il existe deux grands niveaux de paramètres de QoS : les paramètres liés à la vidéo elle-même (résolution, débit d'encodage, codecs audio et vidéo, paramètres d'encodage) et les paramètres liés au réseau (débit<sup>3</sup>, latence<sup>4</sup>, gigue<sup>5</sup>, probabilité de perdre de l'information pendant la transmission<sup>6</sup>, déséquence<sup>7</sup>).

Le sigle QoE est quant à lui apparu beaucoup plus récemment. Présentée comme une approche globale de la qualité (mesure de bout en bout), la QoE consiste à mesurer la performance d'utilisation d'un service directement auprès de l'utilisateur. Si les deux sigles font référence à la mesure de performance d'un service fourni, la QoE s'appuie sur une mesure subjective du service fourni, tandis que la QoS est basée sur la mesure objective des composants qui constituent le service.

Prenons l'exemple d'un service de téléphonie. L'approche QoE définit la qualité d'écoute d'une communication voix selon l'indice MOS<sup>8</sup> attribué par un échantillon d'utilisateurs et qui varie de 0 (très mauvais) à 5 (excellent). A contrario, l'approche QoS consiste à mesurer les paramètres techniques du réseau (délai réseau, gigue, perte de paquets) et des Codecs qui influent sur la qualité de la voix comme le fait l'ARCEP. Autre exemple concernant cette fois l'utilisation d'une application Web. L'approche QoE consiste à mesurer le délai de navigation de l'application directement sur le poste de

---

<sup>1</sup> Quality of Service (Qualité de Service)

<sup>2</sup> Meilleure effort (en anglais *best effort*) protocole de transmission des données ne fournissant aucune différenciation entre plusieurs flux réseaux et ne permettant aucune garantie de qualité de service.

<sup>3</sup> Débit (en anglais *bandwidth*), parfois appelé *bande passante* par abus de langage, il définit le volume maximal d'information (bits) par unité de temps.

<sup>4</sup> Latence, délai ou temps de réponse (en anglais *delay*) : elle caractérise le retard entre l'émission et la réception d'un paquet.

<sup>5</sup> La gigue (en anglais *jitter*) est la variation de la latence au fil du temps.

<sup>6</sup> Perte de paquet (en anglais *packet loss*) : elle correspond à la non-délivrance d'un paquet de données, la plupart du temps due à un encombrement du réseau.

<sup>7</sup> Déséquence (en anglais *desequencing*) : il s'agit d'une modification de l'ordre d'arrivée des paquets.

<sup>8</sup> Mean Opinion Score. Cf. annexes (III.1).

travail de l'utilisateur, tandis que l'approche QoS consiste à mesurer les délais réseau, le délai d'accès au serveur et enfin le délai d'accès à l'application.

L'approche QoE présente l'avantage de mesurer le résultat visible de l'utilisateur. En revanche, elle souffre d'une grave limitation, car elle tient rarement compte des conditions de test. En effet, en changeant simplement le téléviseur on peut obtenir un meilleur ressenti utilisateur. D'où l'importance de fixer, dans l'approche QoE, un échantillonnage pertinent d'utilisateurs et une configuration identique pour chacun d'eux. Signalons également que la vision de bout en bout de la QoE ne permet pas d'identifier l'origine des défauts constatés. Ainsi la QoE de manière générale est très difficile à évaluer. Enfin, l'évaluation de la QoE est extrêmement coûteuse, tant en termes de coûts directs que de temps. Nous ne rentrerons pas dans les détails dans notre étude, mais le lecteur intéressé trouvera en annexe un état des lieux des différentes stratégies d'évaluation de la QoE. L'approche QoS permet quant à elle, en mesurant objectivement les performances des composants majeurs de la transmission (réseaux, serveurs, applications<sup>1</sup>) d'identifier le ou les composants défectueux, de valider les niveaux de qualité de service requis (SLA<sup>2</sup>) et finalement de contribuer à la qualité de bout en bout. En revanche, en étant focalisée sur la performance/qualité d'un composant, l'approche QoS est moins susceptible de traduire le ressenti de l'utilisateur final.

En résumé, QoS et QoE sont intimement liées et constituent deux approches complémentaires de la mesure de performance. Si la QoE symbolise la qualité "visible" de l'utilisateur final, elle ne peut exister sans une maîtrise de la qualité intrinsèque des différents composants (réseaux, boucle locale, terminaux, installation privée de l'abonné). Ainsi, dans l'hypothèse d'une future évaluation de la « qualité » de la télévision numérique chez les différents opérateurs, il semble pertinent à votre rapporteur de prendre en considération des paramètres purement objectifs de QoS ainsi que des facteurs supplémentaires, plus subjectifs, qui sont proche de la qualité d'expérience de l'utilisateur final.

## 2. Paramètres techniques de QoS.

Il y a une grande variété de facteurs qui influent sur la qualité de service de la télévision numérique.

- a. *Les facteurs de qualité associés à la source.*
- b. *Les facteurs de qualité associés à l'encodage.*
- c. *Les facteurs de qualité associés à la transmission sur le réseau.*
- d. *Les facteurs de qualité associés à la boucle locale.*
- e. *Les facteurs de qualité associés à l'installation terminale de l'abonné.*

<sup>1</sup> S'il s'agit d'un flux vidéo, les composants majeurs associés à l'aspect « application » de la transmission sont par exemple : la résolution, le débit d'encodage, les codecs audio et vidéo utilisés ainsi que les paramètres d'encodages.

<sup>2</sup> Le Service Level Agreement (SLA) est un document qui définit la qualité de service requise entre un prestataire et un client.

### **a. Facteurs de qualité associés à la source**

- Mise au point.
- Contraste.
- Luminosité.
- Performance de la caméra.
- Pré-encodage par la régie.

Les facteurs de qualité associés à la source dépendent uniquement du producteur du contenu (régie des chaînes de télévision). C'est lui qui achète le matériel audiovisuel (performance des caméras et perches de son, etc.) et qui contrôle la prise de vue (source de lumière sur le plateau, position des caméras, tournage, montage). Les fournisseurs d'accès à la télévision numérique récupèrent les flux vidéo que les chaînes de télévision ont décidé de distribuer, ce ne sont donc pas des paramètres qu'ils peuvent contrôler. De plus, les flux régies ne sont pas toujours distribués aux fournisseurs d'accès « brut » d'encodage. Souvent, surtout dans le cas des chaînes étrangères, un pré-encodage est effectué par la chaîne de télévision. Le fournisseur d'accès peut alors garder le même encodage, soit ré-encoder avec ses propres paramètres. Dans tous les cas il reste « bridé » par les choix de la chaîne de télévision. Par exemple si une chaîne de télévision fournit un flux régie pré-encodé avec un certain débit, le fournisseur d'accès ne pourra proposer à ses clients mieux que ce qu'on lui donne. La qualité d'expérience utilisateur est donc directement conditionnée par les choix des chaînes de télévision. Le fournisseur d'accès ne peut alors, au mieux, que restituer le plus fidèlement possible le flux régi. Lorsqu'un flux TV proposé par le fournisseur d'accès est insatisfaisant pour l'abonné (par exemple à cause d'une mauvaise qualité d'image) cela peut provenir de la régie elle-même. Alors, la seule solution pour le fournisseur d'accès pour améliorer la qualité d'expérience de ses abonnés est de demander à la chaîne de télévision d'améliorer les facteurs de qualité associés à la source (par exemple meilleur débit de pré-encodage).

### **b. Facteurs de qualité associés à l'encodage**

- Codec d'encodage (audio et vidéo) utilisé.
- Débit.
- Paramètres d'encodage.

Dans d'autres cas le flux vidéo régie est proposé aux fournisseurs d'accès pratiquement pas compressé. C'est alors au fournisseur d'accès lui-même de choisir la façon dont il encode et transporte l'information jusqu'à l'abonné. C'est ici un point fondamental, car les choix techniques et stratégiques du fournisseur d'accès vont directement influencer sur la QoS et QoE. Voici un tableau présentant en détail les choix des différents opérateurs du marché en la matière :

|   | Orange   | Bouygues   | SFR  | Numéricâble   | Free  |
|---|--|--|--|---|---|
| Type d'encodage des flux vidéo                              | MPEG-4 <sup>1</sup> (avec couche de multiplexage MPEG-2-TS) et MPEG-2 pour quelques chaînes. | MPEG-4 et de manière marginale MPEG-2 pour quelques chaînes. | MPEG-4 et de manière marginale MPEG-2 pour quelques chaînes. | MPEG-2 pour la SD et MPEG-4 pour la HD.                         | MPEG-2 en général et MPEG-4 pour les chaînes en « bas débit » |
| CBR <sup>2</sup> ou VBR <sup>3</sup>                        | CBR  | CBR  | CBR  | CBR   | CBR   |
| Débit d'encodage des flux vidéo SD <sup>4</sup> (débit IP)  | 2.7 Mbit/s (+ 20% de FEC)  | 2 à 2.5 Mbit/s selon les chaînes.                            | 2.4 Mbit/s   | 3 à 8 Mbit/s selon les chaînes (la plupart entre 6 et 8 Mbit/s) | 1,7 Mbit/s en MPEG-4 et 3,5 Mbit/s en MPEG-2                  |
| Débit d'encodage des flux vidéo HD <sup>5</sup> (débit IP)  | 6.5 Mbit/s (+ 12.5% de FEC)  | De 5.5 à 5.8 Mbit/s selon les chaînes.                       | 6 Mbit/s   | 6 à 18 Mbit/s selon les chaînes                                 | 5.8 Mbit/s  |
| Débit d'encodage des flux vidéo SD+ <sup>6</sup> (débit IP) | 6 Mbit/s (pas de FEC. Disponible sur fibre uniquement)                                       | 8 Mbit/s   | NC   | 3 à 8 Mbit/s selon les chaînes (la plupart entre 6 et 8 Mbit/s) | NC  |
| Débit d'encodage des flux vidéo HD+ <sup>7</sup> (débit IP) | 12 Mbit/s (pas de FEC. Disponible sur fibre uniquement)                                      | 16 Mbit/s  | 12 Mbit/s  | 6 à 18 Mbit/s selon les chaînes                                 | 6.8 Mbit/s  |

FIGURE III-1 : TABLEAU OPERATEURS QOS TV (PARTIE 1 : ENCODAGE)

Nous allons commenter ce tableau ligne par ligne :

<sup>1</sup> Identique au MPEG-4.

<sup>2</sup> Constant Bit Rate. Classe de service offrant un débit constant garanti, permettant de transporter des flux, tels que la vidéo ou la voix, qui requièrent un contrôle strict de synchronisation et de hautes performances en qualité de service.

<sup>3</sup> Contrairement au CBR le VBR (Variable Bit Rate) fait varier la quantité de données par segment de temps. Le VBR permet d'encoder dynamiquement avec un débit plus ou moins grand selon la complexité de l'image sur une vidéo.

<sup>4</sup> Définition Standard (Standard-Definition).

<sup>5</sup> Haute définition.

<sup>6</sup> SD sur les réseaux IP en FTTx, lesquels permettent des débits d'encodage supérieurs.

