



La télévision numérique terrestre





Sommaire

- 1- La télévision numérique terrestre dans le monde
- 2- Recevoir la télévision numérique
- 3- Pourquoi la TNT ?
- 4- Les canaux de la TNT
- 5- Exemples de récepteurs
- 6- Installation de réception
- 7- Les antennes
- 8- Branchement d'un adaptateur
- 9- Les testeurs
- 10- L'occupation du canal
- 11- Structure de l'émetteur TNT
- 12- Les paquets de données
- 13- Composition du multiplex
- 14- La caméra de télévision
- 15- Les signaux de luminance et de chrominance
- 16- Le signal vidéo numérique
- 17- Nécessité de la compression de débit
- 18- Réduction du débit par codage MPEG2
- 19- Les débits numériques en TNT
- 20- Exemple de mesures sur un signal TNT
- 21- Protection des données
- 22- La modulation OFDM
- 23- Spectre du signal modulé OFDM
- 24- Spectre OFDM théorique
- 25- Spectre OFDM réel
- 26- Rapidité de modulation
- 27- Modulation 64-QAM d'une porteuse
- 28- Allure temporelle d'une porteuse modulée
- 29- Exemple de symbole transmis

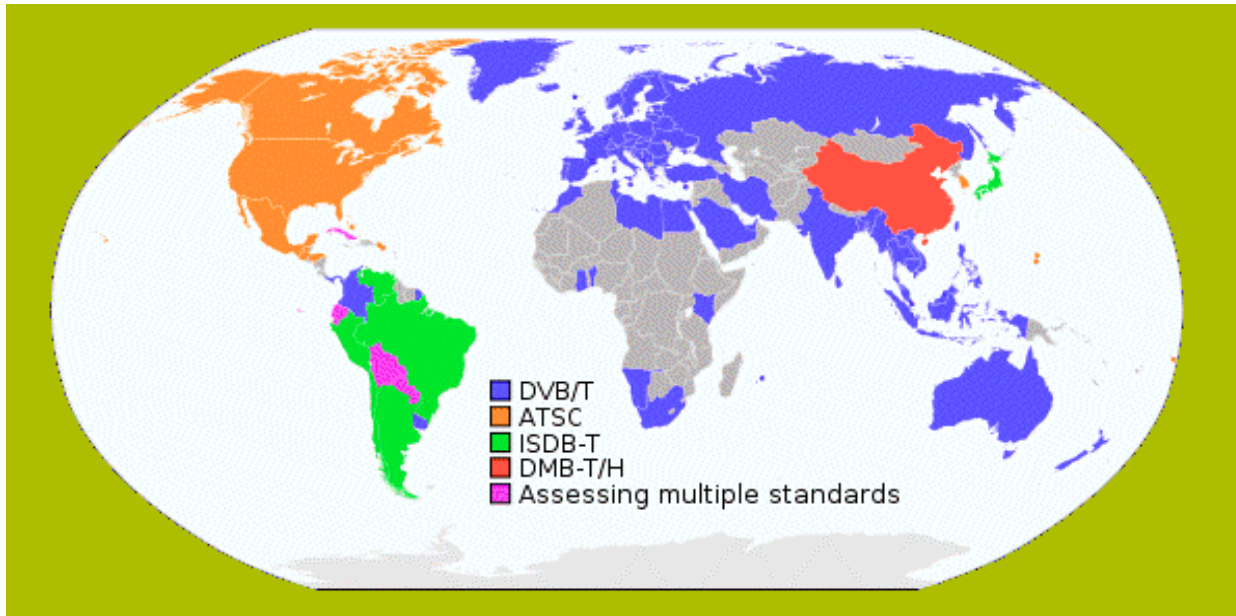
- 30- Constellation des états (bonne réception)
- 31- Constellation des états (mauvaise réception)
- 32- Mesure de la qualité de modulation
- 33- Vision globale du signal OFDM émis
- 34- Problème des trajets multiples
- 35- Les irrégularités de niveau reçu
- 36- Les interférences inter-symboles
- 37- Exemple de relevé d'échos
- 38- Structure d'un adaptateur TNT
- 39- Intérieur d'un adaptateur TNT
- 40- Intérieur d'un adaptateur TNT-USB
- 41- Les mesures sur le signal TNT
- 42- Mesure de la qualité de réception
- 43- Critères de qualité en réception TNT





1- La télévision numérique terrestre dans le monde

Le DVB-T* ou TNT est une norme de télévision numérique utilisée dans de nombreux pays. Elle est appelée « terrestre » parce que ses émetteurs sont installés au sol.



Exceptions notables : USA/Canada (norme ATSC), Japon (ISDB-T) et Chine (DMB-T)

