

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البليدة

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



دائرة الإلكترونيك

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE

PROJET DE FIN D'ETUDES

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME

DE MASTER EN ELECTRONIQUE

Option : Réseaux et télécommunications

LA DIFFUSION TNT

ETUDE TECHNIQUE ET REALISATION PRATIQUE

(CAS DE LA TDA)

Proposé par:

Pro M. BEGBAGUI A.

Copro M. HENHEN M.

Réalisé par:

BENALI NAIMA

N° :

Session: 2011

Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements à Monsieur le Président du jury pour avoir accepté de présider ce jury ainsi qu'à l'ensemble des membres de ce dernier.

J'adresse également mes remerciements à M.BEGBAGUI Amar, mon promoteur pour m'avoir guidé dans ce travail ainsi que pour sa générosité et la grande patience dont il a fait preuve tout au long de cette étape malgré ses charges professionnelles au niveau de l'établissement public de TéléDiffusion d'Algérie.

Je voudrais aussi exprimer toute ma reconnaissance envers M.HENHEN Mahfoud, mon co-promoteur.

Aussi, je n'oublie pas mes parents pour toute leur précieuse contribution, leur soutien et surtout leur patience.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis qui m'ont toujours soutenue et encouragée pendant toute la durée de réalisation de ce mémoire.

Résumé

Le monde de la transmission et la diffusion numérique est en plein essor. Chaque jour, on pourra constater de manière concrète les changements progressifs dans ce domaine. Ainsi, la numérisation des programmes de la télévision et de la radio, leur compression adéquate suivie du multiplexage nous permettra d'héberger plusieurs programmes TV et radio sur une même fréquence pour obtenir un bouquet numérique appelé bouquet numérique TNT. Cette technologie (DVB-T) consiste à protéger l'information déjà numérisée.

Cette protection est une méthode rigoureuse de lutte contre les échos dus au multi-trajet. La modulation COFDM est la nouvelle méthode utilisée en divisant la porteuse en « N » porteuses, chacune est modulée par un débit d'information. Par cette méthode, le récepteur domestique interprétera un écho reçu comme un signal de bonne qualité, ce qui rendra l'écho comme phénomène constructif et non destructif.

L'étude pratique d'une plateforme TNT (5+1) gérée par un logiciel « nCompass » donne un cas exemplaire d'application de cette technologie sur le terrain. En effet, le déploiement de la TNT en Algérie se généralisera à ce cas pratique sur le territoire national selon des phases de réalisation bien étudiées dans le temps.

Mots clés

Numérisation, compression, multiplexage, bouquet numérique, TNT, DVB-T, échos, COFDM, plateforme TNT (5+1), nCompass.

Abstract

The world of digital broadcasting and transmission is booming. Each day we will see in concrete terms the progressive changes in this area. Thus, the digitization of television programs and radio and their proper compression followed by multiplexing will allow us to host several TV and radio programs on the same frequency for a digital package called digital package DTT. This technology (DVB-T) is to protect the information already digitized.

This protection is a rigorous method to fight against the echoes due to multipath. COFDM modulation is the new used method by dividing the load carrier into « N » carriers where each one is modulated by a flow of information. By this method the domestic receiver will interpret the echo received as a signal of good quality, making the echo phenomenon as constructive and not destructive.

The practical study of a platform DTT (5 +1) managed by a software « nCompass » provides an exemplary case of applying this technology in the field. Indeed, the deployment of DTT in Algeria is going to become more common case on the national territory according to well-studied phases of implementation over time.

Keywords

Digitization, compression, multiplexing, digital package, DTT, DVB-T, echo, COFDM, platform DTT (5+1), nCompass.

INTRODUCTION GENERALE

Dans le monde de la communication, la télévision a fait ses premiers pas dans les années 50 (1953). Depuis cette date et jusqu'à aujourd'hui, la transmission qui s'est toujours faite à travers des émetteurs et des récepteurs analogiques va devoir laisser place à un nouveau mode de transmission basé sur la numérisation des moyens de transmissions plus récents. Le système proposé doit également permettre une évolution vers la haute définition pour des applications purement professionnelles dans un premier temps et s'adapter à tout type de support de transmissions tels que le satellite, le câble ou le réseau terrestre.

Ainsi, après avoir révolutionné le son, l'image et la téléphonie, c'est au tour des réseaux hertziens terrestres de passer au numérique. Une fois lancée, le téléspectateur pourra recevoir à travers son ancienne installation d'antenne, des images et du son de qualité numérique avec également une multitude de services interactifs représentant le fruit du progrès technologique de la diffusion numérique terrestre.

A ce titre, le changement de normes et la refondation hertzienne consistant à diffuser en numérique toutes les chaînes existantes ainsi que celles en prévision doivent répondre au triptyque suivant : efficacité, qualité et universalité. Par ailleurs, avec l'avènement futur de la télévision numérique terrestre en Algérie, il y a lieu de relever les enjeux pouvant découler d'une mise en œuvre pareille et se résumant ainsi :

Une plus grande efficacité dans l'utilisation du spectre de fréquences.

D'importants avantages sur le plan industriel avec la transition progressive vers le numérique de l'ensemble des récepteurs d'où des milliers voire des millions de récepteurs représentant un marché considérable.

L'introduction d'une multitude de services interactifs destinés à générer des gains importants à enregistrer qui sont appelés à aller crescendo.

Enfin, sur le plan social, l'accès à de nouveaux services en plus de celui du numérique accessible à tous.

Dans cette optique, l'étude menée à travers ce travail doit nous permettre de pouvoir répondre aux différentes questions relatives aux aspects de la dite-problématique caractérisée tout particulièrement par un ensemble de défis sur différents plans à savoir : culturel, économique, industriel et même social.

Cependant, afin d'opter pour la généralisation de ce mode de diffusion récent, nous devons répondre aux questions suivantes :

Quelle est la technique utilisée ?

Quel est le niveau de l'impact social de la généralisation de cette technologie ?

Pour cela, nous commencerons par l'étude du processus de numérisation de ce vecteur de diffusion analogique et des principes de son fonctionnement. Après avoir énuméré les différents concepts, nous examinerons les étapes du mode de diffusion et de réception. Puis, nous passerons en revue l'étude pratique de la plateforme TNT de la TDA.

Nous procéderons ensuite à la présentation des différentes phases du déploiement de la télévision numérique terrestre dans notre pays.

Pour conclure, nous nous appuierons sur certains critères que nous estimons indispensables pour assurer la réussite de ce projet ainsi que la généralisation de la TNT à l'ensemble des régions du pays pouvant être couvertes par cette diffusion.

I.1 INTRODUCTION

Avec la multiplication et la diffusion à grande échelle des médias numériques, la compression du signal audio visuel est devenue l'un des défis majeurs à relever à savoir comment garantir une qualité optimale de diffusion tout en réduisant ou du moins en optimisant le débit des données. Avant d'accomplir cette opération, il y a lieu de procéder d'abord à la numérisation du signal analogique en signal numérique. Cette numérisation est le procédé permettant la conversion d'un signal (vidéo, image, audio, caractère d'imprimerie, impulsion, etc.) en une suite de nombres permettant de représenter cet objet en informatique ou en électronique numérique.

A ce titre, nous traiterons ainsi les différentes techniques de compression et de codage de l'information tout en précisant pour chacune ses spécificités techniques. Aussi ; nous évoquerons les sujets relatifs au codage audio et d'images fixes de même que celui des images animées et de format de haute définition.

Nous aborderons également le sujet relatif au multiplexage qui représente un procédé essentiel sur lequel s'appuie la télédiffusion.

I.2 NUMERISATION DES SIGNAUX ANALOGIQUES

La numérisation est un procédé qui transforme une information analogique en une suite de nombres codés en binaire. La valeur de ces nombres est une représentation discrète de la valeur instantanée de l'information analogique.

Concrètement, la numérisation est un procédé qui découpe (échantillonne) le signal analogique continu en tranches temporelles (définies par la fréquence d'échantillonnage) et convertit la hauteur (amplitude du signal) de la tranche découpée en un nombre (quantification). La finesse de cette quantification est définie par le nombre de bits (2 exposant le nombre de bits exprime le nombre de niveau maximum de cette conversion, c'est-à-dire la précision de cette opération) qui donne une échelle de quantification normalisée.

Un tel signal numérique est caractérisé par le nombre de bits « N » des mots numériques à la sortie et par sa période d'échantillonnage temporel T_e .

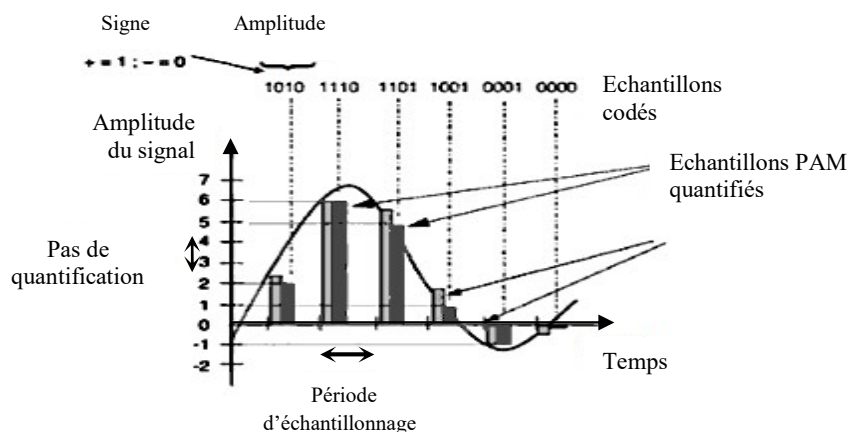


Figure 1.1 - Numérisation d'un signal analogique. Source [9]

I.3 BASE DE NUMERISATION

Le codage MIC (Modulation par Impulsions Codées) (en anglais PCM) permet le passage d'un signal continu analogique porteur d'information à une suite de symbole discret.

Le MIC nécessite trois opérations :

- L'échantillonnage/blocage ou échantillonnage par maintien du signal analogique qui consiste à prélever périodiquement la valeur du signal analogique à des instants appelés instants d'échantillonnage. Cette opération n'introduit pas de distorsion si on prélève les échantillons à une fréquence suffisamment grande.

Le signal échantillonné obtenu est appelé signal PAM (Pulse Amplitude Modulation).

- La quantification par excès ou par défaut permet d'associer une valeur discrète à chaque échantillon. Elle consiste à comparer l'amplitude de chaque échantillon à une échelle de mesure dite : échelle de quantification normalisée ; on obtient alors des échantillons normalisés approximatés par excès ou par défaut aux plus proches échantillons. Ce traitement ajoute de la distorsion qui va être d'autant plus petite que le nombre de niveaux de quantification est élevé.

- Le codage remplace chaque valeur discrète par un nombre binaire codé sur « N » bits.

Ainsi, un signal MIC est un signal échantillonné, quantifié et codé (en binaire).

En réalité, cette technique de modulation quantifie simplement le signal en des mots de « N » bits, et ne module pas à proprement parler le signal.

I.3.1 Echantillonnage des signaux analogiques

L'échantillonnage d'un signal analogique représenté par une fonction $x(t)$ (cf. Figure 1.2) consiste à construire à partir de $x(t)$ un signal à temps discret $x(n) = x(nT_e)$ obtenu en mesurant la valeur de $x(t)$ toutes les T_e secondes ($F_e = 1/T_e$ correspond à la fréquence d'échantillonnage).

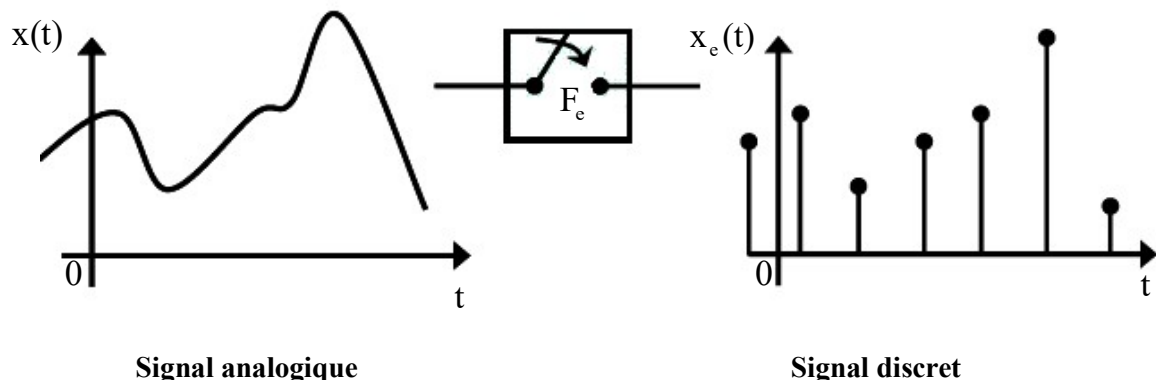


Figure 1.2 - Illustration de la phase d'échantillonnage d'un signal analogique. Source [11]

La technique d'échantillonnage permet de connaître $x(t)$ uniquement aux instants d'échantillonnage nT_e , toute autre valeur étant inconnue.

Le signal échantillonné peut s'écrire sous deux formes :

- Une série numérique dont les termes correspondent aux valeurs prises par $x(t)$ aux instants d'échantillonnage distants de T_e :

$$\{x(nT_e)\} = \{x(T_e), x(2T_e), \dots, x(nT_e)\} \quad (1.1)$$

- Une somme d'impulsion de Dirac de poids respectifs $x(nT_e)$, placées aux instants nT_e :

$$x_e(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT_e) \delta(t - nT_e) \quad (1.2)$$

Dans le domaine fréquentiel, ce produit temporel se traduit par une convolution de leurs transformées de Fourier :

$$x_e(f) = \frac{1}{T_e} x(f) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(f - nF_e) \quad (1.3)$$

T_e et F_e sont respectivement la période et la fréquence d'échantillonnage.

Selon cette dernière équation, l'échantillonnage d'un signal $x(t)$ dans le domaine temporel correspond à recopier dans le domaine fréquentiel son spectre $x(f)$ tous les F_e comme le montre la figure suivante :

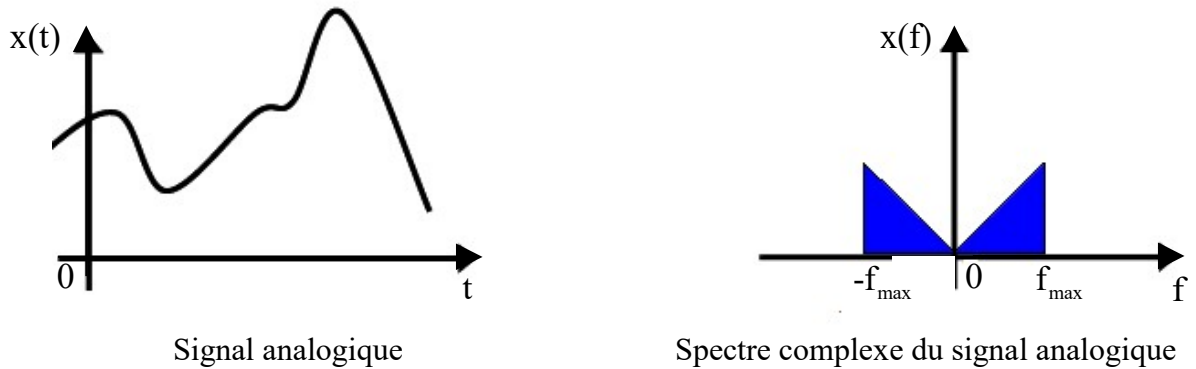


Figure 1.3 - Propriétés temporelles et fréquentielles du signal à numériser. Source [11]

I.3.1.1 Reconstitution du signal : Théorème de Shannon-Nyquist

Le théorème d'échantillonnage présente les conditions dans lesquelles un signal continu peut être complètement représenté par la suite discrète de ses échantillons. Il s'exprime de la façon suivante : Toute fonction $x(t)$ dont le spectre est à support borné ($x(f) = 0$ pour $f > f_{\max}$) est complètement définie par ses échantillons $x(nT_e)$ si :

$$F_e \geq 2.f_{\max} \quad \text{avec} \quad F_e = \frac{1}{T_e} \quad (1.4)$$

La fréquence d'échantillonnage minimum $2f_{\max}$ est appelé fréquence de Nyquist.

I.3.1.2 Notion de Repliement du spectre (aliasing)

Si le spectre $x(f)$ du signal analogique $x(t)$ n'est pas nul au delà de $F_c/2$, la superposition peut conduire à des empiètements des signaux transposés (cf. Figure 1.4). Ce phénomène est appelé recouvrement ou repliement de spectre.

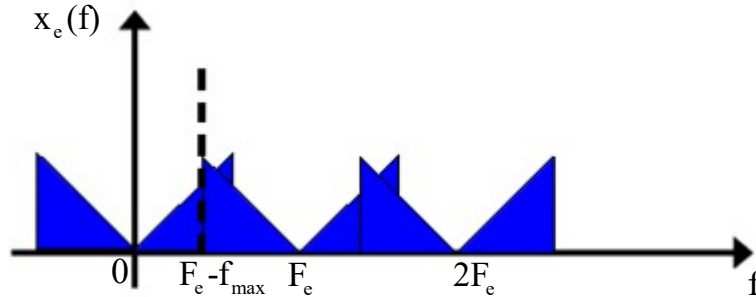


Figure 1.4 - Repliement de spectre avec un échantillonnage ne respectant pas le théorème de Shannon-Nyquist. Source [11]

S'il y a repliement de spectre, il n'est plus possible de retrouver le spectre du signal d'origine. Dans ce cas, l'opération d'échantillonnage modifie les caractéristiques du signal d'entrée. Ainsi, pour ne pas perdre d'informations par rapport au signal que l'on échantillonne, il est nécessaire de respecter le théorème de Shannon-Nyquist.

I.3.1.3 Filtre anti-repliement

Une fonction dont le spectre borné est illimitée dans le temps. Un signal physique n'est jamais illimité dans le temps, et par conséquent, son spectre n'est pas borné. L'échantillonnage provoque donc un recouvrement spectral, ainsi la condition de non recouvrement n'est donc en général pas vérifiée par les signaux usuels, ce qui implique la nécessité de faire précéder l'échantillonneur d'un filtre passe bas dont les spécifications seront définies pour vérifier la condition de non recouvrement en limitant l'amplitude des composantes indésirables de fréquence supérieure à $F_c/2$. Ce filtre est en général appelé, filtre de garde ou filtre anti-repliement (anti-aliasing) présentant une fréquence de coupure f_c égale à $F_c/2$.

I.3.2 Théorie de la quantification

Un signal échantillonné se présente comme une suite d'impulsions dont les amplitudes peuvent prendre une infinité de valeurs distinctes. La quantification consiste à réduire le nombre de valeurs que peut prendre cette amplitude, en attribuant à chaque échantillon une valeur choisie parmi un ensemble fini de valeurs prédéterminées. Ces valeurs sont les niveaux de quantification. L'écart entre deux niveaux de quantification consécutifs s'appelle intervalle ou pas de quantification dont la largeur peut être différente d'un intervalle à l'autre.

Pour la quantification uniforme (largeur de pas de quantification constante) où les valeurs codées sont obtenues par arrondi dans le domaine de conversion « Δ_{CAN} » du convertisseur (appelé aussi tension de pleine échelle du CAN), le pas de quantification est donnée par :

$$q = \frac{\Delta_{CAN}}{2^N} \quad (1.5)$$

où N est le nombre de bits de quantification qui vont permettre de distinguer 2^N niveaux de tension. En considérant par la suite que le CAN travaille avec « N » bits entre $\pm V_{max}$ (cf. Figure 1.5 - (a)), on a $\Delta_{CAN} = 2V_{max}$ et le pas de quantification vaut alors :

$$q = \frac{\Delta_{CAN}}{2^N} = \frac{2V_{max}}{2^N} = \frac{V_{max}}{2^{N-1}} \quad (1.6)$$

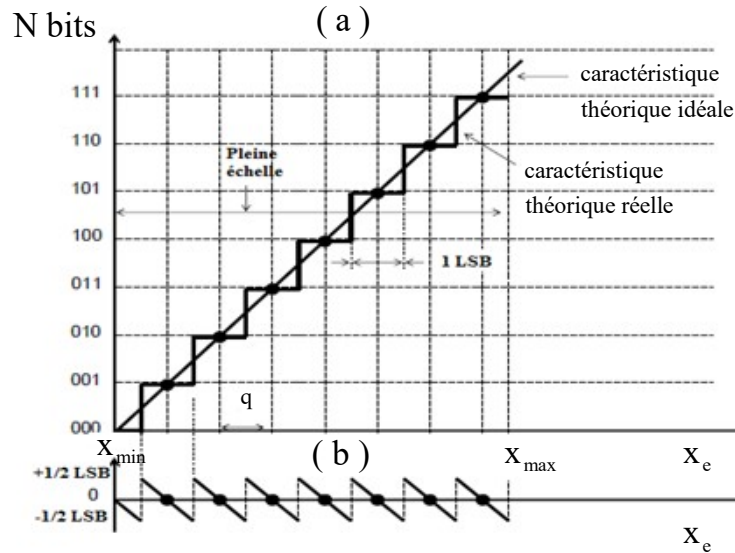


Figure 1.5 - (a) Fonction de transfert idéal d'un CAN 3 bit, (b) Erreur de quantification. Source [11]

I.3.2.1 Bruit de quantification

La plage d'amplitude du signal est divisée en « M » niveaux de quantification, les valeurs du signal échantillonné vont être remplacées par le niveau le plus proche.

La différence entre la valeur du signal d'origine et du signal échantillonné quantifié qui est l'erreur de quantification (cf. Figure 1.5 - (b)) autrement dit une erreur d'arrondi apparaît statiquement comme un bruit de quantification. Ce bruit est d'autant plus faible que le nombre de niveaux est élevé.

Le bruit de quantification $\epsilon_{q(t)}$ correspond à l'équation :

$$\epsilon_q(t) = x(t) - x_q(t) \quad (1.7)$$

où $x(t)$ correspond au signal source, et $x_q(t)$ au signal quantifié.

La puissance du bruit de quantification est donnée par :

$$B = \frac{q^2}{12} \quad (1.8)$$

I.3.2.2 Rapport signal à bruit (SNR)

Lorsqu'un signal est perturbé par du bruit, il est nécessaire de quantifier l'importance de cette perturbation par rapport au signal. La notion de rapport signal sur bruit (SNR : Signal to Noise Ratio) est alors définie comme le quotient entre la puissance du signal et la puissance du bruit.

$$\frac{S}{B} = \frac{\text{Puissance du signal}}{\text{Puissance du bruit}} = 2^{2N-1} \quad (1.9)$$

Exprimé en dB, le rapport signal sur bruit vaut :

$$\left(\frac{S}{B} \right)_{\text{dB}} = 10 \log \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{bruit}}} = 6,02 n + 1,76 \quad (1.10)$$

Soit approximativement :

$$\left(\frac{S}{B} \right)_{\text{dB}} = 6 n + 2 \quad (1.11)$$

I.3.3 Codage

Le codage désigne le type de correspondance que l'on souhaite établir entre chaque valeur du signal analogique et le nombre binaire qui représentera cette valeur. Il permet au récepteur d'interpréter correctement les valeurs reçues, et d'en tirer à nouveau le signal original, (ou du moins une approximation satisfaisante) afin d'optimiser son stockage ou sa transmission.

C'est le codage qui génère implicitement le processus de quantification ; en effet représenter (à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique) le nombre définissant la valeur associée à une grandeur, à l'aide de « N » bits revient à limiter la précision de son écriture en numérique.

I.3.4 Débit du signal numérique

La numérisation correcte d'un signal analogique de bande passante comprise entre 0 et f_{max} , sur « N » bits, nécessite un débit binaire D en sortie de quantificateur tel que :

$$D = N \times F_e \quad (1.12)$$

I.4 NUMERISATION DES SIGNAUX VIDEO ET AUDIO

Les signaux à transmettre, de manière impérative, en télévision sont les suivants : le signal audio, issu des micros, lequel contient l'information sonore ; le signal vidéo, issu des caméras, lequel contient l'information image ; les signaux nécessaires à la commande du récepteur.

I.4.1 Intérêts de la numérisation des signaux vidéo et audio

La numérisation des signaux vidéo et audio permet plusieurs avantages :

- Multiplication du nombre de canaux pour consulter des programmes. Il faut savoir que, si un canal ne peut transmettre qu'un seul programme en mode analogique, désormais il pourra loger 6 à 8 programmes en numérique, des services et une multiplicité d'informations supplémentaires sur les programmes (leurs services annexes, guide de programmes, commerce électronique, etc.), qui échappaient à l'analogique, peuvent y être adjoints.
- Contrôle d'accès conditionnel aux sources audio- vidéo (source péage), par embrouillage et chiffrement des informations, qui ne sont réalisables que grâce à la numérisation et aux traitements numériques de l'information audio-vidéo.
- La génération de certains effets spéciaux visuels ou sonores, de nombreux effets spéciaux et corrections colorimétriques, qui devaient être faits à la source auparavant. Par exemple, depuis que les incrustations se font en numérique, le « bleu » a disparu des cheveux du présentateur de la météo. Ainsi les produits qui étaient en noir et blanc à l'époque peuvent devenir en couleur grâce à la technique de numérisation moderne.

I.4.2 Numérisation du signal vidéo

La numérisation du signal vidéo s'effectue en appliquant les opérations du codage MIC sur le signal analogique.

L'influence de la numérisation sur le signal est jugée par un observateur, lequel possède des caractéristiques de perception subjectives sachant que l'œil est plus sensible à la lumière (luminance) qu'à la couleur (chrominance).

Dans ce cas, la numérisation ne doit pas générer, dans la mesure du possible, de défaut perceptible par l'observateur. Il faut garder à l'esprit que la perception humaine des phénomènes physiques reste analogique et donc que le résultat de tous les traitements appliqués au signal n'ont de sens que si l'on sait revenir dans l'espace d'origine, celui qui nous est perceptible.

I.4.2.1 Echantillonnage de la vidéo

Le signal vidéo peut être présenté comme un signal à trois dimensions (tridimensionnel), dimension horizontal (H), vertical (V), et temporel (t). A chacune des dimensions doit donc correspondre une fréquence d'échantillonnage.

- Temporel : 25 ou 30 images/s (Europe, USA, Japon).
- Vertical : 625 lignes (Europe), 525 lignes (USA, Japon).
- Quant à la fréquence d'échantillonnage horizontale, elle doit tenir compte de la largeur du spectre vidéo de 6 MHz, de la présence des deux informations luminance et chrominance et de l'importance majeure du signal de luminance Y et faible sensibilité de l'œil aux couleurs.

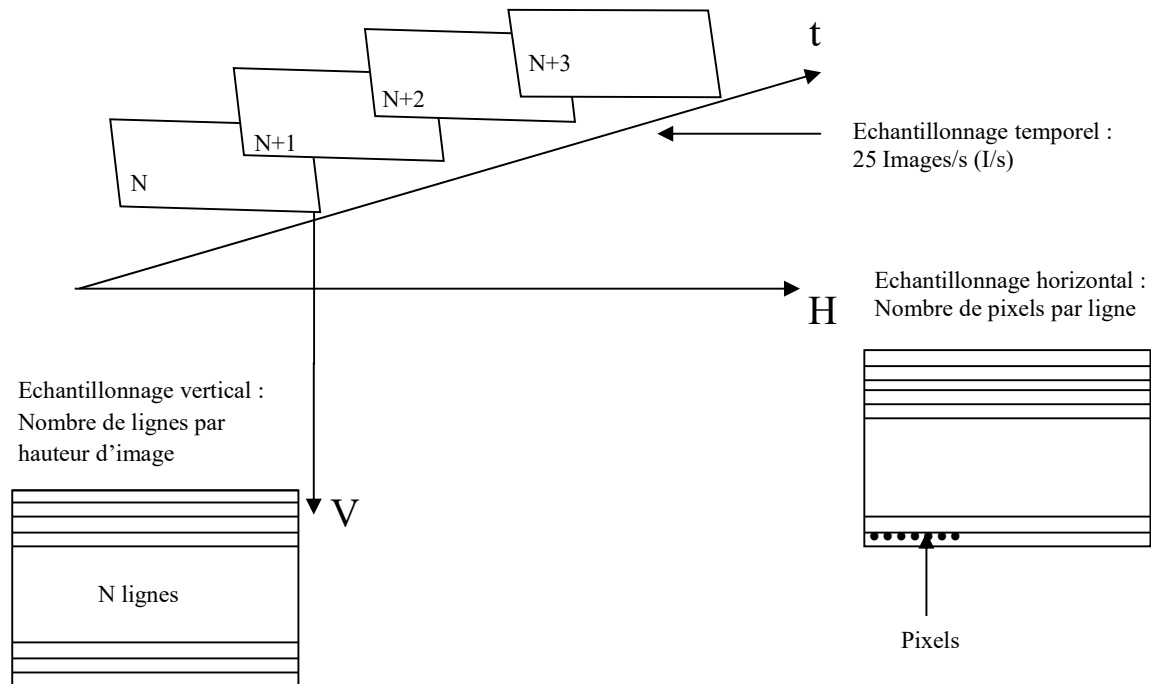


Figure 1.6 - Les trois dimensions du signal vidéo. Source [10]

I.4.2.1.1 Fréquence d'échantillonnage

Pour assurer une compatibilité ascendante entre la norme 601 et les normes analogiques d'émission (PAL ou SECAM en Europe, NTSC aux USA, Japon), la recommandation 601 du CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications) a choisi, pour fréquence d'échantillonnage, un multiple entier des fréquences lignes des différents systèmes analogiques existants :

$$F_{c_Y} = K' \cdot F_{\text{LIGNE (625)}} = K'' \cdot F_{\text{LIGNE (525)}} \quad (1.13)$$

I.4.2.1.2 Echantillonnage du signal de luminance

Il suffit d'une bande passante de 6 MHz pour transmettre le signal analogique de luminance sans dégradation notable et en respectant le théorème de Shannon donné par la relation (1.4).

Faute de quoi on introduit un repli spectral (aliasing en anglais). On a retenu la valeur :

$$F_{c_Y} = 13,5 \text{ MHz, soit : } F_{c_Y} = 864 \cdot F_{\text{LIGNE (625)}} = 858 \cdot F_{\text{LIGNE (525)}} \quad (1.14)$$

I.4.2.1.3 Sous-échantillonnage des signaux de chrominance

Il suffit d'une bande passante de 3 MHz pour transmettre chaque signal analogique de chrominance sans dégradation notable. En conséquence on se devait de prendre, pour les chrominances, une fréquence d'échantillonnage $F_{e_{C_r, C_b}} \geq 6$ MHz. On a retenu la valeur :

$$F_{e_{C_r, C_b}} = 6,75 \text{ MHz, soit : } F_{e_{C_r, C_b}} = F_{e_Y} / 2 \quad (1.15)$$

Ce faisant, on sous-échantillonne par deux chaque chrominance vis-à-vis de la luminance, ce qui est une forme simple de codage d'image à réduction de débit.

I.4.2.1.4 Filtrage anti-repliement, en bande de base, préalable à l'échantillonnage

Pour éviter le problème de repliement, on fait passer les signaux dans des filtres passe-bas anti repliement, avant de procéder à l'échantillonnage de la luminance et des deux voies de chrominance.

I.4.2.1.5 Formats de numérisation de la chrominance

Lors de l'acquisition d'une vidéo numérique, il existe plusieurs façons d'échantillonner les différentes composantes couleurs, qui prennent en compte le fait que l'œil humain est plus sensible à la précision de la luminance qu'à celle de la chrominance. Ceci est réalisé par le sous-échantillonnage chromatique ce qui permet une réduction importante de la quantité d'information des signaux de différence de couleurs. Les différents modes d'échantillonnage sont :

- Format 4:4:4

La luminance est numérisée pour chaque pixel (ou pour chaque échantillon), de même que les éléments de chrominance C_r et C_b .

Chaque composante est échantillonnée à la même fréquence 13,5 MHz. Ce format indique qu'aucun sous-échantillonnage chromatique n'a été effectué.

- Format 4:2:2

Le standard CCIR-601 (1982) permet d'économiser un tiers du débit du format précédent en ne codant qu'un pixel sur deux dans le sens horizontal, et ce pour les composantes de chrominance uniquement, d'où la désignation de la norme 4 :2 :2 c'est-à-dire que sur quatre échantillons on numérise quatre valeurs de luminance, deux de différence de couleur C_r et deux de différence de couleur C_b .

La fréquence d'échantillonnage est de 13,5 MHz pour la luminance Y et de 6,75 MHz pour les signaux de chrominance C_b et C_r . Ce format indique qu'un sous-échantillonnage d'un facteur deux horizontalement. La qualité de l'image codée reste sensiblement la même.

- Format 4:2:0

La luminance est numérisée dans chaque pixel (ou pour chaque échantillon). Pour la chrominance : en horizontal : on numérise qu'un pixel sur deux (on numérise une seule valeur de C_r , C_b), en vertical : on numérise une ligne sur 2 la chrominance c'est-à-dire réduction verticale de la résolution chrominance.

La fréquence d'échantillonnage est de 13,5 MHz pour la luminance Y et de 6,75 MHz pour les signaux de chrominance C_b et C_r une ligne sur deux. Ce format indique un sous-échantillonnage d'un facteur deux à la fois horizontalement et verticalement ; c'est la plus proche approximation de l'acuité chromatique humaine réalisée seulement par sous-échantillonnage chromatique.

- Format 4:1:1

La luminance est numérisée pour chaque pixel en horizontal. Les éléments de chrominance sont numérisés tous les quatre pixels en horizontal. Donc il ya réduction horizontale de la résolution chrominance.

Dans ce format la fréquence d'échantillonnage est de 13,5 MHz pour la luminance Y et de 3,375 MHz pour chaque composante de chrominance C_b et C_r . Ce format indique un sous-échantillonnage d'un facteur 4 horizontalement.

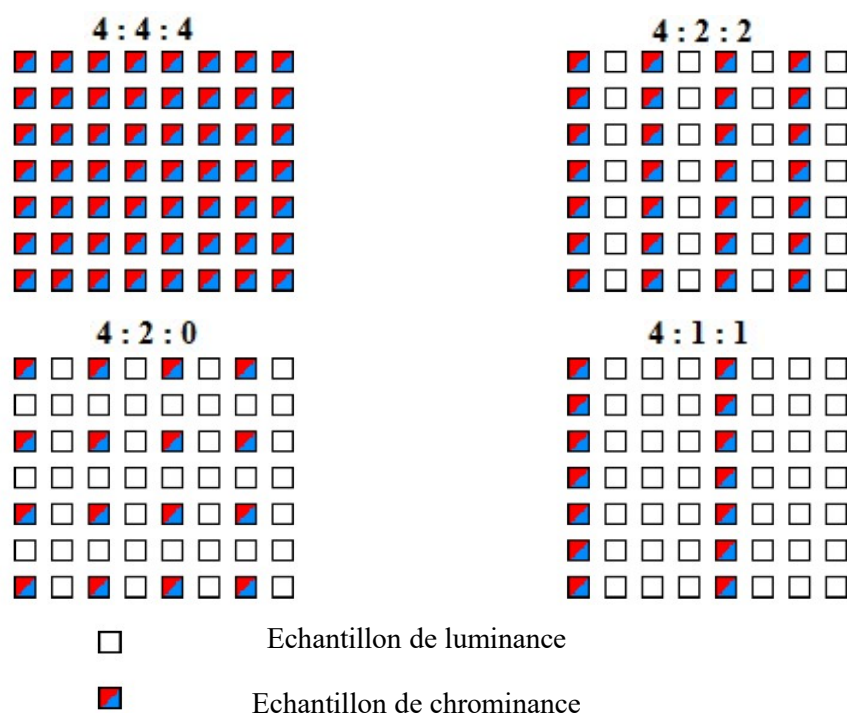


Figure 1.7 - Les différents méthodes d'échantillonnage de la luminance et de la chrominance. Source [18]

Il existe de multiples formats de vidéo numérique. La figure 1.8 en décrit quelques uns. Ils sont caractérisés notamment par la dimension des images (nombre de colonnes $\times$ nombre de lignes) et le nombre d'images par seconde.