<sup>7</sup> HD sur les réseaux IP en FTTx, lesquels permettent des débits d'encodage supérieurs.

Comme nous pouvons le voir, l'ensemble des opérateurs utilise aujourd'hui deux normes d'encodage différentes, le MPEG-2 et le MPEG-4 (ou H264). Le MPEG-2 est la norme usuelle applicable au codage de l'audio et la vidéo, ainsi que leur transport pour la télévision numérique. Les débits habituels sont de 2 à 6 Mbit/s pour la définition standard (SD), et de 15 à 20 Mbit/s pour la haute définition (HD). Le MPEG-4 (ou H264) quant à lui est une évolution du MPEG-2 : il permet des gains de qualité d'un facteur 2 par rapport au MPEG-2 à débit égal. Intuitivement tous les opérateurs devraient donc préférer encoder en MPEG-4 plutôt qu'en MPEG-2 (débit nécessaire divisé par deux pour une qualité égale), car c'est techniquement et stratégiquement parlant le meilleur choix. Pourtant, si Orange, Bouygues Telecom et SFR encodent en priorité en H264, deux opérateurs sur cinq ne le font pas systématiquement. Numéricâble n'encode en H264 que pour les chaînes HD et Free uniquement pour ses abonnés DSL trop éloignés du DSLAM. Pour Numéricâble le bénéfice du MPEG-4 en terme de débit n'a pas grande importance au regard de la bande passante disponible sur réseau câblé<sup>1</sup> et seule les chaînes HD, demandant un débit d'encodage important, ont été encodées en MPEG-4. Chez Free le MPEG-2 reste majoritaire pour des raisons techniques liées à l'incompatibilité partielle de son réseau vis-à-vis du MPEG-4. C'est donc pour Free davantage un choix par défaut avant une mise à jour de son réseau. Seules quelques chaînes, parmi les plus regardées par les Français, ont été encodées à la fois en MPEG-2 et en MPEG-4 pour en faire profiter le plus grand nombre. De fait tous les abonnés à la TV par DSL chez Free n'ont pas accès au même nombre de chaînes. Certains, trop loin du DSLAM n'ont pas accès au flux TV encodé en MPEG-2, plus gourmand en termes de bande passante minimum.

Tous les opérateurs utilisent un encodage à débit constant (Constant Bit Rate). L'avantage est qu'on a toujours la même qualité d'image en termes de définition. L'inconvénient est que lorsque l'image se complexifie (scène d'action ou de sport par exemple) il peut arriver que le débit nécessaire à une bonne fluidité d'image augmente. Les opérateurs prévoient bien sûr une marge de sécurité, mais si la complexité augmente trop, il arrive parfois que l'image se pixélise ou se floute, voire qu'on observe un gel d'image (c'est plus généralement ce qu'on appelle des artefacts). A priori une autre solution serait d'encoder dynamiquement avec un débit plus ou moins grand selon la complexité de l'image sur une vidéo (Variable Bit Rate). L'intérêt évident de cette solution serait de pouvoir éviter les artefacts lorsque la complexité de l'image augmente. Néanmoins cela impliquerait une la qualité d'image variable, comme on peut le trouver actuellement sur les solutions de streaming sur internet (lorsque la complexité de l'image augmente, on diminue la résolution de l'image pour compenser). Si l'internaute est souvent habitué à une qualité d'image fluctuante sur le web, le téléspectateur attend avant tout une image qui soit constante et de bonne qualité. C'est la raison pour laquelle les opérateurs choisissent tous d'encoder en CBR, quitte quelquefois à faire apparaître des artefacts sur l'image<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Cf. paragraphe I.1.1 *La télévision numérique par câble*.

<sup>2</sup> Cf. paragraphe II.

Venons-en maintenant aux débits d'encodages des flux SD. Sur le MPEG-4, dans l'ordre décroissant de débit nous trouvons : Orange à 2.7 Mbit/s, SFR à 2.4 Mbit/s, Bouygues entre 2 et 2.5 Mbit/s et enfin Free à 1.9 Mbit/s. Sur le MPEG-2, Numéricâble encode pour la plupart des chaînes entre 6 et 8 Mbit/s (ce qui correspond à un flux MPEG-4 de qualité identique de 3 à 4 Mbit/s) et Free à 3.5 Mbit/s (ce qui correspond à un flux MPEG-4 de qualité identique à 1.75 Mbit/s environ). En conclusion, Numéricâble est clairement l'opérateur qui a les débits d'encodages les plus élevés, Free celui qui a les débits les plus faibles, tandis que les trois autres opérateurs, dans une situation intermédiaire, ont tous trois des débits comparables.

Dans l'ensemble, ces résultats peuvent s'expliquer du fait de la différence de support physique utilisé par les opérateurs pour transmettre les flux TV. Numéricâble utilise un réseau câblé conçu pour la TV, alors que les quatre autres opérateurs fournissent la télévision numérique à leurs abonnés par DSL, un réseau conçu pour le téléphone. Les débits inférieurs constatés chez les concurrents de Numéricâble sont dû au manque de bande passante disponible sur le DSL<sup>1</sup>. Numéricâble qui lui dispose d'une bande passante de 1GHz (soit 500 fois plus que le DSL) peut se permettre d'augmenter les débits d'encodage.

Tentons maintenant d'expliquer les différences entre les quatre autres opérateurs. Il est important de rappeler que du fait du phénomène d'atténuation sur le DSL (la bande passante diminue avec la longueur de la ligne) les fournisseurs d'accès doivent faire face au dilemme suivant : si un opérateur encode ses flux TV avec des débits élevés (afin de proposer une bonne qualité d'image) il prive alors un grand nombre d'abonnés du service de télévision numérique (ceux qui ont une bande passante inférieure au débit d'encodage). Au contraire si un opérateur souhaite proposer la télévision numérique au plus grand nombre alors il sera obligé d'utiliser des débits d'encodage les plus petits possible ce qui aura pour conséquence de diminuer la qualité d'image du signal. Ainsi les opérateurs qui souhaitent fournir à leurs abonnés la télévision numérique par effectue un choix stratégique entre qualité et accessibilité.. Free a clairement fait le choix de proposer la télévision numérique le plus souvent possible quitte à diminuer la qualité de l'image. Orange et SFR ont fait le choix inverse et proposent la TV par satellite à leur parc non éligible.

En théorie, plus le débit d'encodage est élevé plus l'image sera de bonne qualité. Néanmoins, la qualité d'image d'un flux TV ne dépend pas uniquement du débit d'encodage. Il existe en effet une marge de manœuvre supplémentaire pour l'opérateur. En effet les paramètres d'encodages ont aussi une grande importance pour la qualité d'image du flux TV. Ces paramètres sont choisis par l'opérateur au moment de l'encodage, de manière à maximiser la qualité d'image. Ainsi, en optimisant la valeur de ces paramètres on peut augmenter la qualité à débit d'encodage constant. De fait, on peut donc concevoir qu'en théorie un opérateur ait pu trouver des paramètres d'encodages idéaux lui permettant de diminuer drastiquement ses débits d'encodage en gardant la même qualité. En soi, Free pourrait

<sup>1</sup> Cf. paragraphe I.5 et I.11 *La télévision numérique par DSL* et *La télévision numérique par câble*.



donc avec des débits d'encodage inférieurs et une qualité d'image équivalente à celle de ses concurrents. Néanmoins, le MPEG-2 et le MPEG-4 sont des types d'encodages qu'on peut aujourd'hui qualifier de « rodés » dans le sens où les opérateurs les utilisent maintenant depuis des années. Ainsi on est amené à penser que tous les opérateurs ont probablement trouvé des paramètres d'encodages avec des caractéristiques semblables, et la marge d'améliorations de ces derniers est désormais très faible. Si de petites différences de débit d'encodage pouvaient donc être comblées par de meilleurs paramètres, ces différences sont peu susceptibles d'avoir un impact significatif en terme de qualité.

### ***c. Facteurs de qualité associés à la transmission sur le réseau***

- Probabilité de perdre de l'information pendant la transmission (perte de paquets).
- Stratégie de correction des erreurs.
- Latence.
- Gigue.

Nous avons vu au paragraphe précédent que l'encodage était la première grande marge de manœuvre pour les opérateurs pour influencer sur la qualité TV. L'encodage se fait en amont de la transmission de l'information sur le réseau. En réalité, la transmission elle-même a une grande importance pour la qualité TV car elle entraîne de nombreuses complications pour les opérateurs. En effet, quel que soit le support physique de transmission de l'information (cuivre, câble, fibre optique) il existe une probabilité non nulle pour que l'information se perde pendant la transmission (c'est ce qu'on appelle la perte de paquets). Ces pertes de paquets sont particulièrement présentes sur les réseaux DSL. Les pertes de paquets sont en outre extrêmement gênantes pour l'abonné, car elles ne se traduisent pas l'apparition d'artefacts à l'écran, par exemple des effets de pixellisations, de mosaïque ou de flou<sup>1</sup>. Ces défauts sont désignés de manière générique par le terme « artefact ».

En réalité, il existe différents artefacts résultant de la perte de paquets. Ils peuvent être autant visuels que sonores<sup>2</sup>. Aujourd'hui la dégradation de flux audiovisuel du fait de la présence d'artefacts est l'une des causes de mécontentement les plus importantes pour les consommateurs. Ces derniers ne peuvent se satisfaire de telles dégradations et c'est au rôle de l'opérateur de trouver des solutions pour pallier au problème. Comme nous l'avons déjà dit, la perte de paquets sur le réseau est inévitable et si certains supports physiques garantissent une meilleure fiabilité que d'autres<sup>3</sup>, on ne pourra jamais garantir une probabilité nulle de perte d'information. De plus, pour l'ADSL la boucle locale est commune à tous les opérateurs, la probabilité de perte est donc identique pour chacun d'entre eux. La

---

<sup>1</sup> Cf. figure 2.2 ci dessous.

<sup>2</sup> Cf. Annexe

<sup>3</sup> Par exemple, la perte de données sur fibre optique est beaucoup plus rare que sur cuivre.

solution pour l'opérateur est de contourner le problème en corrigeant ces erreurs. C'est là où les opérateurs peuvent se démarquer les uns des autres. Il existe pour cela deux approches :

- La retransmission : En cas de pertes de données, le récepteur demande à l'émetteur de retransmettre les données perdues. Ceci nécessite de prévoir de la bande passante en cas de retransmission.
- Les codes correcteurs d'erreurs (Foward
- Error Correction –FEC) : On ajoute au flux initial des données de redondance permettant, en cas de pertes, de régénérer dans le récepteur les données perdues. Ceci nécessite de transmettre le flux de redondance en plus des données, ce qui consomme en permanence de la bande passante supplémentaire (environ 20% en plus aujourd'hui).



**FIGURE III-2 : EXEMPLES D'ARTEFACTS VISUELS DUS A LA PERTE DE PAQUETS AU MOMENT DE LA TRANSMISSION**

Quelle que soit l'approche sélectionnée par l'opérateur, on voit que cela entraîne forcément une bande passante supplémentaire pour la transmission du flux TV. Pour recevoir un flux TV avec

correction d'erreur il faut donc que la bande passante disponible chez l'abonné soit supérieur au débit d'encodage plus un débit supplémentaire du fait de la correction des erreurs de l'ordre de 15 à 20%. Une nouvelle fois c'est à l'opérateur de trouver ce qui lui semble le meilleur compromis entre qualité et accessibilité du service.