* DVB = Digital Video Broadcasting = diffusion vidéo numérique



2- Recevoir la télévision numérique

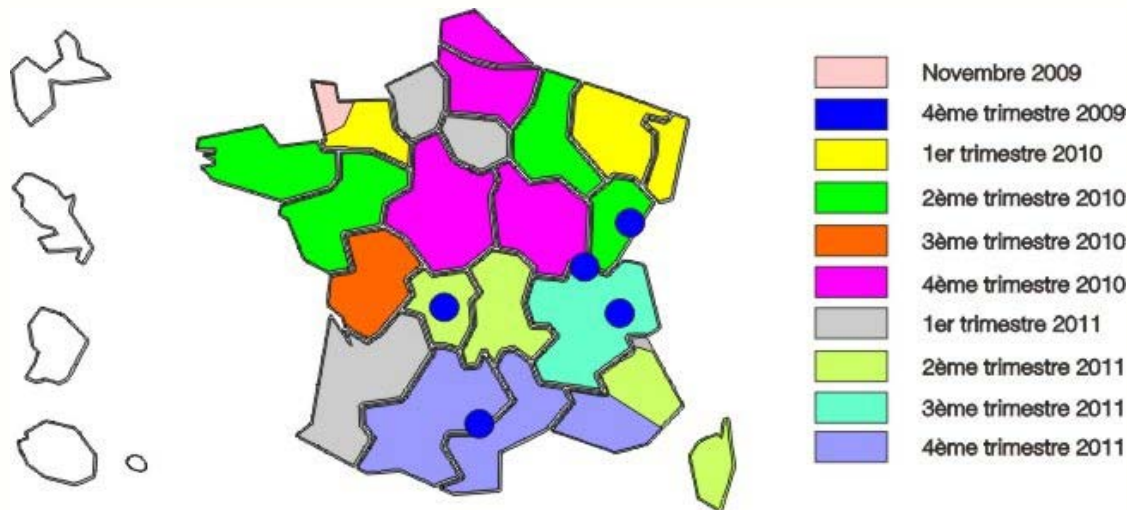


Historiquement, la télévision numérique a d'abord été diffusée par le satellite (norme DVB-S) et le câble (norme DVB-C) avant de l'être par voie hertzienne terrestre (norme DVB-T). Elle est aussi disponible en France par la ligne téléphonique (ADSL).

3- Pourquoi la télévision numérique terrestre ?

La télévision numérique offre de multiples avantages :

- un plus grand nombre de chaînes : jusqu'à 18 chaînes gratuites au lieu de 6
- et donc un choix de programmes plus large
- des chaînes en haute définition (HD)
- un guide des programmes intégré pour connaître le programme en cours et le suivant
- une meilleure qualité d'image et de son : image DVD, son numérique stéréo ou home cinéma



Le passage à la télé tout numérique s'est déroulé région par région, entre début 2009 et fin 2011.



4- Les canaux de la TNT

Les émissions de la TNT se font pour l'essentiel dans la bande UHF qui va de 470 à 860 MHz.

Cette bande a été divisée en canaux de largeur 8 MHz pour la TV analogique, numérotés de 21 à 69. La TNT a repris les mêmes canaux.

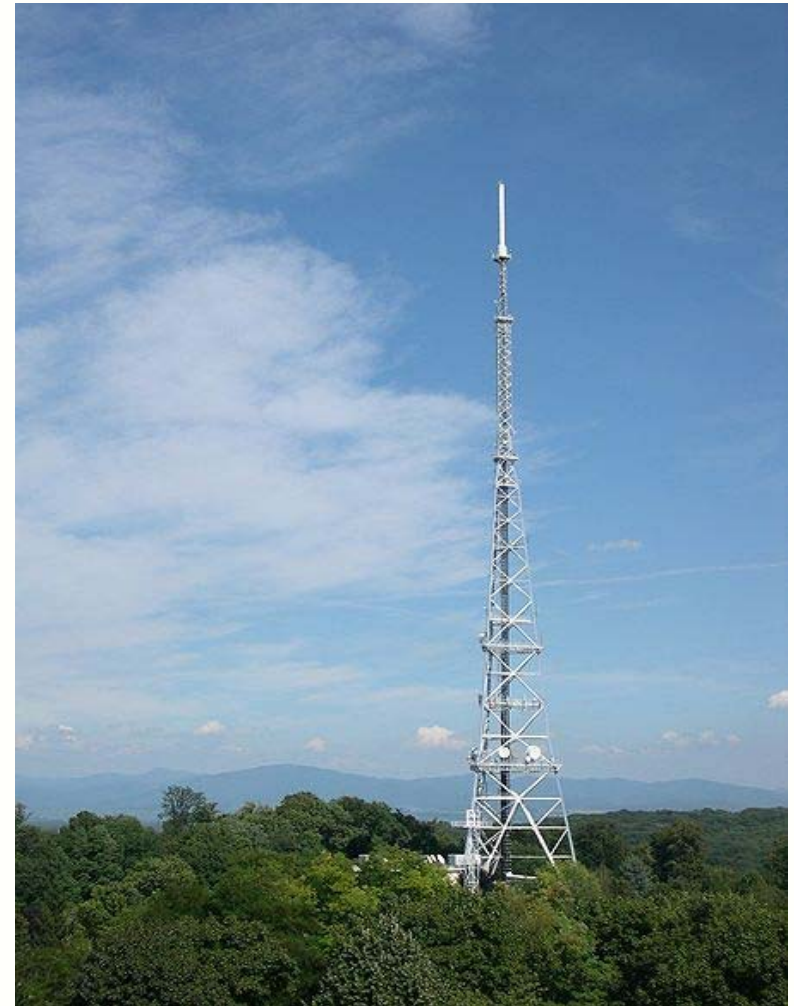
Formule de calcul de la fréquence :

$$F_{\text{MHz}} = 306 + 8 \times \text{numéro du canal}$$

Exemple : le canal 21 correspond à une fréquence $F = 306 + 21 \times 8 = 474 \text{ MHz}$ soit $\lambda = 63 \text{ cm}$

NB : il convient d'ajouter parfois un décalage (shift) de + 166 kHz destiné à éviter les perturbations dans le canal voisin analogique

⇒ canal 21 TNT = 474,166 MHz



Émetteur TNT du Belvédère - Mulhouse



5- Exemples de récepteurs

Adaptateur de salon



Tuner « clé USB »



Récepteur complet



Adaptateur « PériTel »



6- Installation de réception

La TNT se reçoit avec :