L'échantillonnage d'un signal vidéo analogique TV de type PAL/SECAM (Phase Alternating Line / système électronique couleur avec mémoire, 720×576 à 25 images/s) ou NTSC (National Television System Committee, 720×480 à 30 images/s) permet d'obtenir une vidéo numérique à un débit non compressé de 166 Mbits/s en 4 : 2 : 2. En divisant par deux les dimensions des images suivant chacun des axes, on obtient des séquences à des résolutions de 360×240 pour le NTSC et 360×288 pour le PAL. On échantillonne ensuite la couleur en 4 : 2 : 0. Pour des raisons particulières, on souhaite enfin que les dimensions des images soient des multiples de 16 ; en éliminant les 4 colonnes extérieures de chaque côté des images, on obtient finalement le SIF (Standard Interchange Format (SIF, 352×240 à 30 images/s) et le Common Intermediate Format (CIF, 352×288 à 25 images/s), qui codent tous deux des vidéos non entrelacées à un débit non compressé de 30, 4 Mbit/s. Le format CIF à 30 images/s (36, 5 Mbits/s) est également utilisé, ainsi que le QCIF (quart de CIF).

Les formats disponibles pour le DVD sont également dérivés du PAL et du NTSC. Les résolutions possibles vont de 720×480 à 352×240 pour les signaux dérivés du NTSC, et de 720×576 à 352×288 pour ceux dérivés du PAL. La résolution 720×480 est également appelée 525 SD (Standard Definition), et de même, le 625 SD représente la résolution 720×576 .

En ce qui concerne la télévision numérique haute définition (TVHD) et le cinéma numérique, trois résolutions ont été définies : le 1080i à 1920×1080 pixels, et le 720i et 720p à 1280×720 pixels. Le « i » signifie que la vidéo est entrelacée (interlaced), par opposition au « p » qui signifie progressive. En résolution 1080i, on atteint des débits non compressés d'au moins 1,5 Gbits/s.

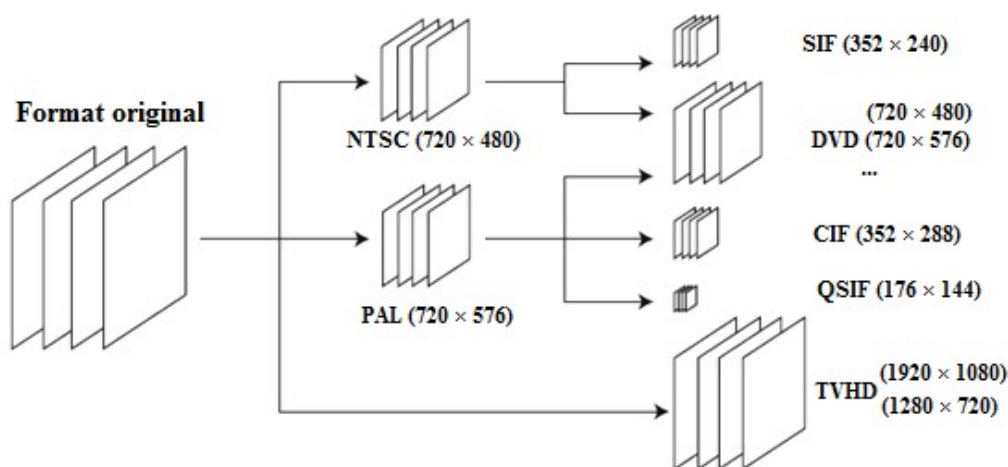


Figure 1.8 - Différents formats utilisés en vidéo numérique. Source [15]

I.4.2.2 Quantification du signal vidéo

La quantification du signal vidéo est uniforme, linéaire et s'effectue de façon séparée sur C_r et C_b . L'échelle de quantification a été fixée sur 256 niveaux, soit 8 bits avec possibilité d'extension à 10 bits pour les applications les plus exigeantes. Le rapport SNR de la quantification du signal vidéo sur 8 bits est de 50 dB et il vaut 62 dB pour une quantification sur 10 bits.

I.4.2.2.1 Choix du nombre de bits de quantification

Des tests empiriques et subjectifs ont montré qu'en passant de 7 à 6 bits pour le codage de la vidéo, on introduit en bout de chaîne une dégradation perceptible des images. Par contre entre 7 et 8 bits on ne note pas de différence perceptible. On pourrait donc travailler avec un codage sur 7 bits, toutefois on est habitué à travailler avec des octets. Il faut donc disposer d'un critère de décision pour choisir entre 7 ou 8 bits. Le calcul du rapport Signal sur Bruit (SNR) fournit ce critère.

I.4.2.3 Codage du signal vidéo

Une fois échantillonné et quantifié, le signal vidéo doit être codé. Différentes formes de codage existent et présentent chacune leurs avantages et inconvénients. Le but de la manœuvre est donc de choisir le code le plus adapté à l'utilisation. Pour cela, plusieurs codes sont à disposition le code NRZ (Non retour à Zéro), le code NRZI (Non Retour à Zéro Inversé), le code Biphasé Mark, le code Miller etc.

I.4.2.4 Débit binaire du signal vidéo

Le débit d'un signal vidéo est donné par la relation : $D = F_e \times N$

D : Débit binaire (Mbits/s).

F_e : Fréquence d'échantillonnage (MHz).

N : Nombre de bits par échantillon (bits/échan).

Format de numérisation	Signal utile (Mbits/s)		Signal complet (Mbits/s)	
	8 bits	10 bits	8 bits	10 bits
4 : 4 : 4	248,83	311,04	324	405
4 : 2 : 2	165,88	207,36	216	270 (SDI)
4 : 2 : 0	124,41	155,52	162	202,5
4 : 1 : 1	124,41	155,52	162	202,5

Tableau 1.1 – Débit binaire du signal vidéo correspond à chaque format de numérisation.

Source [10]

Remarque

Le signal utile correspond à des informations « visibles » sur l'écran. Si on tient compte de l'inutilité de numériser les intervalles de suppression (souvent appelés blanking) ligne et trame, on peut donc tirer profit de ces temps libres pour transporter des voies son numériques et des données de service ou autres.

I.4.3 Numérisation du signal audio

La numérisation du signal audio s'effectue en appliquant les opérations du codage MIC sur le signal analogique.

La numérisation d'un signal audio peut se faire de manière monophonique où les deux canaux de diffusion droite/gauche auront un signal identique. A l'inverse le mode stéréophonique effectuera une double numérisation indépendante pour le canal droit et le canal gauche.

I.4.3.1 Echantillonnage d'un signal audio

Echantillonner un signal audio analogique revient à prélever ses valeurs de tension électrique à une fréquence bien déterminée. La fréquence de ces prélèvements qui est la fréquence d'échantillonnage est souvent imposée par des contraintes technologiques.

1.4.3.1.1 Choix de la fréquence d'échantillonnage

La norme AES-1984 recommandait les trois principales fréquences d'échantillonnages suivantes :

32 KHz : recommandée pour les applications en radiodiffusion et télévision ou en relation avec celles-ci, où une largeur de bande audio de 15 KHz est jugée suffisante.

44,1 KHz : recommandée pour les applications grandes publiques comme le disque audionumérique (Compact Disc).

48 KHz : est la fréquence principale ; compatible avec les systèmes TV et cinéma, elle permet une largeur de bande audio jusqu'à 20 KHz.

Les applications multimédia, notamment les « cartes-son » des mini-ordinateurs, utilisent entre autres les fréquences de 44,1 KHz, 22,05 KHz et 11,025 KHz. Enfin, certains dispositifs travaillent à une fréquence d'échantillonnage variable (par exemple transpositeur de fréquence pour modifier la hauteur harmonique d'un son musical)

Remarque

Les fréquences d'échantillonnage utilisées en audionumérique sont toutes situées au dessus du double de la fréquence maximale perçue par l'oreille humaine. Ces fréquences d'échantillonnage assurent donc un codage du signal audio adapté à la bande passante de l'oreille.

I.4.3.2 Quantification

En audionumérique, le choix s'est porté sur une quantification uniforme initialement à 16 chiffres binaires ou bits, en code binaire complément à deux. Actuellement, elle se fait sur 20 ou 24 bits, le nombre de pas de quantification est donc 2^n , avec $n = 16, 20$ ou 24 , dont $(2^{n-1}-1)$ pour les nombres positifs et 2^{n-1} pour les négatifs.

I.4.3.3 Codage

Après échantillonnage et quantification, le signal audio quantifié doit être codé. Le code binaire utilisé généralement en audio numérique est le code binaire pur.

I.4.3.4 Débit binaire d'un signal audio

Le débit d'un signal audio est donné par la formule : $D = F_e \times N \times K$

D : Débit binaire (Kbits/s)

F_e : Fréquence d'échantillonnage (KHz)

N : Nombre de bits par échantillon (bits/échan)

K : Nombre de canaux

Débit mono : $K = 1$

Débit stéréo : $K = 2$

Fréquence d'échantillonnage	Débit mono (Kbits/s)			Débit stéréo (Kbit/s)		
	16 bits	20 bits	24 bits	16 bits	20 bits	24bits
32 KHz	512	640	768	1024	1280	1536
44,1 KHz	705,6	882	1058,4	1411,2	1764	2116,8
48 KHz	768	960	1152	1536	1920	2304
96 KHz	1536	1920	2304	3072	3840	4608

Tableau 1.2 - Débit binaire du signal audio correspond à chaque fréquence d'échantillonnage.
Source [10]

I.5 COMPRESSION DES DONNES

La compression consiste à réduire le débit consistant d'un signal numérisé en se basant sur l'énorme redondance de l'image elle-même ou un flux d'images entre elles, ainsi que l'audio où on respecte le spectre audible afin de numériser la plage audible surtout.

On distingue en général deux types de compression : la compression sans pertes qui permet de récupérer l'intégralité des données originales et la compression avec pertes qui, au contraire, perturbe les données de manière irréversible.

I.5.1 Compression sans pertes (non destructive)

La compression sans perte est principalement applicable aux données qui demandent une restitution exacte de l'information, cas qui n'est pas applicable à l'audio et à la vidéo.

I.5.2 Compression avec pertes (destructive)

La compression avec pertes supprime définitivement certaines informations pour réduire le débit du flux audio ou vidéo. Cette opération n'est pas réversible : il n'est pas possible de « reconstruire » le signal original une fois les données compressées.

Ce type d'algorithme repère les données pouvant être détruites sans affecter (selon certaines tolérances) la perception que l'on a du son ou de l'image. Parmi les techniques de

compression avec perte, une grande majorité des méthodes exploite les résultats issus des recherches en psycho-acoustique.

Dans le cadre de cette thèse nous aborderons uniquement les formes de compression avec perte (énormes paquets audio vidéo).

I.5.2.1 Les redondances de l'image vidéo

Pour comprimer des images, il faut éliminer les redondances présentes dans le signal. Il existe plusieurs formes de redondances selon que l'image soit fixe ou animée. Ainsi la compression des images fixes a pour but de réduire la redondance spatiale entre pixels ou entre blocs voisins dans l'image dite « intra-image » ; contrairement aux images animées, la compression se caractérise par l'exploitation de la redondance spatiale ainsi que la redondance temporelle « inter-image ».

- La redondance temporelle

En vidéo, il existe une forte corrélation entre deux images voisines à cause du mouvement. On peut considérer que deux images voisines sont identiques à la différence d'un mouvement près. On note que la technique mise en jeu pour coder une image vidéo, est la compensation temporelle entre deux images voisines après l'estimation du mouvement. Dans ce cas, il suffit de transmettre uniquement le vecteur mouvement et l'erreur de prédiction. On note que la décorrélation temporelle conduit à des taux de compression élevés.

- La redondance spatiale

Dans une image, il existe généralement des zones homogènes, c'est-à-dire, présence d'un nombre de pixels ayant la même valeur de niveaux de gris. On constate qu'il est inutile de coder chaque pixel séparément, car il suffit de coder uniquement le nombre et la valeur.

Comme on peut aussi effectuer des opérations de prédiction et d'interpolation des uns à partir des autres, la redondance spatiale à l'intérieur de l'image peut être mise en évidence par une technique de transformations dans le domaine des fréquences, tel que : DCT (Discrete Cosine Transfom).

- La redondance psychovisuelle

Appelée aussi redondance subjective, elle fait appel au concept de codage perceptuel en tirant profit de la faiblesse du système visuel humain. En fait, elle consiste à coder les détails jugés pertinents et significatifs pour notre système visuel avec un nombre de bits limité, tout en rejetant les détails non perceptibles pour un observateur non averti. L'élimination de la redondance psychovisuelle s'accomplit avec la condition de maintenir un compromis entre le désir de préserver une qualité convenable et la nécessité de réduire suffisamment le débit au regard de la capacité du support de l'information.

- La redondance statistique

Cette redondance est définie par le caractère statistique d'émission des symboles par une source. Alors, dans un alphabet, il existe des symboles dont la fréquence d'apparition est grande, il convient de leur attribuer des mots codes plus courts. Tandis que, les symboles qui se répètent rarement on leur associe des mots codes plus longs. Cette opération de codage à caractère statistique est aussi appelée codage entropique.

I.5.3 Compression d'images fixes : JPEG

La norme JPEG (Joint Photographic Experts Group) est conçue par le groupe ISO (International Standards Organisation) et le groupe IEC (International Electrotechnical Commission) sous la référence ISO/IEC 10918. Elle est destinée à la compression des images fixes en couleurs et à niveaux de gris en vue de leurs stockages sur les supports numériques.

La compression JPEG peut être avec ou sans perte selon le but et le taux de compression recherchés.

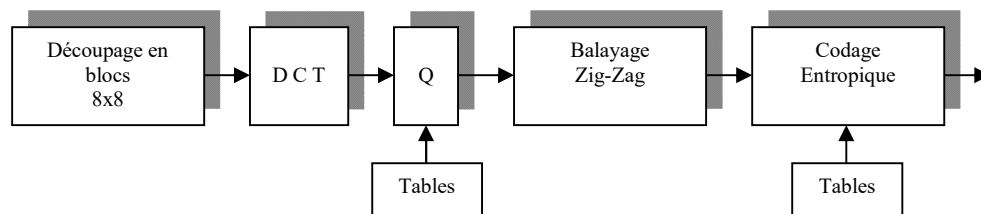


Figure 1.9 - Synoptique fonctionnel du JPEG (basé DCT). Source [10]

I.5.3.1 Etapes de la compression JPEG

La compression JPEG se décompose en 6 étapes :

1- Décomposition en blocs

Tout d'abord un découpage en blocs de tailles $N \times N$ doit être opéré pour pouvoir appliquer la DCT. Le choix de N revient à résoudre un compromis entre performance et qualité. En effet, en augmentant la taille de ces blocs, la compression serait meilleure, mais le coût en temps a été jugé trop grand. Contrairement, en diminuant la valeur de « N », on aura un temps de calcul meilleur, mais un taux de compression moins important.

Le choix s'est porté alors sur une taille de bloc $N=8$, donnant ainsi une complexité de calcul modérée, pour un taux de compression tout à fait acceptable.

2- Transformation DCT

Cette étape (DCT) permet de représenter l'image dans une nouvelle base plus propice à la compression. Dans cette représentation, l'information est plus concentrée.

La Transformée en Cosinus Discrète (DCT : Discrete Cosine Transform), permet de passer d'une représentation d'amplitude discrète bidimensionnelle en une représentation de fréquence discrète bidimensionnelle (c'est-à-dire des coefficients de Fourier).

De même que la transformée de Fourier Rapide (FFT : Fast Fourier Transform), la DCT est une transformation linéaire bijective. Elle est donc irréversible et son inverse s'appelle la DCT inverse ou IDCT (Inverse Discrete Cosine Transform).

La DCT et la IDCT fournissent chacune une matrice carrée. Leurs formules sont données ci dessous. On a bien évidemment $\text{Img}(x,y) = \text{IDCT}(x,y)$.

$$\text{DCT}(i,j) = \frac{2}{N} c(i) c(j) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \text{Img}(x,y) \cos\left(\frac{(2x+1) i\pi}{2N}\right) \cos\left(\frac{(2y+1) j\pi}{2N}\right) \quad (1.16)$$

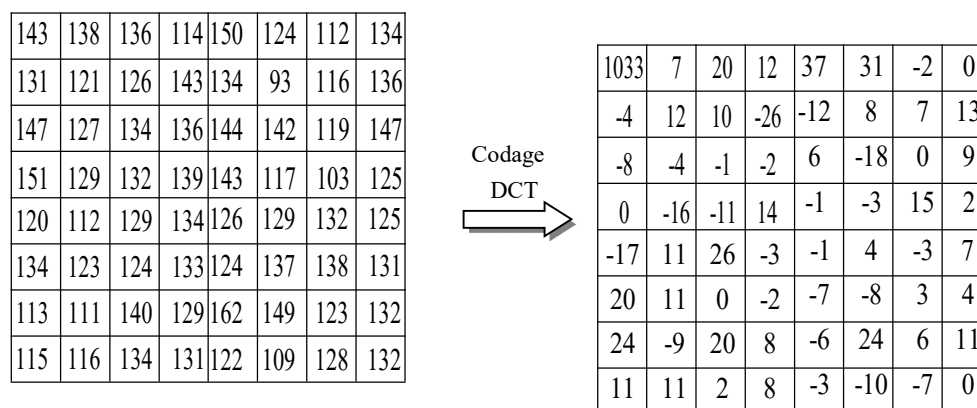
$$\text{IDCT}(x,y) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} c(i) c(j) \text{DCT}(i,j) \cos\left(\frac{(2x+1) i\pi}{2N}\right) \cos\left(\frac{(2y+1) j\pi}{2N}\right) \quad (1.17)$$

$$\text{Avec } c(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{si } u = 0 \\ 1 & \text{si } u > 0 \end{cases}$$

La DCT est effectuée sur chaque matrice 8×8 de valeurs de pixels et elle donne une matrice 8×8 de coefficients de fréquence. L'élément (0,0), appelé coefficient DC (Direct Component), représente la valeur moyenne du bloc et possède la valeur la plus importante de l'ensemble des coefficients. Les autres coefficients, appelés coefficients AC (Alternative Component), indiquent la puissance spectrale pour chaque fréquence spatiale. La DCT est conservative si l'on ne tient pas compte des erreurs d'arrondis qu'elle introduit.

Lorsqu'on travaille avec le signal $\text{Img}(x,y)$, les axes X et Y représentent les dimensions horizontales et verticales de l'image. Lorsqu'on travaille avec la transformée de cosinus discrète du signal $\text{DCT}(i,j)$, les axes représentent les fréquences du signal en deux dimensions.

La DCT, en elle-même, ne comprime donc pas l'image. Elle la représente simplement sous une forme qui se prête beaucoup mieux à la compression. Il ne reste alors plus qu'à appliquer un codage intelligent des différents coefficients.

Figure 1.10 - Transformation du bloc de 8×8 pixels en matrice de 8×8 coefficients. Source [2]

3- Seuillage et quantification

Le seuillage en fonction de la fréquence : les valeurs inférieures à un seuil déterminé, considérés comme peu ou non visibles, seront mise à zéro, il y a là évidemment perte d'information (non réversibilité), mais peu d'incidence sur la qualité subjective de l'image.

La quantification est la phase non conservatrice du processus de compression JPEG (excepté les arrondis effectués). Elle permet, moyennant une diminution de la précision de l'image, de réduire le nombre de bits nécessaires au stockage. Pour cela, elle réduit chaque valeur de la matrice DCT en la divisant par un nombre (quantum) fixé par une table (matrice 8×8) de quantification.

Comme l'œil est moins sensible aux hautes fréquences qu'aux basses fréquences, la diminution de précision sera d'autant plus forte que les fréquences sont élevées, car les informations qu'elles contiennent sont moins pertinentes. La valeur du quantum sera d'autant plus élevée que l'élément correspondant de la matrice DCT contribue peu à la qualité visuelle de l'image, donc qu'il se trouve éloigné dans la séquence zig-zag.

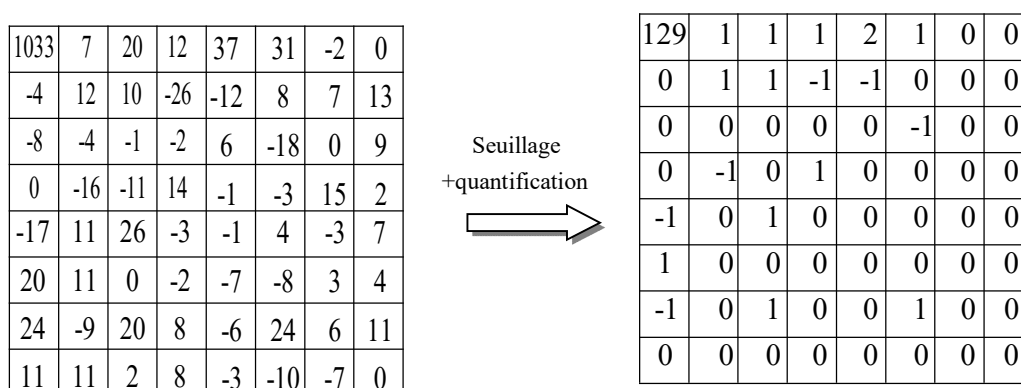


Figure 1.11 - Résultat du processus seuillage + quantification. Source [2]

4- Lecture en zigzag

La première étape de codage de la matrice quantifiée est le codage différentiel de type DPCM (Differential Pulse Code Modulation) pour la composante DC. Le reste de la matrice est lu en parcourant les coefficients AC dans l'ordre imposé par une séquence particulière appelée séquence zigzag. Cette séquence a la propriété de parcourir les éléments en commençant par les basses fréquences et de traiter les fréquences de plus en plus hautes. Puisque la matrice DCT quantifiée contient beaucoup de composantes de hautes fréquences nulles, l'ordre de la séquence zigzag va engendrer de longues suites de 0 consécutifs.

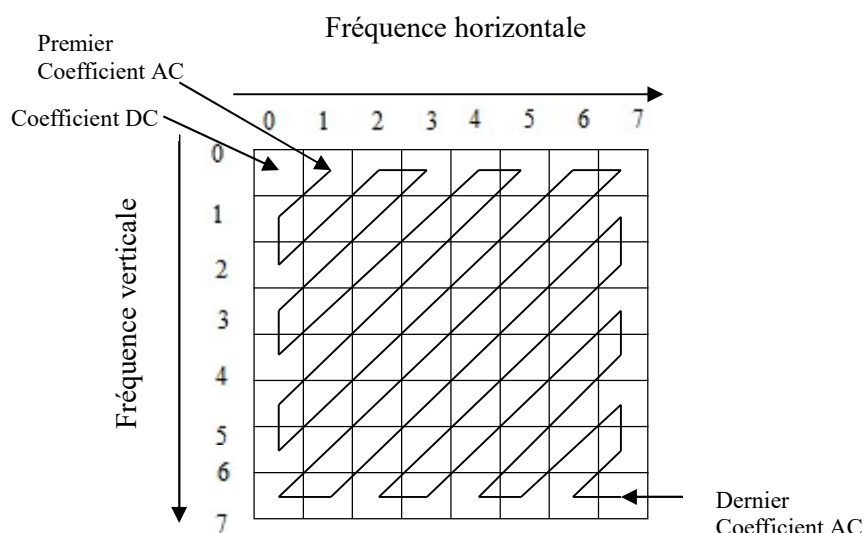


Figure 1.12 - Lecture de la matrice en zigzag. Source [2]

5- Codage RLE (Run Length Encoding)

Le codage des coefficients AC de la matrice DCT quantifiée va se faire suivant le codage RLE. Ce codage est une méthode de compression simple. Son principe est de remplacer une suite de caractères identiques par le nombre de caractères identiques suivi du caractère en question. Par exemple la suite AAAAAAA sera remplacée par 7A.

Ainsi, deux mécanismes sont mis en œuvre pour comprimer la matrice DCT quantifiée. D'une part, les suites de valeurs nulles sont simplement codées par codage RLE. D'autre part, les valeurs non-nulles seront codées en utilisant une méthode statistique de type Huffman.

6- Codage entropique de Huffman (VLC, Variable Length Coding)

Le codage de Huffman du nom de son concepteur, est une méthode statistique de compactage. Son principe est de remplacer un caractère par une suite de bits, sachant que plus la probabilité d'apparition du caractère est importante et plus la séquence de bits représentant ce caractère sera courte. Il crée ainsi des codes de longueurs variables.

Concernant la matrice DCT, il consiste à coder les coefficients avec une longueur d'autant plus courte qu'ils sont plus fréquents statiquement, comme nous l'avons vu plus haut.

I.5.4 La compression d'images animées : MPEG

Le MPEG (Moving Picture Experts Group) est un standard développé par un groupe expert de l'ISO en 1987.

Le MPEG fait référence à une famille standard de compression de fichiers de données audio et vidéo permettant de les transformer sous un format de moindre importance sans dégradation perceptible des informations originelles, cette famille est présentée ci-après.

I.5.4.1 Type d'images MPEG

Dans la norme MPEG, trois types d'images qui s'enchaînent et forment le GOP (Group Of Pictures) (cf. Figure 1.13)

- Les images I (Intra-spatiale) : Elles sont codées sans aucune référence à d'autres images (comme en JPEG) elles sont de ce fait les points d'entrée obligatoire lors de l'accès à une séquence, ce sont des images de référence et leur taux de compression est faible.
- Les images P (Prédites) : Les macroblocs de l'image P peuvent être prédits par estimation et compensation de mouvement arrière autrement dit la zone de recherche se situe dans l'image de référence précédente (I ou P). Leur taux de compression est plus important que celui des images I.
- Les images B (Bidirectionnelles) : Leur macroblocs peuvent être prédits soit par :
 - Estimation et compensation de mouvement arrière : La zone de recherche se situe dans l'image de référence précédente (I ou P).
 - Estimation et compensation de mouvement avant : La zone de recherche se situe dans l'image de référence (I ou P).
 - Estimation et compensation de mouvement bidirectionnel : Le macrobloc résulte de la moyenne entre le macrobloc issu de la compensation de mouvement avant et le macrobloc issu de la compensation de mouvement arrière, on parle alors d'images interpolées. Elles ne propagent pas d'erreurs car elles ne sont pas utilisées pour définir d'autres images, elles ont le taux de compression le plus élevé.

Le GOP est défini comme l'ensemble d'images borné par deux images I consécutives sa longueur est généralement de 12 à 15 images.

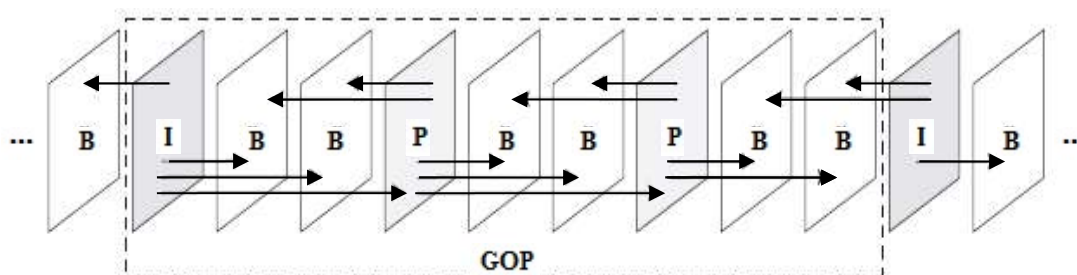


Figure 1.13 - Groupe d'image (GOP), I B et P dans le cadre de MPEG après réorganisation.
Source [15]

I.5.4.2 Structure du flux vidéo

La structure du flux vidéo suit également une structure hiérarchique :

- **La couche Séquence**

Elle correspond à la structure la plus haute. Ce niveau d'information contient les informations générales relatives à la séquence, principalement le format des images (taille, ratio des pixels, nombre d'images par seconde), le débit, la taille du buffer de décodage, et les deux tables de quantification pour le codage des blocs intra et inter.

- **La couche Group Of Pictures (GOP)**

Chaque séquence d'images est décomposée en une succession de GOP. La composition des GOP doit contenir au moins une image Intra et un nombre d'images P ou B variable. L'obligation d'avoir une image Intra permet de prendre en compte la contrainte d'accès aléatoire aux images. (le GOP habituel est de (3,12)).

- **La couche image (Picture)**

C'est la couche d'affichage élémentaire.

- **La couche tranche (Slice)**

C'est la couche qui permet l'adressage à l'intérieur de l'image. Elle est définie comme une suite de macrobloc ; l'ensemble des slices doit couvrir toute l'image, sans chevauchement entre elles.

- **Macrobloc (macroblock)**

De taille 16×16 pixels, le macrobloc est formé de 4 blocs de luminance et 2 blocs de chrominance $1 \times C_r$ et $1 \times C_b$, chacun de 8×8 pixels.

Il y a trois formats de chrominance pour les macro-blocs, référencés par : 4:2:0, 4:2:2 et 4:4:4. L'ordre des blocs est différent pour chaque format de chrominance.

- **Bloc (block)**

Sa taille est de 8×8 pixels, c'est comme en JPEG, la couche où s'effectue la DCT.

I.5.4.3 La norme MPEG-1

Le MPEG-1 (ISO/IEC 11172), finalisé en 1992, est un standard pour la compression des données vidéo et des canaux audio associés (jusqu'à 2 canaux pour une écoute stéréo) « Coding Of Moving Picture And Associated Audio ». Elle permet de stocker des vidéos à un débit de 1,5 Mbits/s avec une qualité relativement proche des cassettes VHS. Le MPEG-1 est devenu par la suite la norme de stockage de vidéos sur CD-ROM au format CD-I ou VCD (vidéo CD).

MPEG-1 se décompose en cinq parties : la partie système, la partie vidéo, la partie audio, la partie tests de conformité et la partie simulation logicielle.

En MPEG-1, le schéma vidéo suivant montre l'obtention d'un débit constant à partir d'un flux d'images (I, P, B), pour coder que la différence entre ces images en appliquant la même méthode que le JPEG.

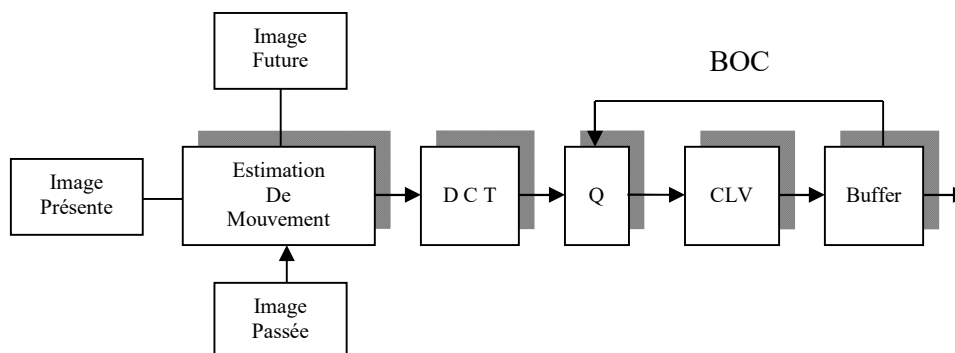


Figure 1.14 - Synoptique fonctionnel de MPEG 1. Source [10]

I.5.4.4 La norme MPEG-2

La qualité de vidéo compressée au format MPEG-1 avec un débit de 1,5 Mbits/s a été jugée inacceptable pour de nombreuses applications. Ainsi, MPEG-2 (enregistrée à l'ISO sous le code ISO/IEC 13818) est une extension de la norme MPEG-1 pour être utilisée dans une plus large gamme d'applications avec des débits (2-20 Mbits/s) et des résolutions variées. Aussi, ce standard convient pour le DVD, la HDTV (TV Haute Définition) et les images fortement animées.

Comme dans le cas précédent, cette norme est découpée en plusieurs parties (plus nombreuses que pour le MPEG1), les parties de un à cinq portent sur les mêmes sujets que pour le MPEG-1.

Les principes de compression utilisés sont les mêmes que pour la norme MPEG-1, mais avec des idées supplémentaires pour augmenter le taux de compression. De plus, la norme MPEG-2 offre la possibilité de coder les séquences vidéo entrelacées : les blocs et macroblocs peuvent ainsi être créés sur l'image complète (formée par deux trames successives) ou sur chaque trame séparément.

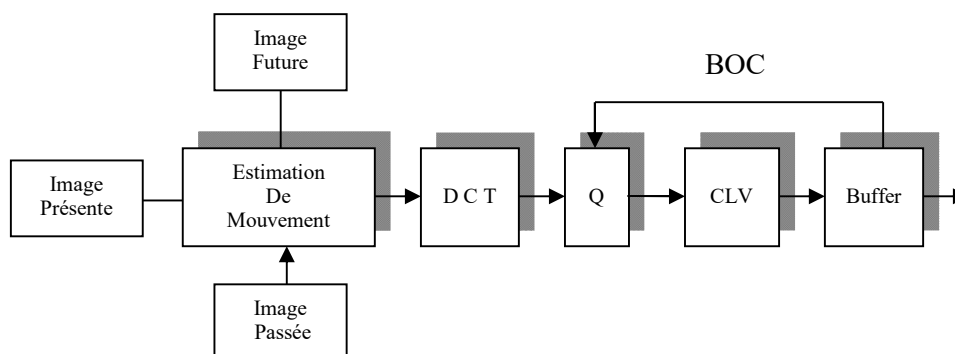


Figure 1.15 - Synoptique fonctionnel de MPEG 2. Source [10]

I.5.4.4.1 Profils et niveaux

L'apport de MPEG-2 par rapport à MPEG-1 concerne principalement la création de différents niveaux et différents profils.

- Les niveaux de MPEG-2

Quatre niveaux définissent la résolution de l'image sous MPEG-2 selon le tableau 1.3 :

Niveau de MPEG 2	Format de codage
Low level	H 352 V 288
Main level	H 720 V 576
High-1440 level	H 1440 V 1152
High level	H 1920 V 1152
H : Horizontal V : Vertical	

Tableau 1.3 - Les quatre résolutions disponibles en MPEG-2. Source [10]

- Les profils de MPEG-2

La norme MPEG-2 est caractérisée par six profils :

- Simple profile
- Main profile
- SNR scalable profile
- Spatially scalable profile
- High profile
- 4 : 2 : 2

I.5.4.4.2 Option permise par la norme MPEG-2

La combinaison des quatre niveaux et des six profils facilite l'exploitation de MPEG 2 comme (caisse à outils) de la compression.

	Profil	Simple	Main	Snr	Spatial	High	4 : 2 : 2
Niveau	Types d'images	I, P	I, P, B	I, P, B	I, P, B	I, P, B	I, P, B
	Format Chroma	4 : 2 : 0	4 : 2 : 0	4 : 2 : 0	4 : 2 : 0	4 : 2 : 2	4 : 2 : 2
High	Echantillons/ligne		MP@HL			HP@HL	422P@HL
	Lignes/image		1920			1440	1920
	Images/seconde		1152			1152	1088
	Débit maximum		60 80 Mb/s			60 100Mb/s	60 300 Mb/s
High 1440	Echantillons/ligne		MP@H14L		SSP@H14L	SSP@H14L	
	Lignes/image		1140		1140	1140	
	Images/seconde		1152		1152	1152	
	Débit maximum		60 60 Mb/s		60 60 Mb/s	60 80 Mb/s	
Main	Echantillons/ligne	SP@ML	MP@ML	SNRP@ML		HP@ML	422P@ML
	Lignes/image	720	720	720		720	720
	Images/seconde	576	576	576		576	608
	Débit maximum	30 15 Mb/s	30 15 Mb/s	30 15 Mb/s		30 20 Mb/s	30 50 Mb/s
Low	Echantillons/ligne		MP@LL	SNPR@LL			
	Lignes/image		352	352			
	Images/seconde		288	288			
	Débit maximum		30 4 Mb/s	30 4 Mb/s			

Tableau 1.4 – Option permise par la norme MPEG-2. Source [10]

1.5.4.5 La norme MPEG-4

La norme MPEG-4 (ISO/IEC 14496) se veut plus ambitieuse que les précédentes versions de MPEG. En MPEG-4, le principe est le même qu'en MPEG-2 : des images Intra, des images Prédites et des images Bidirectionnelles.

La principale différence réside dans la compensation de mouvement.

D'abord les invariants ne sont plus des macroblochs mais de vrais objets 2D ou 3D définis avec leur géométrie (trame) et leur texture. On distingue quatre types d'objets :

- Des objets vidéo (plages de texture qui varie d'une image à l'autre),
- Des objets de texture fixe (plages de texture qui ne change pas dans le temps),
- Des objets maillés (géométrie définie par un maillage triangulaire 3D)
- Enfin des objets maillés humains (corps et visages).

Chacun de ces objets peut non seulement se déplacer (vecteur vitesse), comme en MPEG-2, mais aussi pivoter. On peut même faire pivoter les objets 3D selon un axe quelconque : ainsi, toutes les formes de déplacement peuvent être décrites. On peut aussi décrire les déformations ou les dilatations d'un objet.