A présent, observons les différences de politiques des opérateurs en matière de correction des erreurs :

|  | Orange  | Bouygues                                    | SFR                       | Numéricâble | Free        |
|--|---|---|---------------------------|-------------|-------------|
| FEC <sup>1</sup>                                       | OUI (toujours, pour tous les abonnés éligibles TV). | OUI (si le débit de l'abonné le lui permet) | NON                       | ***         | OUI         |
| Retransmission des paquets en cas d'erreur ou de perte | NC  | NC  | OUI (PHY-R et PURE PIXEL) | ***         | OUI (PHY-R) |

FIGURE III-3 : TABLEAU OPERATEURS QOS TV (PARTIE 2 : FEC)

SFR a fait le choix de la retransmission uniquement. Pour SFR, l'intérêt d'un tel choix est de ne demander à la ligne de l'abonné une bande passante supplémentaire uniquement en cas d'erreur, et non pas en permanence. SFR utilise de plus une technologie de retransmission propriétaire, développée en interne, le « pure pixel » pour remplacer le « PHY-R » protocole de retransmission développé par Broadcom. Selon SFR, cette nouvelle technologie permettrait de corriger les erreurs de manière plus efficace. On imagine que SFR cherche avec son « pure pixel » économiser de la bande passante en optimisant la correction. Pour autant, votre rapporteur n'a pas pu avoir d'information supplémentaire sur le sujet. Orange et Bouygues Telecom, au contraire, font le choix de la FEC uniquement. La FEC permet comme nous l'avons expliqué de corriger les erreurs en permanence, en introduisant de la redondance. Le problème est que cette redondance entraîne une augmentation de la bande passante nécessaire pour recevoir le flux TV. Orange fait le choix de flux TV avec FEC pour tous ces abonnés. C'est-à-dire que pour être éligible au service TV de chez Orange, un consommateur doit nécessairement avoir une bande passante nécessaire supérieure au débit d'encodage proposé par Orange (2.7 Mbit/s pour une chaîne SD) plus 20% de bande passante supplémentaire c'est-à-dire 3.25 Mbit/s. Bouygues Telecom a au contraire choisit de proposer la FEC en option : si un consommateur ne dispose pas de la bande passante suffisante pour recevoir la FEC, alors Bouygues Telecom lui propose un flux sans correction d'erreur. Autrement dit un abonné disposant d'une bande passante de 2.8 Mbit/s sera éligible chez Bouygues Telecom, mais ne pourra profiter de la correction d'erreur. Il disposera donc de la télévision par ADSL, mais avec une qualité de service inférieure. On voit d'ailleurs qu'un consommateur peut donc très bien être éligible à la TV chez Bouygues Telecom et

<sup>1</sup> Forward Error Correction (Code correcteur en Français).

pas chez Orange. Numéricâble n'a pas besoin de faire de correction d'erreur. L'atténuation et la perte d'information sur le réseau de Numéricâble son quasiment négligeable. Nous n'avons pas d'information détaillée pour Free concernant la correction d'erreur. Il semblerait néanmoins que Free est fait le choix d'utiliser les deux méthodes de correction : retransmission et FEC.

En ce qui concerne la transmission de l'information sur le réseau, d'autres paramètres pourraient permettre d'évaluer la qualité du service de télévision. En effet la congestion du réseau de l'opérateur est également à prendre en considération. Plus le réseau de l'opérateur est saturé, plus le risque pour l'abonné d'observer des d'artefacts à l'écran augmente. Pour mesurer la congestion d'un réseau, on peut prendre en compte deux grandeurs caractéristiques : le délai de transmission des paquets (latence) et la gigue. La latence également appelée délai est le temps pris par un paquet pour voyager à travers le réseau entre deux points A et B, par exemple entre la chaîne de télévision et l'abonné. Si un paquet met trop de temps à arriver chez l'abonné, alors l'image peut se figer un court instant, ce qui est particulièrement pénible pour le consommateur. La gigue elle va affecter l'ordre d'arrivée des paquets. Si la gigue est élevée alors un paquet émit avant un autre, peut être reçu après ce dernier. Évidemment les paquets sont émis dans un ordre bien précis, ainsi, si l'ordre d'arrivée n'est pas le même que l'ordre de départ, une nouvelle fois des artefacts apparaissent à l'écran.

#### ***d. Facteurs de qualité associés à la boucle locale.***

- **Usure.**
- **Vieillissement.**

La boucle locale est ce qui relie un utilisateur d'un réseau au premier niveau d'équipement du réseau auquel il est abonné. Cet élément peut être physique comme une paire torsadée ou une fibre optique dans le cas du réseau téléphonique ou immatériel comme une onde électromagnétique dans le cas d'une boucle locale radio ou d'un réseau de téléphonie mobile. L'état de la boucle locale a évidemment une importance dans la qualité d'un service de télévision numérique. Par exemple les lignes de cuivre posées en France dans les années 1970 ont pu avec le temps se détériorer (humidité, etc.). L'usure et le vieillissement de la boucle locale sont très difficilement identifiables et quantifiables en termes de perte de qualité de service. Pourtant une part non négligeable des problèmes d'artefacts sur l'image TV peut provenir de cette usure et de ce vieillissement. Même la prise téléphonique peut être source de problème. Sur certaines installations très anciennes, on trouve dans les prises téléphoniques des condensateurs. Ce condensateur servait (à l'époque) à tester le bon fonctionnement d'une ligne téléphonique. Aujourd'hui ce condensateur ne sert plus à rien, mais le problème est qu'il peut poser de gros problèmes pour la connexion ADSL, et en particulier pour la réception des flux TV du fait de nombreuses désynchronisations. Hélas, dans la plupart des cas, les opérateurs ne peuvent de toute façon rien faire concernant ces facteurs de vieillissement, particulièrement présents sur l'ADSL.

C'est l'une des raisons qui motive aujourd'hui le développement des réseaux fibres (FTTH, FTTB etc.). Il existe toutefois des manières plus ou moins intelligentes de prendre en compte ce bruit. Ces dernières sont des éléments de différenciation entre opérateurs mais dépassant le cadre de ce rapport.

#### **e. Facteurs de qualité associés à l'installation terminale de l'abonné**

- Performance du réseau personnel de l'abonné (interférences avec des appareils ménagers, qualité de l'installation électrique).
- Performance du décodeur fourni par l'opérateur (Set Top Box).

La qualité est l'installation terminale, négligée à tort, est également très importante tant elle influe sur la qualité finale (QoE) pour l'utilisateur. Comme nous allons le voir certains éléments ne sont pas maîtrisables par les opérateurs, d'autres si.

Il existe un premier élément de différenciation entre les opérateurs dont nous avons parlé dans la première partie de ce rapport concernant le transport de la télévision numérique. Certains opérateurs utilisent le concept de la « one box » (une seule box) pour proposer à la fois internet, TV, téléphone. Dans ce premier cas la TV est directement reliée à la box par l'intermédiaire d'un câble péritel ou HDMI. Aujourd'hui seul Bouygues Telecom sur son réseau DSL et Numéricâble utilise cette configuration. Les autres opérateurs, Orange, SFR et Free depuis sa Freebox V6 ont décidé de séparer les fonctions d'accès aux services transportés par l'ADSL au moyen d'une passerelle ou gateway à laquelle se connectent l'ordinateur et un décodeur pour la télévision laquelle est reliée au premier boîtier par Ethernet, WiFi ou CPL<sup>1</sup>. Cette seconde solution permet en particulier de pouvoir placer la TV où le consommateur le souhaite, et pas uniquement près d'une prise téléphone (c'est le problème des solutions « one box » de Numéricâble et Bouygues Telecom). Cependant, cette solution est également source de problèmes supplémentaires dans certains cas. En effet, comme nous l'avons dit, les deux boîtiers (celui pour la télévision et celui pour la réception ADSL) doivent être connectés entre eux. L'idéal est de les raccorder à l'aide d'un câble Ethernet (ce que proposent toujours les opérateurs), dans ce cas en effet, la liaison est optimale et il n'y a pas plus de problèmes qu'avec un seul terminal. Mais, bien peu de consommateurs font ce choix, car il n'est pas toujours aisé de raccorder les deux boîtiers, qui se trouvent souvent dans des pièces différentes, avec un câble. Le plus souvent (selon les opérateurs et les versions des terminaux) la liaison se fait par WiFi ou par CPL. Commençons par envisager le cas du WiFi. Le WiFi a une portée théorique de 100m, autrement dit entièrement suffisant pour relier les deux boîtiers dans la grande majorité des cas. Le premier problème du WiFi vient des barrières naturelles que l'on trouve dans les foyers (murs, meubles, etc.). C'est obstacles vont absorber une partie de l'énergie des ondes, atténuant ainsi le signal. Des paquets d'informations peuvent également se perdre. Il suffit donc

---

<sup>1</sup> Courant porteur en ligne : permet de construire un réseau informatique sur le réseau électrique d'une habitation ou d'un bureau.

qu'il y ait un ou plusieurs murs entre les deux boîtiers pour la qualité du flux TV baisse énormément<sup>1</sup>. Le problème c'est que cette fois, il n'y a pas de correction d'erreurs, pour l'opérateur, le paquet a bien été transmis à la passerelle réseau (le premier boîtier). Le CPL, qui a été développé pour permettre une liaison sans les problèmes du WiFi, n'est lui non plus pas exempt de complication. Par exemple les boîtiers CPL marchent souvent très mal lorsqu'ils sont reliés à des multiprises. En effet les autres appareils viennent parasiter et freiner le signal du CPL. Ainsi il suffit qu'un abonné ait branché ses boîtiers CPL sur des multiprises reliées à de nombreux autres appareils pour que le signal se dégrade et la qualité de service diminue en flèche. Ainsi un abonné avec une excellente qualité de ligne (bande passante importante, très faible latence et gigue, etc.) peut avoir de gros problème de réception TV à cause de son installation terminale.

Un autre élément fondamental est la qualité (en termes de performance) des décodeurs fournis par l'opérateur et intégré dans les terminaux. En effet lorsque le flux vidéo arrive au terminal de l'abonné, il faut réaliser la restitution de signaux compressés pour afficher la vidéo sur la télévision (c'est l'étape inverse de l'encodage). Nous avons vu précédemment que l'encodage d'un flux TV peut être plus ou moins performant (une même quantité d'information peut prendre plus ou moins de place selon la méthode de codage utilisée ; le MPEG-4 permet par exemple de diviser la bande passante nécessaire à la transmission d'un flux TV par deux par rapport au MPEG-2). De même, le décodage peut se faire de manière plus ou moins performante. Plus l'algorithme de décodage est performant, plus le décodage sera rapide et de bonne qualité. Au contraire, d'une puce bas de gamme pourra résulter un encodage de mauvaise qualité, ce qui détériorera la qualité d'image finale pour l'utilisateur. Très peu d'informations sont disponibles actuellement concernant la nature des puces de décodage utilisées dans les différents terminaux du marché. Quoi qu'il en soit, il existe une multitude de fabricants et de prix différents pour les puces de décodage vidéo. Les différentes box du marché ne se valent donc pas forcément et il serait très intéressant pour une étude future, d'approfondir la question des performances des puces de décodage vidéo.