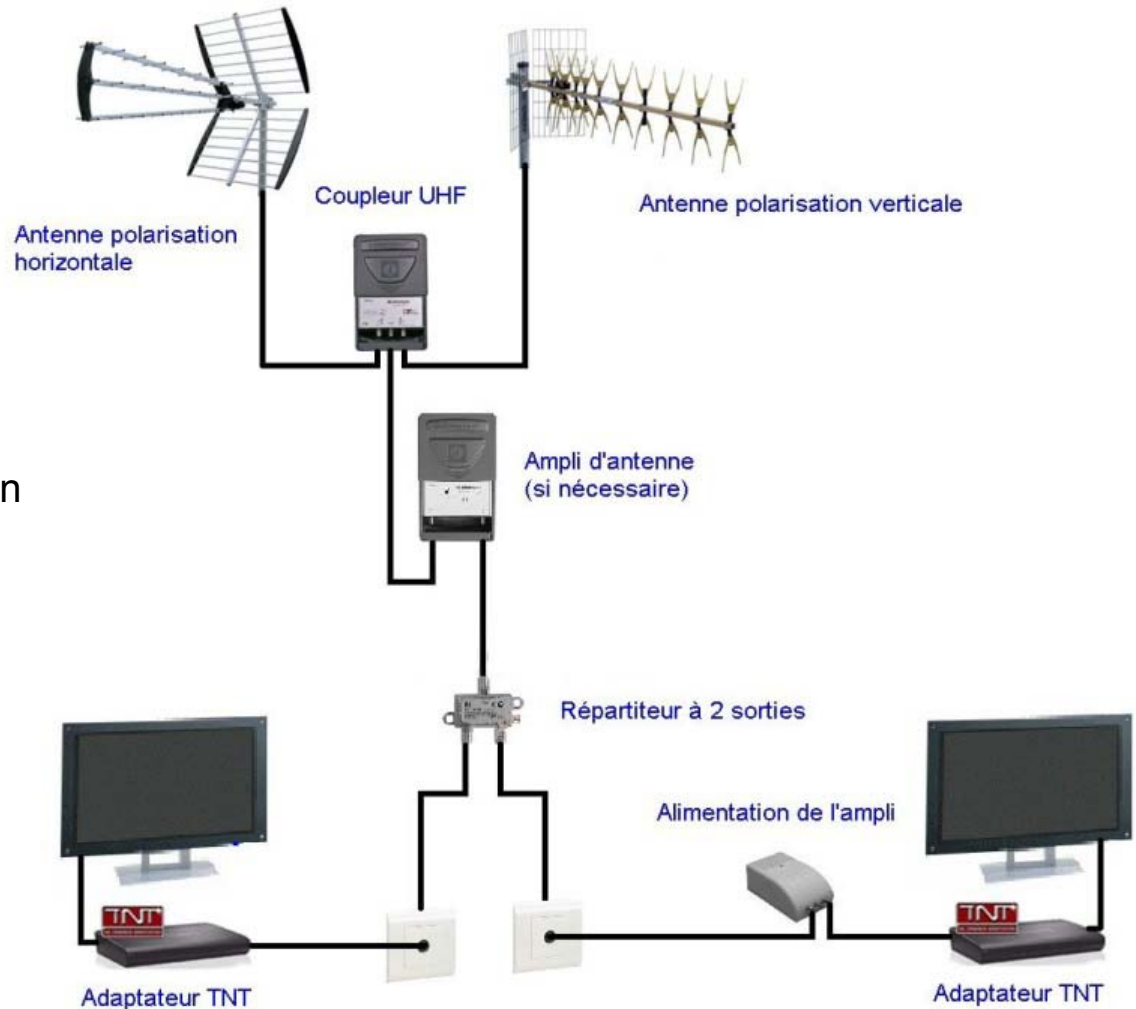
- une antenne « râteau »
- une antenne d'intérieur

L'antenne doit être montée en respectant la **polarisation** :

- **horizontale** presque partout en France et en Allemagne
- **verticale** en Suisse

Il faut aussi :

- un adaptateur TNT ou
- un téléviseur équipé d'un décodeur TNT





7- Les antennes



Antenne passive Yagi

- impédance 75 Ω
- canaux : 21 à 69 (470-862 MHz)
- triple Boom
- réflecteur dièdre
- gain : 17,5 dB



Antenne active

- intérieur / extérieur
- gammes de fréquence :
170 - 240 et 460 - 860 MHz
- gain 20 dB

Antenne passive

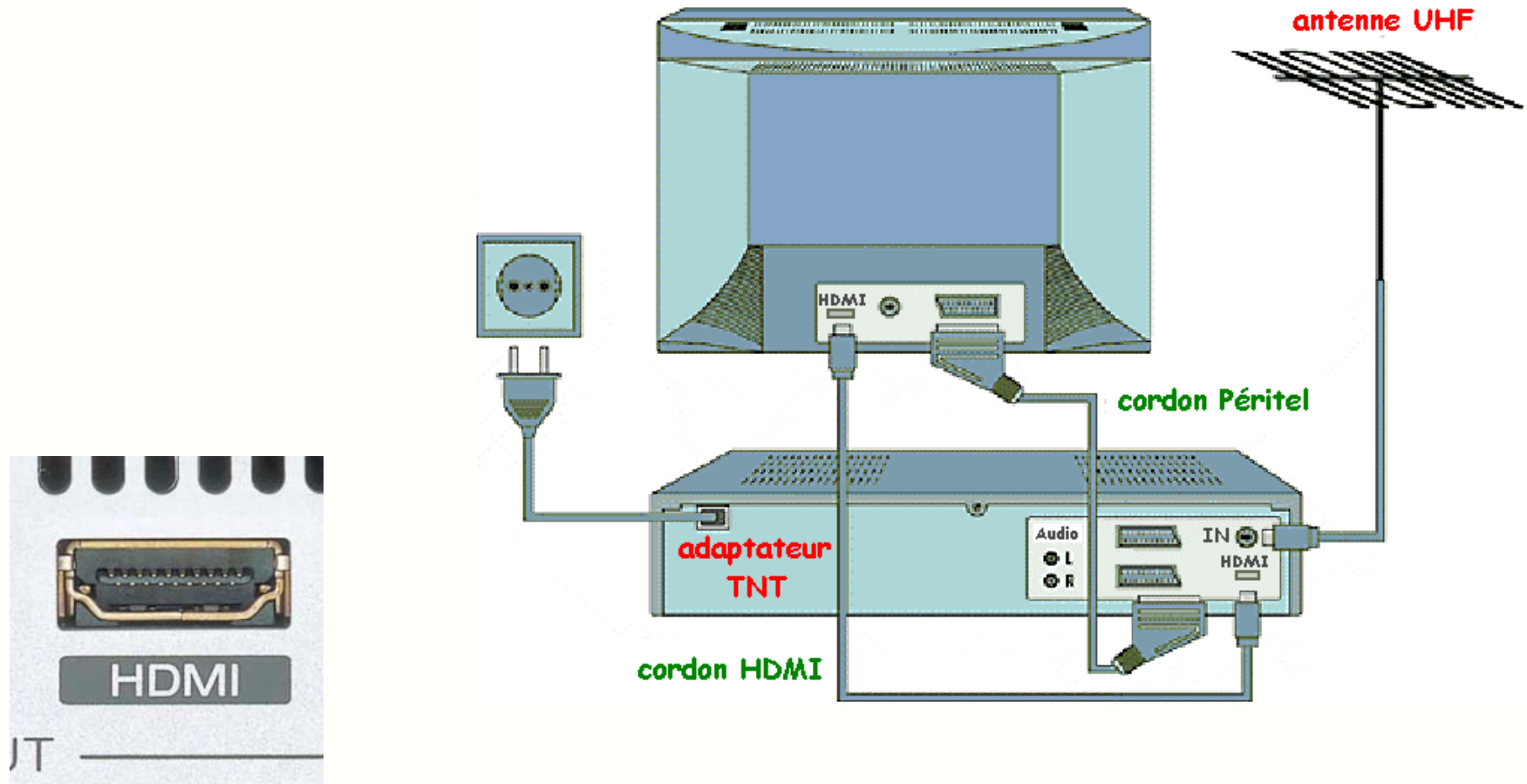
- intérieur / extérieur
- gamme de fréquence :
460 - 860 MHz
- gain 2 dB