En outre, en MPEG-4 ce n'est plus la transformée en cosinus discrète, décrit plus haut, qui code les objets, mais la transformée par « ondelettes ». Cette technique, qui ressemble à la transformée en cosinus discrète, offre une efficacité encore plus grande en ce sens que les détails fins (fréquences spatiales élevées) nécessitent plus d'ondelettes (c'est-à-dire plus de coefficients descriptifs) que les grandes masses (fréquences spatiales basses). Ce codage est plus efficace parce que l'essentiel des objets est généralement pauvre en fréquences spatiales

élevées. On trouve de telles fréquences essentiellement sur les contours de chaque objet : ce sont elles qui déterminent la netteté du contour.

L'ensemble composé du codage d'objets et de la transformée en ondelettes permet une description « naturelle », donc plus efficace. Une voiture qui s'approche tout en prenant un virage est difficile à coder en MPEG-2, parce que les macroblocs ont une taille et une forme fixes (16×16 pixels), alors que les éléments du contenu de l'image non, puisque la voiture s'approche et tourne. En revanche, le MPEG-4 sera beaucoup plus économique en données à transmettre sur un exemple tel que celui-là. On décrit l'objet (la voiture), puis, pour chaque image P, on précisera son déplacement, sa déformation et l'évolution de sa texture. C'est économique parce que la description MPEG-4 est plus proche de la manière dont est composé le monde visible : il n'y a pas de macroblocs dans la nature. En revanche, il y'a des personnages, des arbres, des voitures, des animaux, etc.

Ainsi, grâce à ces techniques de codage, on peut réduire encore davantage le débit. Un programme de télévision pourra être d'autant plus comprimé que l'image est moins animée. L'image d'un programme de télévision courant peut généralement être comprimée à 3 Mbits/s en MPEG-2 et à 1 Mbits/s en MPEG-4 sans que sa qualité soit affectée.

I.5.5 Compression audio

Dans le domaine audio, deux voies ont été essayées, soit passer par une DCT soit passer par un codage en sous-bande. Dans la pratique, le codage en sous-bande s'est avéré la voie la plus appropriée pour préparer une réduction irréversible du débit sonore. Celle-ci utilise un modèle perceptuel associé à d'autres fonctionnalités à caractère irréversible comme la quantification ou la décimation.

I.5.5.1 Principe de la compression audio

Trois observations vont permettre d'élaborer un codage du son mieux adapté aux réalités physiologiques de l'oreille humaine. Ce codage pourra servir de base aux méthodes de compression :

L'oreille n'a sa sensibilité maximale que dans une faible portion (de 500 Hz à 10 KHz environ) de la bande de fréquences audibles (20 Hz-20 KHz).

La sensibilité de l'oreille à chaque fréquence est affectée par la présence d'un son sur une autre fréquence : ainsi, par exemple, en présence d'un son à 200 Hz de fort niveau (30 dB au dessus du seuil d'audibilité) de l'oreille à 500 Hz est supérieur de 20 dB à ce qu'il est en l'absence de tout autre signal. Ce phénomène s'appelle le masquage fréquentiel.

Enfin, la sensibilité de l'oreille est moindre juste après un bruit fort, ce qui est compréhensible, mais on a constaté aussi qu'elle était amoindrie avant un bruit fort. On est en présence d'un phénomène où la cause semble précéder l'effet, mais on ne perdra pas de vue que ce phénomène n'est pas purement physique, ni même purement physiologique. Il est probable que le système cérébral humain « oublie » les sons forts. Ce phénomène s'appelle le masquage temporel.

I.5.5.2 Le codage en sous-bandes

Le principe du codage consiste à diviser la bande passante audio en 32 sous-bandes de largeur identique au moyen d'un banc de filtre dit polyphase. L'encodeur fait une analyse fréquentielle par TFTD (Transformée de Fourier à Temps Discret) de chaque sous-bande et détermine le niveau de bruit tolérable à l'aide d'un modèle psycho-acoustique. Le nombre minimal de bits nécessaires à chaque sous-bande est ensuite attribué par l'encodeur afin que les erreurs de quantification ne soient pas perceptibles. Pour cela, il tient compte des effets de masque. Les informations de quantification de chaque sous-bande sont ensuite transférées avec les échantillons de la sous-bande codée.

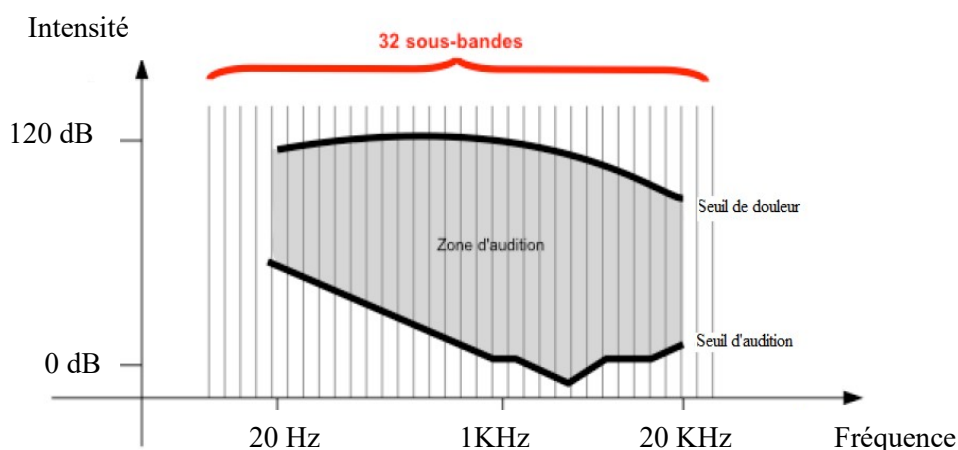


Figure 1.16 - Division de la bande audiofréquence en 32 sous-bandes. Source [10]

I.5.5.3 MPEG-1 audio

Cette norme définit un codage à bas débit permettant le transport de signaux audionumériques de haute qualité, associés ou non à des images, sur des supports de stockage ou des canaux de transmission de capacité limitée. Elle introduit trois modes de présentation sonore : monophonique, stéréophonique, stéréophonique combiné.

I.5.5.4 Les layers

Dans MPEG-1 audio, trois «niveaux» différents (les layers) ont été définis. Ils ont en commun un certain nombre de caractéristiques (les fréquences d'échantillonnage utilisées : 32 KHz, 44,1 KHz et 48 KHz, la structure de base, le mode de traitement des données) mais ils se distinguent essentiellement par la complexité des encodeurs, donc par la plage du débit numérique correspondant à un niveau de qualité donné.

Les 3 types de codecs sont compatibles sur le plan hiérarchique : un décodeur de niveau 3 décodera les layers 1, 2 ou 3 mais un décodeur prévu pour le layer 2 n'acceptera de décoder que les layers 1 et 2. La complexité des codecs et les performances croissent avec chacun des layers : pour un débit donné, la qualité de la restitution sera meilleure avec un layer 3 qu'avec un layer 1 mais le codeur du layer 3 sera plus complexe.

- Le layer 1

C'est le système le plus simple. Les débits utilisables sont compris entre 32 Kbits/s et 448 Kbits/s. Bien que dépendant de l'encodage, la qualité CD est obtenue avec un débit de 384 Kbits/s environ pour un programme stéréo.

- Le layer 2

Parfois mentionné dans la littérature un peu ancienne sous le nom de Musicam (Masking Pattern adapted Universal Subband Coding And Multiplexing) par référence à l'algorithme développé par le CCETT, Philips et IRT... qui a servi de base à la création de ce point de la norme. Les débits sont compris entre 32 Kbits/s et 384 Kbits/s ce qui correspond à des taux de compression plus importants que pour le layer 1 et donc à une complexité accrue au niveau des équipements (2 à 4 fois plus importante pour l'encodage, 25% pour le décodeur). La qualité CD est obtenue avec un débit de 256 Kbits/s pour un programme stéréo. Ce layer est très utilisé pour la télévision numérique (DVB). Il a également été intégré dans les normes du DVD, mais il n'a guère été utilisé dans les faits.

- Le layer 3

Les débits sont compris entre 32 Kbits/s et 320 Kbits/s. Il est adapté aux plus faibles débits grâce à la plus grande complexité de son codeur (avec notamment, outre la division en 32 sous-bandes principales, une subdivision supplémentaire pour chacune d'entre-elles en 18 sous-bandes soit au total 576) qui permet des plus grandes performances. La qualité CD est obtenue pour 192 Kbits/s environ. C'est très certainement le format le plus connu dans le monde entier sous son « nom de scène » MP3, qui se rapporte à l'expression « MPEG layer 3 ». Très utilisé sur internet, il offre à 128 Kbits/s une réduction du volume des fichiers de 10 à 12 fois par rapport au classique CD audio. Il est également utilisé pour la même fin dans les baladeurs et dans les portables nouvelle génération.

1.5.5.5 MPEG-2 audio

MPEG-2 a été finalisé en 1994. Elle apporte à MPEG-1 des fonctionnalités supplémentaires :

- Une extension vers les bas débits avec des fréquences d'échantillonnage de 16 KHz, 22,05 KHz et 24 KHz et des débits plus faibles qui peuvent descendre jusqu'à 8 Kbits/s.
- La prise en compte de canaux supplémentaires pour les applications multicanaux. Avec MPEG-2, on passe de la restitution stéréophonique qui était de mise avec le CD audio à des dispositifs de reproduction « surround » comprenant jusqu'à 5 ou 7 canaux audio en pleine bande. On y associe généralement un canal supplémentaire destiné à la seule reproduction des sons les plus graves (LFE pour Low Frequency Effect). Ces dispositifs sont souvent mentionnés dans la littérature sous l'appellation 5.1 ou 7.1, le chiffre 1 faisant référence à ce canal LFE.

MPEG-2 audio est une extension de MPEG-1 audio avec qui il reste compatible, d'où la dénomination de MPEG-2 BC (pour Backward Compatible) qui est parfois employée. Un décodeur MPEG-1 décodera la partie stéréo de MPEG-2 et ignorera les données relatives à l'extension multicanal.

MPEG-2 audio n'apporte pas d'amélioration par rapport à MPEG-1 au niveau de la qualité de la restitution. L'évolution qualitative sera obtenue avec les versions suivantes de MPEG.

I.5.5.5 MPEG-4 audio

MPEG-4 se caractérisait lors des premiers travaux de normalisation par son approche « objet » avec toutes les formes d'interactivité attenantes que l'on pouvait imaginer. Comme pour la vidéo où le contenu d'une image pouvait être décomposé en une série d'objets indépendants que l'on pourrait manipuler et coder séparément les uns des autres, il avait été prévu une approche similaire pour l'audio. Le codage du son en MPEG 4 est une évolution du codage MUSICAM qui ressemble à l'évolution du codage de l'image entre MPEG-2 et MPEG-4. Des descripteurs d'objets sonores rendent possible une recomposition du son dans le décodeur. On peut, par exemple, transmettre du son orienté vers l'intelligibilité de la parole, ou vers la fidélité des textures ; Le décodeur ne reproduira plus, en tant que telles, les fréquences sonores qui ont été captées par le microphone, mais il synthétisera un son qui aura le même effet physiologique sur l'oreille de l'auditeur.

Ceci offrait les avantages suivants : une adaptation du codage utilisé en fonction de la nature même de chacune des composantes sons (parole, musique, bruitages, sons synthétiques...), la mise en œuvre de traitements spécifiques (effets, spatialisation, positionnement des sons dans l'espace).

Cette approche originelle a depuis été mise en « stand by » au profit de toutes les améliorations portant sur l'aspect qualitatif et sur la réduction des débits.

I.6 MULTIPLEXAGE MPEG

Le terme « multiplexage » regroupe l'ensemble des techniques qui permettent de transmettre simultanément plusieurs signaux indépendants à travers un seul support de transmission.

Le multiplexage permet d'assurer la transmission des signaux vidéo, audio et les données vers les unités de stockage, de transmission et de diffusion.

I.6.1 La couche système de MPEG - 1

La partie système de la norme MPEG-1 (ISO/IEC 11172-1) définit les règles pour la constitution d'une couche système (système layer) regroupant vidéo, audio et d'autres données (private data) en un seul train, ainsi que les contraintes sur les trains élémentaires permettant d'assurer cette combinaison .

Les 5 fonctions de base de la couche Système qui entoure la couche de compression sont les suivantes :

- Synchronisation de trains élémentaires (Elementary Stream, ES) compressés multiples, afin que le décodeur puisse séparer les données et synchroniser l'image et le son à la reproduction.

- Combinaison de ces trains multiples en un seul train de données. Chaque ES est découpé en paquets qui constituent ainsi un PES (Packetized Elementary Streams.) Les PES sont ensuite rassemblés sous forme de packs pour le multiplexage.
- Initialisation des mémoires-tampons (buffers) au début de la reproduction.
- Gestion continue de ces buffers afin d'éviter qu'ils ne débordent (overflow) ou ne se vident (underflow).
- Identification du temps par des marqueurs (time stamps), tous exprimés en fonction d'un temps absolu, une horloge système commune.

Comme le MPEG-1, la partie système de MPEG-2 (ISO/IEC 13818-1) définit l'organisation du multiplex. Cependant MPEG-2 prévoit deux manières différentes de multiplexer les PES pour former deux types de trains suivant l'application visée.

I.6.2 Le train élémentaire de paquets de MPEG-2 (Packetised Elementary Stream)

La sortie d'un codeur vidéo MPEG est un train élémentaire de vidéo, ES. Il en est de même pour le codeur audio. Avant d'être multiplexés, les ES audio et vidéo sont découpés en paquets élémentaires : Les PES audio et les PES vidéo. La longueur de chaque paquet peut être variable.

I.6.3 Le train Programme de MPEG - 2 PS (Program Stream)

Les données d'entrée du multiplexeur de Program Stream ainsi que les données de sortie du démultiplexeur de Program Stream sont les PES audio et vidéo. Le Program Stream est similaire au train système de MPEG-1.

Les caractéristiques du train programme MPEG-2 (Program Stream) :

- Il contient un ou plusieurs PES qui appartiennent à un programme et partagent obligatoirement la même horloge de temps.
- Il est destiné à des applications où le dispositif de stockage ou de transmission est susceptible de n'introduire que très peu d'erreurs (error free medium), comme c'est le cas pour les applications multimédia sur CD-ROM ou DVD, ou disque dur.
- Ses paquets peuvent être longs (par exemple 2048 octets) et de longueur variable.

I.6.4 Le train Transport de MPEG - 2 TS (Transport Stream)

Les données d'entrée du multiplexeur de Transport Stream ainsi que les données de sortie du démultiplexeur de Transport Stream sont les PES audio et vidéo.

Le train Transport de MPEG-2 a les caractéristiques suivantes :

- Il peut contenir plusieurs programmes ne partageant pas forcément la même horloge système (System Time Clock, STC). Ce n'est qu'à l'intérieur d'un même programme que les

PES audio et vidéo doivent être synchronisés.

- Il est destiné au transport de programmes TV à longue distance sur des supports susceptibles d'introduire un taux d'erreur assez élevé (error prone medium). La longueur des paquets doit être courte pour permettre l'introduction de dispositifs de correction d'erreurs efficaces.
- Il possède une structure de paquet de longueur fixe de 188 octets. Un paquet Transport consacre 4 octets à l'en tête (header) et 184 octets à la charge utile (Payload) et/ou à un champ d'adaptation.
- La longueur des paquets PES ne sont pas multiples de 184 octets et le dernier paquet transport d'un paquet PES devra donc débiter par un champ d'adaptation (Adaptation Field, AF), dont le rôle ne se limite pas au remplissage, mais sert aussi à véhiculer la référence d'horloge du programme (PCR, Program Clock Reference), dont la cadence de répétition est dix par seconde.

I.7 CONCLUSION

Une fois toutes les opérations de numérisation, de compression et de multiplexage du signal effectuées, il y a lieu de procéder à sa modulation numérique en vue de l'adapter au canal de transmission ; une opération dont le traitement figure au chapitre suivant.

II.1 INTRODUCTION

Pour pouvoir être transmis, un signal doit être conforme aux caractéristiques du canal de transmission. Aussi, pour répondre aux normes de conformité évoquées, il y a lieu de procéder à la modulation numérique de ce même signal.

Ce chapitre est consacré à la description de l'opération de cette modulation numérique.

II.2 MODULATIONS NUMERIQUES

La modulation a pour objectif d'adapter le signal à émettre au canal de transmission. Cette opération consiste à modifier un ou plusieurs paramètres (amplitude, fréquence, phase) d'un signal appelé porteuse (signal de haute fréquence) par la variation de l'amplitude d'un autre signal appelé signal modulant (signal de basse fréquence), le signal obtenu après modulation est le signal modulé.

Si le signal modulant se présente sous forme numérique (suite de 0 et 1) on parlera de la modulation numérique sachant qu'à proprement dit cette opération est toujours analogique et le modulateur doit obligatoirement disposer d'un CNA à son entrée pour faire un passage du numérique à l'analogique avant d'effectuer la modulation.

Signal modulé : $\left\{ \begin{array}{l} \text{Porteuse (onde électromagnétique sinusoïdale)} \\ \text{Signal modulant (représente l'information binaire)} \end{array} \right.$

II.3 TYPES DE MODULATIONS NUMERIQUES

Les modulations numériques se caractérisent suivant le paramètre qui a été modifié

- Modifier l'amplitude de la porteuse : Modulation par Déplacement d'Amplitude « MDA » (en anglais ASK Amplitude Shift Keying).
- Modifier la fréquence de la porteuse : Modulation par Déplacement de Fréquence « MDF » (en anglais FSK Frequency Shift Keying).
- Modifier la phase de la porteuse : Modulation par Déplacement de Phase « MDP » (en anglais PSK Phase Shift Keying).

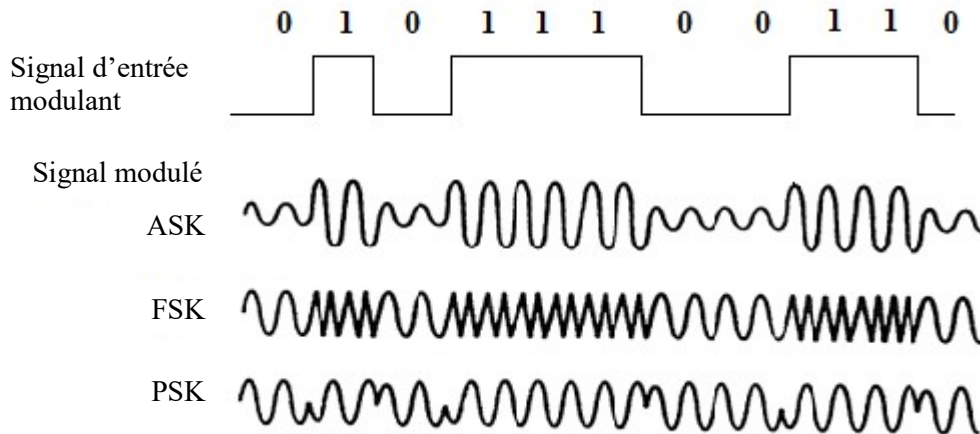


Figure 2.1 - Représentation des signaux modulés par un signal numérique. Source [10]

II.4 CRITERES DE QUALITE POUR UNE MODULATION NUMERIQUE

Ces derniers sont :

- Sensibilité au bruit.
- Sensibilité aux non-linéaires (dus aux amplificateurs de puissance).
- Sensibilité aux interférences (diaphonie entre canaux hertziens, brouilleurs).
- Occupation spectrale (bande de fréquences occupée par le signal modulé).
- Efficacité spectrale (débit binaire par Hertz).
- Sensibilité à l'interférence intersymbole.
- Complexité de réalisation.

II.5 DEFINITIONS

D : Débit binaire (bits/s)

C'est le nombre de bits par seconde à transmettre par le système.

T_b étant la durée d'un bit, on peut écrire la relation :

$$D = \frac{1}{T_b} \quad (2.1)$$

R : Rapidité de modulation (bauds)

C'est le nombre de symboles par seconde, c'est-à-dire le nombre de changements d'états de la modulation par seconde.

T_s étant la durée d'un symbole, on peut écrire la relation :

$$R_s = \frac{1}{T_s} \quad (2.2)$$

K : Nombre de bits par symbole

C'est le nombre de bits que représente chaque état de la modulation.

$$k = \frac{D}{R_s} \quad (2.3)$$

B : Bande de base occupée par le signal modulant (Hz)

C'est la bande de fréquences d'origine du signal modulant comprise entre 0 et un certain $F_{\max}$.

W : Bande RF occupée par le signal modulé (Hz)

C'est la bande de fréquences occupée par le signal modulé centrée sur la fréquence f_0 de la porteuse.

Cette bande de fréquences dépend de la largeur de bande du filtre utilisé avant modulation ; elle est, au minimum, égale à 1 Hz par baud.

$$W \geq R_s \quad (2.4)$$

BW : Bande du canal de transmission à - 3 dB (Hz)

C'est la bande de fréquences occupée par le canal de transmission (satellite ou autre) définie par la largeur de ce canal à un niveau de - 3 dB par rapport au niveau de référence.

η : Efficacité spectrale (bits/s/Hz)

C'est le débit binaire transmis par le signal modulé ramené à une bande de 1 Hz.

$$\eta = \frac{D}{W} = \frac{\text{Débit binaire (bits/s)}}{\text{Bande RF (Hz)}} \quad (2.5)$$

M : Nombre d'états de la modulation

C'est le nombre d'états différents que peut prendre une modulation : par exemple, une MDP 4 a quatre états de phase différents et M vaut donc 4. On peut établir une relation entre k et M.

$$k = \log_2 M \quad (2.6)$$

Exemple Pour une MDP4

$$M = 4 \Rightarrow K = \log_2 4 = \log_2 2^2 = 2 \text{ bits par symbole.}$$

II.6 MODULATIONS PAR DEPLACEMENT DE PHASE (MDP)

La MDP est une modulation à amplitude quasi constante (les états de phase sont à amplitude constante mais il y a passage par zéro pour les transitions entre états opposés). Ce type de modulation est utilisé dans des systèmes introduisant des distorsions d'amplitude importantes (par exemple sur les satellites dont les tubes amplificateurs sont généralement utilisés en saturation).

La MDP permet d'associer à chacun des états binaires du signal modulant un état de phase de la porteuse.

Les types de la modulation par déplacement de phase sont :

- MDP 2 : BPSK (Binary Phase Shift Keying)
- MDP 4 : QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

On sait réaliser des modulations par déplacement de phase à grand nombre d'états, mais en pratique, on ne dépasse pas la MDP 8, la plus utilisée étant la MDP 4.

II.6.1 Modulation par déplacement de phase à 2 états : MDP 2 (BPSK)

Expression de l'onde porteuse :

$$y(t) = A \cos \omega_0 t \quad (\varphi_0 = 0) \quad (2.7)$$

Signal modulant :

- Un débit d'information binaire.
 - Deux états binaires « 0 » et « 1 ».
 - Deux états de phase (φ_k) 0 et π .

Expression du signal modulé :

$$y(t) = A \cos (\omega_0 t + \varphi_k) \quad (2.8)$$

- Pour les états binaires « 0 », $\varphi_k = 0$:

$$y(t) = A \cos \omega_0 t \quad (2.9)$$

- Pour les états binaires « 1 », $\varphi_k = \pi$:

$$y(t) = A \cos (\omega_0 t + \pi) \quad (2.10)$$

$$y(t) = -A \cos \omega_0 t \quad (2.11)$$

Etat logique binaire	Etat de phase de la porteuse (φ_k)
----------------------	--

0	0
1	π

Tableau 2.1 - Table des états de MDP 2. Source [10]

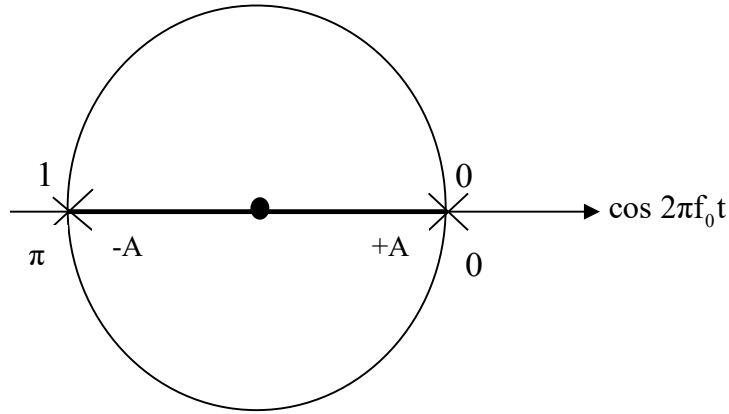


Figure 2.2 - Diagramme des constellations et des transitions de MDP 2. Source [10]

II.6.1.1 Efficacité spectrale en MDP 2 (BPSK)

$$M = 2 \Rightarrow k = \log_2 2 = 1$$

$$k = \frac{D}{R_s} \Rightarrow R_s = D$$

$$\text{Filtrage optimal : } W = R_s \Rightarrow W = D$$

$$\text{On a donc : } \eta = \frac{D}{W} = 1 \text{ bits/s/Hz}$$

Remarque

MDP 2 = MAPS (Modulation d'Amplitude à Porteuse Supprimée)

$$\text{MAPS : } y(t) = s(t) \cos \omega_0 t$$

$s(t)$ représente le signal modulant (signal binaire à deux états « 0 » ou « 1 »)

$s(t)$ vaut : $+A$ pour l'information binaire « 0 ».

$-A$ pour l'information binaire « 1 ».

On retrouve : $y(t) = +A \cos \omega_0 t$ pour l'information binaire « 0 ».

$y(t) = -A \cos \omega_0 t$ pour l'information binaire « 1 ».

II.6.2 Modulation par déplacement de phase à 4 états : MDP 4 (QPSK)

Expression de l'onde porteuse :

$$y(t) = A \cos \omega_0 t \quad (\varphi_0 = 0) \quad (2.12)$$

Signal modulant :

- Deux bits d'information binaire.
- Quatre états binaires.
- Quatre états de phase séparés de $\pi/2$ (voir table des états).

Expression du signal modulé :

$$y(t) = A \cos (\omega_0 t + \varphi_k) \quad (2.13)$$

φ_k prenant l'une des quatre valeurs définies par la table des états.

Etat logique binaire	Etat de la porteuse (φ_k)
00	$\frac{\pi}{4}$
10	$\frac{3\pi}{4}$
11	$\frac{5\pi}{4}$
01	$\frac{7\pi}{4}$

Tableau 2.2 - Table des états de MDP 4. Source [10]

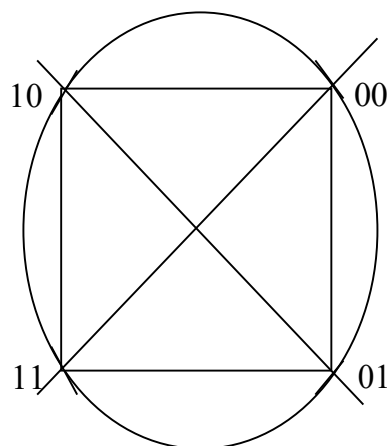


Figure 2.3 - Diagramme des constellations et des transitions de MDP 4. Source [10]

II.6.2.1 Efficacité spectrale en MDP 4 (QPSK)

$$M = 4 \Rightarrow k = \log_2 4 = 2$$

$$k = \frac{D}{R_s} \Rightarrow R_s = \frac{D}{2}$$

$$\text{Filtrage optimal : } W = R_s \Rightarrow W = \frac{D}{2}$$

$$\text{On a donc : } \eta = \frac{D}{W} = 2 \text{ bits/s/Hz}$$

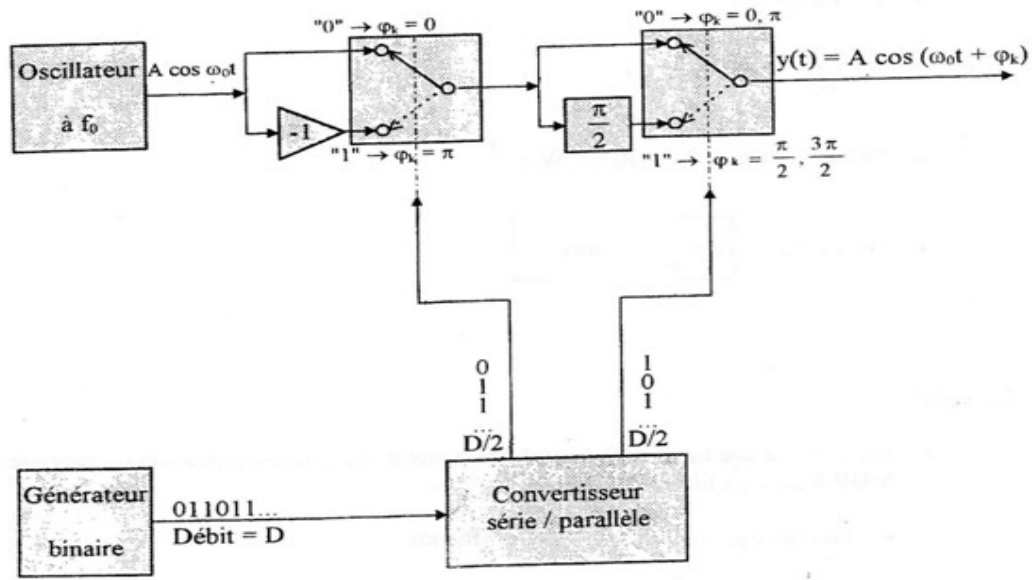


Figure 2.4 - Modulateur MDP 4 (modulation de phase). Source [10]

Remarque

MDP 4 : double MAPS en quadrature

$$y(t) = s_1(t) \cos \omega_0 t + s_2(t) \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2})$$

$s_1(t)$ et $s_2(t)$ représentent le signal modulant (2 bits d'information binaire, soit 4 états en tout).

$s_1(t)$ vaut : + A pour l'information binaire « 0 »
- A pour l'information binaire « 1 »

$s_2(t)$ vaut : +A pour l'information binaire « 0 »
-A pour l'information binaire « 1 »

Le diagramme des constellations est obtenu en faisant la somme vectorielle de chaque point obtenu sur les axes des cosinus et sinus.

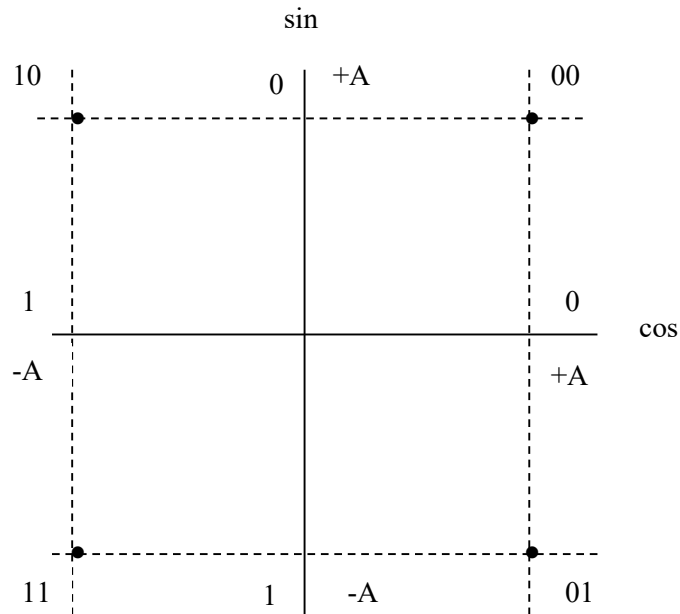


Figure 2.5 - Diagramme des constellations en double MAPS en quadrature. Source [10]

II.7 MODULATION D'AMPLITUDE EN QUADRATURE (MAQ)

Une modulation MAQ (en anglais QAM : Quadrature Amplitude Modulation) est réalisée par une double modulation d'amplitude à porteuse supprimée (MAPS) selon deux axes en quadrature (à 90° l'un de l'autre) appelés :

- Axe I pour l'axe en phase (In phase).
- Axe Q pour l'axe en quadrature.

La MAQ est en fait une modulation mixte, amplitude et phase.

Pour un nombre d'états de la modulation $M > 4$, une MAQ-M est supérieure, pour un canal linéaire, à une MDP-M (une MAQ-M est moins sensible au bruit qu'une MDP-M car elle présente une distance entre ses états plus importante).

On sait réaliser, actuellement, des modulateurs MAQ à 256 états.

La norme DVB câble, par exemple, est définie pour des MAQ 16 à 64.

II.7.1 Modulation d'amplitude en quadrature à 4 états MAQ 4 (4 QAM)

Expression d'une MAQ :

$$y(t) = s_1(t) \cos \omega_0 t + s_2(t) \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}) \quad (2.14)$$

$s_1(t)$ et $s_2(t)$ représentent le signal modulant (2 bits donc 4 états).

$s_1(t)$ vaut : $+A$ pour l'information binaire « 0 ».

-A pour l'information binaire « 1 ».

$s_2(t)$ vaut : +A pour l'information binaire « 0 ».

-A pour l'information binaire « 1 ».

MAQ 4 est identique à MDP 4

II.7.2 Modulation d'amplitude en quadrature à 16 états MAQ 16 (16 QAM)

$$y(t) = s_1(t) \cos \omega_0 t + s_2(t) \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}) \quad (2.15)$$

$s_1(t)$ et $s_2(t)$ représentent le signal modulant (4 bits donc 16 états).

$s_1(t)$ prend les valeurs : +A, -A, +3A, -3A sur l'axe I.

$s_2(t)$ prend les valeurs : +A, -A, +3A, -3A sur l'axe Q.

Le diagramme des constellations est obtenu en faisant la somme vectorielle de chaque point obtenu sur les axes des cosinus et sinus.