FIGURE III-4 : PUCE SIGMA DESIGNS SMP8635 UTILISEE DANS LES FREEBOX V5

<sup>1</sup> Sans parler des problèmes d'interférences avec les appareils ménagers ou les voisins. En effet le Wi-Fi utilise une bande de fréquence étroite dite « Industrielle, Scientifique et Médicale » comprise entre 2,4 ou 5GHz qui est de plus en plus surchargée et peut parfois rentrer en interférence avec les fours à micro-ondes par exemple...

## f. Conclusion

Comme nous l'avons vu, il existe aujourd'hui pour les opérateurs quatre facteurs majeurs pour influencer sur la qualité (ou à contrario l'accessibilité) de leur service de TV numérique. Ces facteurs sont très facilement modifiables :

- Le type d'encodage (en orange dans la figure II-5 ci-dessous)
- Le débit d'encodage (en bleu dans la figure II-5 ci-dessous)
- Les paramètres d'encodage
- La correction d'erreur (en gris dans la figure II-5 ci-dessous)

Nous avons vu dans les tableaux précédents qu'elles étaient les différences concernant ces quatre facteurs entre les opérateurs. Les choix des opérateurs influent sur leur politique d'éligibilité. Nous les résumons dans le tableau ci-dessous (en vert dans la figure II-5 ci-dessous).

|   | Orange  | Bouygues   | SFR  | Numéricable   | Free  |
|---|---|--|--|---|---|
| Type d'encodage des flux vidéo                              | H264 <sup>1</sup> (avec couche de multiplexage MPEG2-TS) et MPEG-2 pour quelques chaînes. | H264 et de manière marginale MPEG-2 pour quelques chaînes. | H264 et de manière marginale MPEG-2 pour quelques chaînes. | MPEG-2 pour la SD et H264 pour la HD.                           | MPEG 2 en général et H264 pour les chaînes en « bas débit » |
| CBR <sup>2</sup> ou VBR <sup>3</sup>                        | CBR   | CBR  | CBR  | CBR   | CBR   |
| Débit d'encodage des flux vidéo SD <sup>4</sup> (débit IP)  | 2.7 Mbit/s (+ 20% de FEC)   | 2 à 2.5 Mbit/s selon les chaînes.                          | 2.4 Mbit/s   | 3 à 8 Mbit/s selon les chaînes (la plupart entre 6 et 8 Mbit/s) | 1,9 Mbit/s en H264 et 3,5 Mbit/s en MPEG-2                  |
| Débit d'encodage des flux vidéo HD <sup>5</sup> (débit IP)  | 6.5 Mbit/s (+ 12.5% de FEC)   | De 5.5 à 5.8 Mbit/s selon les chaînes.                     | 6 Mbit/s   | 6 à 18 Mbit/s selon les chaînes                                 | 5.8 Mbit/s  |
| Débit d'encodage des flux vidéo SD+ <sup>6</sup> (débit IP) | 6 Mbit/s (pas de FEC. Disponible sur fibre uniquement)                                    | 8 Mbit/s   | NC   | ***   | NC  |

<sup>1</sup> Identique au MPEG-4.

<sup>2</sup> Constant Bit Rate. Classe de service offrant un débit constant garanti, permettant de transporter des flux, tels que la vidéo ou la voix, qui requièrent un contrôle strict de synchronisation et de hautes performances en qualité de service.

<sup>3</sup> Contrairement au CBR le VBR (Variable Bit Rate) fait varier la quantité de données par segment de temps. Le VBR permet d'encoder dynamiquement avec un débit plus ou moins grand selon la complexité de l'image sur une vidéo.

<sup>4</sup> Définition Standard (Standard-Definition).

<sup>5</sup> Haute définition.

<sup>6</sup> SD sur les réseaux IP en FTTx, lesquels permettent des débits d'encodage supérieurs.



|  |  |   |   |   |  |
|--|--|---|---|---|--|
| Débit d'encodage des flux vidéo HD+<br><sup>1</sup> (débit IP) | 12 Mbit/s (pas de FEC. Disponible sur fibre uniquement)  | 16 Mbit/s   | 12 Mbit/s   | ***   | 6.8 Mbit/s   |
| Type d'encodage des flux audio                                 | MPEG-1 Layer II<br>Passage en HE-AAC en novembre.  | MPEG-1 Layer II   | MPEG-1 Layer II et à terme HE-AAC   | MPEG-1 Layer II, MPEG-2, AC3  | MPEG / AAC / HE-AAC  |
| Débit d'encodage des flux audio sur xDSL                       | 64 kbit/s mono, 128kbit/s stéréo, 384kb/s AC3 (HD). En fonction de la chaîne, disponibilité de deux canaux : 2xstéréo, AC3 + stéréo ou 2xAC3 | 192 kbit/s  | 192 kbit/s (et à terme 80 kbit/s).  | 128 à 392 kbit/s, indépendants de la définition d'image, bien que l'AC3 soit plus utilisé en HD qu'en SD                          | 128kbit  |
| Débit d'encodage des flux audio sur fibre                      | Idem que sur xDSL  | 376 kbit/s en HD+   | 400 à 500 kbit/s (Dolby Digital 5.1)  | ***   | 128kbit  |
| FEC <sup>2</sup>   | OUI (toujours, pour tous les abonnés éligibles TV).  | OUI (si le débit de l'abonné le lui permet)   | NON   | ***   | oui - INP 1  |
| Retransmission des paquets en cas d'erreur ou de perte         | NC   | NC  | OUI (PHY-R et PURE PIXEL)   | ***   | oui - PHYR (broadcom)  |
| Politique d'éligibilité au service TV                          | Maximum 44 dB d'affaiblissement soit un débit théorique minimum de <b>4.6 Mbit/s (ATM)</b> . Baisse envisagée fin 2012                       | Maximum 48dB d'affaiblissement soit un débit théorique minimum de <b>3.5 Mbit/s(ATM)</b> .                                | Maximum 48dB d'affaiblissement soit un débit théorique minimum de <b>3.5 Mbit/s (ATM)</b> .                               | Tous les clients raccordés aux réseaux câble sont éligible au service TV quel que soit la longueur de la ligne.                   | <b>2.5 Mbit/s ATM</b> conseillé <sup>3</sup> (pas de politique d'éligibilité). |
| Flux dynamique   | NC   | OUI. Par défaut le terminal sélectionne le flux SD. C'est au client de sélectionner le flux HD si sa ligne le lui permet. | OUI. Par défaut le terminal sélectionne le flux SD. C'est au client de sélectionner le flux HD si sa ligne le lui permet. | Numéricâble propose à tous ses clients les flux HD et SD sur deux canaux différents. Au client de choisir lorsque c'est possible. | Par le DSLAM, en fonction du débit disponible peut être forcé par le client    |

FIGURE III-5: TABLEAU OPERATEURS QOS TV (COMPLET)

Nous pouvons faire un premier classement des opérateurs dans l'ordre décroissant de qualité de service (ou de la même façon dans l'ordre décroissant d'accessibilité du service). Bien sûr il faut garder en tête que Numéricâble est un cas à part, car il utilise une boucle locale en câble coaxial ne présentant pas les mêmes contraintes que la paire de cuivres (atténuation en particulier).

<sup>1</sup> HD sur les réseaux IP en FTTx, lesquels permettent des débits d'encodage supérieurs.

<sup>2</sup> Forward Error Correction (Code correcteur en Français).

<sup>3</sup> <http://www.free.fr/assistance/2260-conditions-et-nombre-de-chaines-pouvant-etre-recues.html>



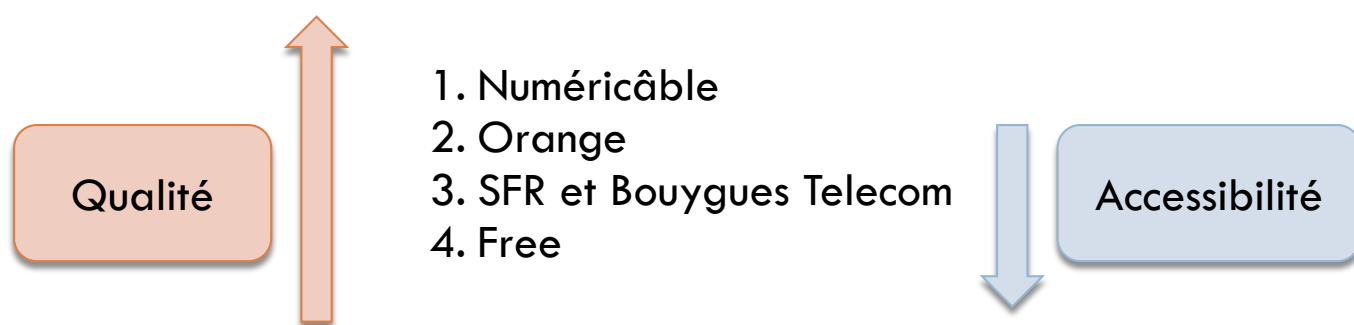


FIGURE III-6 : CLASSEMENT DES OPERATEURS EN MATIERE DE QOS-TV

Ainsi Numéricâble mise à part, lequel combine à la fois qualité de service optimale et éligibilité du service TV à tous les foyers raccordés au réseau câble<sup>1</sup>, les autres opérateurs ne peuvent pas se démarquer à la fois dans la qualité et dans l'accessibilité. Free qui a la moins bonne qualité de service est par contre l'opérateur qui propose le service TV au plus grand pourcentage de la population. A contrario, Orange est le meilleur opérateur ADSL en ce qui concerne la qualité du service TV, est aussi le dernier opérateur en termes d'accessibilité. Comme nous le disions au début de cette partie, il n'y a pas de meilleure stratégie que d'autres. Du fait des contraintes du xDSL, on ne peut reprocher aux opérateurs de favoriser la qualité plutôt que l'accessibilité ou l'inverse. Le problème aujourd'hui vient davantage du manque d'information disponible pour les consommateurs. En effet rien ne permet aujourd'hui à consommateur de départager réellement les opérateurs sur cette question de la qualité TV. Ainsi pour quelqu'un qui habiterait loin du DSLAM, qui ne posséderait qu'une petite télévision, le plus important est d'avoir accès au service avant tout, la qualité n'est qu'un critère secondaire. Pour ce consommateur, pouvoir profiter de la télévision chez Free alors qu'il n'est pas éligible chez les autres opérateurs est une bonne chose. Au contraire dans le cas d'une personne qui a investi dans un grand téléviseur plasma pour profiter d'une qualité d'image optimal, le plus important est d'avoir la meilleure qualité de service possible. Dans ce cas, l'offre de Numéricâble est clairement la plus adaptée.

Il faudra donc à l'avenir donner toute l'information nécessaire aux consommateurs pour que chacun puisse choisir l'offre qui répond le plus à ses besoins.