Remarque : le choix de l'antenne se fait en fonction de l'intensité du signal au lieu de réception (niveau minimal en sortie d'antenne pour une bonne réception : **50 μ V**)



8- Branchement d'un adaptateur



Le plus souvent, l'adaptateur TNT est relié à l'antenne UHF et au téléviseur par un cordon Périitel (ou HDMI si le téléviseur en est équipé).



9- Les testeurs

En réception TV, les tests et mesures se font à l'aide d'un **mesureur de champ** qui, grâce à ses nombreuses fonctions, est devenu un outil indispensable :

« voltmètre » :

pour mesurer le niveau reçu par l'antenne, le rapport Porteuse/Bruit...

« analyseur de spectre » :

pour visualiser la bande UHF, le signal reçu, les signaux parasites...

« démodulateur » :

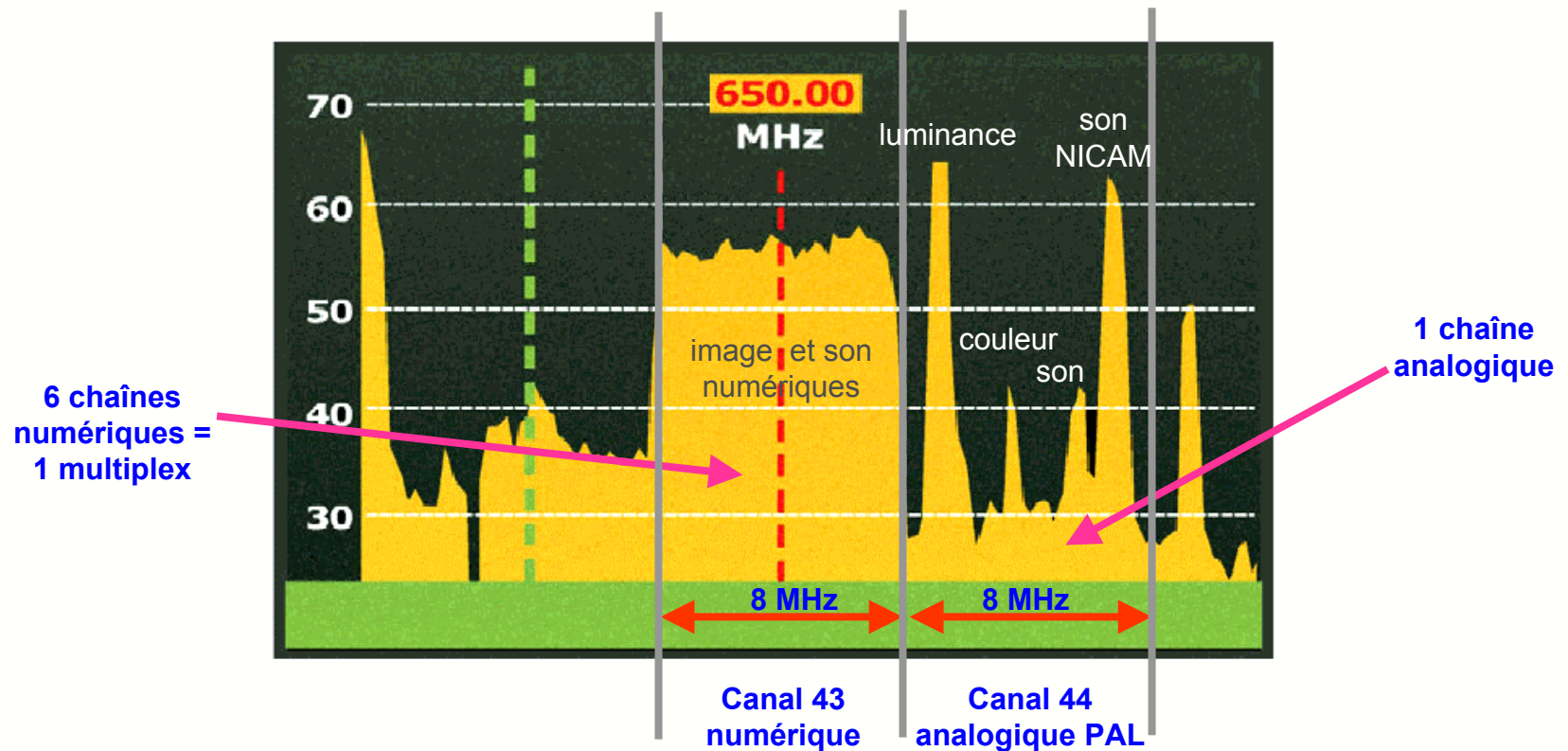
pour visualiser l'image TV, mesurer et afficher ses caractéristiques (taux d'erreur, qualité de la modulation, constellation des états, échos ...)