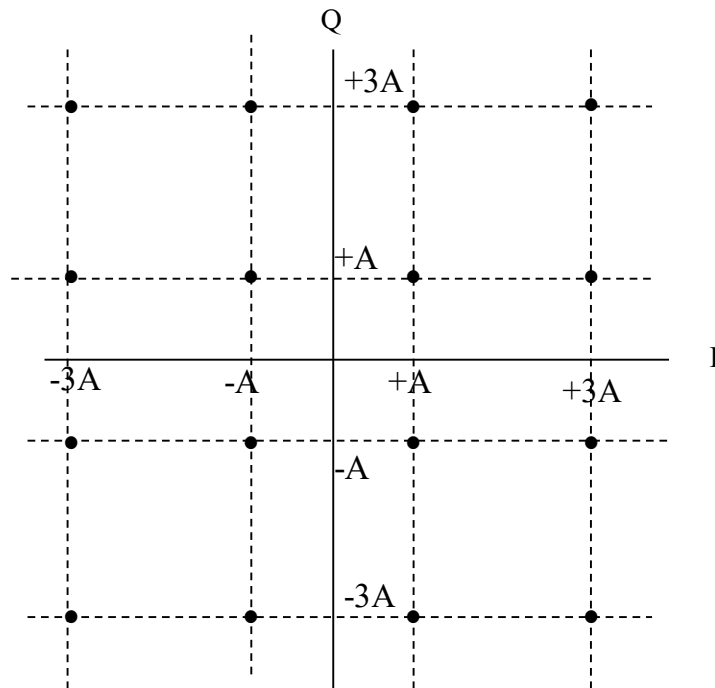


Figure 2.6 - Diagramme des constellations en MAQ 16. Source [10]

II.7.2.1 Efficacité spectrale en MAQ 16 (16 QAM)

$$M = 16 \Rightarrow k = \log_2 16 = 4$$

$$k = \frac{D}{R_s} \Rightarrow R_s = \frac{D}{4}$$

$$\text{Filtrage optimal : } W = R_s \Rightarrow W = \frac{D}{4}$$

$$\text{On a donc : } \eta = \frac{D}{W} = 4 \text{ bits/s/Hz}$$

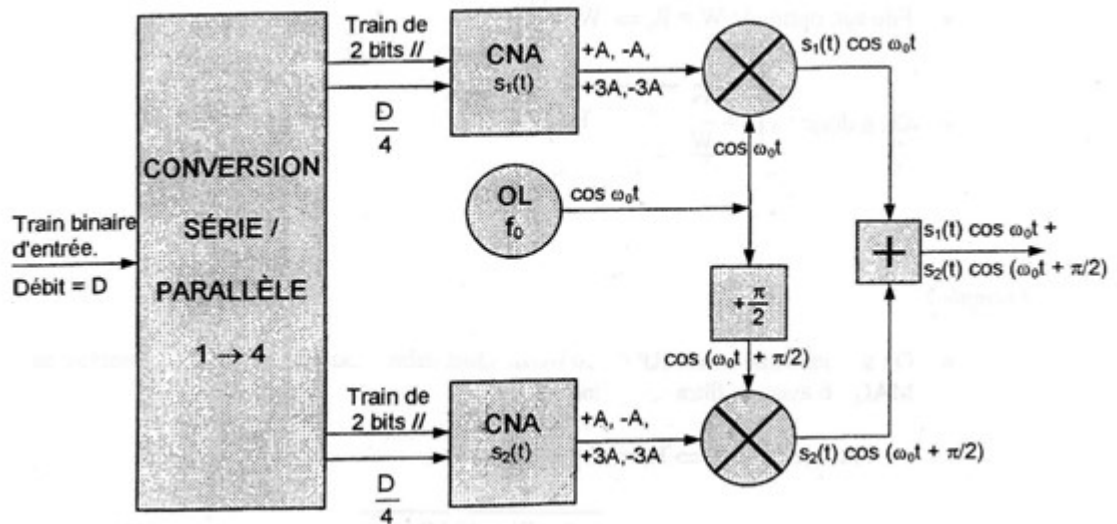
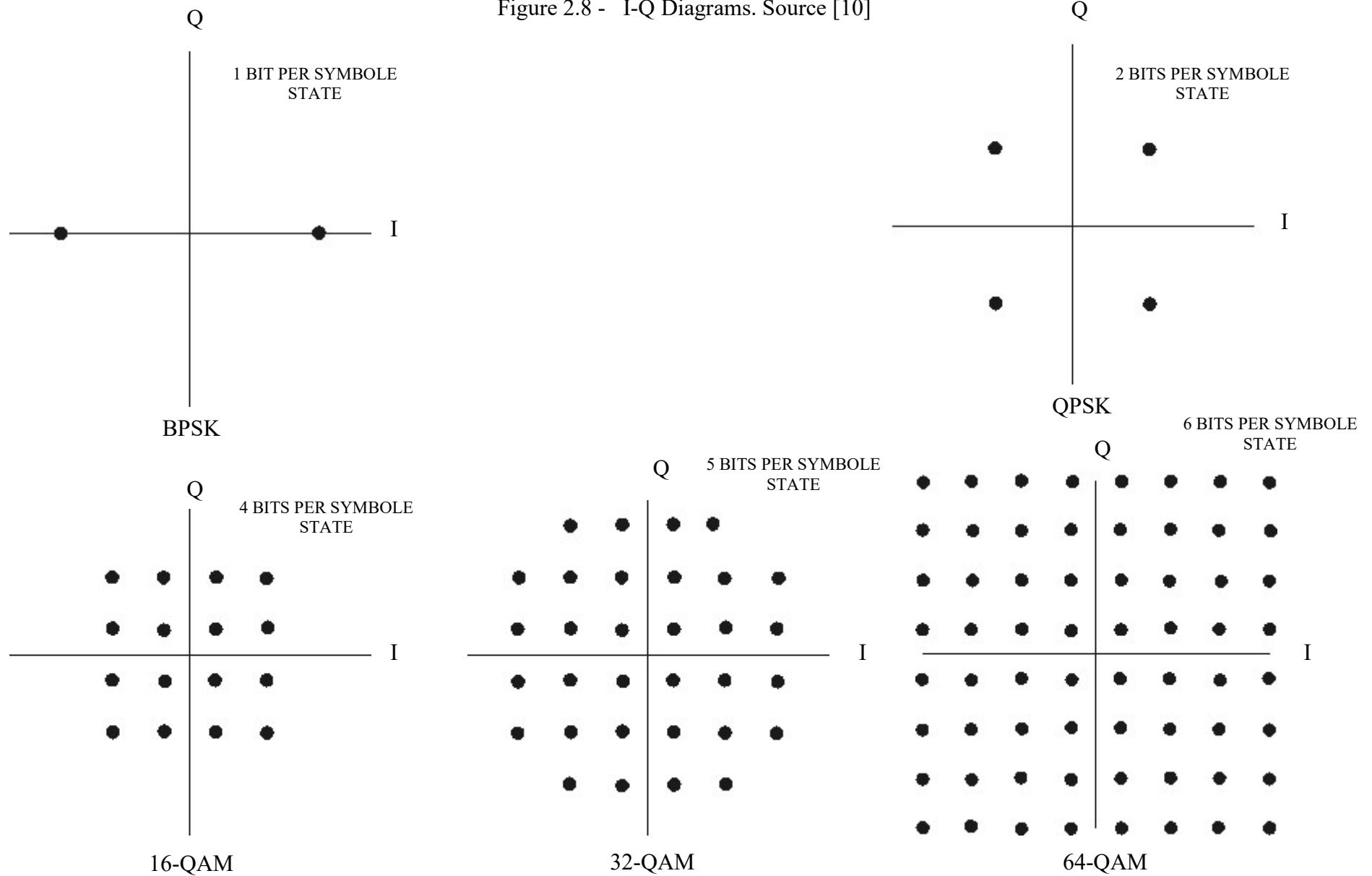


Figure 2.7 - Modulateur MAQ 16 (double MAPS en quadrature). Source [10]

Figure 2.8 - I-Q Diagrams. Source [10]



Le tableau suivant récapitule les principaux paramètres caractérisant les modulations.

L'efficacité spectrale est obtenue en se plaçant dans le cas d'un filtrage optimal offrant la bande RF occupée minimale et donc pour laquelle on obtient $R_s = W$.

Un exemple du débit obtenu pour chaque modulation est donné dans les mêmes conditions de filtrage optimal pour une bande RF constante et égale à 10 MHz.

Un exemple de bande RF nécessaire pour chaque modulation est donné dans les mêmes conditions de filtrage optimal pour un débit binaire constant et égal à 60 Mbits/s.

Modulation	MDP2	MDP4 MAQ4	MDP 8	MAQ 16	MAQ 32	MAQ 64	MAQ 128	MAQ 256
Nombre d'états (M)	2	4	8	16	32	64	128	256
Nombre de bits par symbole (k)	1	2	3	4	5	6	7	8
Efficacité spectrale max. (η) (bits/s/Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8
Exemple pour une bande RF constante $W = 10$ MHz et un filtrage optimal ($R_s = W$)								
Rapidité de modulation (R_s) (Mbauds)	10	10	10	10	10	10	10	10
Débit binaire (D) (Mbits/s)	10	20	30	40	50	60	70	80
Exemple pour un débit binaire constant $D = 60$ Mbits/s et un filtrage optimal ($R_s = W$)								
Rapidité de modulation (R_s) (Mbauds)	60	30	20	15	12	10	8,57	7,5
Bande RF (W) (MHz)	60	30	20	15	12	10	8,57	7,5

Tableau 2.3 - Paramètres des différentes modulations. Source [10]

II.8 CONCLUSION

Le traitement du signal sous sa forme numérique est une opération nécessaire et indispensable, ayant pour objet l'élaboration et l'interpolation des signaux porteurs d'informations. Le but consistera à réussir à émettre et recevoir un maximum d'information utile sur un support en s'appuyant sur les différentes modulations adéquates.

A ce titre, les notions de base étudiées dans les chapitre I et II à savoir la numérisation, la compression, le multiplexage et la modulation numérique serviront comme outils absolument nécessaires à utiliser pour l'établissement d'une plateforme TNT, sujet du chapitre suivant.

III.1 INTRODUCTION

La numérisation de la diffusion audiovisuelle s'est développée depuis le début des années 1990 et ce tout d'abord par l'intermédiaire du satellite puis par celui du câble. La question posée aujourd'hui consiste à introduire la diffusion numérique sur le réseau hertzien terrestre.

Dans ce chapitre, nous aborderons toutes les notions de base de la TNT, son mode de fonctionnement ainsi que l'ensemble des avantages liés à son introduction.

➤ NOTIONS DE BASE DE LA DVB-T

Voir schéma suivant :

- Chaîne d'émission avec introduction du DVB

Constituer de trois blocs à savoir :

- Le bloc codage de source (obtention du MPEG-2 vidéo et MPEG-2 audio)
- Le bloc codage de canal (obtention du MPEG-2 TS et protection de l'information)
- Le bloc modulation numérique (modulation pour adaptation avec le canal RF)

Voir schéma ci dessous

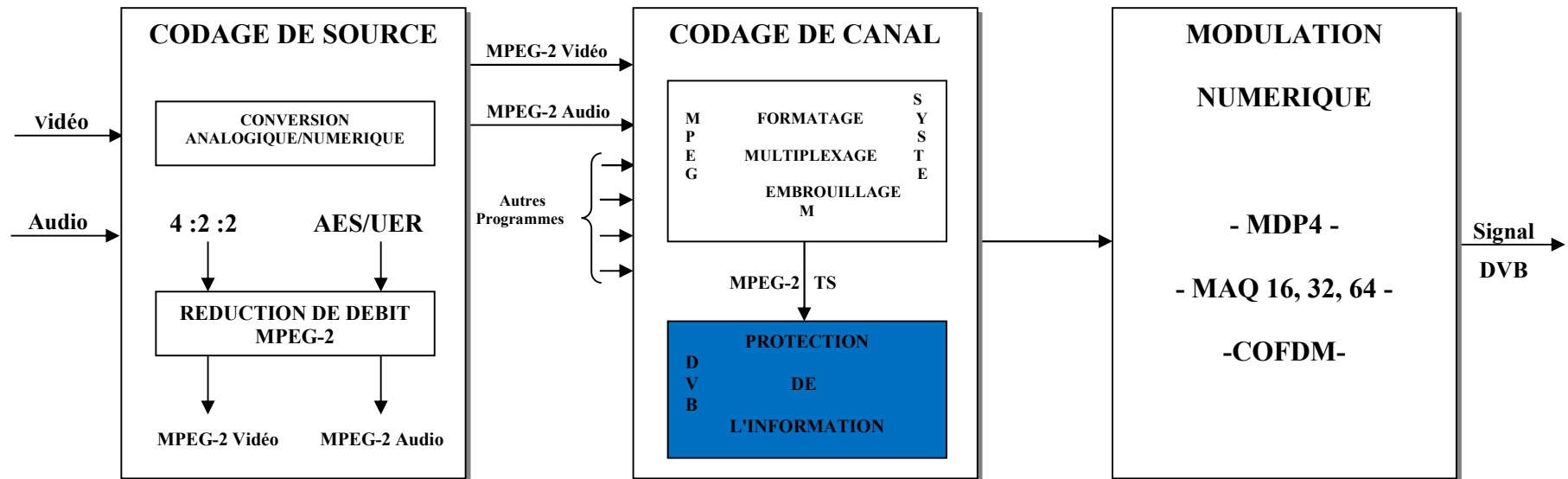


Figure 3.1 - Chaîne d'émission avec introduction du DVB. Source [10]

- Chaîne de réception avec introduction du DVB

Constituer de trois blocs à savoir :

- Le bloc démodulation numérique
- Le bloc décodage de canal
- Le bloc décodage source

Voir schéma ci dessous

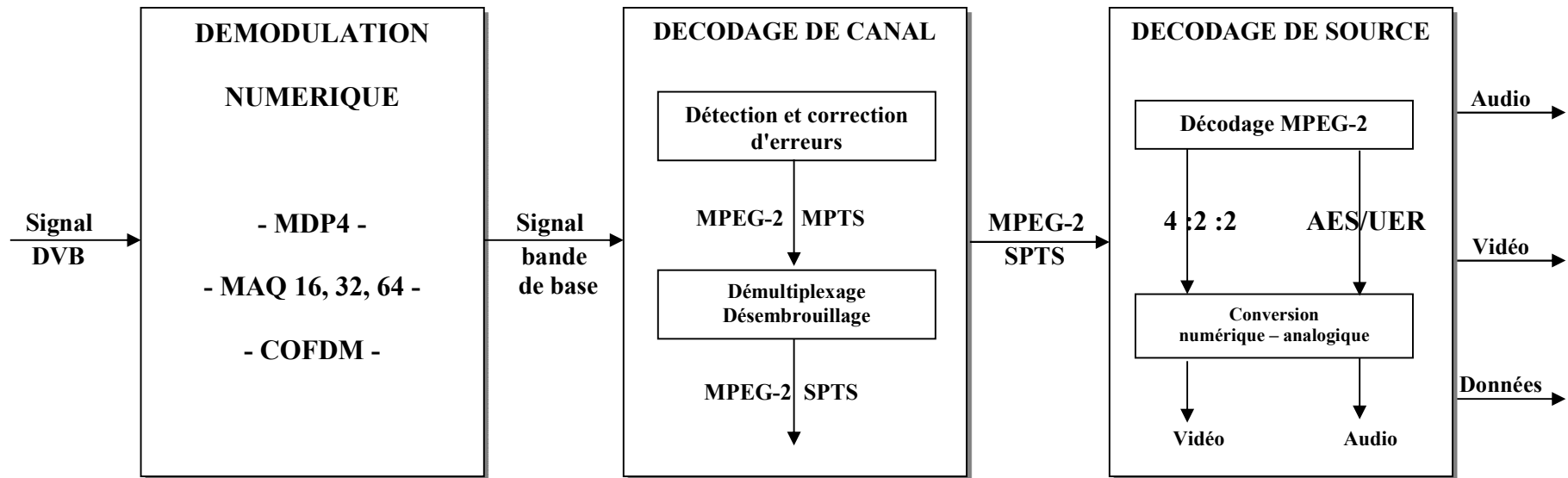


Figure 3.2 - Chaîne de réception avec introduction du DVB. Source [10]

III.2 LE DVB

Les normes européennes qui couvrent la télédiffusion numérique sont le résultat de travaux, démarrés en 1991, du groupe de travail ELG (European Launching Group) devenu DVB (Digital Video Broadcasting), dont l'objectif principal était la définition d'une norme de télévision numérique pour diffusion par satellite, câble ou réseau terrestre.

Dès le mois de septembre 1993, 80 organismes et entreprises de 12 pays de l'union européenne ont signé un document commun qui concrétisait l'entrée de l'Europe dans la course à la télévision numérique. Les signataires marquaient leur accord pour promouvoir et participer à la définition d'une norme unique de télévision numérique.

Cet accord a donné naissance à un consortium dénommé Digital Video Broadcasting (DVB). Ce groupe (150 sociétés européennes mais également japonaises et américaines par l'intermédiaire de leurs filiales européennes : JVC, Sony et IBM) a travaillé à l'élaboration de spécifications techniques pour la diffusion numérique et à la réalisation de normes compatibles aussi bien pour le câble que pour le satellite et la transmission hertzienne (les standards DVB-C, DVB-S, DVB-T seront abordés dans le prochain paragraphe).

La transmission suivant le système DVB permet la transmission de plusieurs programmes sur un canal de transmission classique (Astra 1F et 1G offrent en moyenne une centaine de programmes par satellite grâce à 18 répéteurs actifs, la moyenne par répéteur est de 4 à 10 programmes numériques, Télécom 2D comporte, lui, 11 répéteurs qui peuvent diffuser entre 6 et 8 programmes chacun). Elle offre plusieurs niveaux de qualité possible à partir d'un seul signal, permet la réception stable avec des récepteurs mobiles, autorise la transmission de la télévision haute définition (HDTV) sur les réseaux terrestres.

Les différents groupes d'étude ont travaillé à la normalisation des procédés de modulations numériques, à la mise en place d'un dispositif commun d'information (annonce des programmes en cours de diffusion ou programmés à la disposition des utilisateurs), à la définition des systèmes d'accès conditionnels et de cryptage... Compte tenu du nombre important de langues utilisées en Europe, le système DVB propose plus de canaux audio pour un programme vidéo que le modèle américain.

III.2.1 La famille des normes DVB

Les normes DVB concernant les media de transmission sont :

III.2.1.1 DVB-S / ETSI 300 421

Le DVB-S (normalisé en décembre 1994) est la norme de transmission numérique par satellite. Les bandes de fréquence vont jusqu'à 11/12 GHz et la largeur des canaux se situe entre 26 et 54 MHz (valeur la plus courante : 27 MHz pour Astra et 36 MHz pour Télécom). Elle est prévue pour gérer différents débits le plus souvent entre 3 et 9 Mbits/s (Dans le système Direct TV aux Etats-Unis, les débits varient de 2,5 Mbits/s pour la transmission des films à 5 Mbits/s pour les émissions de télévision et 7,5 Mbits/s pour la retransmission

sportive).

La modulation retenue par la norme est la modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Cette modulation est le meilleur compromis entre un taux d'erreur (BER) minimal et la meilleure efficacité spectrale (elle est proportionnelle au nombre de bits/symbole) possible. En effet, d'une part le répondeur satellite est non linéaire et d'autre part le rapport Signal/Bruit en réception satellite est très faible (~ 8 à 14 dB). Or le diagramme théorique (dans des conditions idéales) du taux d'erreur en fonction du rapport Signal/Bruit montre que, parmi toutes les courbes de modulation possibles, la modulation de phase à 4 états est celle qui permet d'obtenir un taux d'erreur minimal dans la plage de rapport Signal/Bruit comprise entre 8 et 10 dB.

Le codage canal destiné à lutter contre les erreurs dues au support de transmission, comprend : la dispersion d'énergie (brassage), le codage de Reed-Solomon, la dispersion temporelle des erreurs et le codage convolutif.

III.2.1.2 DVB-C / ETSI 300 429

Le DVB-C (normalisé en décembre 1994) est la norme de transmission numérique via le câble. Elle a le même noyau que le DVB-S sauf en ce qui concerne la modulation et le codage convolutif. La modulation est une modulation d'amplitude en quadrature ou QAM. Le système DVB-C est essentiellement développé en 64-QAM (6 bits/symbole), car cette modulation permet de minimiser le taux d'erreur pour une réception câble de rapport Signal/Bruit de 30 dB. Certains systèmes américains utilisent des niveaux plus élevés comme le 128-QAM et le 256-QAM, ce qui permet d'augmenter l'efficacité spectrale mais au détriment du taux d'erreur. La différence avec le DVB-S réside aussi dans l'absence de codage interne (codage convolutif) dans le codage de canal, car on est en milieu plus protégé.

III.2.1.3 DVB-T / ETSI 300 744 (TNT)

Le DVB-T (approuvé en février 1997) est la spécification concernant la diffusion de la télévision numérique terrestre via des canaux de 7 à 8 MHz. La modulation conjugue l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) avec le QPSK ou le QAM, selon le compromis robustesse/débit recherché. Le codage de canal est similaire à celui du DVB-S (codage de Reed-Solomon et codage convolutif).

III.3 SYSTEME MPEG ET INFORMATIONS DE SERVICE

III.3.1 Synoptique de la chaîne MPEG-2/DVB

Les programmes peuvent être fournis au point de multiplexage à partir de :

- **Programmes analogiques** numérisés par un équipement d'acquisition audio et vidéo puis transmis vers le codeur MPEG 2 par une liaison SDI (Serial Digital Interface) à 270 Mbits/s.
- **Signaux directement produits en numérique** (vidéo $4 : 2 : 2$ et audio AES/UEA) amenés à l'entrée d'un codeur MPEG 2.

- **D'un point de codage MPEG 2 distant**, le signal est alors acheminé par un réseau de transport (ATM par exemple) vers le multiplexeur.

Chaque programme MPEG 2 obtenu est appelé SPTS (Single Program Transport Stream) et peut être embrouillé individuellement. Le multiplexage de plusieurs SPTS a pour but de constituer le multiplex de transport final (MPTS : Multiple Program Transport Stream). On ajoute des informations de service permettant de décrire son contenu et des informations de contrôle d'accès permettant aux abonnés de désembrouiller les signaux éventuellement cryptés.

Le signal est ensuite transmis vers une station d'émission satellite où l'on réalise la protection de l'information et sa modulation (QPSK).

La réception peut être individuelle ou collective via une tête de réseau câblé.

Dans le réseau câblé, le signal sera démodulé, éventuellement démultiplexé et remultiplexé en incorporant le cas échéant des programmes locaux.

Le nouveau multiplex est à nouveau modulé (QAM) et distribué.

III.3.2 Comparaison analogique numérique

En analogique, un opérateur de programme (exemple : ENTV) fournit un programme (exemple : canal Algérie). Ce programme est ensuite diffusé par un opérateur de diffusion (ex : TDA) dans un canal TV. En analogique, on peut donc associer directement un programme (ou service) avec un canal particulier.

En numérique, grâce aux techniques de compression, on peut transporter plusieurs programmes (ou services) dans le même canal. On ne peut donc plus sélectionner un programme particulier uniquement par son canal de diffusion. Il est donc nécessaire de rajouter des informations d'identification du contenu du multiplex.

Le multiplexage permet de réaliser :

- La répartition temporelle des composantes des différents services présents dans le multiplex.
- L'identification de ces différentes composantes pour assurer leur répartition correcte à la réception.

Les informations de services (SI) sont :

- Des données complémentaires diffusées cycliquement qui fournissent des informations sur les services et permettent la navigation, la sélection et l'accès automatique par les récepteurs aux programmes.

III.3.3 Synoptique général de l'organisation des données

Les signaux numérisés vidéo 4:2:2 et audio AES/UEF sont appliqués respectivement

sur les entrées des codeurs MPEG 2 vidéo et MPEG 2 audio.

Les signaux de sortie sont les flux élémentaires (Elementary Stream - ES) MPEG 2 audio et vidéo. Ces flux sont de toutes longueurs et correspondent à des séquences.

Pour effectuer les opérations suivantes, il est nécessaire de les mettre en paquets. On obtient alors des paquets PES (Packetized Elementary Stream) audio et vidéo en sortie du « Packetizer ».

Ensuite, deux utilisations possibles conduisent à élaborer des flux différents. Pour effectuer du stockage, un flux PS est réalisé à partir de plusieurs paquets PES vidéo et audio d'un même programme.

Pour les besoins de la transmission un autre flux est réalisé. Il s'agit du flux TS (Transport Stream) qui réalise le découpage des paquets PES en paquets de format fixe de 188 octet.

Le multiplexage des composants TS vidéo et audio d'un même programme s'appelle un SPTS (Single Program Transport Stream).

Le multiplexage des composantes TS vidéo et audio de plusieurs programmes s'appelle un MPTS (Multiple Program Transport Stream).

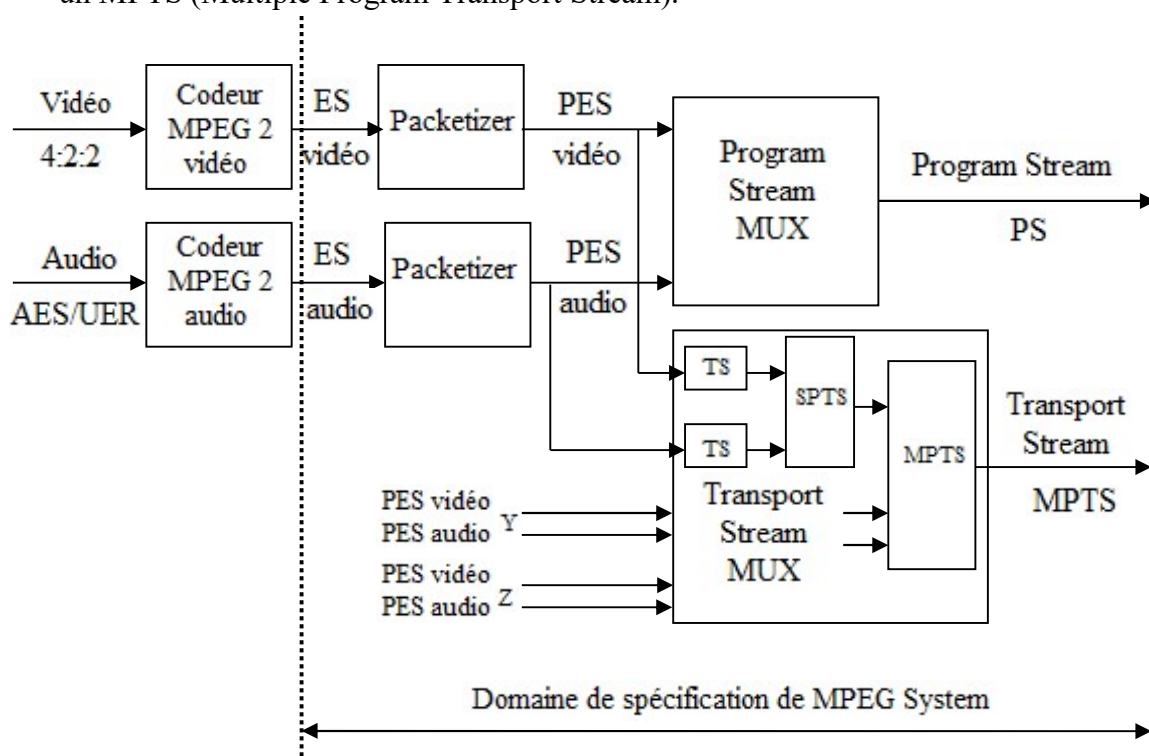


Figure 3.3 - Synoptique général de l'organisation des données. Source [10]

III.3.4 Construction d'un flux MPEG 2 TS

Un programme ou service peut contenir de la vidéo, de l'audio et éventuellement des

données (interactivité par exemple). Ces informations sont mises sous forme de PES puis de paquets TS de 188 octets.

A cela sont rajoutées des informations de service (SI) permettant la description du multiplex et éventuellement, des informations de contrôle d'accès (CA) permettant à l'abonné de désembrouiller le signal. Ces informations, pour une compréhension facilitée, sont présentées sous forme de tables puis sont transportées par des paquets TS.

Ces différentes composantes sont multiplexées pour obtenir un SPTS. La même opération est réalisée pour chacun des programmes.

Ensuite, un nouveau multiplexage est réalisé avec les différents SPTS pour obtenir un flux MPTS.

En transmission, le débit transmis doit être constant. Certaines composantes pouvant avoir un débit variable, il est nécessaire de régulariser ce débit par l'ajout d'information non utile appelée paquets de bourrage (null packets ou stuffing packets).

Le flux est asynchrone et l'ordre des paquets n'est pas défini.

III.3.5 Décodeur MPEG 2

Après avoir été transporté dans le canal de transmission numérique, le signal est démodulé et le flux de transport est restitué en bande de base.

Le signal est ensuite démultiplexé ou plus exactement les composantes vidéo et audio du programme sélectionné sont extraites du flux TS et dirigées vers le décodeur MPEG 2 adéquat.

Des informations temporelles, liées au programme choisi sont également exploitée pour synchroniser la restitution des informations vidéo et audio, lesquelles n'ont généralement pas subi les mêmes temps de traitement.

Les informations décodées sont ensuite dirigées vers les équipements de reproduction (ampli BF et haut parleur, moniteur TV).

III.3.6 Approche MPEG : PSI (Program Specific Information)

Informations, définies par MPEG, permettant à l'IRD (Integrated Receiver Decoder) de retrouver correctement les services contenus dans le multiplex.

- PAT (Program Association Table) : description du multiplex, identification des services, position des PMT et de la NIT ; 1 PAT par multiplex.
- PMT (Program Map Table) : description des composantes, identification et position de chaque composante d'un service ; 1 PMT par service.
- CAT (Conditionnal Acces Table) : description du système de contrôle d'accès, liste des EMM.

- NIT (Network Information Table) : données privées de description du réseau, structure définie par MPEG, contenu fourni par DVB.

III.3.7 Approche DVB : SI (Service Information)

Informations complémentaires à MPEG 2 PSI :

- Ensemble d'outils pour permettre aux IRD de collecter et stocker les informations sur les réseaux, plans de fréquence, services, émissions, etc.
- Utilisées par les IRD pour offrir des facilités de navigation (guide électronique de programme) sans contrainte de présentation.
- Organisées en tables, sur le principe de MPEG :

NIT, BAT (Bouquet Association Table), SDT (Service Description Table), EIT (Event Information Table), RST (Running Status Table), TDT (Time Data Table), TOT (Time Offset Table), ST (Stuffing Table).

III.3.8 Liens entre les tables PAT et PMT

La table PAT est transportée par les paquets TS ayant le PID 00. Elle décrit la structure du multiplex. La table PAT permet au récepteur de connaître les informations suivantes :

- Le PID de la table NIT (10 en DVB).
- Le PID de chaque table PMT associée à chaque programme contenu dans le multiplex.

Une table PMT est transportée par les paquets TS ayant le PID défini par la table PAT. Elle décrit les composantes d'un programme particulier.

Une PMT permet au récepteur de connaître les informations suivantes :

- Le type de composantes (vidéo, audio, données) contenues dans un programme.
- Le PID de chaque composante associée à ce programme.

III.3.9 Liens entre le réseau et les tables

Le lien entre la structure du réseau de transmission et les informations contenues dans chaque table est résumé comme suit :

- La table NIT (Network Information Table) : décrit le réseau physique (satellite, câble, fréquence du canal, etc.).
- La table BAT (Bouquet Association Table) : décrit la composition d'un bouquet de programmes. Ces programmes peuvent appartenir à différents supports.
- La table SDT (Service Description Table) : décrit la structure d'un service ou d'un programme.

- La table EIT (Event Information Table) : décrit la nature, l'horaire des émissions en cours et à venir.
- La table PMT (Program Map Table) : décrit les composantes d'un service ou d'un programme et donne les PID des paquets TS les transportant.

III.4 PRESENTATION DE LA CHAÎNE DVB

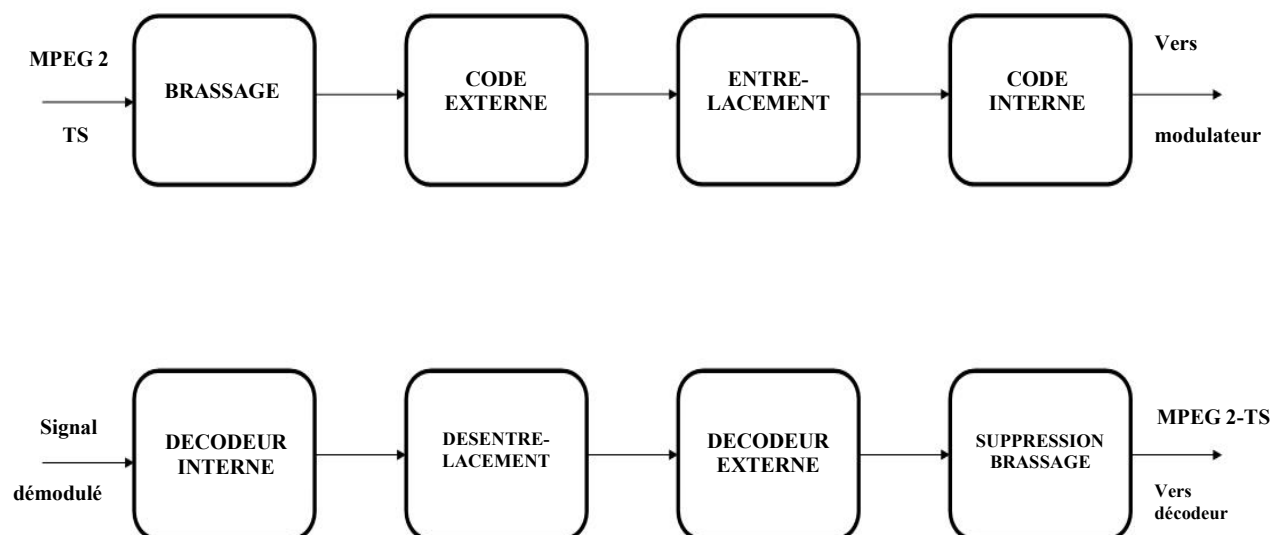


Figure 3.4 – Synoptique de la chaîne de codage / décodage DVB. Source [10]

III.4.1 Le brassage

Le flux de transport d'entrée MPTS est organisé en paquets de longueur fixe de 188 octets. Le brassage sert à effectuer une dispersion d'énergie, c'est à dire une répartition uniforme de l'énergie dans le canal d'émission afin d'éviter les longues suites de 1 ou de 0, qui créeraient des parasites dans le spectre du signal et qui empêcheraient la récupération de l'horloge.

III.4.1.1 Principe du brassage

La séquence à transmettre est mélangée avec une séquence pseudo-aléatoire connue.

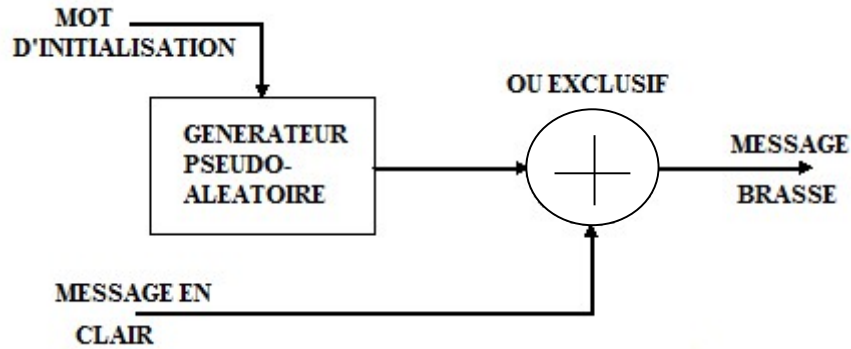


Figure 3.5 - Principe du brassage. Source [20]

On facilite aussi la récupération de l'horloge en augmentant le nombre de transitions.

En DVB le format d'entrée en brassage est : « MPEG 2-TS »

MPEG 2 transport Stream = Paquets de Transport MPEG 2 de 188 octets :

- premier octet : synchro (47_{hex})
- 3 octets : en-tête
- 184 octets : données MPEG 2

Remarque

Le processus de brassage continue même si le signal d'entrée est absent ou s'il n'est pas conforme au format MPEG 2-TS.

Ainsi le signal transmis est au minimum la séquence pseudo-aléatoire, inversée ou non. On assure ainsi en permanence la répartition d'énergie.

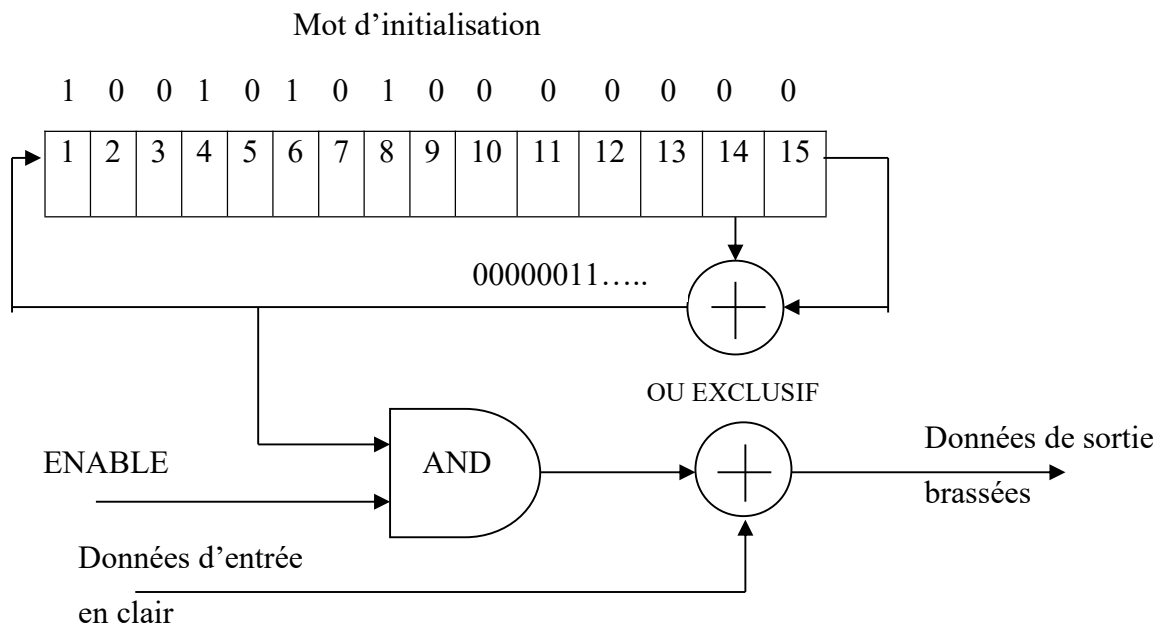


Figure 3.6 - Principe de brassage en DVB. Source [25]

III.4.2 Code externe

Afin de pouvoir corriger la majeure partie des erreurs introduites par le canal de transmission, on introduit une redondance dans le signal permettant de détecter et de corriger ces erreurs par l'utilisation d'un code externe.