Ce premier classement se concentre sur des critères purement objectifs liés à la qualité de service (encodage, correction des erreurs, etc.). Mais comment savoir si ces différences dans les paramètres objectifs ont réellement une influence sur la satisfaction de l'utilisateur finale ? D'autres paramètres, plus subjectifs, sont également très importants pour évaluer la qualité globale d'un service de télévision numérique. Dans ce cas-là, comme nous l'avons expliqué en introduction de cette seconde partie du rapport, on parle souvent de qualité d'expérience utilisateur (QoE). Ces facteurs subjectifs sont l'objet du paragraphe suivant.

<sup>1</sup> Cf. I.11 « La télévision par câble ».

### 3. Paramètres techniques de QoE.

#### Facteurs supplémentaires à prendre en compte liés à la QoE :

- L'interface TV proposée par l'opérateur (ergonomie, fluidité, fonctions, etc.).
- Le temps de zapping.
- La désynchronisation avec le direct.

Un autre facteur qui semble important aux yeux de votre rapporteur est la qualité de l'interface TV proposée par l'opérateur à l'utilisateur pour sélectionner une émission, naviguer entre les chaînes, choisir un programme de VOD ou encore programmer un enregistrement. En effet selon l'ITU<sup>1</sup> l'ergonomie, le design, la fluidité et la facilité d'utilisation de l'interface TV sont pour beaucoup d'utilisateur aussi important que la qualité du flux TV lui-même. Un flux vidéo de qualité quelconque, mais intégré dans une interface TV très aboutie peut aboutir à une meilleure satisfaction client qu'un flux vidéo de qualité supérieur dans une interface TV médiocre. Il est donc très important de prendre en considération tout autant la qualité du flux TV lui-même que « l'habillage » de l'interface TV. D'ailleurs la tendance du marché de la télévision numérique confirme l'hypothèse de l'ITU : de plus en plus, les opérateurs qui sortent de nouvelles versions de leurs terminaux communiquent autant sur l'ergonomie et le design de leur interface TV que sur le contenu lui-même<sup>2</sup>. L'évolution dans le temps des interfaces TV démontre effectivement une prise de conscience des opérateurs sur leur importance pour la satisfaction client (cf figure 2.3 et 2.4 page suivante).

Le second facteur à prendre en considération est le temps de zapping. Intuitivement le temps de zapping est la durée entre le moment où le téléspectateur appuie sur le bouton pour changer de chaîne et l'instant où la chaîne souhaitée est affichée à l'écran. Il est évident que la satisfaction client est directement reliée à la longueur de ce temps de zapping : plus le temps est long moins le client sera satisfait. On pourrait donc mesurer ce temps de zapping chez les différents opérateurs pour les classer selon ce critère (C'est d'ailleurs ce que l'entreprise IP Label fait aujourd'hui). Cependant en réalité, le temps de zapping n'est pas un facteur purement objectif. En effet l'important est la perception de ce temps par l'utilisateur. En QoE on montre qu'une même durée peut être ressentie comme plus ou moins longue par les téléspectateurs. Cette perception dépend de ce qu'on appelle communément le « scénario de zapping ». Ce scénario décrit la nature de la transition entre deux chaînes. La transition

---

<sup>1</sup> Recommandation ITU-T G.1080

<sup>2</sup> Cf. Les campagnes publicitaires pour la « Neuf-Box évolution » qui promettait une interface révolutionnaire en 3 dimensions. Idem avec l'offre Freebox « Révolution » qui était censée proposer l'interface TV la plus conviviale et intuitive.

entre les deux chaînes peut se faire de multiple façon. Par exemple on peut imaginer qu'au moment où le téléspectateur appui sur le bouton pour changer de chaîne, l'écran devient noir jusqu'au moment où le nouveau flux a été chargé depuis le NRA. Une autre possibilité est un effet de fondu entre les deux chaînes, avec pourquoi pas un sablier qui indique que la transition est bien en cour, etc. Il est possible pour les opérateurs de trouver un scénario de zapping qui « minimise » le temps de zapping perçu (c'est à dire sa perception intrinsèquement subjective, par les consommateurs). Il existe aujourd'hui une forte expertise en la matière chez les ingénieurs d'Orange Labs à Rennes.



FIGURE III-7 : INTERFACE TV SUR FREEBOX DANS LES ANNEES 2002-2010

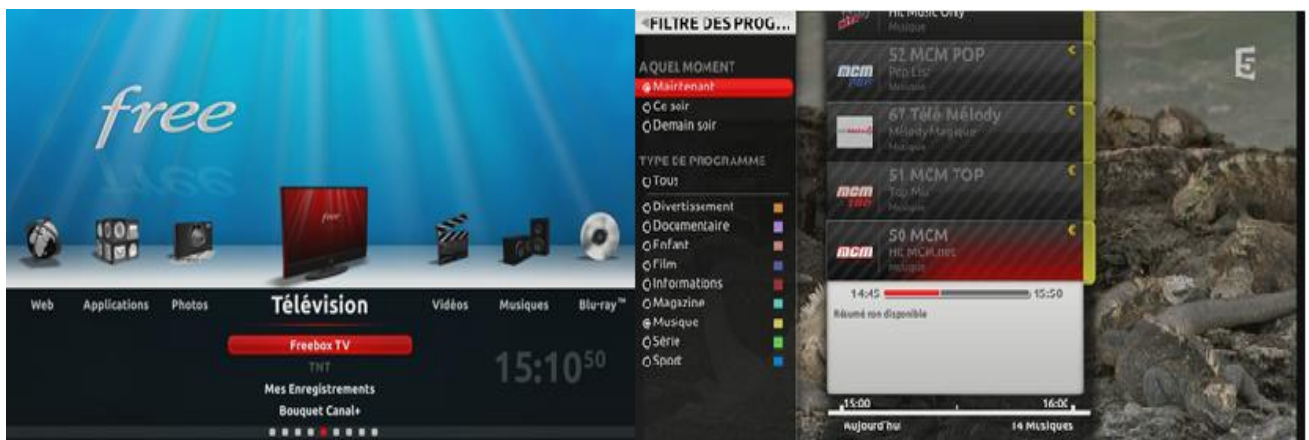


FIGURE III-8 : INTERFACE TV SUR LA DERNIERE VERSION DE LA FREEBOX (DEPUIS 2010)

Le dernier facteur à prendre en compte est la synchronisation, ou plutôt la désynchronisation, avec le direct. En effet, les émissions sur xDSL ne sont pas diffusées simultanément sur la ligne, mais sont accessibles sur un serveur par un protocole de diffusion de flux multimédia spécifique comme Real Time Streaming Protocol ce qui conduit à un décalage de quelques secondes entre l'image reçue par TNT et celle transitant par le boîtier xDSL. Ce décalage n'est pas nécessairement le même chez les opérateurs. De plus, les performances réseau, les puces de décodage vidéo et les puces ADSL peuvent augmenter

encore ce décalage. Ce décalage n'est pas un problème dans la majorité des cas. Il ne devient qu'un élément pertinent lors des émissions en direct, par exemple les manifestations sportives où il est peut être gênant pour le téléspectateur d'être en retard sur le direct.

#### 4. Conclusion générale sur la qualité TV

En conclusion nous avons relevé quatre facteurs de QoS principaux à prendre en considération ainsi que trois autres supplémentaires plus proche de la QoE afin d'évaluer les offres de télévision numérique et comparer les opérateurs entre eux.

| QOS   | QOE  |
|---|--|
| <p><u>Quatre facteurs majeurs sur lesquels les opérateurs peuvent influencer facilement:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Type d'encodage</li> <li>• Débit d'encodage</li> <li>• Paramètres d'encodage</li> <li>• Correction des erreurs</li> </ul> <p><u>auxquels viennent se rajouter deux facteurs également maîtrisables :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance réseau : latence et gigue.</li> <li>• Performance du terminal TV (box et décodeur)</li> </ul> | <p><u>Quatre facteurs majeurs sur lesquels les opérateurs peuvent influencer facilement:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ergonomie, design et fonctions de l'interface TV</li> <li>• Temps de zapping.</li> <li>• Désynchronisation avec le direct</li> </ul> |

FIGURE III-9 : TABLEAU RECAPITULATIF SUR LA QOS ET LA QOE DU SERVICE DE TELEVISION NUMERIQUE

## IV. Conclusion et perspectives

La télévision a connu ses dernières années un phénomène de multiplication des moyens de diffusion. D'abord cantonné aux ondes hertziennes et au câble, le passage au numérique a permis à la télévision de conquérir tous les réseaux de transmissions : les réseaux IP, le satellite et plus récemment les réseaux mobiles 3G. Le passage au numérique s'est fait globalement au bénéfice des consommateurs : plus de chaînes avec une meilleure qualité d'image.

Néanmoins le service de télévision s'est également complexifié avec le passage au tout numérique. Alors qu'auparavant une seule antenne sur le toit suffisait à la réception de la télévision, aujourd'hui les offres par câble, internet et satellite ont grandement complexifié les procédures de réception des flux TV pour les consommateurs (décodeur nécessaire, abonnement aux bouquets de chaînes, VOD). Surtout, alors que les consommateurs étaient habitués avec la télévision hertzienne à une qualité de service quasi homogène sur l'ensemble du territoire national, la télévision numérique (et en particulier la télévision par xDSL) marque une rupture importante avec le passé, car la qualité de service et la qualité d'expérience utilisateur peut varier grandement selon le moyen de diffusion, la technologie utilisée et surtout la longueur et la qualité de la ligne téléphonique. Alors que de plus en plus de foyers utilisent leur connexion xDSL pour recevoir le signal TV, les opérateurs sont face à un compromis difficile, entre qualité et accessibilité du service. Comme nous l'avons expliqué en détail, les opérateurs xDSL ne peuvent aujourd'hui augmenter la qualité des flux vidéo autant qu'ils le voudraient, car le phénomène d'affaiblissement ainsi que le vieillissement de la boucle local cuivre empêcherait un trop grand nombre d'abonnés de pouvoir profiter de la télévision numérique. Chacun des opérateurs DSL a aujourd'hui choisi ce qui lui semblait le meilleur compromis, sans pour autant communiquer quoi que ce soit aux consommateurs, en matière de qualité TV ou de politique d'éligibilité.

Face à ces problématiques, le rapprochement des consommateurs des réseaux fibre optique, que ce soit par l'intermédiaire du protocole IP (FTTx) ou des fréquences radio (câble), est aujourd'hui l'unique solution pour s'affranchir des limitations précédentes. Plus que des débits plus importants les réseaux « fibre jusqu'à l'abonné » garantissent surtout une grande stabilité et une QoS homogène entre les consommateurs. C'est cette stabilité qui permettra de garantir à tous, peu importe l'éloignement, une qualité de service et une qualité d'expérience optimale et quasi constante dans le temps. A ce sujet, le déploiement du VDSL2 par les opérateurs ne permettra en rien d'améliorer la situation actuelle en matière de qualité de la télévision numérique par IP. Le VDSL2 permet uniquement de fournir aux abonnés ayant déjà une très bonne qualité de ligne, des débits encore meilleurs. La « fracture numérique » qui empêche déjà actuellement les opérateurs d'augmenter la qualité de leur service de télévision numérique avec l'ADSL et l'ADSL2+ n'est que renforcée avec le VDSL2.