10- L'occupation du canal

Spectre de la bande UHF montrant un canal TNT à côté d'un canal TV analogique :



L'occupation du canal est bien meilleure, puisque avec une même largeur (8 MHz) on transmet 6 chaînes en qualité « normale » (ou 3 chaînes en haute définition).



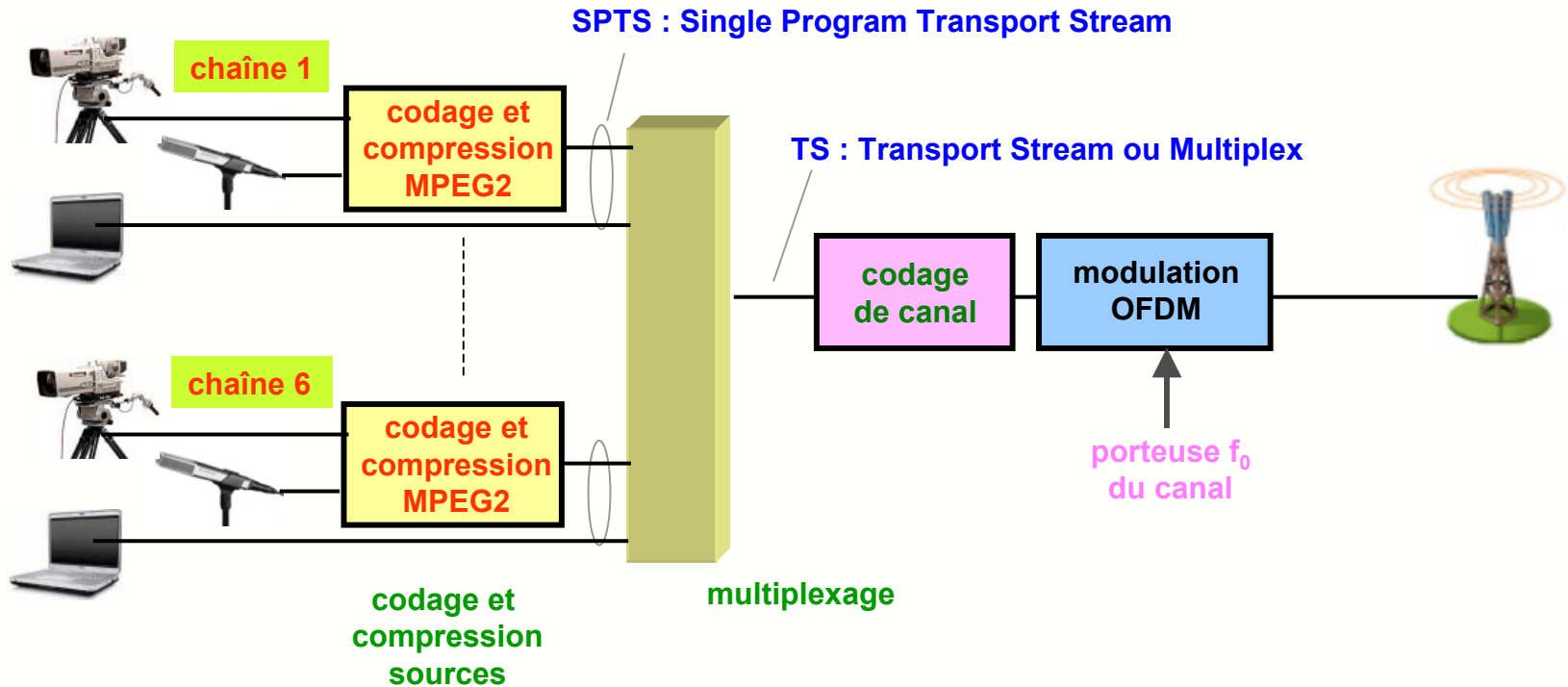
... pause ...





11- Structure de l'émetteur TNT

La structure d'un émetteur TNT est la suivante (pour 1 canal et un multiplex de 6 chaînes) :



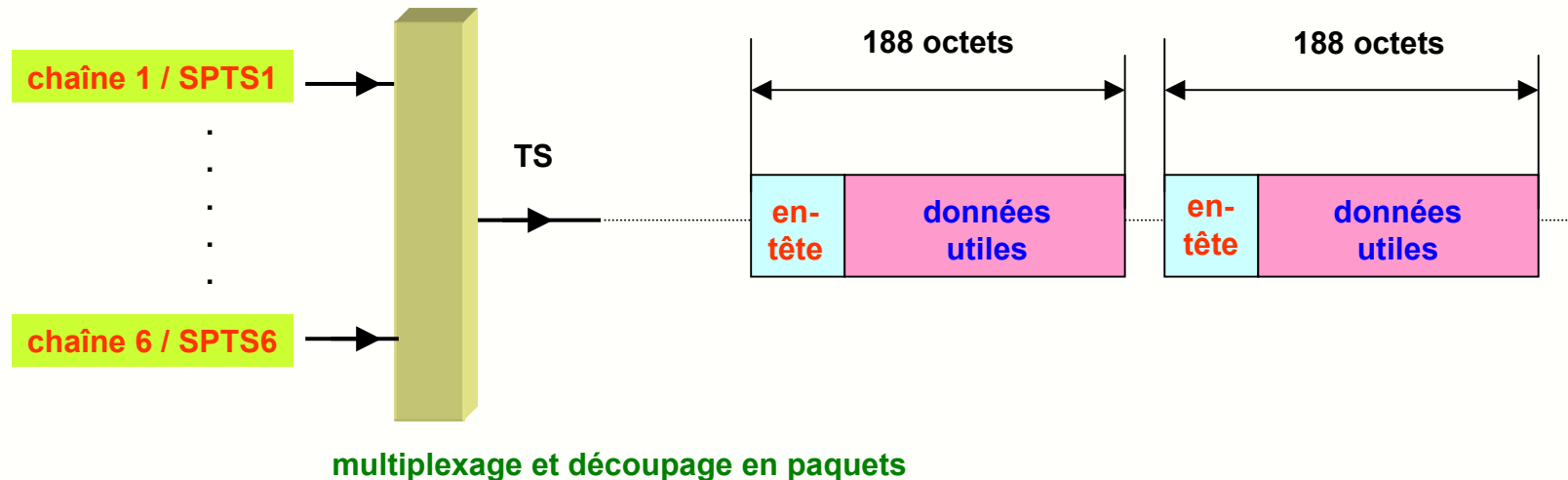
Le signal « vidéo+son+données » est échantillonné et compressé en MPEG2, mélangé à 5 autres signaux, protégé contre les erreurs de transmissions, puis module la porteuse.