III.4.2.1 Type de code externe

Le code externe utilisé en DVB est le code Reed-Solomon RS (204, 188, $T = 8$). Il s'agit de la version raccourcie du code original RS (255, 239, $T = 8$). Le code Reed Solomon permet de corriger au mieux les paquets d'erreurs résiduels en sortie du décodeur interne par ajout de redondance à l'information d'origine.

Le codage de Reed-Solomon est appliqué aux 188 octets des paquets de transport brassés y compris l'octet de synchro inversé ou non.

La redondance ajoutée par le code est de 16 octets, ce qui donne 204 octets en sortie pour 188 octets à l'entrée.

III.4.2.2 Les codes Reed-Solomon

Les codes Reed-Solomon appartiennent à la famille des codes BCH (codes cycliques) mais ils s'appliquent à des groupes de « p » bits.

Les codes obtenus sont notés « RS (n, k, T) » :

- $n = 2^p - 1$ = Nombre total de symboles de « p » bits du mot de code.
- $k = n - 2T$ = Nombre de symboles du mot d'information.
- $2T$ = Nombre de symboles du mot de contrôle.
- T = Nombre de symboles pouvant être corrigés dans le mot de code.

Exemple

RS (255, 239), $p = 8$ bits, $T = 8$ octets :

- $n = 2^8 - 1 = 256 - 1 = 255$ octets.
- $k = n - 2T = 255 - (2 \times 8) = 255 - 16 = 239$ octets.

On peut donc corriger 8 octets parmi 255 octets du mot de code dont 239 octets de mot d'information et 16 octets de mot de contrôle.

Ces codes sont bien adaptés pour la correction de petits paquets d'erreurs.

III.4.3 L'entrelacement

Cette étape est destinée à augmenter l'efficacité du codage de Reed-Solomon. Un code a une capacité de correction de paquets d'erreurs très inférieure à la capacité de correction d'erreurs isolées.

Pour éviter les paquets d'erreurs trop importants, les échantillons proches les uns des autres sont séparés avant la transmission. A la réception, l'ordre initial des échantillons est rétabli, ce qui a pour effet de diviser les paquets d'erreurs en erreurs isolées et de faciliter la correction. L'entrelacement n'augmente pas la capacité de correction mais seulement son efficacité.

Il existe deux types d'entrelacement ; entrelacement par blocs et entrelacement convolutionnel.

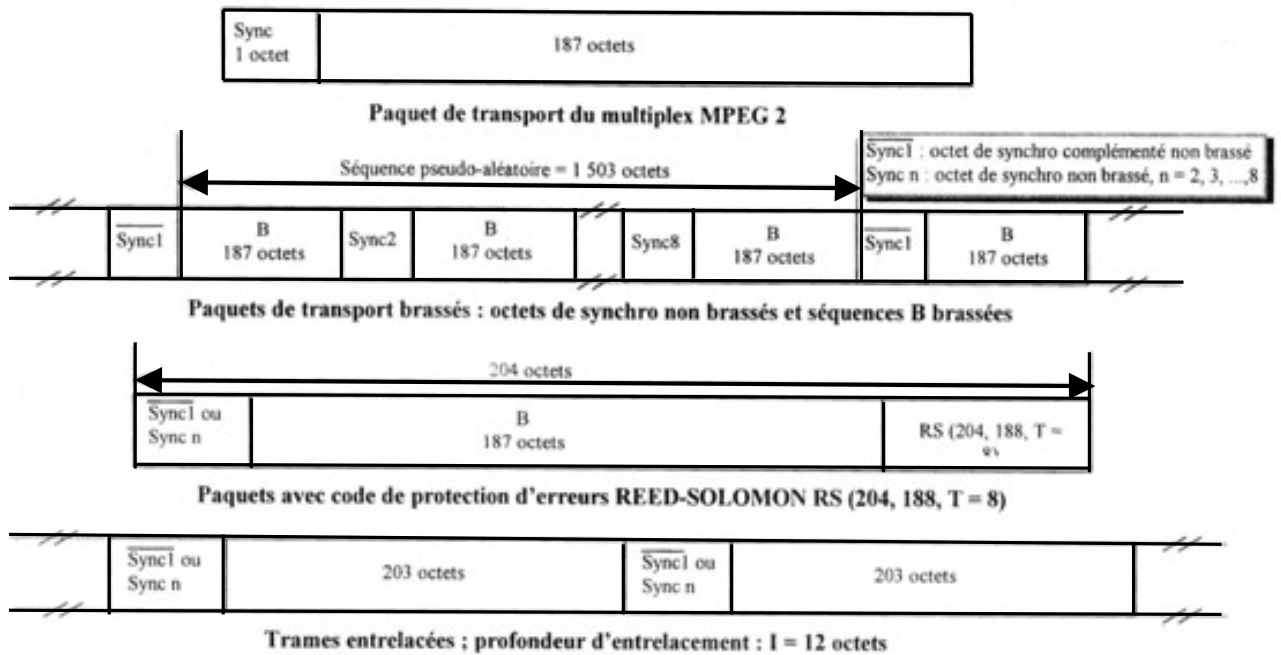


Figure 3.7 - Structure des trames aux différentes étapes du codage. Source [20]

III.4.4 Code interne

Un code interne (lié au modulateur) est utilisé lorsque le signal est transmis dans un milieu très perturbé comme c'est le cas pour une transmission par satellite ou terrestre. Il s'agit d'un deuxième code correcteur d'erreurs qui va permettre de renforcer les mesures de protection des données à transmettre.

III.4.4.1 Type de code interne

Le code interne utilisé en DVB est un code convolutif de base de rendement $1/2$ et de longueur de contrainte : $L=7$. Ce code peut être poinçonné pour obtenir des rendements : $r = 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$.

Le décodeur choisi s'appuie sur l'algorithme de viterbi.

➤ **Définition du rendement d'un code**

Rendement : $r = k / n$

K = nombre de symboles d'information

n = nombre de symboles du mot de code

Exemple

Le code RS (204 ,188) a un rendement : $r = k / n = 188 / 204 = 0,92$.

Un code de rendement 1/2, aura autant de symboles de redondance que de symboles d'information.

➤ **Définition du taux d'erreur binaire (TEB)**

$$\text{TEB} = \frac{\text{Nombre de bits faux d'une séquence}}{\text{Nombre de bits total de la séquence}}$$

En anglais : **BER (Bit Error Rate)**

Exemples

TEB	Qualité
10^{-2}	Mauvaise mais permet la compréhension de la voix (basse qualité).
10^{-3}	Médiocre (interruption de service en audio HQ).
10^{-6}	Liaison téléinformatique de qualité ordinaire (interruption de service en TV).
10^{-9}	Liaison de haute qualité pour des transmissions de données.
$\leq 10^{-10}$	Très haute qualité nécessaire pour la télévision numérique.

Tableau 3.1 - Ordre de grandeur de taux d'erreur en transmission numérique. Source [10]

III.4.4.2 Principe des codes convolutifs

Chaque bloc du code dépend non seulement des blocs présents à l'entrée mais aussi de V blocs précédents. Il y a introduction d'un effet de mémoire.

V = nombre de mémoires.

K = nombre de bits à l'entrée du codeur

N = nombre de bits à la sortie du codeur

$L = (V+1)$ = longueur de contrainte du code

L = nombre de bits sur lesquels s'effectue le codage (V bits précédents mémorisés +1 bit entrant).

$r = k/n$ = rendement du code

2^v = nombre d'états possibles du codeur.

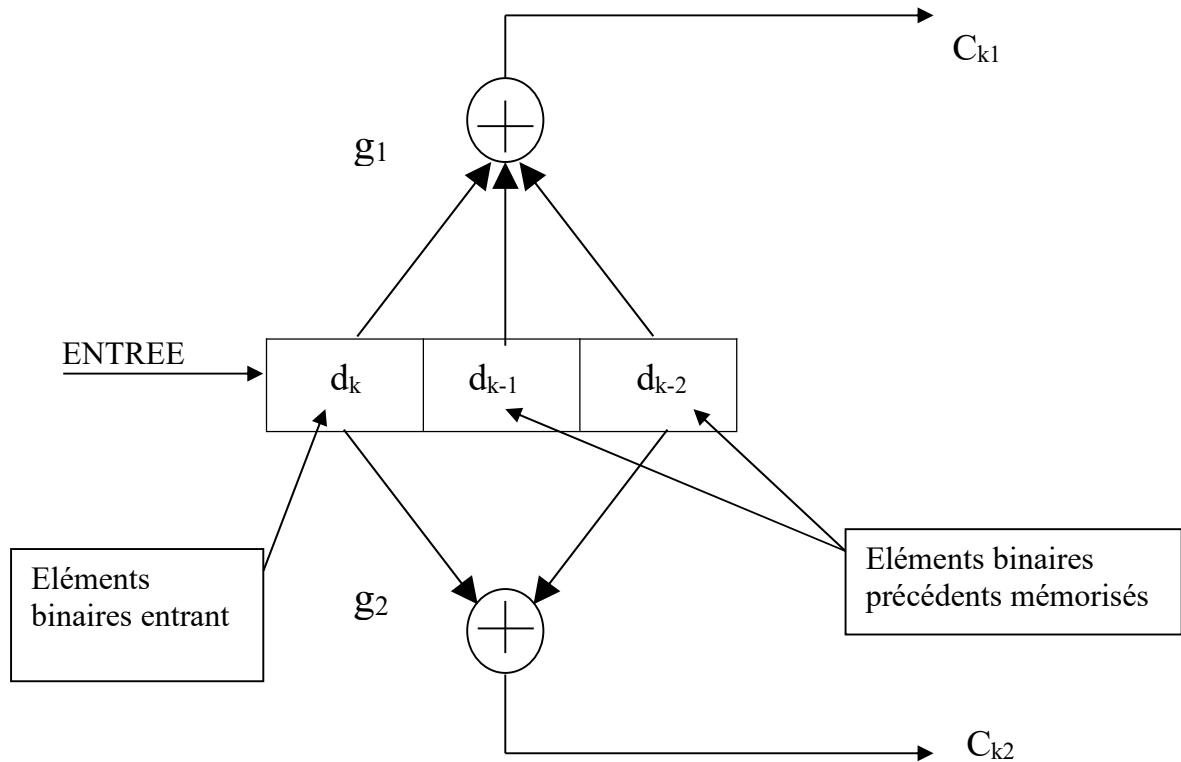


Figure 3.8 - Codeur convolutif : $L = 3$, $k = 1$, $n = 2$, $r = 1/2$. Source [20]

III.4.4.3 Description du codeur

Longueur de contrainte $L = 3$: 3 éléments à coder

$k = 1$: 1 élément binaire à l'entrée

$N = 2$: 2 éléments binaire en sortie

$r = k/n = 1/2$

Nombre d'états du codeur = 2^v

$L = V+1 \Rightarrow V = 2 \Rightarrow 2^2 = 4$ états

Chaque sortie du codeur (C_{k1} et C_{k2}) est égale au produit de convolution entre la suite des éléments binaires et les fonctions génératrice du code g_1 et g_2 .

$g_1 = [1, 1, 1] = 7_{\text{octal}}$ et $g_2 = [1, 0, 1] = 5_{\text{octal}}$

Supposons : $d_k = 1$, $d_{k-1} = 0$ et $d_{k-2} = 0$

d_k : valeur entrante ; d_{k-1} et d_{k-2} : valeurs mémorisées.

Les sorties valent :

$$C_{k1} = (1 \times 1) \oplus (1 \times 0) \oplus (1 \times 0) = 1 \oplus 0 \oplus 0 = 1$$

$$C_{k2} = (1 \times 1) \oplus (0 \times 0) \oplus (1 \times 0) = 1 \oplus 0 \oplus 0 = 1$$

Au coup d'horloge suivant les données sont transférées d'un étage dans le registre à décalage.

III.4.4.4 Poinçonnage

Les codes convolutifs utilisés ont un rendement de base de $1/2$ et utilisent donc deux fonctions génératrices g_1 et g_2 pour rester de réalisation simple. Cependant le rendement de $1/2$ double le débit initial, c'est pourquoi on effectue un poinçonnage.

Le poinçonnage consiste à ne pas transmettre tous les bits en sortie du codeur dans le but de réduire le débit total.

Exemple

Sur 4 bits en sortie, on n'en transmet que 3 :

nombre de bits à l'entrée du codeur : $k = 2$

nombre de bits en sortie du codeur : $C = 4$

nombre de bits transmis : $n = 3$

On a donc un rendement : $r = k / n = 2/3$.

On peut ainsi avoir des rendements améliorés : $r = 2/3, 3/4, 5/6$ et $7/8$:

$r = 1/2$: tous les bits sont transmis.

$r = 2/3$: 3 bits sur 4 sont transmis.

$r = 3/4$: 4 bits sur 6 sont transmis.

$r = 5/6$: 6 bits sur 10 sont transmis.

$r = 7/8$: 8 bits sur 14 sont transmis.

Au décodage, on effectue l'opération inverse (dépointonnage) pour retrouver un rendement de base de $1/2$; les bits manquants sont remplacés par des "0". Par contre on diminue la capacité de correction.

III.4.4.5 Inconvénient des codes convolutifs

Si la capacité de correction du code est dépassée, le chemin choisi est faux et provoque un paquet d'erreurs. Pour limiter cela, on peut utiliser un décodeur à décision douce qui évalue la distance euclidienne, c'est à dire la distance sur les valeurs analogiques au lieu des valeurs numériques.

Avec le même exemple que précédemment, un décodeur à décision douce permet de corriger 2 erreurs.

III. 5 INTRODUCTION A LA DIFFUSION NUMERIQUE TERRESTRE (TNT)

La diffusion terrestre hertzienne peut aujourd'hui bénéficier des techniques de compression numérique. Ceci permettrait de proposer aux téléspectateurs des bouquets de chaînes nationales et locales sans modifications sauf exceptions, de leur antenne, mais à condition de disposer d'un téléviseur ou d'un décodeur adaptés.

En outre la numérisation de la diffusion (TNT) libérera à terme des fréquences pour d'autres usages (le dividende numérique), accroissant ainsi les possibilités d'usage de cette ressource limitée qui est le spectre hertzien.

III.5.1 Spécificités du réseau terrestre

Les deux problèmes majeurs de la diffusion terrestre sont liés à la propagation des signaux (échos) et à la planification des fréquences.

- Problèmes liés à la propagation des signaux : Echos

En diffusion TV terrestre, les échos sont le résultat d'une propagation par trajets multiples empruntés par le signal à transmettre due aux :

- phénomènes de réflexion sur des obstacles.
- phénomènes de diffraction.

En effet, la propagation des ondes est soumise à son environnement et ces ondes peuvent rencontrer divers obstacles sur leur trajet. Le temps de propagation des ondes de l'émetteur jusqu'au récepteur est alors différent pour chacune d'entre elles. Ce phénomène s'appelle l'écho, l'information arrive par plusieurs trajets à des moments différents.

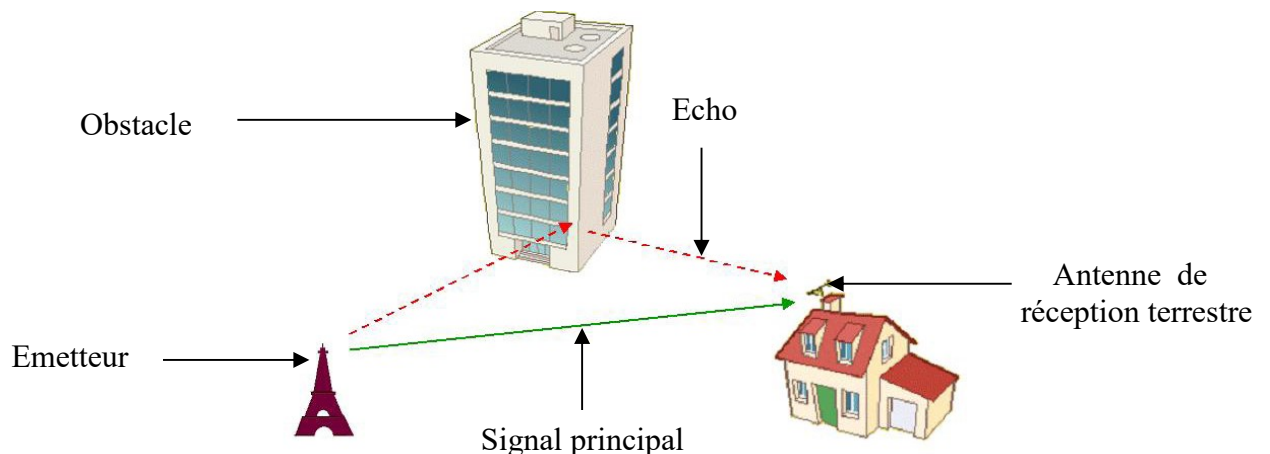


Figure 3.9 - Exemple d'écho. Source [24]

En diffraction, l'onde réfractée ne se propage pas dans la même direction que l'onde principale.

- **Planification de fréquence**

- Une bande saturée en analogique :

- Les émetteurs Co-canaux se brouillent mutuellement :

Dans le cas où deux émetteurs diffusent un programme sur une même fréquence, les signaux reçus ayant parcouru des trajets différents ne possèdent pas la même phase au point de réception.

- Interdiction d'utiliser les canaux « tabous » (principalement canaux adjacents) :

Les canaux adjacents (N+1, N-1) ne doivent pas être utilisés en raison du manque de sélectivité des tuners des récepteurs.

Les canaux « conjugués (N-5, N+5 et N+9) ont longtemps été interdits dans le plan de fréquences hertziens, les canaux conjugués découlent de la fréquence image générée par les oscillateurs des téléviseurs commercialisés jusqu'en 1985.

La solution dans ce cas est :

- D'élargir les émetteurs analogiques et effectuer un maillage de fréquence, pour un même service, en évitant les canaux interdits.
 - La distance entre émetteurs puissants est supérieure à 100 Km.

Il en résulte dans ce cas une très faible efficacité spectrale.

III.5.2 Objectifs à atteindre en numérique

Le système à concevoir doit :

- Nécessiter moins de puissance en réception.
- Etre plus robuste vis-à-vis des interférences de l'analogique ou de ses interférences propres :
 - Possibilité de rapprocher les émetteurs à une même fréquence.
 - Résoudre le problème des échos : naturels et artificiels.
 - Permettre une réception portable (pas mobile).

Il y a donc des nouvelles possibilités qui peuvent être envisagées :

- Des réémetteurs fonctionnant sur la même fréquence que l'émetteur principal pour couvrir une zone d'ombre (gap filler).
- Des réseaux mono fréquences : SFN.

III.5.3 Avantages de la diffusion numériques terrestre

La numérisation du support hertzien présenterait des avantages importants :

- Elle permettrait une meilleure gestion des fréquences (Les propriétés du numérique permettent de dégager un nombre satisfaisant de canaux grâce à l'utilisation des fréquences tabous) et la possibilité de récupération à terme d'un spectre important pouvant servir au développement de nouveaux services, grâce à la suppression de la diffusion hertzienne terrestre analogique. Cela pourrait représenter de 88 à 160 MHz suivant les hypothèses, soit l'équivalent de 2 fois les attributions actuelles du radiotéléphone GSM. Même s'il convient de procéder à un examen plus précis pour savoir quel serait le spectre libéré par l'arrêt de la diffusion analogique, la disponibilité annoncée d'une telle quantité de fréquences, dont la valeur économique va croissant, mérite d'être considérée.
- La numérisation pourrait aussi permettre un accroissement du nombre de programmes transmis par voie hertzienne à un coût unitaire décroissant (le débit numérique par canal se situe vers 25 Mbits/s, soit un équivalent de 4 à 5 programmes TV), accroissement relatif significatif même s'il n'est pas équivalent aux possibilités du câble et du satellite. La qualité pourrait être améliorée et des facilités nouvelles offertes telle la réception sur terminaux portables.
- Avec le numérique, l'écho existe toujours mais il n'a aucune incidence négative sur la qualité de l'image. En effet, en numérique, un signal qui se répète est une information beaucoup plus forte et permet du coup de rendre possible la réception portable, d'où le terme portabilité.
- Avec le numérique, on gagne de la place, donc on l'occupe avec des données comme des nouveaux programmes, des pages de textes, des sous-titres, etc. Toutes ces données sont traitées par un moteur d'interactivité, logiciel qui met en mémoire les pages de texte pour les consulter hors programme. Ces données qui passent par la voie hertzienne et qui arrivent au téléviseur circulent sur la voie descendante. Mais avec la TNT, il y aura une voie montante qui permettra au téléspectateur d'être actif et d'envoyer des messages. Les récepteurs seront équipés d'un modem relié à la ligne téléphonique et certains programmes proposeront des liens avec des sites Internet, de jouer en temps réel avec des programmes de jeu ou éducatif, télé-payer avec un lecteur de carte intégré, commander des programmes à la carte, etc. Le commerce avec l'Internet va être une nouvelle source de financement de la télévision et la publicité deviendra interactive pour mieux cibler les consommateurs.
- La réception des programmes numériques se fera avec les antennes audiovisuelles existantes.
- Les antennes collectives accepteront les nouveaux canaux terrestres.
- Une partie de la ressource peut être allouée à des services non audio-visuels.
- L'offre globale des programmes et le partage de la ressource se fait entre programme en accès libre et pay-TV.

- L'hertzien numérique est naturellement adapté aux programmes régionaux et locaux (bien pour le décrochage).
- Le numérique permet le 16/9, un son de qualité CD et la diffusion des données multimédia.
- La numérisation de l'hertzien pourrait faire de ce support l'un des vecteurs de l'accès aux autoroutes de l'information. Elle serait un vecteur puissant pour la convergence des technologies vers le tout numérique.
- La numérisation de l'hertzien susciterait un formidable appel d'air sur le marché de l'audiovisuel grand public en créant l'opportunité d'un renouvellement général du parc des terminaux et donc d'une activité économique majeure. Au total la numérisation de l'hertzien apparaît comme l'opportunité majeure d'un renouvellement du secteur porteur de grandes perspectives économiques.

III.5.4 Nature des services

Le réseau numérique terrestre prévoit d'accueillir :

- Les grandes chaînes diffusées aujourd'hui en analogique (période de Simulcast).
- De nouvelles chaînes et de nouveaux services s'appuyant notamment sur la télévision de proximité et la capacité de multidiffusion.
- Des chaînes thématiques diffusées aujourd'hui sur le câble ou le satellite.

III.6 SYSTEME COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

III.6.1 Caractéristiques du canal de diffusion terrestre

Le signal reçu en onde hertzienne est rarement unique et de bonne qualité. Il subit des réflexions à partir d'obstacles et prend des trajets différents. Tous ces phénomènes physiques entraînent des échos et des évanouissements du signal, ce qui provoque une réception du signal principal ainsi qu'une multitude de signaux atténués et retardés. De plus, en réception mobile, les échos évoluent et les ondes changent de fréquence en permanence à cause de l'effet Doppler.

Pour remédier à cela, l'idée est de répartir l'information sur une multitude de porteuses, créant ainsi des sous-canaux très étroits plus fiables. C'est grâce à cette modulation COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) que l'on va compenser et profiter des interférences. On va pouvoir alors s'affranchir des évanouissements dus aux échos, en répartissant l'information sur un grand nombre de porteuses orthogonales modulées à bas débit.

Rappel

Une onde électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière $C = 3.10^8$ m/s, ainsi une différence de trajets de 300 m correspond à un retard temporel de 1 μ s.

III.6.2 Interférences propres et échos : Un même problème

Les interférences propres peuvent être assimilées à un écho si le contenu du signal est le même sur les deux émetteurs ; un récepteur reçoit des deux émetteurs deux signaux décalés dans le temps.

L'extension de la notion d'écho porte sur :

- La durée du décalage : elle est plus importante pour des émetteurs distants (200 μ s pour 60 Km).
- Le rapport de la puissance des signaux : à mi-chemin entre deux émetteurs de même puissance, le rapport est de 0 dB.

III.6.3 Réponse impulsionnelle et fonction de transfert du canal

III.6.3.1 Réponse impulsionnelle

Le canal hertzien, en présence de trajets multiples est caractérisé par sa réponse à une impulsion. Elle permet de mettre en évidence les différents échos en fonction de leur retard et de leur atténuation.

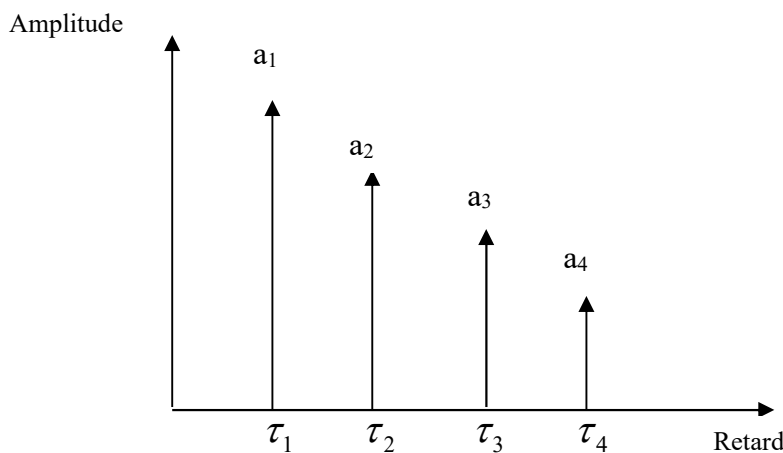


Figure 3.10 - Réponse impulsionnelle du canal. Source [10]

III.6.3.2 Fonction du transfert du canal

Le canal est aussi caractérisé par sa fonction de transfert : Amplitude = f (fréquence). Cette courbe est obtenue en réalisant une transformée de Fourier sur la réponse impulsionnelle du canal.

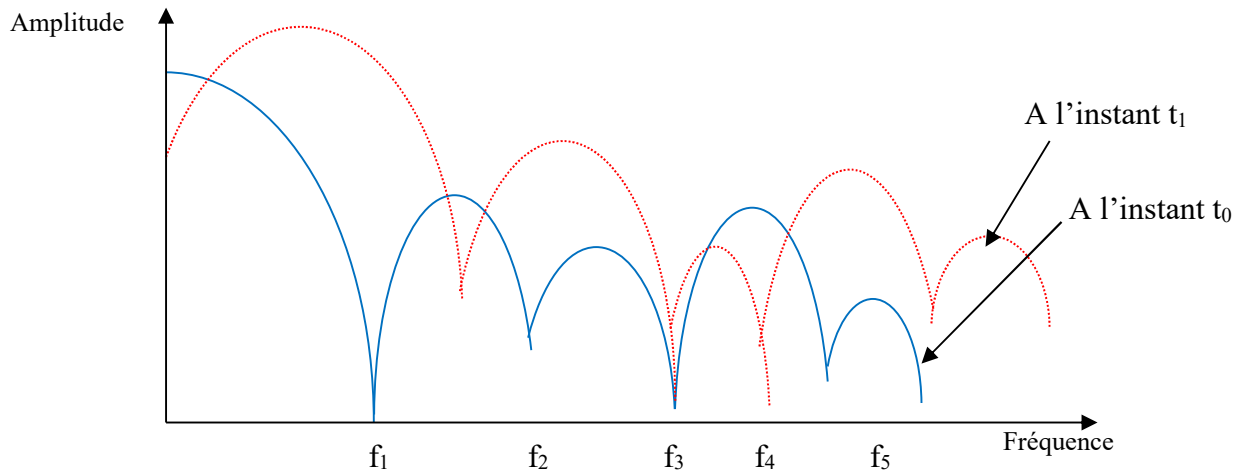


Figure 3.11 - Fonction de transfert du canal. Source [10]

En observant la fonction de transfert d'un canal quelconque résultant d'une propagation à trajets multiples, on constate que certaines composantes fréquentielles du signal sont bien transmises par suites d'interférences « constructives » alors que d'autres composantes sont mal transmises par suites d'interférences « destructives » provoquant des évanouissements.

Pour les fréquences (f_1, f_2, f_3) l'amplitude du signal reçu est minimale, elles correspondent à des « Trous » du canal. En revanche pour d'autres fréquences (f_4, f_5) les différentes ondes arrivant en phase au niveau du récepteur permettent d'obtenir un niveau reçu maximal.

Comme le récepteur peut être portable, le canal évolue au cours du temps. En effet au cours du déplacement du récepteur, les paramètres a_i et t_i (amplitudes et retards des différentes ondes) varient :

Ainsi à un instant t_1 ($t_1 > t_0$) la fonction de transfert du canal sera différente de celle à $t = t_0$ (courbe en pointillé).

Autres exemples de sélectivité en fréquence du canal :

■ Bande peut agitée en fréquence

■ Bande agitée en fréquence

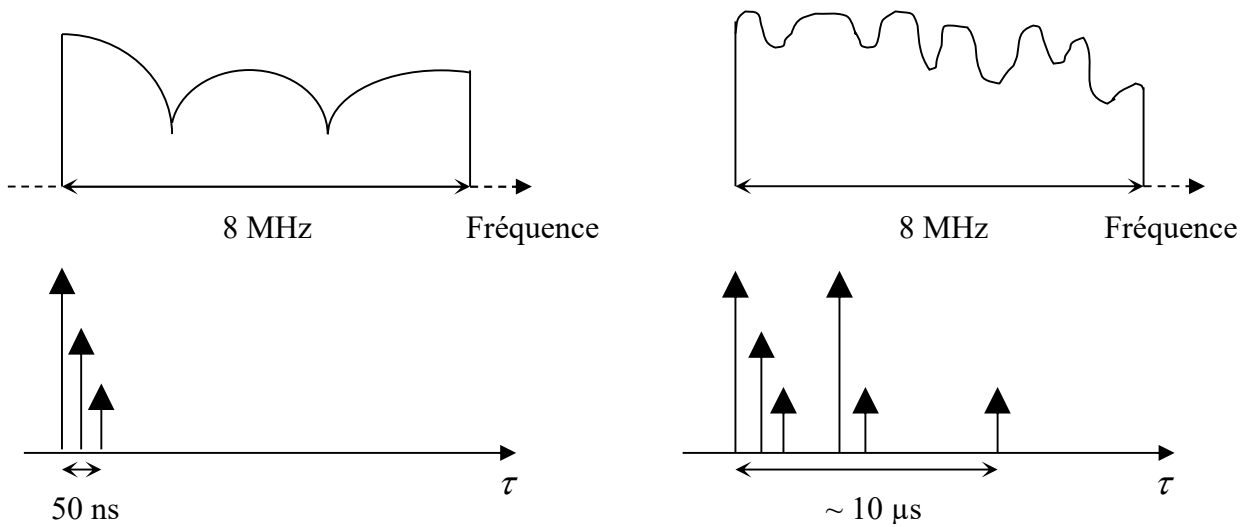


Figure 3.12 (a) - Echos courts. Source [10]

Figure 3.12 (b) - Echos moyens. Source [10]

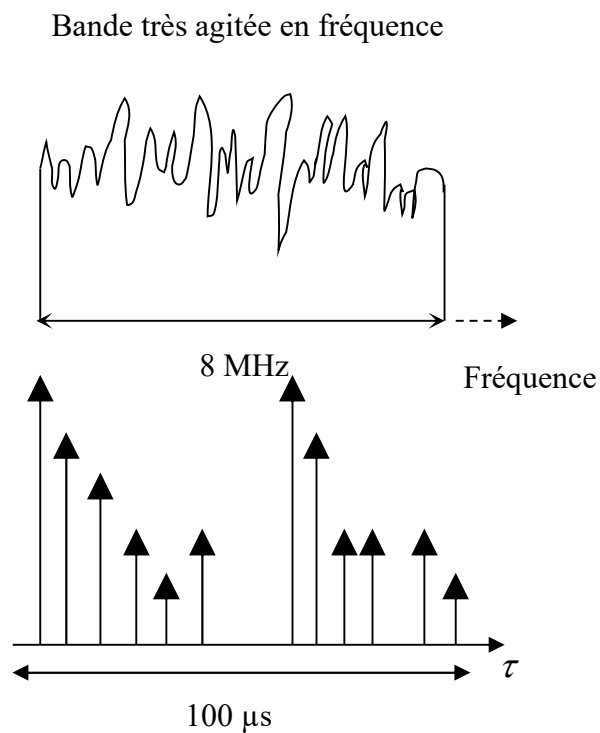


Figure 3.12 (c) - Echos longs. Source [10]

Figure 3.12 – Les différents types d'échos. Source [10]

III.6.4 Distorsion subie par un signal de Bande B en fonction de l'étalement des

échos

La réponse du canal réagit en fonction de l'étalement des échos. Lorsque les échos sont longs (c'est-à-dire $1/\tau$ est faible), le canal est très agité, dans ce cas on dit que le canal est très sélectif en fréquence vis-à-vis du signal et l'ensemble des composantes ne subissent pas toutes la même atténuation lors de la transmission.

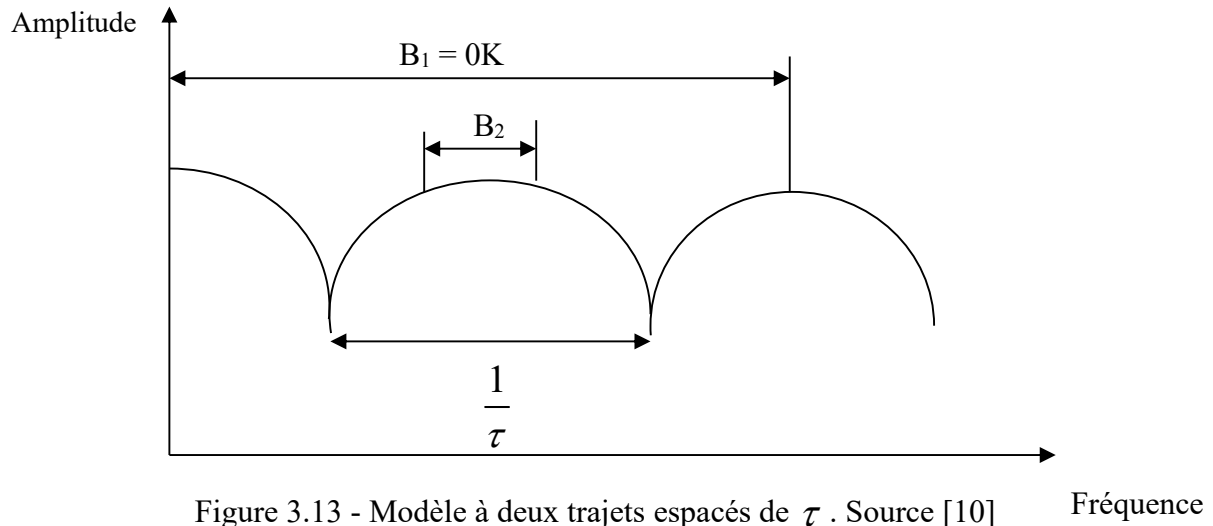


Figure 3.13 - Modèle à deux trajets espacés de τ . Source [10]

- Le cas : $B_1 \gg 1/\tau$

Dans ce cas lorsque $1/\tau$ est très faible (échos long dans le canal) le canal est très agité, on dit que le canal est sélectif en fréquence, vis-à-vis du signal. L'ensemble des composantes ne subissent pas toutes la même atténuation lors de la transmission.

- Le cas : $B_2 \ll 1/\tau$

Le canal est dit non sélectif en fréquence. Il est plat à l'intérieur de la bande B_2 .

Dans ce cas de système à bande étroite ($B_2 \ll 1/\tau$) le canal ne distord pas le signal malgré les échos. Cependant à un instant donné, on peut « tomber dans un trou » du canal ; cela implique une absence du signal reçu.

C'est pourquoi l'on préfère les systèmes à large bande ($B \approx 8$ MHz), rarement sujets à un fading total à condition toutefois de construire au préalable un signal sachant s'affranchir des distorsions apportées par le canal.

III.6.5 Différents canaux de transmission

Pour évaluer le système DVB-T, il est nécessaire de définir les modèles de canaux de transmission pouvant être rencontrés.

- Canal Gaussien : il est caractérisé par la présence d'un trajet direct perturbé seulement par du bruit blanc (thermique).
- Canal de Rice : il est caractérisé par la présence d'un trajet direct auquel se rajoute un certain nombre d'échos variable en amplitude et en phase.

- Canal de Rayleigh : (uniquement des échos) plus difficile c'est en fonction des amplitudes et des phases très variables. Il est caractérisé par l'absence de trajet direct, les échos étant les mêmes que pour le canal de Rice.

Les canaux Gaussien et plus typiquement de Rice sont caractéristiques de la réception aérienne fixe avec une antenne de toit, tandis que le canal de Rayleigh est caractéristique de la réception portable.