## V. Annexes

### 1. État des lieux en matière d'évaluation de la QoE du service de TV numérique.

#### a. Stratégies subjectives.

La qualité d'expérience utilisateur (QoE) ou qualité d'usage est un facteur important du point de vue d'un Fournisseur d'Accès à Internet (FAI), car c'est une indication du niveau de satisfaction des clients. Mais mesurer cette qualité d'usage est une tâche complexe. Actuellement, la méthode la plus fiable d'évaluation de la qualité d'usage d'un service vidéo est la conduite de tests subjectifs de qualité. Ces tests consistent en un groupe d'observateurs qui ont comme la tâche l'évaluation de la qualité de séquences vidéo généralement dégradées par le codage, les erreurs de transmission ou les post-traitements.

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>Acceptabilité</b> | Donne le pourcentage de sujets considérant la séquence à tester comme acceptable.  |
| <b>Préférence</b>    | Donne le pourcentage de sujets préférant une séquence à tester par rapport à une autre ou plusieurs autres.  |
| <b>Classement</b>    | Donne le classement entre plusieurs cas à tester sans mesurer les écarts entre les différents cas.   |
| <b>DSCQS</b>         | Donne le Mean Opinion Score (MOS) pour chaque cas à tester d'une ou plusieurs solutions de codage.   |
| <b>SAMVIQ</b>        | Donnant le même résultat que le DSCQS mais solution plus adaptée pour le multimédia (utilisé par Orange). Donne un MOS.  |
| <b>ACR</b>           | Absolute Category Ranking. Donne un MOS.   |
| <b>DSIS</b>          | Évaluation de la dégradation d'une solution de codage. Mesure l'écart entre la séquence traitée et la séquence de référence et la gêne générée sur l'échelle de qualité continue suivante (imperceptible, perceptible, mais peu gênante, perceptible et très gênante). |
| <b>SSCQE</b>         | Donne un MOS variable pour des séquences de longue durée.  |

FIGURE V-1 : LES STRATEGIES SUBJECTIVES D'EVALUATION DE LA QOE

## MOS (Mean Opinion Score)

Le Mean Opinion Score (MOS) ou Note d'opinion est une note donnée à une séquence vidéo compressée pour caractériser sa qualité relative à la version d'origine. La note peut varier entre 0 (très mauvais) et 5 (excellent, comparable à la version d'origine). Il est défini par l'UIT-T comme la norme « P.800 : Méthodes d'évaluation subjective de la qualité de transmission ».

Le principe de calcul du MOS est basé sur un sondage d'un échantillon supposé représentatif de la population des utilisateurs. Les personnes constituant l'échantillon sont invitées à écouter un signal (souvent de la voix), puis son équivalent codé-décodé. Après chaque écoute, l'auditeur donne une note sanctionnant la qualité qu'il a perçue. La moyenne des notes fournies par la population constitue le MOS.

## DSCQS (Double Stimulus Continuous Quality Scale).

Évaluation globale de la qualité subjective de séquences vidéos de courte durée (8 à 20 secondes, classiquement 10s). Méthode normalisée pour la TV (ITU-R BT.500) Notation sur une échelle continue (0 à 100) annotée des items de qualité suivants (mauvais, médiocre, assez bon, bon, excellent)

Les échantillons sont présentés en paires : la référence et l'altéré. Des sujets sont invités à évaluer la qualité des deux échantillons (et non pas seulement l'échantillon altéré par rapport à la référence comme dans DCR), mais les sujets ne savent pas quelle est la référence. Les sujets sont invités à évaluer la qualité globale d'échantillon de chaque présentation en insérant une marque sur une échelle verticale.

|           | 12 |   | 13 |   | 14 |   | 15 |   | 16 |   | 17 |   |
|-----------|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|
|           | A  | B | A  | B | A  | B | A  | B | A  | B | A  | B |
| Excellent |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |
| Good      |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |
| Fair      |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |
| Poor      |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |
| Bad       |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |

FIGURE V-2 : FORMULAIRE D'EVALUATION DE LA QUALITE EN UTILISANT DES ECHELLES CONTINUES (DSCQS).

## SAMVIQ (Subjective Assessment Methodology for Video Quality)

La plupart des méthodes d'évaluations de la qualité vidéo ont jusqu'à présent été effectuées avec des échantillons provenant de vidéo d'émissions de télévision. Mais avec la popularité croissante des services de diffusion vidéo pour PC et terminaux mobiles, il est apparu un besoin pour le développement de méthodes d'évaluation de la qualité qui soient compatibles avec les différents formats vidéo et différents environnements d'écoute. Dans la méthode SAMVIQ énoncée dans la recommandation UIT-R BT.1788, un environnement d'évaluation est préparé où il est possible de lire vidéo standard ou d'évaluation sur un écran d'ordinateur.

## SSCQE (Single Stimulus Continuous Quality Evaluation).

Évaluation de la qualité subjective de séquences vidéo de longue durée (3 à 30 minutes). Méthode normalisée pour la TV (ITU-R BT.500). Notation sur une échelle continue (0 à 100) annotée des items de qualité suivants (mauvais, médiocre, assez bon, bon, excellent). La dégradation et la qualité d'une vidéo numérique varient dans le temps en fonction de la complexité (entropie) des images. La méthode SSCQE énoncée dans la recommandation UIT-R BT.500-11 est un processus d'évaluation continu de la qualité qui n'utilise pas de vidéo standard. Au lieu de cela, les sujets estiment de manière continue la qualité du flux vidéo en déplaçant un curseur.

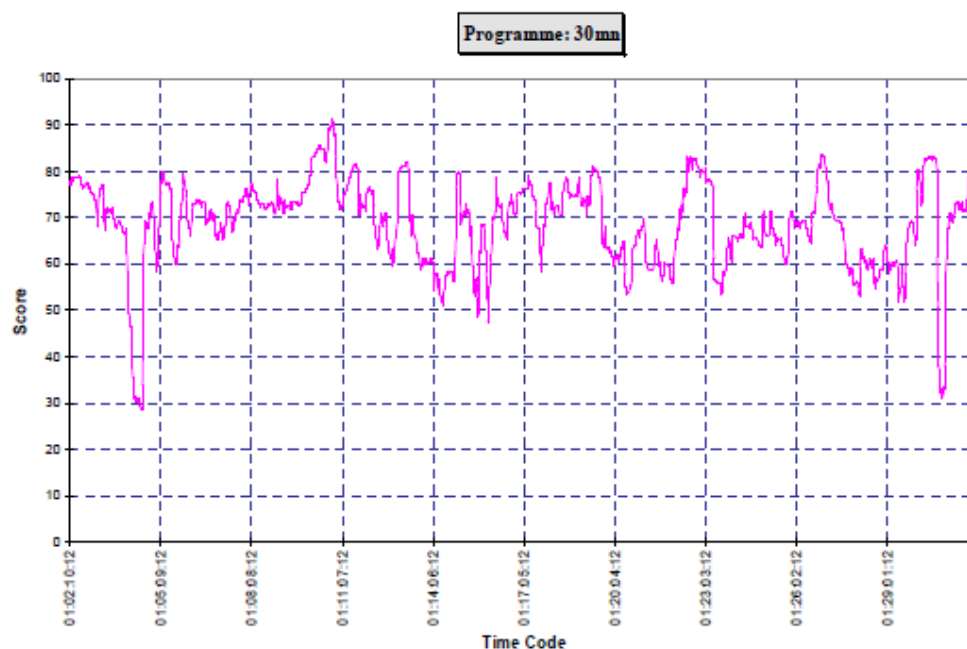


FIGURE V-3 : RESULTAT DE L'EVALUATION DE LA QUALITE D'UNE VIDEO NUMERIQUE PAR LA METHODE SSCQE.



## **b. Stratégies objectives.**

Les stratégies subjectives d'évaluation de la QoE étudiées dans la partie précédente sont extrêmement chères en coût et en temps. Elles supposent de convoquer un nombre relativement grand d'auditeurs, de mettre à leur disposition un équipement audiovisuel adapté et standardisé, de les former à la bonne façon d'attribuer une note qui soit exploitable, et de collecter et consolider les résultats. Cela a créé une forte demande la création de modèles mathématiques permettant de prédire la QoE (c'est-à-dire la moyenne des notes fixées par un groupe d'auditeurs si on avait mise en place une stratégie subjective) en fonction de paramètres objectifs et mesurables (que nous avons étudié en détail dans la partie I.2 *Paramètres techniques de QoS* du présent rapport) par exemple :

- L'encodage
- La latence et la gigue
- La perte de paquets et la correction des erreurs.

À partir de ces différents paramètres de QoS, et grâce à des modèles complexes, on peut essayer d'estimer, ou plus exactement de prédire la QoE (intrinsèquement, subjective par définition) du service TV. Les méthodes objectives, reposant sur des modèles prédictifs, permettent une mesure en temps réel de la QoE, contrairement aux stratégies subjectives qui sont réalisées qu'à posteriori. Ces modèles restent encore au stade de recherche et développement voir de recherche en laboratoire. Les méthodes de prédictions de la QoE en fonction de la QoS sont néanmoins une piste très prometteuse pour améliorer la qualité globale de la télévision numérique et répondre au mieux aux demandes des clients. Nous vous proposons dans la suite une synthèse sur les différentes méthodes disponibles aujourd'hui en la matière. Les stratégies d'évaluation objective de la QoE peuvent être classées en trois catégories. Ces catégories sont définies dans la recommandation UIT-T J.143. Dans cette section nous donnerons un aperçu de chaque modèle d'évaluation, et nous détaillerons les avantages et les inconvénients de chacun (voir la figure 2.3.1).

### **Modèle avec référence absolue (Full référence – FR)**

Le modèle FR (Full référence) est un procédé d'évaluation objective d'une vidéo dégradée (du fait de la transmission et de l'encodage) en la comparant avec une vidéo de référence (vidéo source sans dégradation). Puisque le modèle FR compare la source vidéo avec la vidéo traitée, elle fournit une évaluation objective de haute précision de la qualité. Le principal inconvénient est qu'elle nécessite une très grande quantité de données à partir de la séquence vidéo originale pour faire une comparaison valable, et implique donc une puissance de calcul très importante. Le modèle FR est le mieux adapté pour des mesures de qualité vidéo en amont sur le réseau (sur tête de réseau par exemple).

### Modèle avec référence réduite (Reduce Référence – RR)

Le modèle RR évalue objectivement la qualité vidéo en comparant l'image traitée soumise à une distorsion par codage et par pertes de transmission avec une petite quantité d'informations extraites de la vidéo source (signature). Le modèle RR est moins précis que le modèle FR, mais permet néanmoins d'obtenir de bon résultat sur la qualité du signal vidéo. Le modèle RR peut mesurer la qualité vidéo au niveau des nœuds du réseau (donc plus en aval que le modèle FR).