12- Les paquets de données

Le flux TS est organisé en paquets de 188 octets précédés d'un en-tête qui précise :

- le numéro de la source (Paquet Identifiant PID)
- le type de donnée (audio, vidéo, sous-titre, données de service etc...)



C'est grâce aux en-têtes que le récepteur pourra séparer les données correspondant aux différentes chaînes du multiplex.



13- Composition des multiplex

En 2010 on dispose en France de 6 multiplex :

| | | | | | | | canal* | fréquence* |
|----|--|--|--|--|--|---|--------|------------|
| R1 | | | | | | Chaîne locale France Ô France 3 bis | 53 | 730 MHz |
| R2 | | | | | | | 27 | 522 MHz |
| R3 | | | | | | | 54 | 738 MHz |
| R4 | | | | | | | 37 | 602 MHz |
| R5 | | | | | | | 24 | 498 MHz |
| R6 | | | | | | | 21 | 474 MHz |

* pour le Haut-Rhin

Mise en service en Alsace :

- le 02/02/2010 pour R1, R2, R3, R4, et R6 (extinction de la télévision analogique)
- le 28/09/2010 pour R5



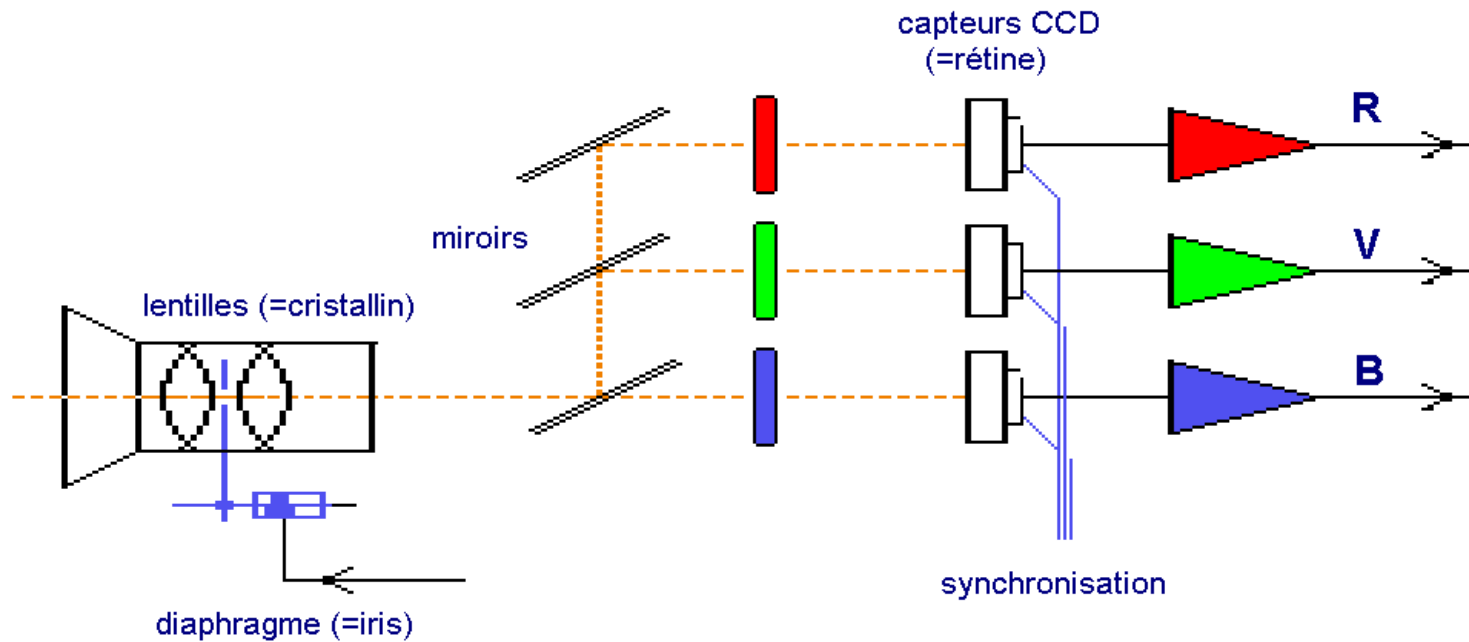
14- La caméra de télévision

La caméra :

- a un fonctionnement voisin de celui de l'œil
- comporte 3 capteurs CCD sensibles aux 3 couleurs
- a un diaphragme qui évite la saturation des CCD
- fournit 3 signaux de luminance R, V et B
- analyse l'image ligne par ligne