III .6.6 Principe de la modulation multiporteuse

Contrairement aux systèmes monoporteuses qui modulent sur une porteuse unique à un débit de R_s , le principe de la modulation multiporteuse de type OFDM consiste à transmettre les données de manière simultanée sur « N » porteuses modulées à un débit de R_s/N . Le débit global reste inchangé mais chaque porteuse est moins sensible à l'étalement des trajets sur le canal de propagation.

La figure 3.14 décrit le schéma de principe d'un modulateur OFDM en bande de base : après un codage Bit/Symboles des bits à transmettre. Les symboles complexes $\{ X_l \}_{l=1,2,...}$ sont successivement regroupés par blocs de N (conversion série/parallèle), mis en forme sur une durée T (forme d'onde $g(t)$) puis envoyés sur les N porteuses $\{ f_n \}_n = -N/2...N/2-1$ afin de former le signal de sortie.

Durant l'intervalle du temps $[iT, (i+1)T]$ le signal OFDM généré s'écrit :

$$S_i(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{i,n} g(t - iT - T/2) e^{j2\pi f_n t} \quad (3.1)$$

Il représente le $i^{\text{ème}}$ symbole OFDM, tandis que les $\{ X_{i,n} \}_n = -N/2...N/2-1$ représentent les N symboles complexes $\{ X_l \}$ qu'il transporte.

Le signal reçu s'écrit de la façon suivante :

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{i,n} g(t - iT - T/2) e^{j2\pi f_n t} + n_n(t) \quad (3.2)$$

où $n_n(t)$ est le bruit blanc additif gaussien introduit par le canal sur la $n^{\text{ème}}$ porteuse. Les symboles transmis peuvent être retrouvés en réception à l'aide d'un filtre adapté suivi d'un échantillonneur.

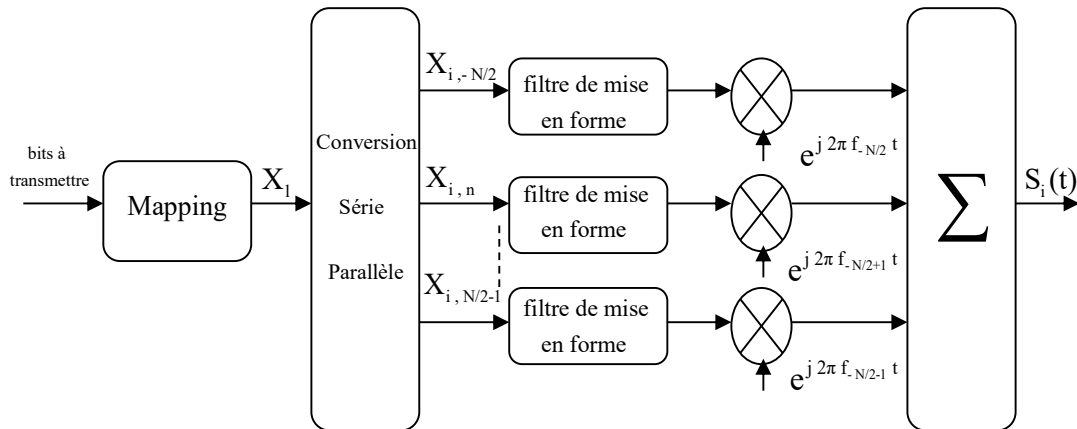


Figure 3.14 - Schéma de principe d'un modulateur OFDM. Source [19]

III.6.7 Porteuses orthogonales

Nous définissons l'efficacité spectrale comme étant le débit binaire transmis par unité de fréquence. Dans une transmission de type OFDM, le choix de l'écartement entre les porteuses va influencer sur cette efficacité spectrale.

Plus l'espacement entre porteuses est grand, plus nous avons besoin de bande passante pour transmettre un même débit, plus l'efficacité spectrale diminue.

Pour garantir une efficacité spectrale optimale, il faut que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles, tout en garantissant une absence d'interférence entre les informations qu'elles transportent afin que le récepteur soit capable de les retrouver.

Les spectres des différentes porteuses sont présentés sur la figure 3.15. Le spectre d'un signal OFDM est la somme de tous ces spectres.

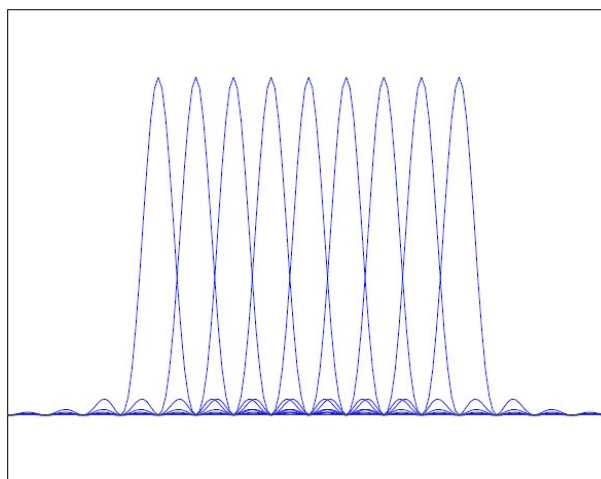


Figure 3.15 - Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM, décomposé sur chaque porteuse. Source [19]

III.6.8 Intervalle de garde

Pour les signaux numériques, l'intervalle de garde correspond à un temps pendant lequel la réception n'est pas perturbée par les échos. Pendant cet intervalle de garde, la transmission des données numériques (symboles) est interrompue afin de laisser les différents échos arriver sur le récepteur, avant d'émettre une nouvelle donnée. Les signaux numériques et leur sensibilité accrue aux interférences ont rendu indispensable l'utilisation d'un intervalle de garde.

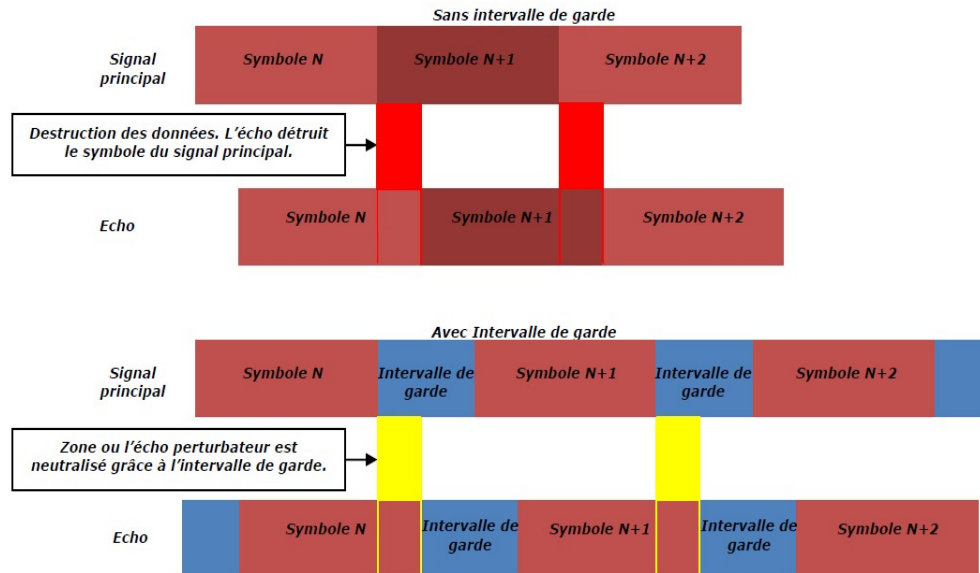


Figure 3.16 – Intervalle de garde. Source [19]

Plus l'intervalle de garde est élevé, plus la résistance aux échos est efficace. Néanmoins le débit utile est alors plus faible.

Il peut arriver que l'introduction de cet intervalle de garde apporte des interférences entre les symboles. C'est le « C » de la technique COFDM (illustré plus loin) qui permet de s'en affranchir. Le codage produit une redondance pour détecter et corriger les erreurs permettant au récepteur de reconstituer les informations perdues lors de la transmission, grâce à la corrélation qui les lie aux informations correctement reçues. Grâce à l'entrelacement, les informations les plus solidaires entre elles sont soumises à des événements indépendants.

III.6.9 Principe du système COFDM

Le COFDM est une des spécificités de la TNT : cette dénomination (COFDM) se justifie par le fait que l'on assure la transmission à l'aide d'un multiplex fréquentiel de sous porteuses orthogonales entre elles séparées par un intervalle de garde.

Le principe de la modulation COFDM consiste à répartir l'information à transmettre quelque soit son débit sur des porteuses distinctes émises simultanément et modulé individuellement en QPSK ou QAM (selon le compromis robustesse/débit) à un débit assez bas pour que la durée utile t_s d'un symbole soit suffisamment grande devant l'étalement des échos.

- L'interférence intersymbole est alors limitée à une faible part de la durée du symbole.
- L'intervalle d'interférence intersymbole n'est pas pris en compte dans le récepteur (intervalle de garde Δ).
- Les porteuses sont orthogonales : Il n'y a pas donc d'interférence inter-porteuses

Par conséquent :

- L'interférence intersymbole disparaît ;
- Il reste néanmoins l'interférence intrasympbole qui est le reflet de la réponse en fréquence du canal.

III.6.9.1 Multiplexage de fréquences orthogonales

L'information est transmise sur un grand nombre de porteuses. On construit un signal dans le quel on crée des symboles de modulations de durée utile (t_s).

Si sur cet intervalle de temps (t_s) les différentes porteuses ont un nombre entier de périodes, ces sinusoïdes sont orthogonales pendant un temps symbole. On transmet donc « N » porteuses exposées de $1/t_s$.

Il existe deux modes de transmissions :

- Mode 2k : 1705 porteuses
- Mode 8k : 6817 porteuses.

III.6.10 Paramètres du signal COFDM en DVB-T

- Intervalle de garde : Δ

Le choix de ce paramètre dépend de la longueur des échos :

$D = 7 \mu s ; 14 \mu s ; 28 \mu s ; 56 \mu s ; 112 \mu s$ ou $224 \mu s$.

- Durée du symbole utile : t_s

$T_s = 4 \Delta ; 8 \Delta ; 16 \Delta ; 32 \Delta$.

- Nombre de porteuses : N

Bande spectrale du signal

$B = 7,61 \text{ MHz}$ (inférieure à la valeur standard 8 MHz du canal TV analogique).

D'où $N = 1705$ porteuse (mode 2k)

et $N = 6817$ porteuses (mode 8k).

- **Modulation appliquée à chaque porteuse**

QPSK ; MAQ 16 ; MAQ 64

- **Codage**

Dans le système, un niveau de flexibilité est aménagé au niveau du codage. On peut coder fortement pour augmenter la robustesse mais l'utilisation du spectre sera peu efficace ; on peut, au contraire, diffuser un grand nombre de programmes codés moins fortement. Une large gamme de codages est proposée et laissée au choix du diffuseur.

Le codeur de base utilisé possède un rendement de $1/2$; après poinçonnage, on obtient des rendements de : $2/3$; $3/4$; $5/6$ ou $7/8$.

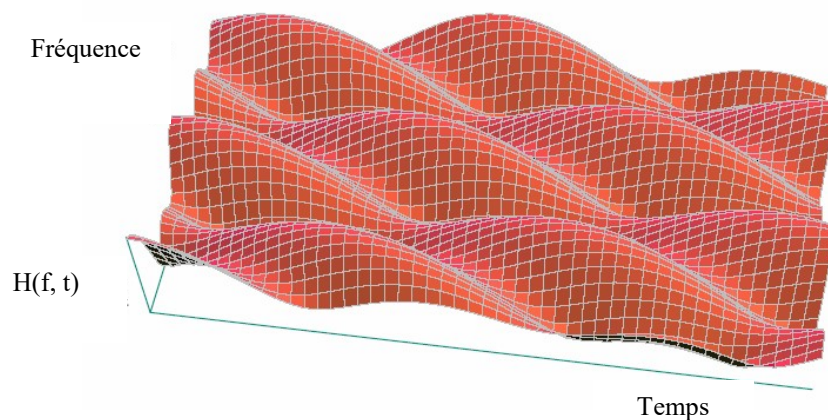


Figure 3.17 - Répartition du signal DVB-T sur les ondes sous porteuses. Source [21]

III.6.11 La portée de cette invention

La modulation COFDM permet de s'affranchir des échos, qui sont, avec le bruit thermique, l'une des deux limitations de la desserte en télévision analogique.

- **S'affranchir de l'obligation d'avoir des antennes de réception directives**

La directivité des antennes de réception de télévision était au moins autant destinée à éviter les échos qu'à recevoir un signal assez fort (c'est-à-dire exempt de bruit). Il n'est plus nécessaire d'éliminer des échos, donc la directivité des antennes n'est plus utile en tant que telle.

- **S'affranchir des contraintes de localisation des émetteurs**

Le gain des antennes, conséquence de leur directivité, permet aussi de recevoir un signal assez fort. Mais cela peut aussi se faire à l'émission : il suffit de rapprocher les émetteurs des zones à desservir. C'est possible car la nécessité de localiser tous les émetteurs aux mêmes emplacements ne résultait que de la difficulté de régler les antennes de réception pour éliminer les échos. On voit que cette invitation, à terme, va permettre de créer des réseaux de diffusion nouveaux, plus proches des zones à desservir, donc avec des émetteurs plus modestes.

- **S'affranchir de la plupart des contraintes de planification des fréquences**

Pour un récepteur qui capte des signaux, il importe peu que les divers échos qu'il reçoit proviennent du même émetteur ou proviennent d'émetteurs différents. Ainsi, deux émetteurs émettant sur la même fréquence ne se brouillent plus, à condition de respecter les conditions de synchronisme nécessaires pour que l'émission de l'un parvienne au récepteur pendant l'intervalle de garde de l'autre, ou vice versa. On pourra donc couvrir l'ensemble d'un territoire avec une seule fréquence, et ajouter des réémetteurs en cas de besoin sur cette même fréquence, sans avoir à planifier quoi que ce soit.

- **Accroître la quantité de programme diffusé**

L'ensemble que nous avons décrit plus haut (6817 porteuses et une durée de symbole de $896 \mu s + 28 \mu s$ d'intervalle de garde) permet un débit utile de 24 Mbits/s, soit largement assez pour transmettre 6 programmes de télévision en multiplexage statistique. En outre, la largeur de bande du signal est de 7,61 MHz, ce qui lui permet de tenir largement dans un canal de télévision. On voit donc qu'un canal, utilisé en numérique, transmet autant de programmes de télévision que six canaux analogiques.

- **Recevoir avec des récepteurs portables**

Les antennes directives n'étant plus nécessaires, on peut recevoir la télévision numérique sur des récepteurs portables. Sans doute inventera-t-on de nouvelles espèces de récepteurs. On ne sait pas si les éditeurs émettront de nouvelles émissions de faible débit numérique pour être reçues sur des appareils de poche à petits écrans ou si, au contraire, on verra surtout se développer des appareils légers mais de grande qualité, des écrans à plasma que l'on pourra déplacer à volonté dans son appartement. Ce qui est certain, c'est que, grâce à le COFDM, le câble d'antenne est un accessoire qui ne fait pas partie des téléviseurs standards de demain.

III.7 CHAÎNE D'ÉMISSION DVB-T

Le signal d'entrée du codeur DVB doit être conforme au format MPEG 2 TS (flux de transport) de 188 octets.

III.7.1 Dispersion d'énergie

Cette opération consiste à ajouter au signal d'entrée une séquence pseudo-aléatoire par l'intermédiaire d'un « OU exclusif ».

Cette dispersion d'énergie a pour but d'obtenir une répartition d'énergie dans le canal de transmission, ceci afin d'éviter les raies de niveau élevé provoquant des brouillages avec les canaux analogiques existants.

Cela permet également d'augmenter le nombre de transition du signal pour faciliter la récupération de l'horloge.

III.7.2 Code correcteur

Le code utilisé est un code Reed Solomon RS (204,188, t=8). Il travaille sur 188 Octets en entrée et ajoute une redondance de 16 octets. Il fournit un train de sortie de 204 octets et il permet de corriger 8 octets parmi ces 204 octets.

III.7.3 Entrelacement convolutionnel externe

Cet entrelacement introduit un retard variable en fonction de l'ordre d'arrivée de chaque octet. A la réception, les retards inverses sont appliqués pour rétablir l'ordre initial des données. Le but est d'effectuer une répartition des erreurs pour permettre au décodeur RS d'atteindre ses performances optimales en limitant la longueur des paquets d'erreurs.

III.7.4 Code interne

Comme le canal de transmission hertzien est un canal fortement perturbé (propagation par trajets multiples), un deuxième code correcteur d'erreurs est ajouté pour améliorer les performances du système.

Le code employé est un code convolutif, son rendement de base est 1/2.

D'autres rendements sont obtenues par poinçonnage : 2/3 ; 3/4 ; 5/6, 7/8.

Le décodeur utilise l'algorithme de Viterbi.

III.7.5 Entrelacement interne

L'entrelacement interne consiste à un entrelacement au niveau des bits suivi d'un entrelacement au niveau des symboles. Le but de cet entrelacement est d'effectuer une décorrélation des informations dans le domaine fréquentiel.

III.7.6 Modulation

La modulation utilisée est une modulation OFDM. Chaque porteuse est modulée en QPSK, 16 QAM ou 64 QAM.

Il existe deux modes de transmission :

- Le « mode 8k » (6817 porteuses) : il permet un espacement entre chaque émetteur/relais pouvant atteindre 100 Km, comme actuellement en analogique.
- Le « mode 2k » (1705 porteuses) : il n'opère que sur un rayon d'environ 20 Km.

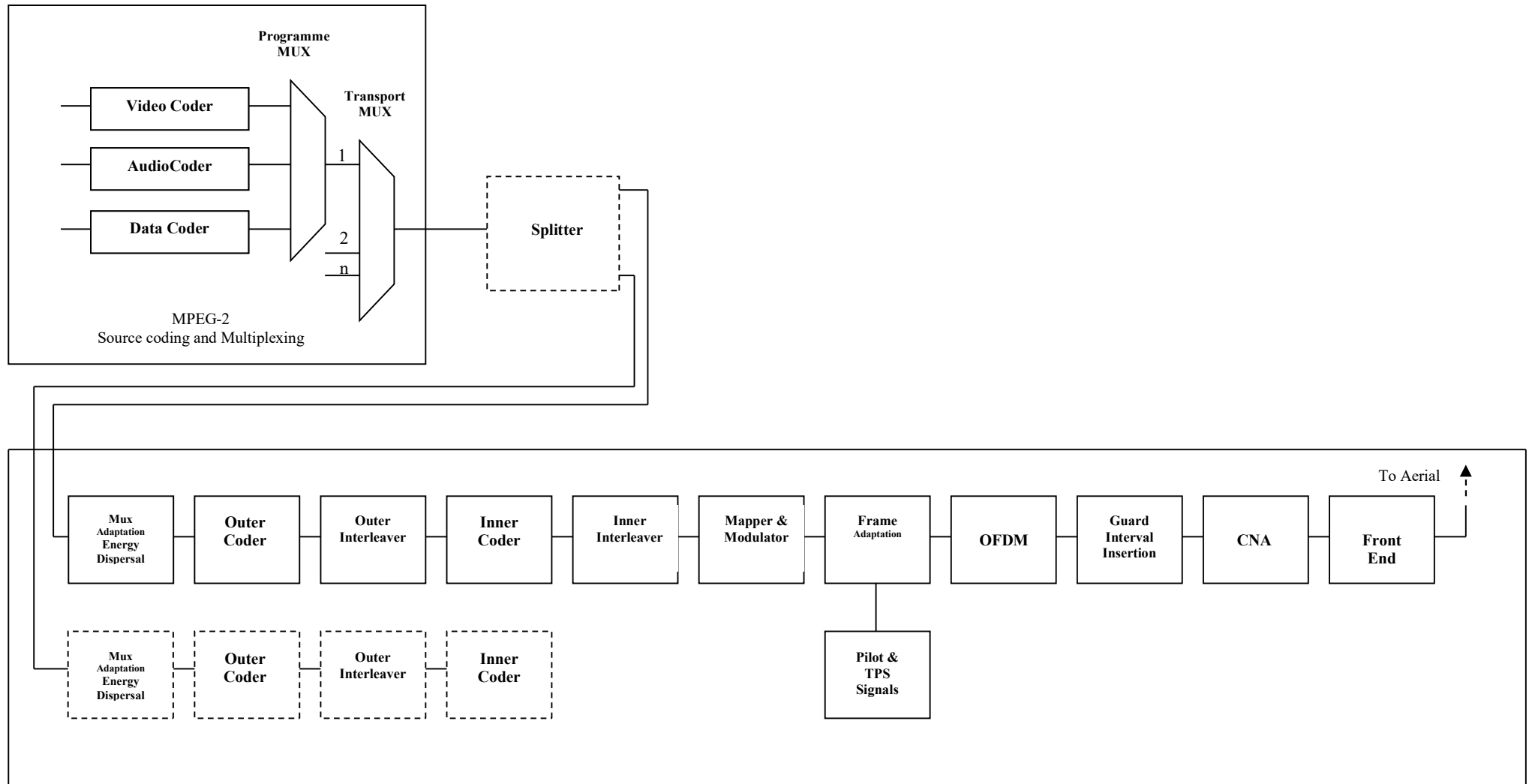


Figure 3.18 - Synoptique de la chaîne d'émission DVB-T. Source [10]

Mode	8k				2k			
Guard interval Δ / T_u	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Duration of symbole part T_u	$8192 \times T$ $896 \mu s$				$2048 \times T$ $224 \mu s$			
Duration of guard interval Δ	$2048 \times T$ $224 \mu s$	$1024 \times T$ $112 \mu s$	$512 \times T$ $56 \mu s$	$256 \times T$ $28 \mu s$	$512 \times T$ $56 \mu s$	$256 \times T$ $28 \mu s$	$128 \times T$ $14 \mu s$	$64 \times T$ $7 \mu s$
Symbole duration $T_s = \Delta + T_u$	$10240 \times T$ $1120 \mu s$	$9216 \times T$ $1008 \mu s$	$8704 \times T$ $952 \mu s$	$8448 \times T$ $924 \mu s$	$2560 \times T$ $280 \mu s$	$2304 \times T$ $252 \mu s$	$2176 \times T$ $238 \mu s$	$2112 \times T$ $231 \mu s$

Tableau 3.2 - Durée symbole en fonction de l'intervalle de garde. Source [10]

Modulation	Code rate	Bitrate (Mbits/s)			
		$\Delta/T_u = 1/4$	$\Delta/T_u = 1/8$	$\Delta/T_u = 1/16$	$\Delta/T_u = 1/32$
QPSK	1/2	4,98	5,53	5,85	6,03
QPSK	2/3	6,64	7,37	7,81	8,04
QPSK	3/4	7,46	8,29	8,78	9,05
QPSK	5/6	8,29	9,22	9,76	10,05
QPSK	7/8	8,71	9,68	10,25	10,56
16-QAM	1/2	9,95	11,06	11,71	12,06
16-QAM	2/3	13,27	14,75	15,61	16,09
16-QAM	3/4	14,93	16,59	17,56	18,10
16-QAM	5/6	16,59	18,43	19,52	20,11
16-QAM	7/8	17,42	19,35	20,49	21,11
64-QAM	1/2	14,93	16,59	17,56	18,10
64-QAM	2/3	19,91	22,12	23,42	24,13
64-QAM	3/4	22,39	24,88	26,35	27,14
64-QAM	5/6	24,88	27,65	29,27	30,16
64-QAM	7/8	26,13	29,03	30,74	31,67

Tableau 3.3 - Débits utiles en fonction du type de modulation, du rapport (Δ/T_u) et du rendement du code convolutif (r). Source [10]

III.8 MODELE DE PLANIFICATION

La technologie numérique autorise deux structures de réseaux différentes :

III.8.1 La notion de cellule

Une cellule représente une zone géographique sur laquelle un multiplex est diffusé en

utilisant les mêmes paramètres physiques. Une cellule peut correspondre au signal émis par un seul émetteur physique ou par plusieurs.

Dans le premier cas on parlera, de réseau MFN ou réseau multi-fréquence, dans le second cas de réseau SFN ou réseau iso-fréquence.

III.8.2 Le réseau multifréquence, Multi Frequency Network ou MFN

Le réseau multifréquence, appelé également MFN (Multi Frequency Network), dont le principe consiste à utiliser pour deux sites de diffusion voisins, des fréquences différentes. Ce mode de planification est aujourd'hui utilisé pour la TV analogique. Ce modèle a été retenu car :

- Il est plus rapide à mettre en place car il reprend le schéma de déploiement des chaînes de télévision analogiques.
- Il n'impose pas la modification des orientations des antennes de réception.
- Il exploite la ressource des canaux tabous.

Seul défaut :

- Il est très gourmand en fréquence.

III.8.3 Le réseau monofréquence, Single Frequency Network ou SFN

Le second modèle est celui du réseau monofréquence, SFN (Single Frequency Network) rendu possible grâce à la technique du COFDM, et dont le principe consiste à diffuser le même multiplex de programmes sur la même fréquence, de manière nationale ou régionale.

Ainsi un récepteur reçoit un signal principal correspondant à l'émetteur le plus proche ou le plus puissant et une combinaison d'échos « actifs ». Ce type de réseau présente l'avantage de :

- Faire une économie drastique sur le nombre de fréquences utilisées.
- Favoriser le développement des récepteurs portables en permettant d'augmenter la densité des émetteurs.

En revanche :

- Il est nécessaire de diminuer les débits.
- Il est actuellement inapplicable dans les zones frontalières à cause de sa fréquence unique.
- Très coûteux car il multiplie le nombre des émetteurs.

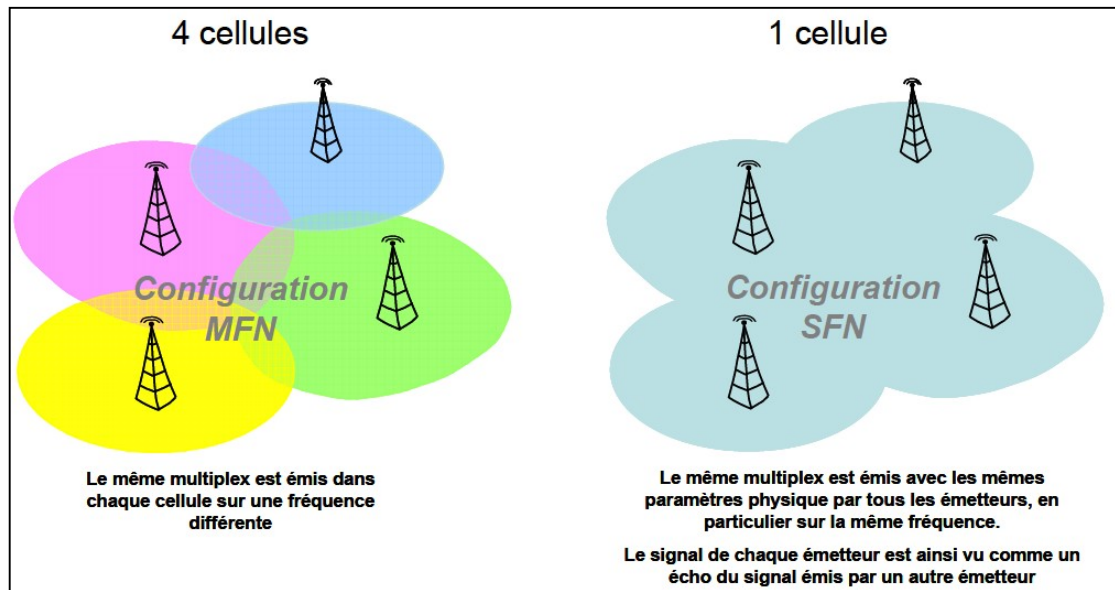


Figure 3.19 - La notion de cellule – les configurations SFN et MFN. Source [28]

III.8.4 Zone non couverte par la TNT

III.8.4.1 Les zones blanches

Les zones blanches sont les zones non couvertes par les émetteurs TNT ou en limite de zones de couverture.

Lors de l'arrêt des chaînes analogiques, la réception de la télévision se fera par satellite, câble, ADSL ou fibre optique.

III.8.4.2 Les zones d'ombre

Entre les zones couvertes et les zones blanches existent des zones d'ombre qui pourraient subir des interférences. De plus, des obstacles (silos...) peuvent également empêcher la bonne réception de la TNT. Mais la délimitation de ces zones est impossible à connaître aujourd'hui.

III.9 MODE DE RECEPTION DE LA TNT

Il faut rappeler que le signal transmis est numérique et à la différence d'un signal de télévision analogique dont la dégradation est progressive, celle de l'image en DVB-T passe par une transition rapide d'une réception de qualité à la perte totale de l'image.

Grâce à sa robustesse, le DVB-T permet des possibilités de dessertes pour différents types de récepteurs : fixes, portables et mobiles

III.9.1 Réception fixe

C'est la situation majoritaire du service de télévision en analogique.

- Elle fonctionne simplement à l'aide d'une antenne de toit conventionnelle,
- Elle ne nécessite aucune intervention requise sur l'antenne dans 75% des cas,
- Seule l'acquisition d'un adaptateur est nécessaire (décodeur).

Depuis l'année 2008, les récepteurs TV produits sont équipés d'un adaptateur TNT.

III.9.2 Réception portable

C'est la possibilité de recevoir les programmes numériques par une antenne intérieure posée sur le téléviseur voir intégrée à ce dernier ; La réception doit être parfaite sans avoir à rechercher une position particulière du récepteur ou de l'antenne intégrée au poste.

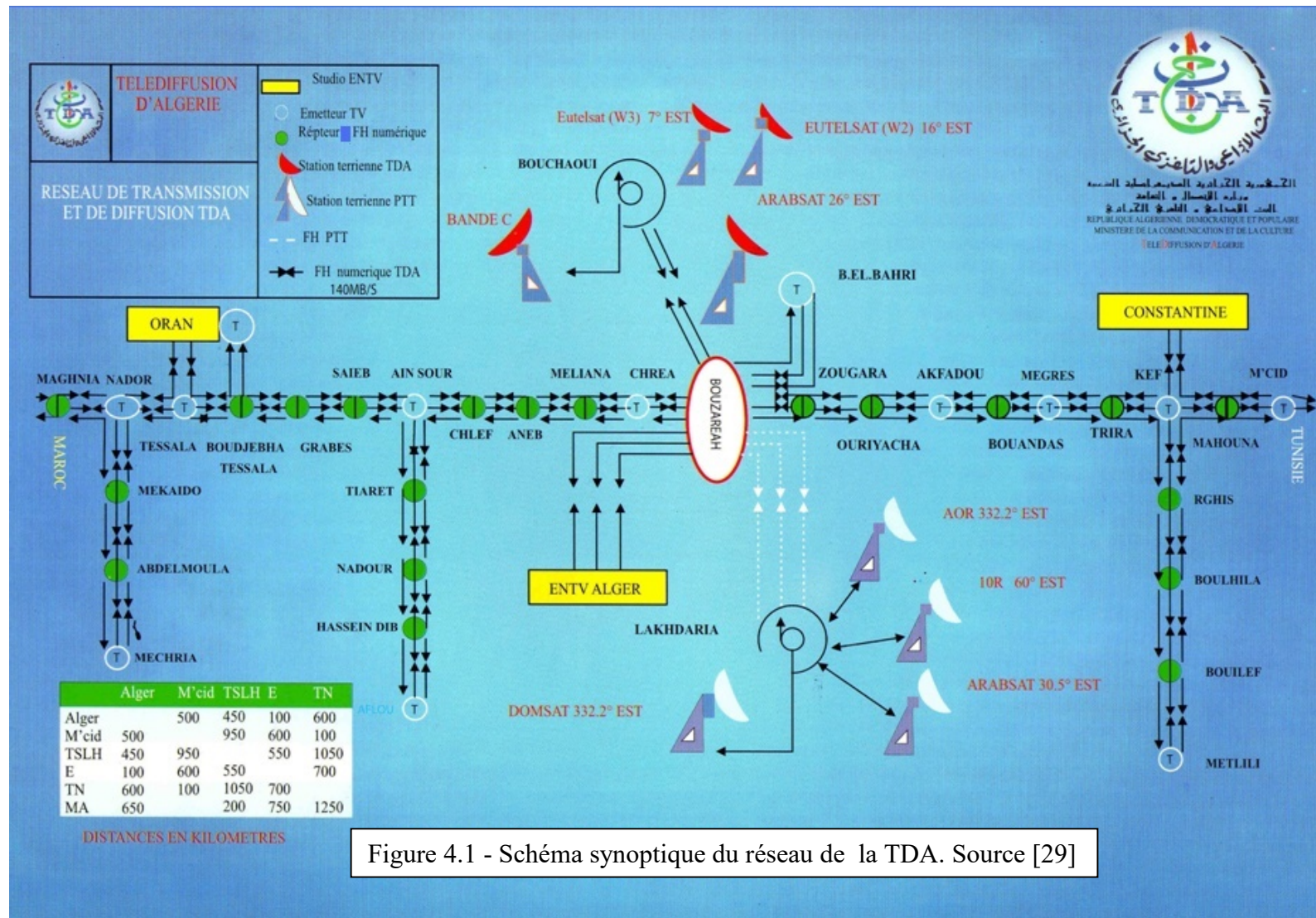
- Elle permet de s'affranchir du câblage (exemple : TV secondaire),
- Elle doit toucher le maximum de population dans la zone couverte par l'émetteur.
- Elle est facilitée à réceptionner beaucoup plus avec un Switch off de l'analogique.

III.9.3 Réception mobile

C'est la possibilité de recevoir les programmes en se déplaçant (exemple en voiture). La norme DVB-T ne prévoit pas ce cas ; une réception par des récepteurs mobiles est possible mais à condition de choisir une émission de type T-DAB. Le débit numérique est plus faible. La réception est possible pour une mobilité limitée, inférieure à 120 Km/h.

III.10 CONCLUSION

A l'issue de l'étude des éléments de ce chapitre, nous avons remarqué que la protection de l'information DVB est une caractéristique primordiale de la qualité du signal. Ceci nous amène à voir pratiquement la qualité d'un signal traité par le DVB, soit un sujet qui fera l'objet de notre étude dans le prochain chapitre et qui est un cas pratique de la TNT.



IV.3 PLATEFORME TNT

C'est une plateforme acquise pour le bouquet TNT et satellite. Elle se trouve au niveau tête de réseau de transmission de la TDA (ENTV devenu EPTV).

L'abréviation 5+1 indique la présence de cinq codeurs actifs et un codeur en réserve chaud (commuté en cas de problème). Chaque codeur traite un programme vidéo et plusieurs audio simultanément.

Les programmes sont : programme national, canal Algérie, A3, Amazigh, Coran et mire de test (sixième feed).

Cette plateforme est gérée automatiquement et manuellement par un logiciel spécifique appelé nCompass.