### Modèle sans référence (No Référence – NR)

Le modèle NR évalue objectivement la qualité vidéo sur la base des trames traitées soumises à une distorsion de codage et les pertes de transmission seule. Puisque la méthode NR ne nécessite aucune information sur la source vidéo, elle peut être appliqué très en aval sur les réseaux (au plus près des foyers des consommateurs). Cependant, puisque le modèle n'utilise aucune information sur la source vidéo, elle est moins précise dans l'évaluation de la qualité vidéo que les modèles FR et RR. Le modèle sans référence permet une surveillance continue de la qualité dans l'équipement terminal de lecture vidéo dans les foyers des utilisateurs.

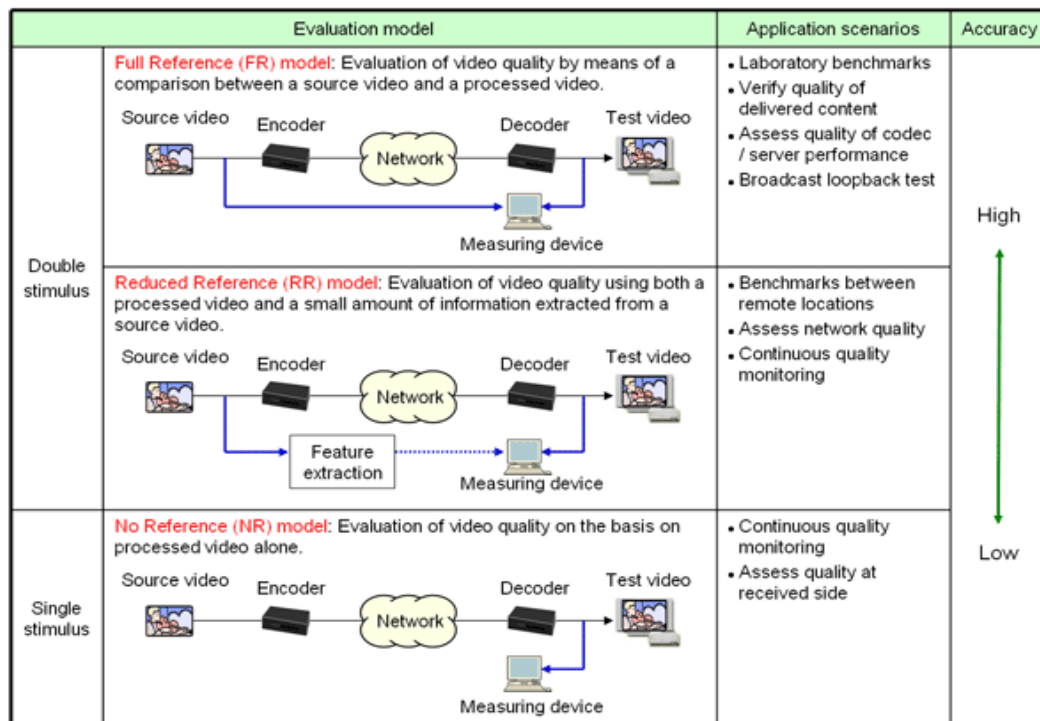


FIGURE V-4 : CATEGORIES DES METHODES OBJECTIVES D'EVALUATION DE LA QOE

### c. Conclusion

|                        | Avantages  | Inconvénient  |
|------------------------|--|---|
| stratégies subjectives | Les stratégies subjectives permettent de réellement prendre en compte la satisfaction du client final. On s'abstrait totalement des considérations techniques pour se concentrer sur la qualité ressentie par le téléspectateur (on mesure le résultat visible).   | La mise en œuvre d'une évaluation subjective de la QoE est chère en temps et en énergie. Elle est également extrêmement coûteuse. Elle suppose de convoquer un nombre relativement grand d'auditeurs, de mettre à leur disposition un équipement audiovisuel adapté, de les former à la bonne façon d'attribuer une note qui soit exploitable, et de collecter et consolider les résultats.. En dehors de toute norme méthodologique, beaucoup de chiffres sont produits dans de mauvaises conditions expérimentales. Par exemple, on trouve des sites Internet proposant à l'utilisateur de participer au vote. Dans ce cas la note prend en compte la qualité du codec, mais aussi celle de l'équipement audio de l'internaute et de son environnement au moment du test. |
| stratégies objectives  | Elles permettent de prédire la QoE de manière algorithmique (par comparaison ou non) ou paramétrique sans avoir à réunir un panel de consommateur pour évaluer la qualité d'une vidéo. Elles permettent aussi une automatisation de la procédure d'évaluation et une mesure de la QoE en temps réel si nécessaire. | Standardisation des modèles et algorithmes encore largement inachevée. Les modèles donnent parfois de mauvaises prédictions de la QoE (voir figure 3.8).  |

FIGURE V-5 : TABLEAU RECAPITULATIF DES METHODE D'EVALUATION DE LA QOE

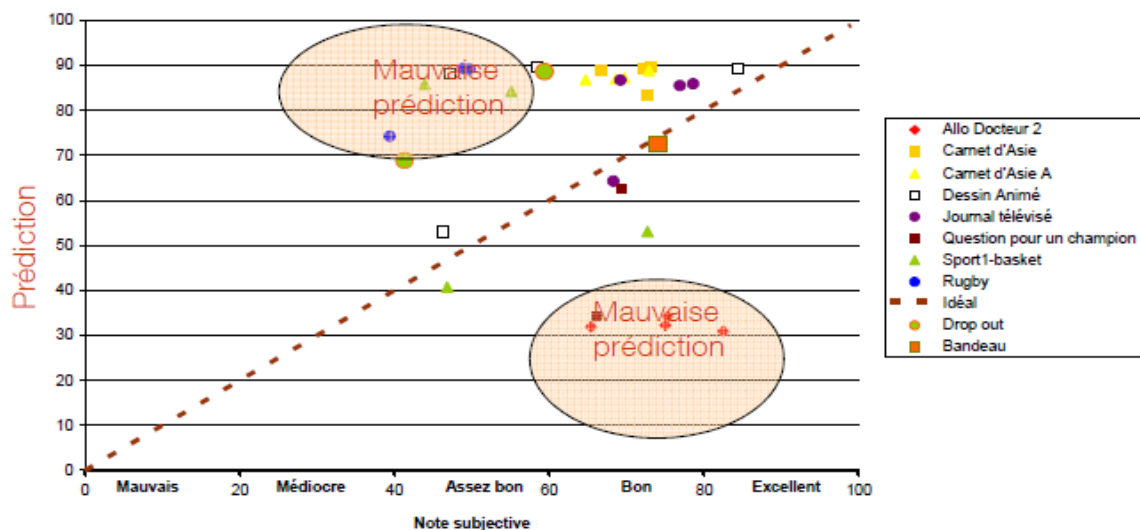


FIGURE V-6 : CATEGORIES DES METHODES OBJECTIVES D'EVALUATION DES MODELES PREDICTIFS DE LA QOE ENCORE AU STADE DE R&D : LES PREDICTIONS NE SONT PAS TOUJOURS EXACTES (SOURCE : ORANGE LABS RENNES)

## 2. Les artefacts

Le tableau ci-dessous récapitule les différents artefacts pouvant apparaître sur la télévision. Les artefacts peuvent être globalement divisés en deux catégories : artefacts spatiaux et artefacts temporels. Les artefacts spatiaux provoquent une diminution de qualité d'image et de la résolution d'écran, et son effet typique visible pour le consommateur sur la qualité vidéo est de créer une distorsion de la mosaïque de pixels (formant alors de gros « blocs » à l'écran que l'on appelle blocs de distorsion ou macro blocs). Les artefacts temporels se manifestent typiquement par une réduction des taux d'image par seconde produisant une image saccadée et une perte de finesse dans les objets en mouvement. Si la distorsion temporelle est trop importante, l'image peut même se figer totalement.

| Type de dégradation.   |  | Conséquence visible sur le signal TV   | Dégradation du fait de l'encodage vidéo. | Dégradation du fait de la transmission sur réseau |
|------------------------|--|--|--|---|
| Distorsion spatiale.   | Diminution de la résolution, flou.     | des bords flous et une réduction de la résolution d'image.                                       | Oui                                      |   |
|                        | Distorsion de « bloc ».                | Distorsion dans la forme d'un motif géométrique sur l'image (mosaïque).                          | Oui                                      | Oui   |
|                        | Faux contour.                          | Faux contours apparaissant dans les parties où il y a un changement de couleur ou de luminosité. | Oui                                      |   |
| Distorsion temporelle. | Saccades.                              | Lissage du mouvement difficile d'où une image apparaissant saccadée.                             | Oui                                      | Oui   |
|                        | Tremblement.                           | Des fluctuations dans le niveau d'intensité provoquent un tremblement de l'image.                | Oui                                      |   |
|                        | Flou cinétique (ou flou de mouvement). | Les régions en mouvement apparaissent floues.  | Oui                                      |   |
|                        | Interruptions et les images gelées.    | Image gelées et interruptions de manière aléatoire et intermittente.                             |  | Oui   |

FIGURE V-7 : ARTEFACTS VIDEO SUR LA TELEVISION NUMERIQUE

### 3. Tableau récapitulatif des offres de TV numérique en France métropolitaine et des facteurs QoS associés.

|   | Orange   | Bouygues   | SFR  | Numéricâble  | Free  |
|---|--|--|--|--|---|
| Type d'encodage des flux vidéo                              | H264 <sup>1</sup> (avec couche de multiplexage MPEG2-TS) et MPEG-2 pour quelques chaînes.  | H264 et de manière marginale MPEG-2 pour quelques chaînes. | H264 et de manière marginale MPEG-2 pour quelques chaînes. | MPEG-2 pour la SD et H264 pour la HD.  | MPEG 2 en général et H264 pour les chaînes en « bas débit » |
| CBR <sup>2</sup> ou VBR <sup>3</sup>                        | CBR  | CBR  | CBR  | CBR  | CBR   |
| Débit d'encodage des flux vidéo SD <sup>4</sup> (débit IP)  | 2.7 Mbit/s (+ 20% de FEC)  | 2 à 2.5 Mbit/s selon les chaînes.                          | 2.4 Mbit/s   | 3 à 8 Mbit/s selon les chaînes (la plupart entre 6 et 8 Mbit/s)  | 1,9 Mbit/s en H264 et 3,5 Mbit/s en MPEG-2                  |
| Débit d'encodage des flux vidéo HD <sup>5</sup> (débit IP)  | 6.5 Mbit/s (+ 12.5% de FEC)  | De 5.5 à 5.8 Mbit/s selon les chaînes.                     | 6 Mbit/s   | 6 à 18 Mbit/s selon les chaînes  | 5.8 Mbit/s  |
| Débit d'encodage des flux vidéo SD+ <sup>6</sup> (débit IP) | 6 Mbit/s (pas de FEC. Disponible sur fibre uniquement)   | 8 Mbit/s   | NC   | ***  | NC  |
| Débit d'encodage des flux vidéo HD+ <sup>7</sup> (débit IP) | 12 Mbit/s (pas de FEC. Disponible sur fibre uniquement)  | 16 Mbit/s  | 12 Mbit/s  | ***  | 6.8 Mbit/s  |
| Type d'encodage des flux audio                              | MPEG-1 Layer II<br>Passage en HE-AAC en novembre.  | MPEG-1 Layer II  | MPEG-1 Layer II et à terme HE-AAC                          | MPEG-1 Layer II, MPEG-2, AC3   | MPEG / AAC / HE-AAC   |
| Débit d'encodage des flux audio sur xDSL                    | 64 kbit/s mono, 128kbit/s stéréo, 384kb/s AC3 (HD). En fonction de la chaîne, disponibilité de deux canaux : 2xstéréo, AC3 + stéréo ou 2xAC3 | 192 kbit/s   | 192 kbit/s (et à terme 80 kbit/s).                         | 128 à 392 kbit/s, indépendants de la définition d'image, bien que l'AC3 soit plus utilisé en HD qu'en SD | 128kbit   |

<sup>1</sup> Identique au MPEG-4.