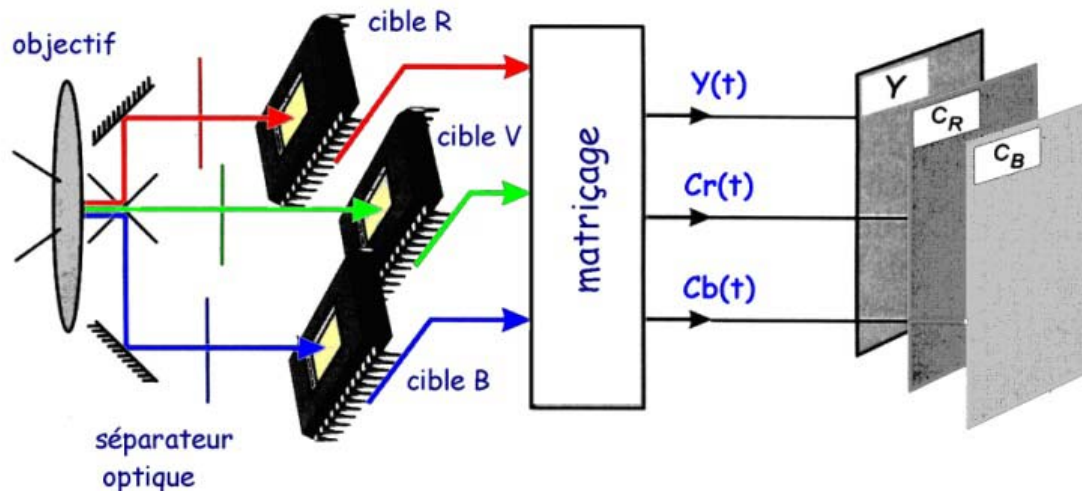
Caméra tri-CCD



15- Les signaux luminance et chrominance

Pour des raisons historiques (compatibilité avec les récepteurs N&B), on préfère travailler avec 3 signaux calculés à partir des précédents :

- la luminance : $Y(t) = 0,299.R(t) + 0,587.V(t) + 0,115.B(t)$
- la chrominance rouge : $Cr(t) = 0,500.R(t) - 0,418.V(t) - 0,082.B(t)$
- la chrominance bleue : $Cb(t) = -0,169 R(t) - 0,331.V(t) + 0,500.B(t)$



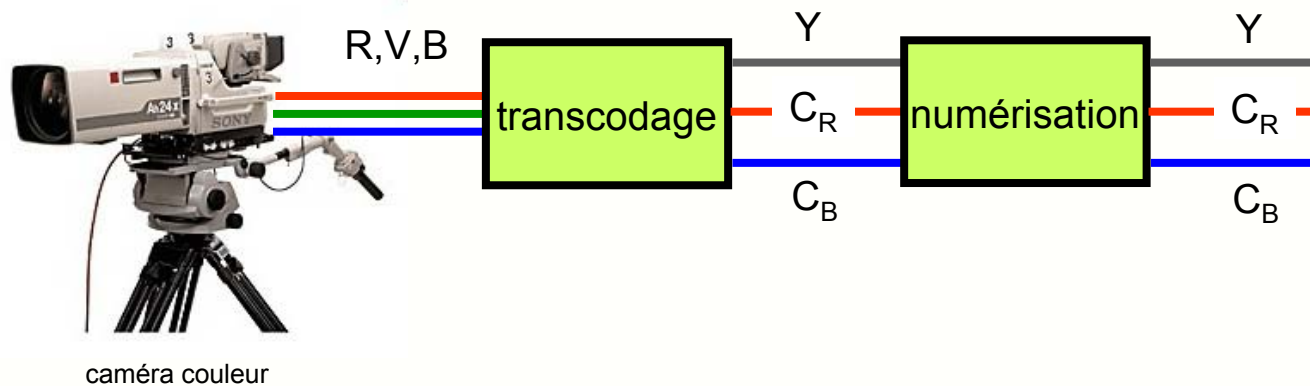
Ce sont ces signaux qui seront digitalisés dans une caméra numérique.



16- Le signal vidéo numérique

Le format de base pour l'image numérique est le **4:2:2**, caractérisé par :

- 25 images/s de 625 lignes, dont 576 affichées
- signal de luminance $Y(t)$ échantillonné à 13,5 MHz ($F_{\max} = 6,5$ MHz)
- signaux de chrominance $C_r(t)$ et $C_b(t)$ échantillonnés à 6,75 MHz ($F_{\max} = 3,25$ MHz)
- échantillons codés sur 10 bits



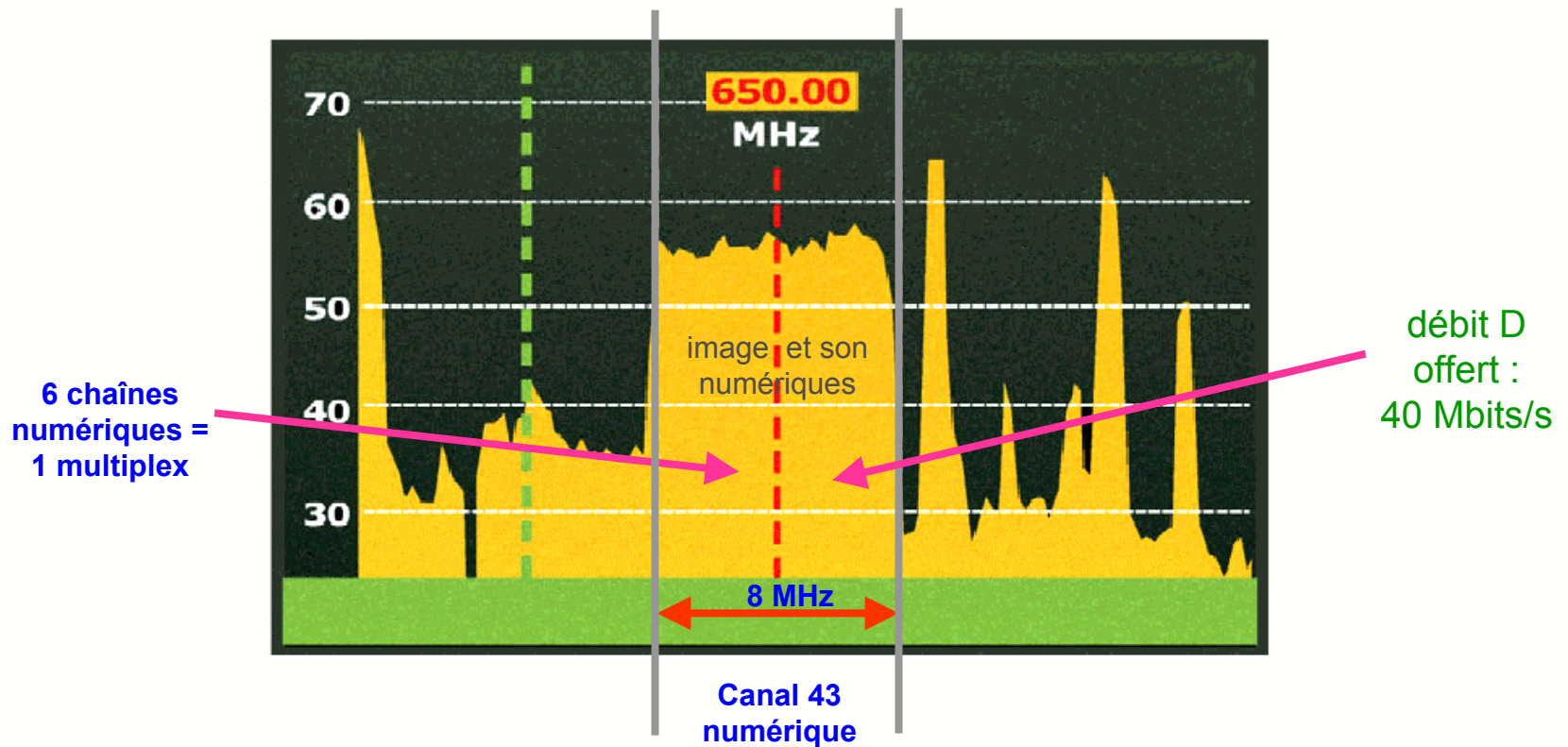
composantes
vidéo
numérisées
D=270Mbits/s