Le schéma global est représenté ci-dessous :

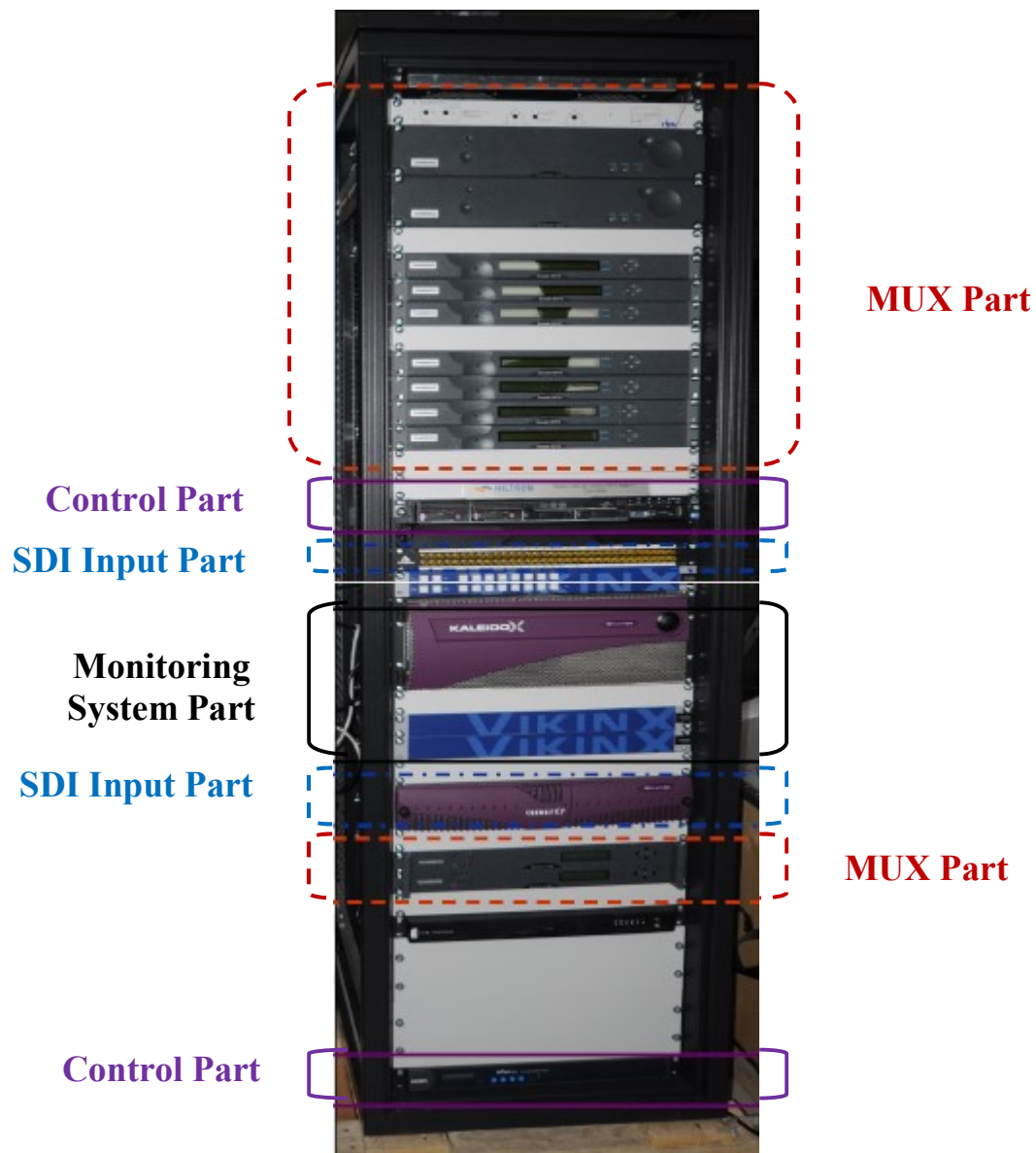


Figure 4.2 – Baie de la plateforme TNT

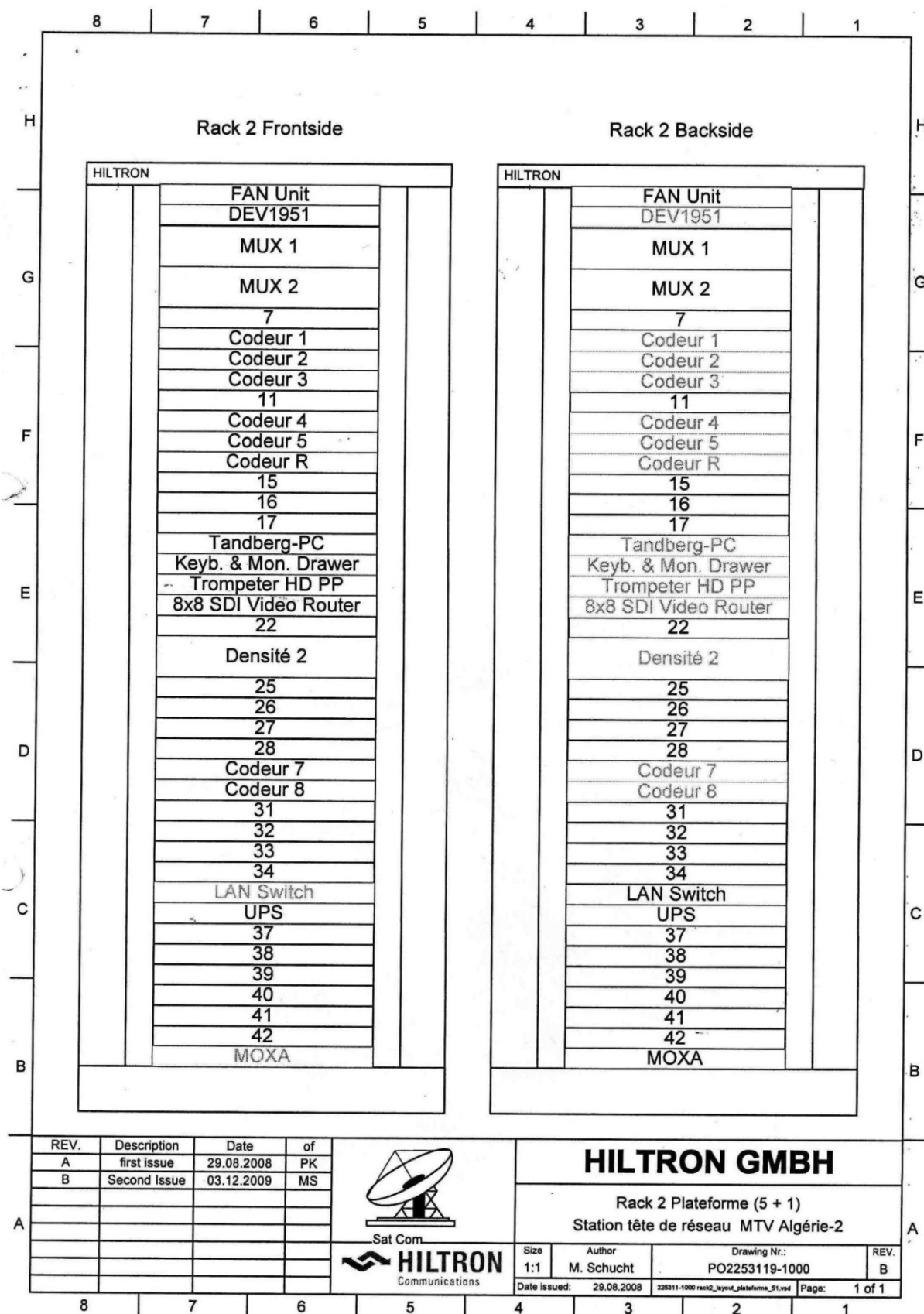


Figure 4.3 - Schéma d'implantation de la plateforme TNT (5 + 1)

D'après le schéma, nous distinguons les organes de base et les organes annexes.

Les organes de base :

- Cinq codeurs actifs et un en réserve
- Une grille vidéo 8×8
- Deux multiplexeurs : Un en fonction et le deuxième en réserve
- Deux codeurs audio numériques
- Un DEV : commutateur finale.

Les organes annexes :

- Trois Patch Panel de contrôle
- Une Densité-2
- Un PC pour la gestion en nCompass de la plateforme
- Un hub
- Trois IO Panel.
- Un Kalaedo

Les caractéristiques techniques des équipements sont :

IV.3.1 Le codeur E 5710

Les entrées :

- SDI IN 75Ω pour une entrée vidéo et audio simultanément (audio encapsulé) (un programme).
- Composite vidéo IN pour l'entrée de la vidéo analogique (CVBS).
- Hsynchron (optionnel) horloge de synchronisation (externe entre les équipements).
- Entrées audio sous forme XLR AES ou D Base aussi (numérique).

Les sorties :

- 3 sorties ASI identiques (elles contiennent le même programme)
- Sortie Ethernet 8 way Rj 45 pour la communication avec TDC pour la commande et monitoring ou le mode BROWSER.

RS 232 : Alarme de contrôle.

Alimentation : de 220 V à 240 V.

Mot de passe : 123456789.

Remarque

Les six codeurs possèdent les mêmes caractéristiques techniques.

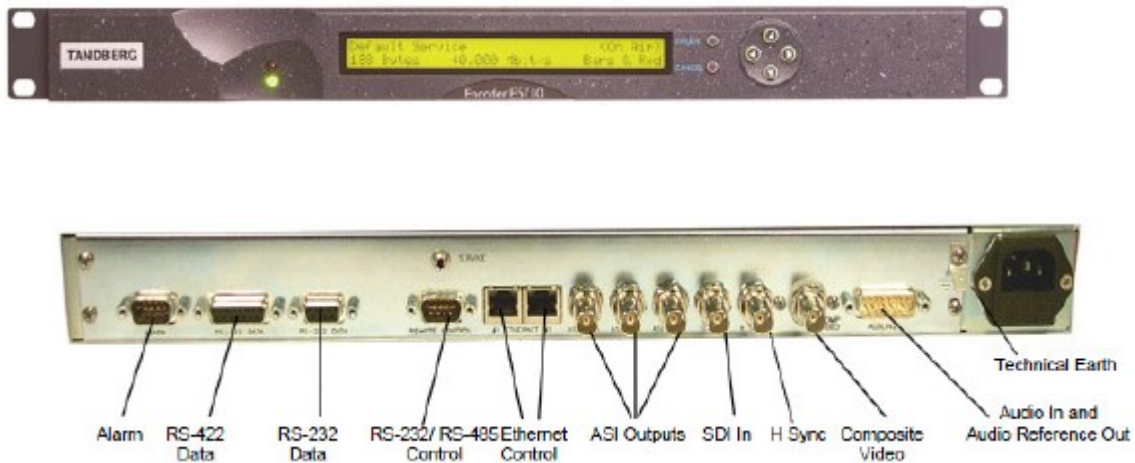


Figure 4.5 - Codeur E 5710

IV.3.2 La grille vidéo 8 × 8

- La grille de commutation vidéo 8 × 8 a huit entrées et huit sorties. Chaque entrée a 64 possibilités d'être commuté à la sortie.
- Format du signal entrée : SDI 270 Mbits (le débit du signal est de 270 Mbits/s et peut atteindre 1,48 Gbits/s).
- Connecteur femelle 75 Ω
- La longueur du câble est d'environ 100 m pour le contrôle audio (comme le signal audio est plus sensible que le signal vidéo on ne doit pas dépasser cette valeur approximative)
- Niveau du signal SDI 1 V crête à crête.



Figure 4.6 - Grille de commutation

IV.3.3 Le multiplexeur 8400

Multiplexeur statistique avec les accès suivants :

- Deux entrées Hsynchrones (Input Hsync) avec des fiches de type BNC
- Deux sorties H synchrones (Output Hsync) avec des fiches de type BNC
- Deux entrées Ethernet avec des fiches Rj 45 réservées au contrôle sur le PC
- Huit entrées ASI (ASI IN), 6 réservées à la vidéo avec des fiches de type BNC et 2 réservées pour la radio avec des fiches de types XLR
- Deux sorties ASI avec des fiches de type BNC
- Quatre entrées data avec des fiches de type Rj 45
- Alimentation 220 V

Remarque

Les deux multiplexeurs ont les mêmes caractéristiques techniques.

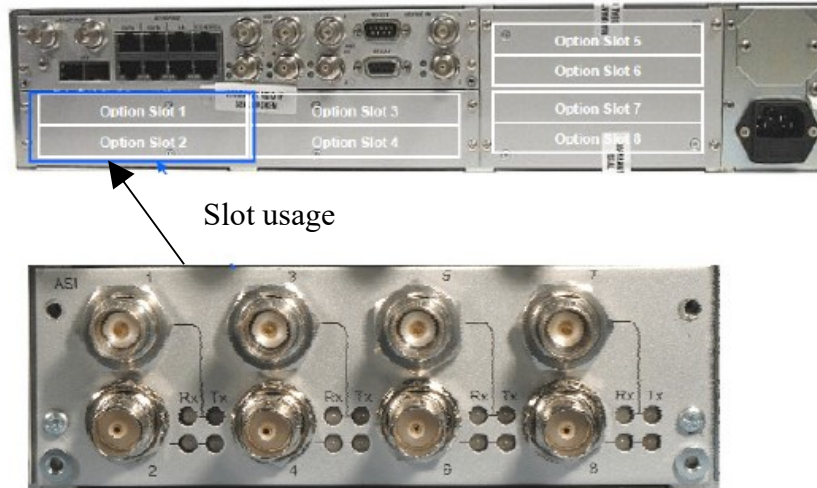


Figure 4.7 - Multiplexeur TNT MX 8400 (représentation des slots)

IV.3.4 Les deux codeurs audio numériques

Le premier codeur audio numérique (cf. Figure 4.4 (codeur 7))

- Six entrées AES
- Trois sorties ASI avec utilisation de deux sorties et une libre, les deux premières sorties ASI utilisées contiennent les six programmes identiquement, la troisième sortie ASI contient les six programmes pour l'utilisation libre et le contrôle.

Le deuxième codeur audio numérique (cf. Figure 4.4 (codeur 8))

- Quatre entrées AES
- Trois sorties ASI, deux sont utilisées et la troisième est libre, les deux premières sorties ASI utilisées contiennent 4 programmes identiquement, la troisième sortie ASI contient les six programmes pour l'utilisation libre et le contrôle.

IV.3.5 DEV 1951

C'est un Switch (commutateur) ASI redondant, il fait la commutation entre les deux multiplexeurs.

- Type du signal ASI de 0,8 V = 800 mV
- Débit de transmission ou commutation est de 30 à 540 Mbits/s
- Deux entrées
- Deux sorties
- Impédance 75 Ω

- Niveau d'entrée de 100 mV à 800 mV
- Rapidité de commutation est de 10^{-6} Baud
- Alimentation 220 V
- Accès Ethernet.



Frontside



Backside

Figure 4.8 - DEV 1951

IV.3.6 Les Patch Panel

Les Patch Panel ou table de brassage sont des équipements passifs, ce ne sont que des câbles utilisés pour le contrôle et la manipulation.

IV.3.7 Densité 2

Elle contient des cartes, elle fait la conversion série parallèle pour utilisation, contrôle et source secours.

- Une entrée série de chaque programme
- Trois sorties parallèle de chaque programme et une quatrième libre.



Figure 4.9 - Densité 2

IV.3.8 PC

PC pour créer les graphes et les différents schémas de contrôle et de modification.



Figure 4.10 - PC

IV.3.9 Hub

Un hub qui possède plusieurs entrées et sorties pour la communication entre les équipements et une sortie vers le PC pour le contrôle.

IV.3.10 Kalaedo

Distributeur vers les moniteurs de contrôle



Figure 4.11 - Kalaedo

IV.3.11 IO Panel-02

Deux IO-Panel-02 (Input Output Panel-2) pour le contrôle des six programmes sur les dalles des moniteurs.

IV.3.12 IO Panel-03

Un IO-Panel-03 (Input Output Panel-3) pour le contrôle audio dans la salle de contrôle (pour écoute après conversion numérique analogique de chaque audio).

IV.4 LE LOGICIEL nCompass

C'est un logiciel spécifique de gestion de la plateforme TNT fourni par la firme HILTRON communication et qui sert à gérer automatiquement et manuellement la plateforme suivant nécessité de maintenance et d'exploitation.

IV.5 ROLE DU LOGICIEL nCompass

- Contrôle du mode de la chaîne d'émission

- Visualisation des alarmes de chaque équipement
- Modification des paramètres de tous les équipements
- Basculement manuel de chaque équipement
- Insertion d'un autre équipement dans la chaîne d'émission exemple : codeur, multiplexeur
- Création et addition d'autres profils et Map
- Historique des alarmes (le journal)
- Le nCompass gère la redondance automatique des équipements.

➤ **Exemple d'utilisation du logiciel nCompass**

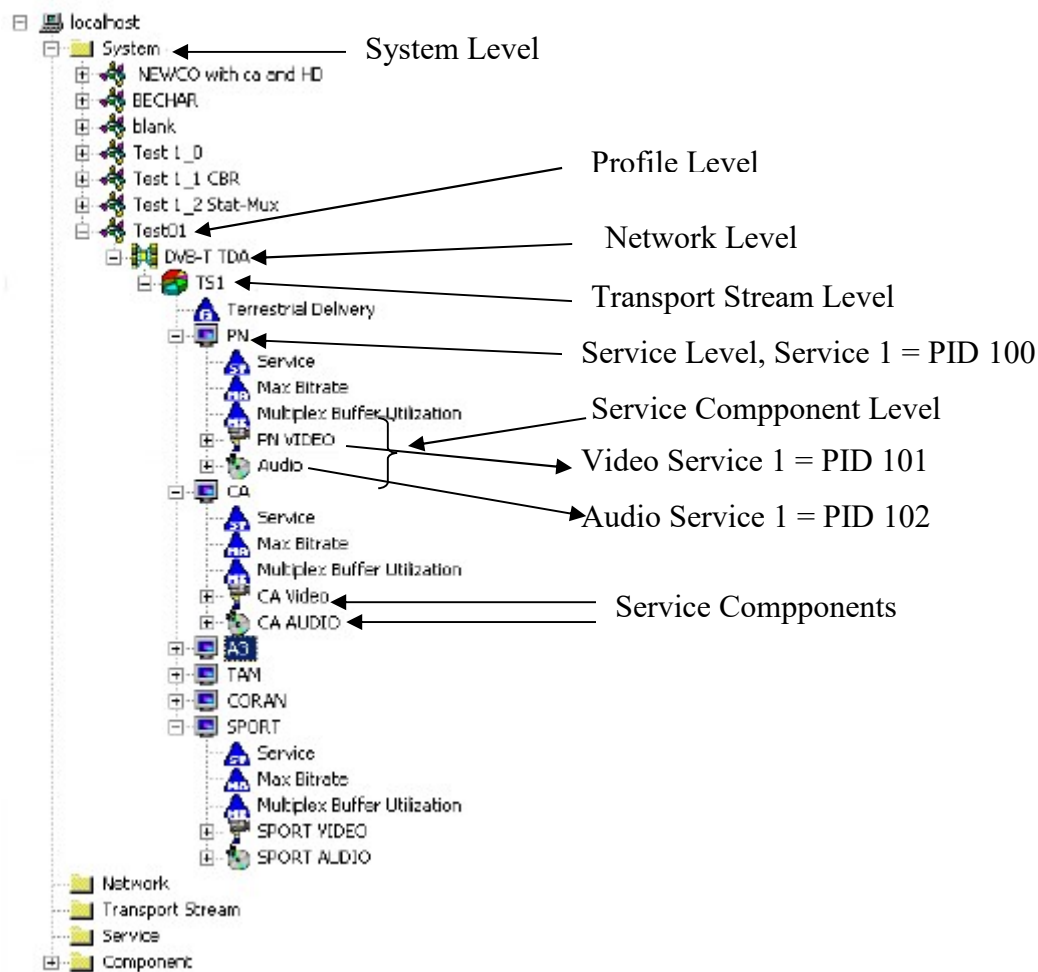


Figure 4.12 - Fenêtre d'accès au différents programmes

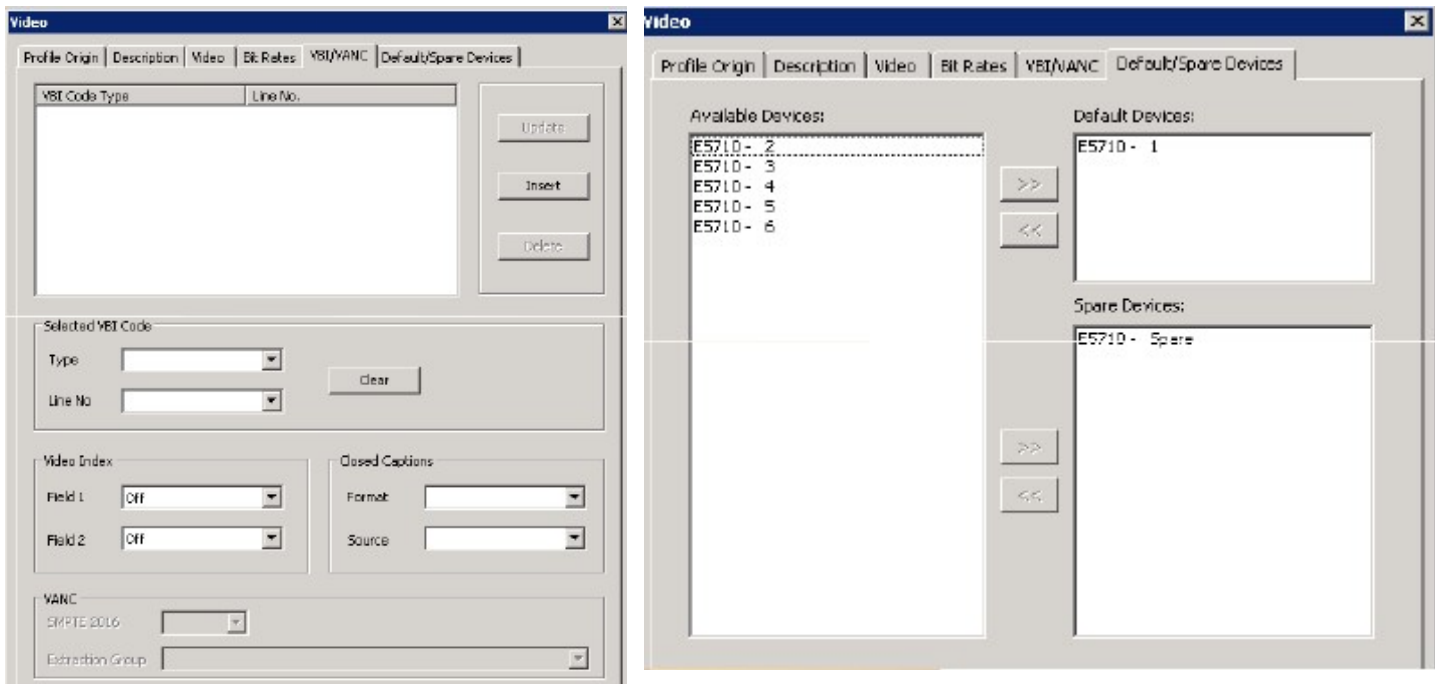


Figure 4.13 – Fenêtre pour les composantes vidéo

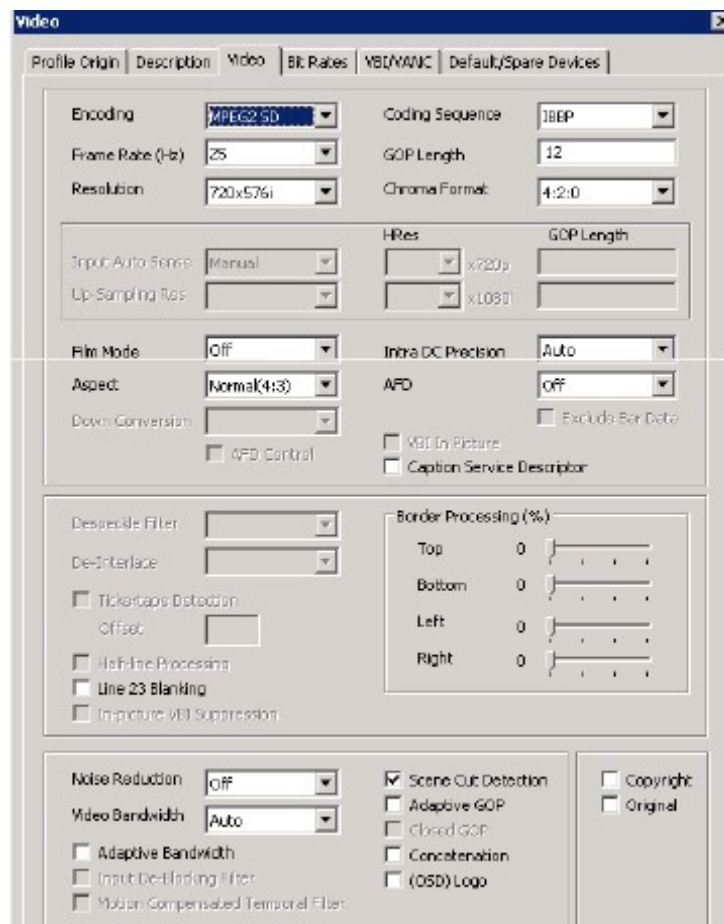
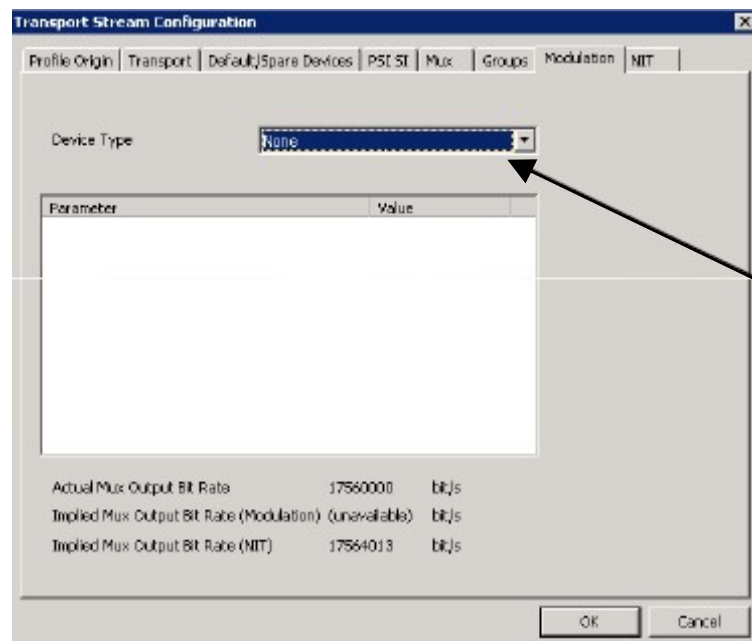
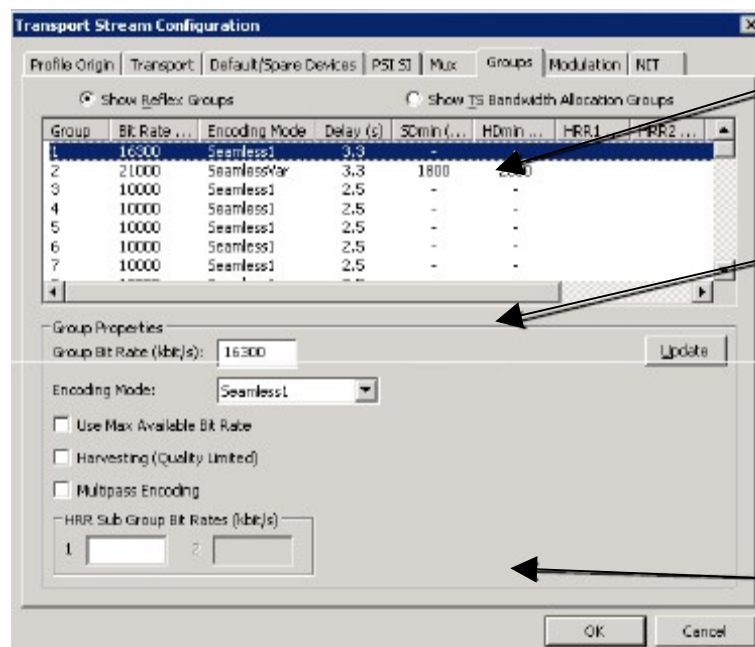


Figure 4.14 – Visualisation des paramètres de la vidéo



Choose modulator in our case choose « None »

Figure 4.15 – Fenêtre menu du modulateur



Choose Reflex Group

Assign Group bit rate and Encoding Mode

Press « Update » button

Figure 4.16 – Fenêtre d'addition d'autres programmes

IV.6 CONCLUSION

En conclusion, il est clair que la plateforme TNT de la TDA va représenter une première expérience de démarrage en Algérie avec une utilisation d'équipements de pointe comme les codeurs TANDBERG, les multiplexeurs TANDBERG ainsi qu'une grille multiple et où tout est géré par un logiciel spécifique et moderne appelé nCompass.

V.1 INTRODUCTION

La TNT consiste en la diffusion des programmes télévisés sous forme d'un signal numérique à partir d'émetteurs placés au sol (et non par satellite ou par câble). Elle entraînera à moyen terme l'abandon total de la diffusion en analogique au profit du numérique au vu des avantages indéniables offerts (qualité et robustesse du signal, mobilité, économie de spectre, augmentation de programmes, interactivité, nouveaux services HDTV, 3DTV et DVB-H).

Ce méga projet de réalisation de la TNT ne se fera pas d'un seul trait mais par phases bien distinctes.

Dans ce chapitre, nous étudierons en détails les différentes phases en question.

V.2 STRATEGIE DE DEVELOPPEMENT

Pour la réception de ces programmes, le téléspectateur a tout simplement besoin d'acquérir une antenne râteau et un décodeur (Set-top box).

Le déploiement du nouveau réseau de diffusion TV numérique terrestre (TNT) s'effectuera en trois phases et débutera en priorité sur les sites où les infrastructures sont disponibles (bâtiments, pylônes, énergie, etc..) et desservant des agglomérations importantes.

Il est utile de rappeler que l'Algérie a obtenu lors de la conférence régionale de planification de la TNT (Genève 2006), 6 à 8 multiplex par site, chaque multiplex (émetteur) pouvant diffuser au format standard (SD) 6 à 9 chaînes ou 3 chaînes HD TV selon la norme de compression (MPEG) choisie.

Le premier multiplex diffusé actuellement par TDA, se compose de 5 chaînes TV selon la norme MPEG-2 (Programme national, Canal Algérie, A3, Tamazight, Coran, plus un signal de test de TDA dans l'attente d'une sixième chaîne).

Tous les séminaires organisés par le Ministère de la Communication avec la participation des établissements (EPTV, EPRS, TDA) et l'Union Européenne de Radiodiffusion durant la période 2008 à 2009 ont noté entre autre, que pour assurer le plein succès de la TNT, il est nécessaire de remplir un certain nombre de conditions qui sont résumées comme suit :

- L'accès rapide et facile à la TNT pour tous les citoyens algériens est un facteur clé essentiel. Il convient de privilégier dans un premier temps comme facteur principal un coût d'équipement individuel attractif (Set-Top box), c'est-à-dire le moins élevé possible et cela avec le maintien de son téléviseur analogique. Et compte tenu du nombre de chaînes TV disponible, les experts de l'UER confirment que le meilleur choix possible est la norme DVB-T / MPEG-2 pour le premier multiplex.

- D'autre part, si le choix du premier multiplex aurait porté sur le MPEG-4, le téléspectateur marocain ne pourra pas recevoir nos programmes du fait que le Maroc diffuse en MPEG-2,

par contre le téléspectateur algérien pourra quant à lui suivre les programmes marocains en raison de la compatibilité du récepteur MPEG-4.

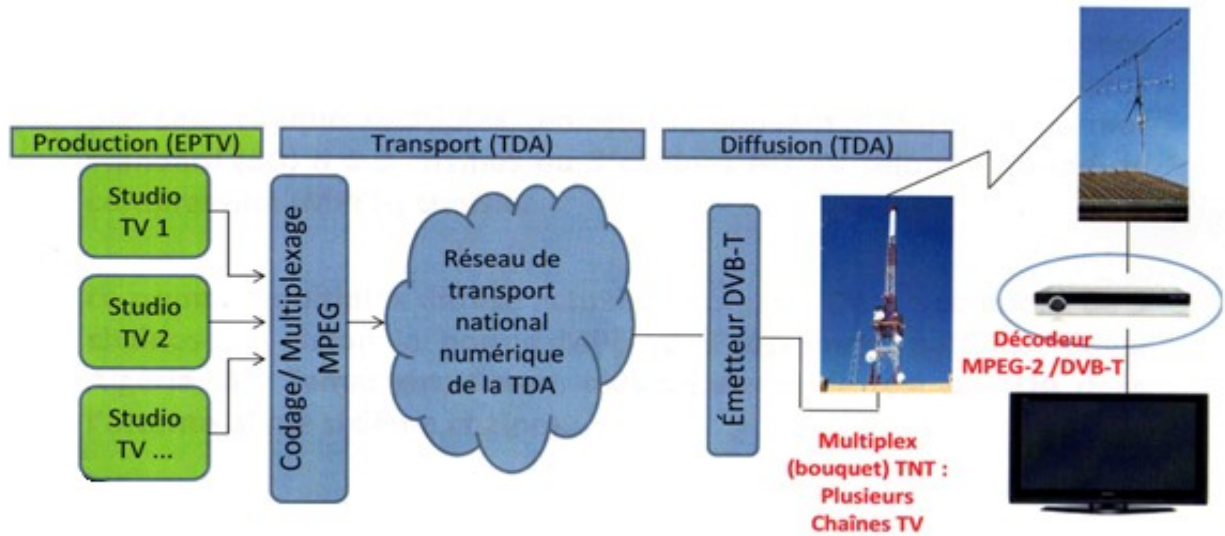


Figure 5.1 – Télévision et diffusion numérique terrestre de la TNT. Source [29]

V.2.1 LA PREMIERE PHASE DU DEPLOIEMENT DE LA TNT

Sept sites de diffusion : six ont été mis en service en juillet 2010. Le septième (Tipaza) a été mis en service à la fin du mois d'octobre 2010.

1. Pour la couverture de la région centre

- Chréa (Blida) : émetteur de 1,2 KW.
- Bordj-El-Bahri : émetteur de 1 KW.
- Bouzaréah : émetteur de 250 W.
- Akfadou (Bejaia) : émetteur de 2 KW.
- Chenoua (Tipaza) : émetteur de 100 KW.

2. Pour la couverture de la région Est

- Kef Lakhal (Constantine) : émetteur de 1,2 KW.

3. Pour la couverture de la région Ouest

- Tessala (Sidi-Bel-Abbès) : émetteur de 1,2 KW.

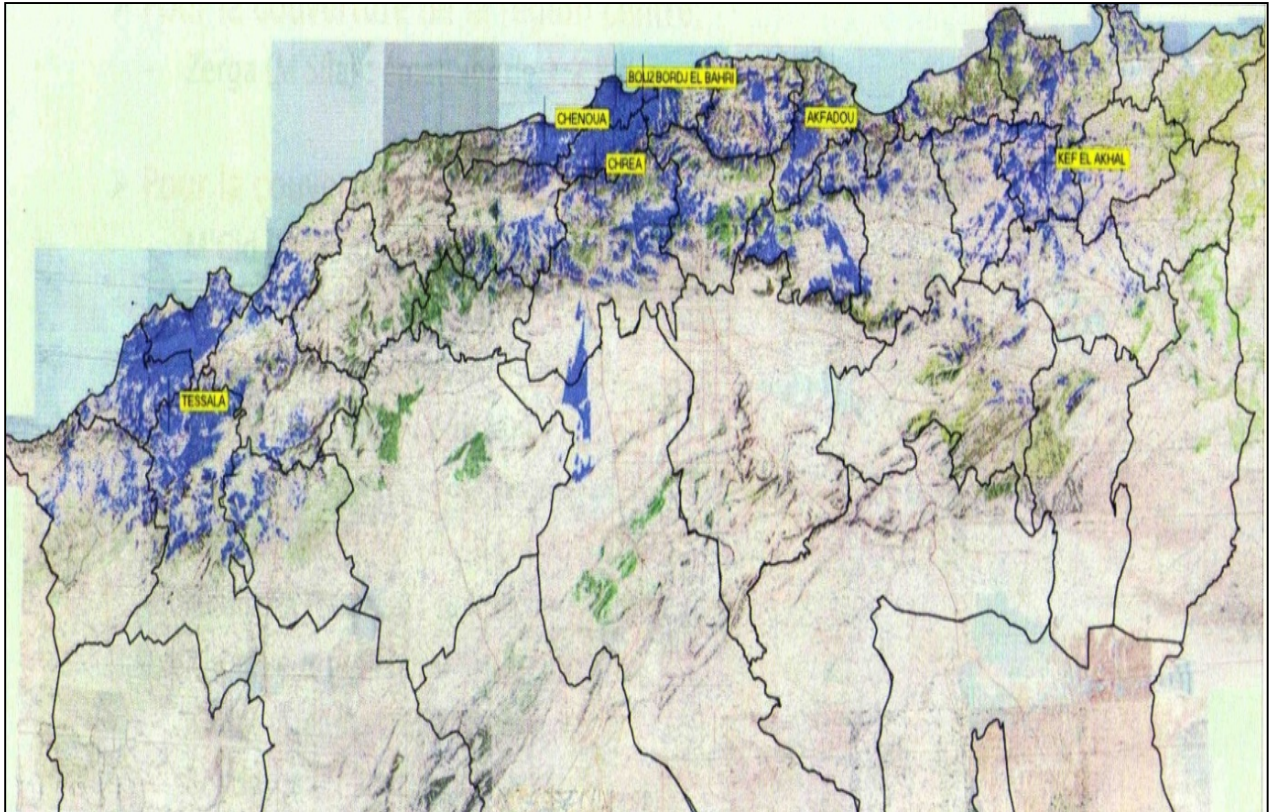


Figure 5.2 - Zone de couverture de la première phase du déploiement de la TNT (7stations).