<sup>2</sup> Constant Bit Rate. Classe de service offrant un débit constant garanti, permettant de transporter des flux, tels que la vidéo ou la voix, qui requièrent un contrôle strict de synchronisation et de hautes performances en qualité de service.

<sup>3</sup> Contrairement au CBR le VBR (Variable Bit Rate) fait varier la quantité de données par segment de temps. Le VBR permet d'encoder dynamiquement avec un débit plus ou moins grand selon la complexité de l'image sur une vidéo.

<sup>4</sup> Définition Standard (Standard-Definition).

<sup>5</sup> Haute définition.

<sup>6</sup> SD sur les réseaux IP en FTTx, lesquels permettent des débits d'encodage supérieurs.

<sup>7</sup> HD sur les réseaux IP en FTTx, lesquels permettent des débits d'encodage supérieurs.

|  |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|
| Débit d'encodage des flux audio sur fibre              | Idem que sur xDSL   | 376 kbit/s en HD+   | 400 à 500 kbit/s (Dolby Digital 5.1)  | ***   | 128kbit   |
| FEC <sup>1</sup>                                       | OUI (toujours, pour tous les abonnés éligibles TV).   | OUI (si le débit de l'abonné le lui permet)   | NON   | ***   | oui - INP 1   |
| Retransmission des paquets en cas d'erreur ou de perte | NC  | NC  | OUI (PHY-R et PURE PIXEL)   | ***   | oui - PHYR (broadcom)   |
| Politique d'éligibilité au service TV                  | Maximum 44 dB d'affaiblissement soit un débit théorique minimum de <b>4.6 Mbit/s (ATM)</b> .<br>Baisse envisagée fin 2012 | Maximum 48dB d'affaiblissement soit un débit théorique minimum de <b>3.5 Mbit/s(ATM)</b> .                                | Maximum 48dB d'affaiblissement soit un débit théorique minimum de <b>3.5 Mbit/s (ATM)</b> .                               | Tous les clients raccordés aux réseaux câble sont éligible au service TV quel que soit la longueur de la ligne.                   | <b>2.5 Mbit/s ATM</b> conseillé <sup>2</sup>                                |
| Flux dynamique   | NC  | OUI. Par défaut le terminal sélectionne le flux SD. C'est au client de sélectionner le flux HD si sa ligne le lui permet. | OUI. Par défaut le terminal sélectionne le flux SD. C'est au client de sélectionner le flux HD si sa ligne le lui permet. | Numéricâble propose à tous ses clients les flux HD et SD sur deux canaux différents. Au client de choisir lorsque c'est possible. | Par le DSLAM, en fonction du débit disponible peut être forcé par le client |

FIGURE V-8 : TABLEAU OPERATEURS QOS TV (COMPLET)

<sup>1</sup> Forward Error Correction (Code correcteur en Français).<sup>2</sup> <http://www.free.fr/assistance/2260-conditions-et-nombre-de-chaines-pouvant-etre-recues.html>

# Table des illustrations

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| FIGURE I-1 LORS DE LA CAPTATION D'UN SON, LE MICRO RECUEILLE UN SIGNAL ANALOGIQUE (CONTINU). IL EN VA DE MEME LORSQUE ON FILME UNE SCENE AVEC UNE CAMERA. ....   | 12                                 |
| FIGURE I-2 UN SIGNAL QUELCONQUE EST ECHANTILLONNE A INTERVALLES DE TEMPS REGULIERS DE PERIODE T (A GAUCHE) AFIN DE GENERER DE COURTES IMPULSIONS (A DROITE) DONT LES AMPLITUDES REPRESENTENT L'AMPLITUDE INSTANTANEE DU SIGNAL .   | 13                                 |
| FIGURE I-3 LE MEME SIGNALE QUE PRECEDEMMENT, MAIS ECHANTILLONNE CETTE FOIS-CI A INTERVALLES DE TEMPS REGULIERS DE PERIODE $T' > T$ . LA PHASE D'ECHANTILLONNAGE NE DONNE PAS LE MEME RESULTAT SELON LA FAÇON DONT ON CHOISIT LA PERIODE DE PRELEVEMENT DES DONNEES. .... | 14                                 |
| FIGURE I-4 QUANTIFICATION DU SIGNAL PREALABLEMENT ECHANTILLONNE AVEC CODE SUR 1 BIT. LA RESOLUTION EST ICI TRES MAUVAISE. ON A PERDU TOUTES LES PETITES NUANCES DU SIGNAL D'ORIGINE.....   | 15                                 |
| FIGURE I-5 QUANTIFICATION 2 BITS. LA RESOLUTION S'AMELIORE, MAIS N'EST PAS ENCORE SUFFISANTE POUR PROFITER DE TOUTES LES VARIATIONS D'UN MORCEAU DE MUSIQUE PAR EXEMPLE. ....  | 16                                 |
| FIGURE I-6 À GAUCHE LE NOMBRE D'INTERVALLES EST FAIBLE ET L'ERREUR EST IMPORTANTE ALORS QU'À DROITE LE NOMBRE D'INTERVALLES EST PLUS GRAND ET L'ERREUR DEVIENT PLUS PETITE. ....   | 16                                 |
| FIGURE I-7 TABLEAU RECAPITULATIF ANALOGIQUE/NUMERIQUE.....   | 18                                 |
| FIGURE I-8 : VIDEO ENCODEE EN MPEG-4 A 8 MBIT/S (A GAUCHE) ET EN MPEG-4 A 1.2 MBIT/S (A DROITE).....   | 21                                 |
| FIGURE I-9 : TABLEAU RECAPITULATIF DES DIFFERENTS FORMAT ET CODEC DE COMPRESSION VIDEO.....  | 22                                 |
| FIGURE I-10 : TENDANCE ET CLASSEMENT DES PRINCIPAUX MODES DE RECEPTION NUMERIQUE EN FRANCE ENTRE 2007 ET 2011 (SOURCE : ARCEP).....  | 25                                 |
| FIGURE I-11 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA TNT .....   | 26                                 |
| FIGURE I-12 : SCHEMA DE RACCORDEMENT DE L'ABONNE AVEC LA TECHNOLOGIE CABLE AU RESEAU (LE « BACKBONE »).....  | 28                                 |
| FIGURE I-13 : SPECTRE DE FREQUENCES POUR L'ADSL2+ ET LE CABLE (SOURCE : NUMERICABLE).....  | 29                                 |
| FIGURE I-14 : SCHEMA DE RACCORDEMENT DE L'ABONNE AVEC LA TECHNOLOGIE CABLE APRES LA RENOVATION DU RESEAU.....  | 29                                 |
| FIGURE I-15 : SCHEMA DE RACCORDEMENT DE L'ABONNE AVEC LES TECHNOLOGIES DSL (BOUCLE LOCALE CUIVRE) .....  | 32                                 |
| FIGURE I-16 : DEBIT THEORIQUE MAXIMUM (DESCENDANT) EN FONCTION DE L'ATTENUATION DE LA LIGNE (A GAUCHE) ET EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE LIGNE (A DROITE). SOURCE : ARCEP .....   | 35                                 |
| FIGURE I-17 : DEBIT THEORIQUE MAXIMUM (DESCENDANT) EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE LIGNE (HYPOTHESE : LIGNE DE CALIBRE 4/10) .....   | 36                                 |
| FIGURE I-18 SCHEMA DE RACCORDEMENT DE L'ABONNE AVEC LES TECHNOLOGIES FTTx.....   | 39                                 |
| FIGURE I-19 : TABLEAU RECAPITULATIF DES DIFFERENTS MOYENS DE TRANSMISSIONS DE LA TELEVISION NUMERIQUE .....  | 41                                 |
| FIGURE II-1 : TABLEAU OPERATEURS QOS TV (PARTIE 1 : ENCODAGE).....   | 45                                 |
| FIGURE II-2 : EXEMPLES D'ARTEFACTS VISUELS DUS A LA PERTE DE PAQUETS AU MOMENT DE LA TRANSMISSION .....  | 49                                 |
| FIGURE II-3 : TABLEAU OPERATEURS QOS TV (PARTIE 2 : FEC).....  | 50                                 |
| FIGURE II-4 : PUCE SIGMA DESIGNS SMP8635 UTILISEE DANS LES FREEBOX V5 .....  | 53                                 |
| FIGURE II-5 : TABLEAU OPERATEURS QOS TV (PARTIE 3 : ELIGIBILITE).....  | <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b> |
| FIGURE II-6 : CLASSEMENT DES OPERATEURS EN MATIERE DE QOS-TV .....   | 56                                 |
| FIGURE II-7 : INTERFACE TV SUR FREEBOX DANS LES ANNEES 2002-2010.....  | 58                                 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURE II-8 : INTERFACE TV SUR LA DERNIERE VERSION DE LA FREEBOX (DEPUIS 2010) .....  | 58 |
| FIGURE II-9 : TABLEAU RECAPITULATIF SUR LA QOS ET LA QOE DU SERVICE DE TELEVISION NUMERIQUE .....   | 59 |
| FIGURE IV-1 : LES STRATEGIES SUBJECTIVES D'EVALUATION DE LA QOE.....  | 61 |
| FIGURE IV-2 : FORMULAIRE D'EVALUATION DE LA QUALITE EN UTILISANT DES ECHELLES CONTINUES (DSCQS). ....   | 62 |
| FIGURE IV-3 : RESULTAT DE L'EVALUATION DE LA QUALITE D'UNE VIDEO NUMERIQUE PAR LA METHODE SSCQE.....  | 63 |
| FIGURE IV-4 : CATEGORIES DES METHODES OBJECTIVES D'EVALUATION DE LA QOE.....  | 65 |
| FIGURE IV-5 : TABLEAU RECAPITULATIF DES METHODE D'EVALUATION DE LA QOE.....   | 66 |
| FIGURE IV-6 : CATEGORIES DES METHODES OBJECTIVES D'EVALUES MODELES PREDICTIFS DE LA QOE ENCORE AU STADE DE R&D :<br>LES PREDICTIONS NE SONT PAS TOUJOURS EXACTES (SOURCE : ORANGE LABS RENNES)..... | 66 |
| FIGURE IV-7 : ARTEFACTS VIDEO SUR LA TELEVISION NUMERIQUE.....  | 67 |
| FIGURE IV-8 : TABLEAU OPERATEURS COMPLET SUR LA QOS-TV.....   | 69 |