Source [29]

V.2.2 LA DEUXIEME PHASE DU DEPLOIEMENT DE LA TNT

Neuf sites de diffusion retenus :

1. Pour la couverture de la région centre

- Zerga (M'Sila) : émetteur de 1,2 kw

2. Pour la couverture de la région Est

- M'Cid (Souk Ahras) : puissance 1,5 KW.
- Meghriss (Sétif) : puissance 1,5 KW.
- Filfila (Skikda) : puissance 1,2 KW.
- Mezghitane (Jijel) : puissance 1,2 KW.

3. Pour la couverture de la région Ouest

- Mecheria (Naama) : puissance 1,5 KW.
- Ain N'sour (Rélizane) : puissance 1,5 KW.
- Nador (Tlemcen) : puissance 1,5 KW.

- Bouderga (El Baydh) : puissance 1,2 KW.

Remarque

Les trois contrats d'acquisition des 9 stations sont notifiés. La mise en service est prévue pour la fin de l'année 2011.

V.2.2.1 Acquisition de 100 émetteurs et réémetteurs UHF de différentes puissances

Contrat signé par le fournisseur, il est en attente de visa de la commission nationale des marchés.

Ils sont destinés à résorber les zones d'ombre identifiées au niveau de la région Nord du pays.

La livraison de ses équipements est prévue au courant de l'année 2011. Leur installation s'effectuera par le personnel de TDA et s'étalera sur la période 2011 et 2012.

Pour assurer la continuité de service de diffusion de la TNT en cas de défection du réseau de transmission terrestre (faisceaux hertzien numérique), des équipements de codage et de multiplexage vidéo (MPEG) ont été acquis afin de réinjecter les programmes du multiplex disponibles sur le satellite. Ceci permettra aussi d'une part, d'augmenter la capacité en termes de canaux TV, et d'autre part, de donner plus de flexibilité dans la commutation des chaînes à émettre dans le cadre du décrochage (diffusion régionale).

Ces équipements acquis séparément, sont pour la plupart livrés et installés.

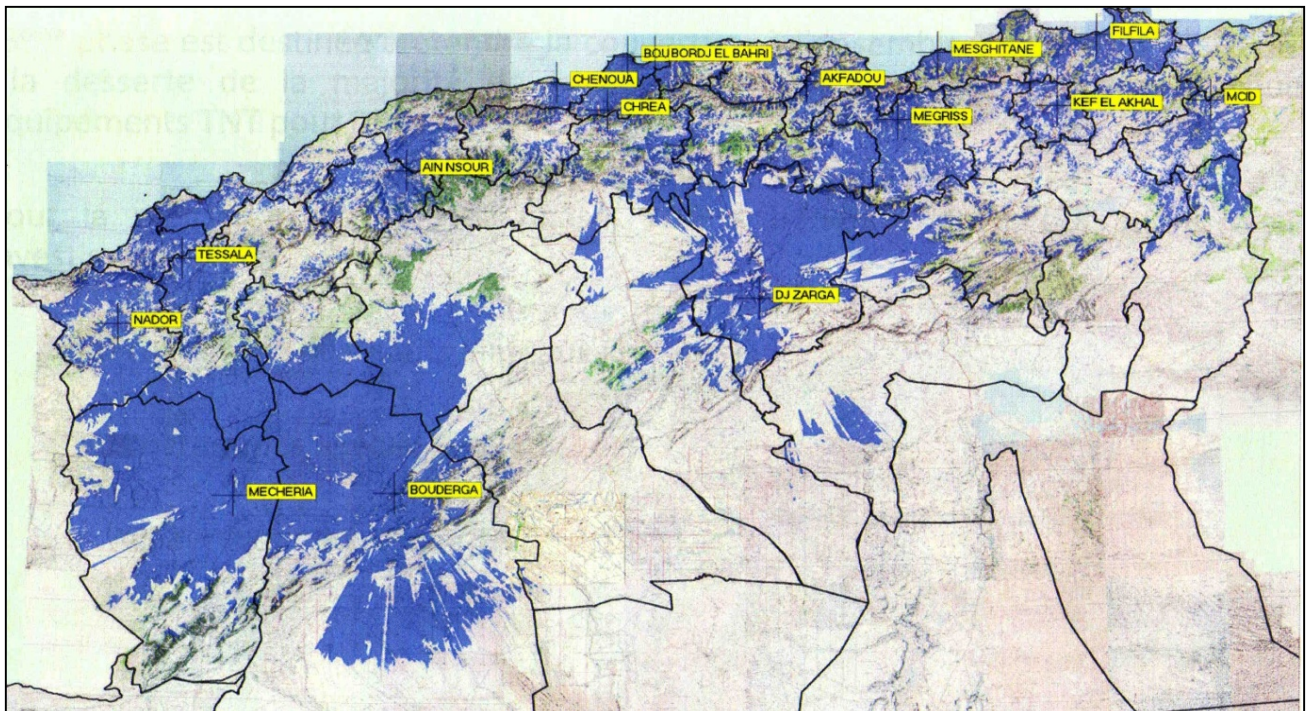


Figure 5.3 - Zones de couverture des deux premières phases du déploiement de la (TNT) (total de 16 stations). Source [29]

V.2.3 LA TROISIEME PHASE DU DEPLOIEMENT DE LA TNT

La troisième phase est destinée à atteindre la couverture à l'ensemble de la partie Nord du pays et la desserte de la majorité de la population du Sud. Elle concerne l'acquisition d'équipements TNT pour 93 sites.

Pour la réalisation de la troisième phase, TDA a bénéficié de trois opérations distinctes d'investissement :

- Programme de Hauts Plateaux (16 sites).
- Programmes Spécial Sud (18 sites).
- Achèvement du réseau TNT (59 sites).

Pour uniformiser les équipements et faire des économies d'échelle, un seul appel d'offres en trois lots distincts a été lancé pour l'acquisition des 93 stations.

- Lot 1 : 25 stations de puissances comprises entre 1,2 et 1,5 KW.
- Lot 2 : 68 stations dont 33 de 500 W, 30 de 200 W et 05 de 50 W de puissance.
- Lot 3 : Acquisition de 88 plateformes de multiplexage.

L'évaluation technique et financière des offres est en cours pour ce projet.

L'année 2011 sera consacrée à la fabrication et à la livraison des équipements.

L'installation et la mise en service des équipements s'étalera sur la période 2012-2013.

Remarque

A la fin de la réalisation de la troisième phase, le taux de couverture de la population est évalué à 85 %. Les actions prévues dans le programme 2010-2014 portera le taux de couverture à 95 %, les 5 % restants devront être couverts par l'utilisation du satellite à l'instar de ce qui se fait dans certains pays d'Europe.

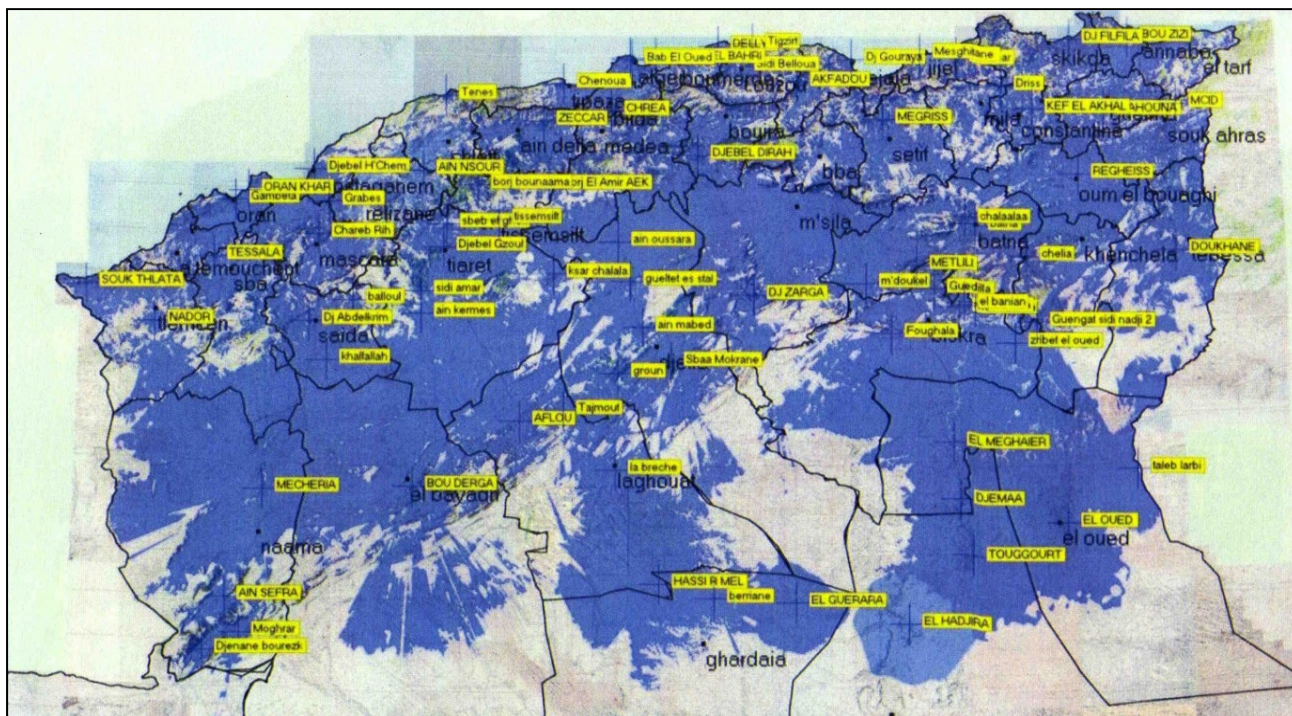


Figure 5.4 - Zones de couverture globale à la fin de la troisième phase de déploiement de la TNT pour le Nord du pays. Source [29]

Remarque

Un effort d'investissement devra être soutenu pour acquérir des réémetteurs supplémentaires pour étendre la couverture du premier multiplex (prévu dans le plan 2010-2014).

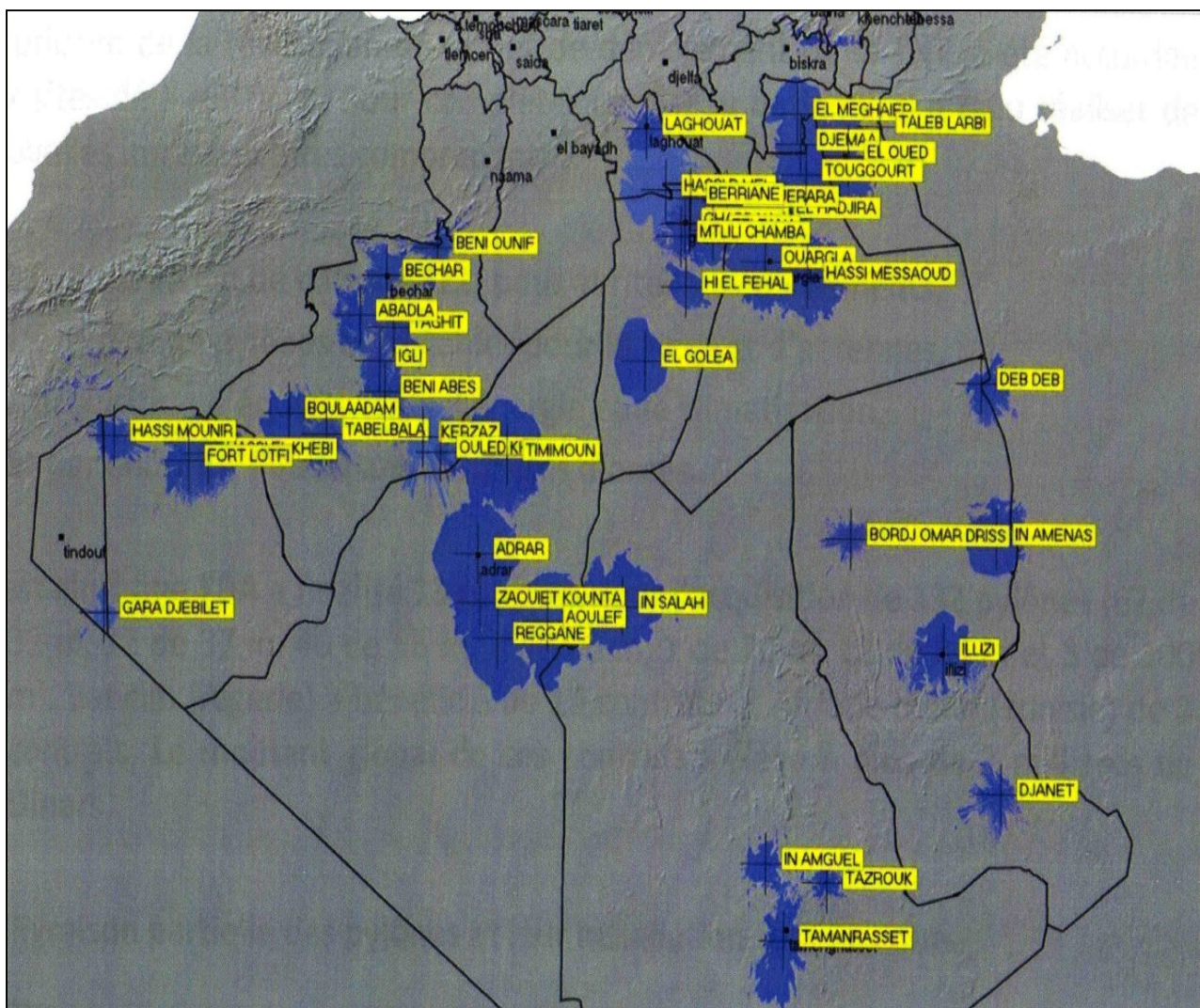


Figure 5.5 - Zones de couverture globale à la fin de la troisième phase du déploiement de la TNT pour le sud du pays. Source [29]

V.3 INFRASTRUCTURES ENVIRONNANTES ET EQUIPEMENTS AUXILIAIRES

La priorité de la réalisation du projet de déploiement de la TNT a été accordée aux sites déjà existants. Pour compléter ce réseau national, il a fallu réaliser de nouvelles infrastructures comprenant :

- La construction de bâtisses (22) pour abriter les équipements,
- L'érection de pylônes autostables pour le support d'antennes,
- L'acquisition d'équipements d'énergie et de climatisation,
- Et par endroits, l'ouverture de routes d'accès.

C'est ainsi que TDA a finalisé 13 contrats pour l'acquisition de 132 pylônes (62 de 32 m, 12 de 37 m, 40 de 56 m, 2 de 60 m, 1 de 70 m, 12 de 80 m et 3 de 100 m). Baticim

(Algérie) a bénéficié de 10 contrats et Afrique métal (Tunisie) de 3 contrats. Le montant global de ces contrats s'élève à plus de 2 milliards de Dinars.

La livraison partielle des pylônes et leur installation sont en cours.

V.4 RESEAU DE TRANSMISSION NUMERIQUE TERRESTRE PAR FAISCEAUX HERTZIENS DES CHAINES RADIO ET TV

V.4.1 Présentation du réseau de transmission par Faisceau Hertziens Numérique (FHN)

Pour l'acheminement des signaux audiovisuels vers les centres de diffusion TV et radio du Nord, la télédiffusion d'Algérie s'appuie sur un réseau de transmission par Faisceau Hertziens Numérique (FHN) en technologie PDH (première génération).

Ce réseau composé de 37 stations a été mis en service en 2000. Il est configuré pour :

- Alimenter les centres de diffusion.
- Assurer l'acheminement des programmes de contribution.
- Relayer les émissions de reportages vers le siège de l'EPTV à Alger.

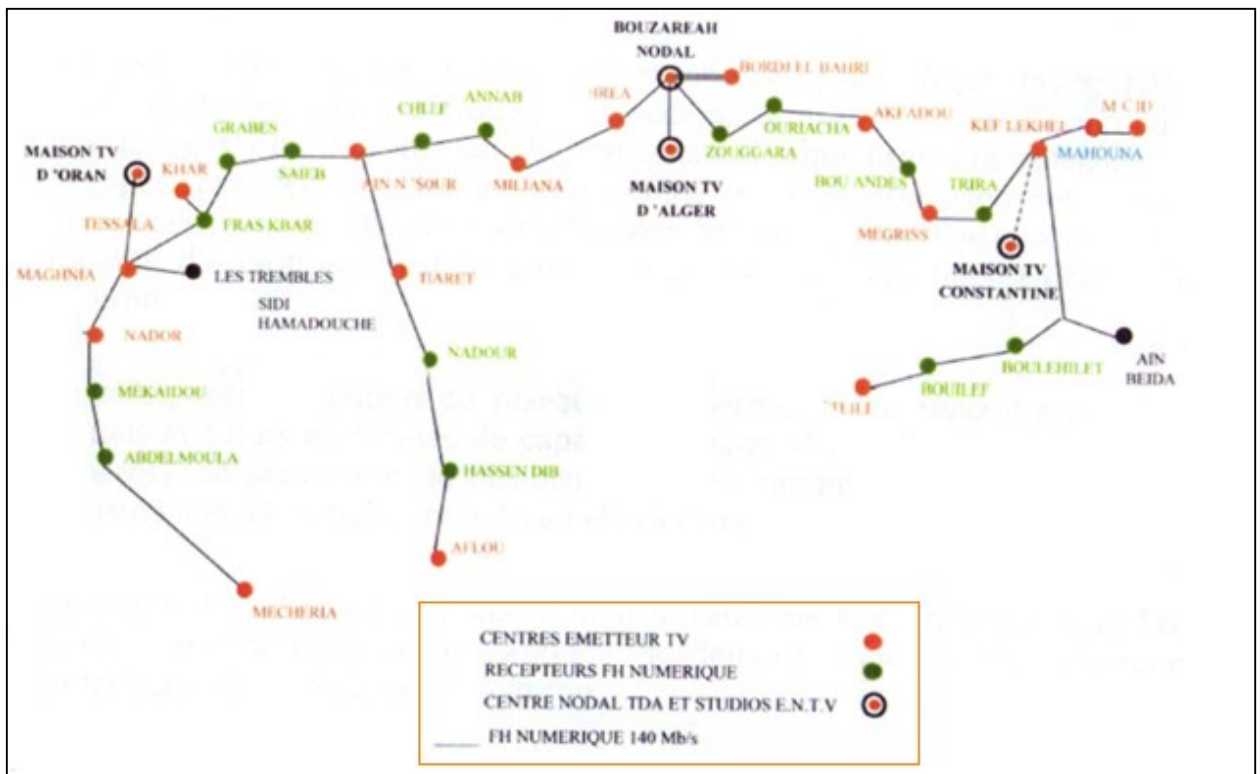


Figure 5.6 - Carte du réseau national de transmission par Faisceaux Hertziens Numérique (FHN) actuel en technologie PDH. Source [29]

V.4.2 Etude du futur réseau de transmission par Faisceaux Hertziens Numérique (FHN)

Les choix technologiques étant un élément stratégique déterminant, TDA a fait appel à un bureau d'étude pour l'accompagner dans l'élaboration du cahier des charges du futur réseau de transmission. Une première réflexion a été engagée par TDA et devait faire l'objet d'une consultation internationale. Cependant, au vu des derniers bouleversements technologiques et de leur rapidité d'évolution, il est plus que nécessaire de faire appel à une expertise externe.

En effet, cette évolution du réseau doit permettre de répondre aux besoins actuels et futurs en termes de capacité (chaînes TV, chaînes radio et nouveaux services), de sécurité et de flexibilité et ce en optant pour une technologie de transmission pérenne pour les 15 années à venir.

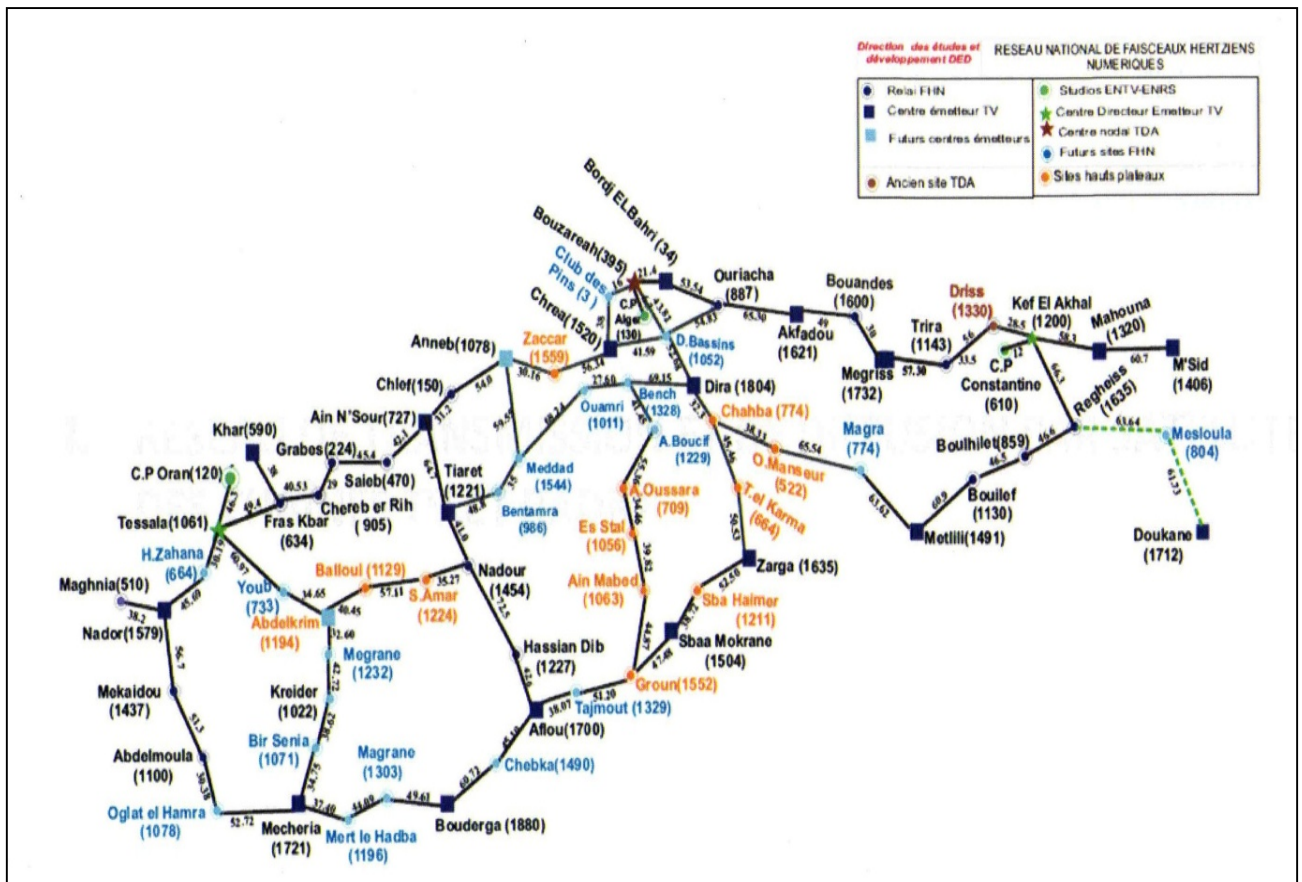


Figure 5.7 - Tracé projeté du futur réseau de transmission par Faisceau Hertiens Numériques (FHN) du Nord du pays. Source [29]

Remarque

L'objectif de cette opération est d'augmenter les capacités de transmission, et d'assurer une plus grande sécurisation du réseau à travers son maillage.

V.5 PREVISIONS

La portion du spectre des fréquences qui sera libérée par les radiodiffuseurs dans un avenir proche lors de l'arrêt de la diffusion analogique (suivant les échéances fixées par la conférence de l'IUT Genève 2006) est prévu pour 2015 pour l'Europe et 2020 pour l'Afrique et le Moyen-Orient et constituera ce qu'on appelle le DIVIDENCE NUMERIQUE. Cette portion du spectre est convoitée par les opérateurs de la téléphonie mobile afin d'assurer des services multimédia (son, image et data). Les radiodiffuseurs de leur côté, ne veulent pas perdre cette ressource qu'ils réservent pour l'introduction de nouveaux services tels que : la TVHD, TV3D, DVB-H...

Du fait du déploiement rapide de plateformes TVHD, l'Europe a avancé la date d'arrêt de la diffusion analogique pour 2011 et 2012. La conséquence de cette décision, est que l'Etat Algérien se doit de réagir à l'importation et la production des récepteurs TV analogiques, afin que notre marché ne soit pas submergé par des récepteurs TV analogiques bon marché. Ainsi, le basculement vers le tout numérique doit être accompagné par des mesures de l'Etat aussi bien en direction des citoyens que de la filière électronique grand public.

Le comité national de stratégie numérique présidé par Monsieur le Ministre de la Communication, devrait être réactivé avec la redynamisation des travaux des quatre commissions suivantes :

- Commission normes et standards
- Commission des relations avec l'industrie, les finances et le commerce
- Commission du contenu
- Commission du dividende numérique

L'objectif est de :

Etablir un calendrier de mise en œuvre précis des premières étapes de l'introduction de la TNT.

Réfléchir sur les perspectives d'extinction de la TV analogique, étape indispensable pour que l'économie générale du pays puisse tirer pleinement parti du dividende numérique dans les années à venir.

Préparer la migration vers la TVHD. D'après l'expérience des organismes membres de l'UER, le lancement d'une future chaîne TVHD, nécessitera une période de production audiovisuelle d'au moins cinq ans. Cette production peut être diffusée parallèlement dans un premier temps en format standard SD actuel.

De plus l'introduction de la TVHD, nécessitera l'utilisation d'un deuxième réseau national d'émission intégrant la technologie MPEG-4 où toute autre norme plus évoluée associée à la norme de diffusion DVB-T2.

Et tout autre sujet lié à cette stratégie numérique.

Il est proposé :

- Une meilleure coordination entre l'EPTV et TDA pour les projets d'investissement et sur les normes d'exploitation.
- Une redynamisation des groupes de coordination technique pour les choix technologiques.
- La tenue d'une réunion sur le redéploiement satellitaire pour les cinq prochaines années à venir.

V.6 CONCLUSION

Dans un avenir très proche, la diffusion en analogique des chaînes de télévision connaîtra une extinction complète (Switch off) pour donner place à un passage progressif à la TNT qui devrait à son tour faire l'objet d'une campagne de promotion C'est à elle que revient le rôle de présenter la nécessité du déploiement de la TNT dans chaque région puisqu'il s'agit là de la principale technologie de remplacement de l'analogique.

L'avènement de la TNT apportera sûrement un confort inégalé. Il faut cependant espérer que l'introduction de la TNT n'amène pas seulement plus de programmes mais aussi une plus grande qualité de réception en haute définition par exemple.

En effet, à terme, même si près de 95 % de la population sera en mesure de recevoir la TNT via les émetteurs terrestres avec la probabilité pour les 5 % restants d'utiliser un autre mode de réception via le satellite, il faut que les installations chez chaque usager aussi bien en habitat individuel que collectif répondent aux normes et assurent en même temps la qualité d'image et de son tant attendus par le téléspectateur.

IV.1 INTRODUCTION

Le nouveau bouquet TNT de la TDA implanté à la tête du réseau distribué vers le satellite et le réseau terrestre nécessite une plateforme adéquate dont la description est traitée dans ce chapitre.

IV.2 RESEAU DE TRANSMISSION ET DE DIFFUSION NUMERIQUE DE LA TDA

Le réseau de transmission et de diffusion de la TDA est un réseau en PDH qui sert pour la transmission et la diffusion terrestre des programmes TV et radio sur le territoire national nord constitué de plusieurs centres de transmission et de diffusion.

Liste des figures

Figure 1.1 - Numérisation d'un signal analogique. Source [9].....	5
Figure 1.2 - Illustration de la phase d'échantillonnage d'un signal analogique. Source [11].....	6
Figure 1.3 - Propriétés temporelles et fréquentielles du signal à numériser. Source [11].....	7
Figure 1.4 - Repliement de spectre avec un échantillonnage ne respectant pas le théorème de Shannon. Source [11].....	8
Figure 1.5 - (a) Fonction de transfert idéal d'un CAN 3 bit, (b) Erreur de quantification. Source [11].....	9
Figure 1.6 - Les trois dimensions du signal vidéo. Source [10].....	12
Figure 1.7 - Les différents méthodes d'échantillonnage de la luminance et de la chrominance. Source [18].....	14
Figure 1.8 - Différents formats utilisés en vidéo numérique. Source [15].....	15
Figure 1.9 - Synoptique fonctionnel du JPEG (basé DCT). Source [10].....	20
Figure 1.10 - Transformation du bloc de 8×8 pixels en matrice de 8×8 coefficients. Source [2].....	22
Figure 1.11 - Résultat du processus seuillage + quantification. Source [2].....	22
Figure 1.12 - Lecture de la matrice en zigzag. Source [2].....	23
Figure 1.13 - Groupe d'image (GOP), I B et P dans le cadre de MPEG après réorganisation [15].....	24
Figure 1.14 - Synoptique fonctionnel de MPEG 1. Source [10].....	26
Figure 1.15 - Synoptique fonctionnel de MPEG 2. Source [10].....	26
Figure 1.16 - Division de la bande audiofréquence en 32 sous-bandes. Source [10].....	30
Figure 2.1 - Représentation des signaux modulés par un signal numérique. Source [10].....	37
Figure 2.2 - Diagramme des constellations et des transitions en MDP 2. Source [10].....	40
Figure 2.3 - Diagramme des constellations et des transitions en MDP 4. Source [10].....	41
Figure 2.4 - Modulateur MDP 4 (modulation de phase). Source [10].....	42
Figure 2.5 - Diagramme des constellations en double MAPS en quadrature. Source [10].....	43
Figure 2.6 - Diagramme des constellations en MAQ 16. Source [10].....	44
Figure 2.7 - Modulateur MAQ 16 (double MAPS en quadrature). Source [10].....	45

Figure 2.8 - I-Q Diagrams. Source [10].....	46
Figure 3.1 - Chaîne d'émission avec introduction du DVB. Source [10].....	52
Figure 3.2 - Chaîne de réception avec introduction du DVB. Source [10].....	53
Figure 3.3 - Synoptique général de l'organisation des données. Source [10].....	57
Figure 3.4 – Synoptique de la chaîne de codage / décodage. Source [10].....	60
Figure 3.5 - Principe du brassage. Source [20].....	61
Figure 3.6 - Principe de brassage en DVB. Source [25].....	61
Figure 3.7 - Structure des trames aux différentes étapes du codage. Source [20].....	63
Figure 3.8 - Codeur convolutif : $L = 3, k = 1, n = 2, r = 1/2$. Source [20].....	65
Figure 3.9 - Exemple d'écho. Source [24].....	67
Figure 3.10 - Réponse impulsionnelle du canal. Source [10].....	71
Figure 3.11 - Fonction de transfert du canal [10].....	72
Figure 3.12 (a) - Echos courts. Source [10].....	73
Figure 3.12 (b) - Echos moyens. Source [10].....	73
Figure 3.12 (c) - Echos longs. Source [10].....	73
Figure 2.12 - Les différents types d'échos. Source [10].....	73
Figure 3.13 - Modèle à deux trajets espacés de τ . Source [10].....	74
Figure 3.14 - Schéma de principe d'un modulateur OFDM. Source [19].....	76
Figure 3.15 - Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM, décomposé sur chaque porteuse. Source [19].....	76
Figure 3.16 - Intervalle de garde. Source [19].....	77
Figure 3.17 - Répartition du signal DVB-T sur les ondes sous porteuses. Source [21].....	79
Figure 3.18 - Synoptique de la chaîne d'émission DVB –T. source [10].....	82
Figure 3.19 - La notion de cellule – les configurations SFN et MFN. Source [28].....	86
Figure 4.1 - Schéma synoptique du réseau de la TDA. Source [29].....	90
Figure 4.2 – Baie de la plateforme TNT.....	92
Figure 4.3 - Schéma d'implantation de la plateforme TNT (5 + 1).....	93
Figure 4.4 – Modulateur et interconnexion.....	94

Figure 4.5 - Codeur E 5710.....	96
Figure 4.6 – Grille de commutation.....	96
Figure 4.7 – Multiplexeur TNT MX 8400 (représentation des slots).....	97
Figure 4.8 - DEV 1951.....	98
Figure 4.9 - Densité 2.....	98
Figure 4.10 – PC.....	99
Figure 4.11 – Kalaedo.....	99
Figure 4.12 – Fenêtre d'accès au différents programmes.....	100
Figure 4.13 - Fenêtre pour les composantes vidéo.....	101
Figure 4.14 - Visualisation des paramètres de la vidéo.....	101
Figure 4.15 – Fenêtre menu du modulateur.....	102
Figure 4.16 - Fenêtre d'addition d'autres programmes.....	102
Figure 5.1 – Transmission et diffusion DVB-T de la TDA. Source [29].....	106
Figure 5.2 - Zone de couverture de la première phase du déploiement de la TNT (7stations). Source [29].....	107
Figure 5.3 - Zones de couverture des deux premières phases du déploiement de la (TNT) (total de 16 stations). Source [29].....	108
Figure 5.4 - Zones de couverture globale à la fin de la troisième phase de déploiement de la TNT pour le Nord du pays. Source [29].....	110
Figure 5.5 - Zones de couverture globale à la fin de la troisième phase du déploiement de la TNT pour le sud du pays. Source [29].....	111
Figure 5.6 - Carte du réseau national de transmission par Faisceaux Hertziens Numérique (FHN) actuel en technologie PDH. Source [29].....	112
Figure 5.7 - Tracé projeté du futur réseau de transmission par Faisceau Hertziens Numériques (FHN) du Nord du pays. Source [29].....	113

Liste des tableaux

Tableau 1.1 - Débit binaire du signal vidéo correspond à chaque format de numérisation. Source [10].....	16
Tableau 1.2 - Débit binaire du signal audio correspond à chaque fréquence d'échantillonnage. Source [10].....	18
Tableau 1.3 - Les quatre résolutions disponibles en MPEG-2. Source [10].....	27
Tableau 1.4 - Option permise par la norme MPEG-2. Source [10].....	28
Tableau 2.1 - Tables des états de MDP 2. Source [10].....	40
Tableau 2.2 - Tables des états de MDP 4. Source [10].....	41
Tableau 2.3 - Paramètres des différentes modulations. Source [10].....	48
Tableau 3.1 - Ordre de grandeur de taux d'erreur en transmission numérique. Source [10].....	64
Tableau 3.2 - Durée symbole en fonction de l'intervalle de garde. Source [10].....	83
Tableau 3.3 - Débits utiles en fonction du type de modulation, du rapport (Δ/T_u) et du rendement du code convolutif (r). Source [10].....	84

CONCLUSION GENERALE

Pour conclure, il y a lieu de souligner tout l'intérêt porté à ce type de projet d'une part, pour une question d'approfondissement des connaissances personnelles et d'autre part, pour la mise en valeur des différents objectifs qui pourraient en découler suite à la concrétisation de sa mise en place sur le terrain.

Ce travail m'a permis également d'avoir une vision globale sur ce que sera demain notre réseau de transmission et de diffusion numérique terrestre de la télévision destiné à prendre le relais une fois l'extinction définitive de la transmission analogique prononcée.

A ce titre, dans le but de porter à la connaissance de la population les caractéristiques principales de la TNT et de la sensibiliser au mieux sur les moyens à acquérir de façon à lui garantir demain une réception de qualité supérieure et acceptable, il est plus que nécessaire de faire dans un premier temps la promotion de ce nouveau vecteur de diffusion.

Associée à un taux de couverture satisfaisant, cette procédure contribuera certainement à assurer sa pleine réussite et en même temps à fidéliser le maximum de téléspectateurs.

La généralisation de cette technologie aura sûrement un impact socio-économique qui se traduira par un certain comportement du citoyen à savoir :

- Familiarisation avec le tout numérique
- Coût d'investissement moins élevé.

Par ailleurs, pour répondre aux multiples et diverses attentes du téléspectateur et garantir aussi le succès de la TNT, il y a lieu de concevoir de nouveaux programmes beaucoup plus riches pour combler certains manques de manière à pouvoir réduire dans une certaine mesure cette dépendance particulière vis-à-vis des chaînes étrangères.

Ainsi, l'Algérie ne manquera pas de se distinguer et de compter parmi les premiers pays à réaliser un tel projet et ce dans un grand nombre de régions du monde et tout particulièrement sur le continent africain.

Avec cette initiative, les autorités algériennes pourront toutes fois réaliser un autre objectif qui consistera si le besoin s'exprime à éradiquer les milliers de paraboles qui ne font que défigurer chaque jour un peu plus le paysage et plus précisément les immeubles et les maisons aussi bien dans les villes que dans les villages du pays.