La numérisation du signal vidéo produit un débit D très important :

$$D = 13,5 \cdot 10^6 \times 10 \text{ bits} + 2 \times 6,75 \cdot 10^6 \times 10 \text{ bits} = 270 \text{ Mbits/s} !$$

17- Nécessité de la compression de débit

Un canal TNT a un débit numérique limité à 40 Mbits/s :

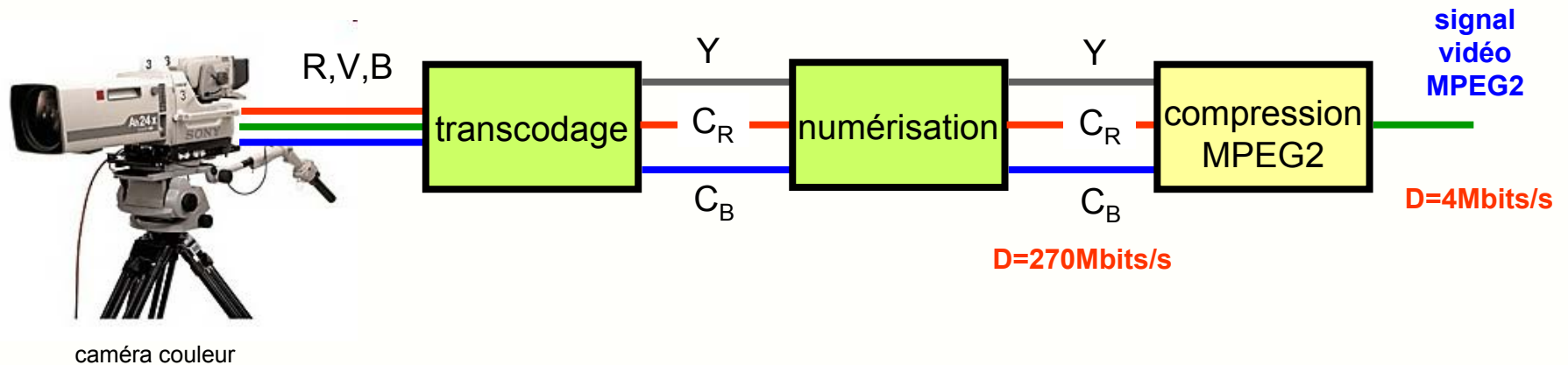


Conclusion : il est impossible de transmettre un signal vidéo numérisé en 4:2:2 dans un canal de 8 MHz de large !

18- La réduction de débit par codage MPEG2

La réduction de débit est possible car deux images vidéo successives sont souvent très voisines :

- si les images sont proches, le MPEG2 ne code que ce qui a changé d'une image à l'autre
- si les images sont très différentes, le MPEG2 code l'image complète



La réduction de débit est très impressionnante car le MPEG2 fait passer le débit de 270 Mbits/s à 4 Mbits/s avec une perte de qualité quasi insensible.

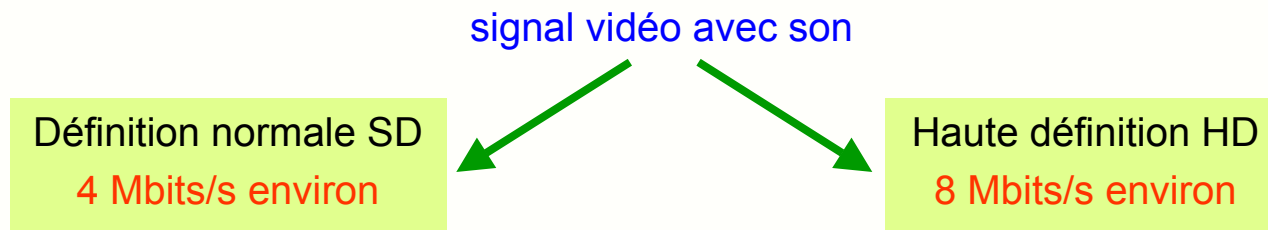


19- Les débits numériques en TNT

Les émissions TNT existent en différentes qualités d'image et de son :

| | chaînes gratuites | chaînes payantes | chaînes payantes |
|------------|--|-----------------------|-------------------------|
| définition | SD (720 x 576 pixels) | SD (720 x 576 pixels) | HD (1440 x 1080 pixels) |
| vidéo | MPEG2 \approx 4 Mbits/s | MPEG4 AVC 1 Mbits/s | MPEG4 AVC 8 Mbits/s |
| audio | MP3 \approx 100 kbits/s Dolby AC3 192 kbits/s Dolby 5.1 384 kbit/s | MPEG4 AAC | MPEG4 AAC |

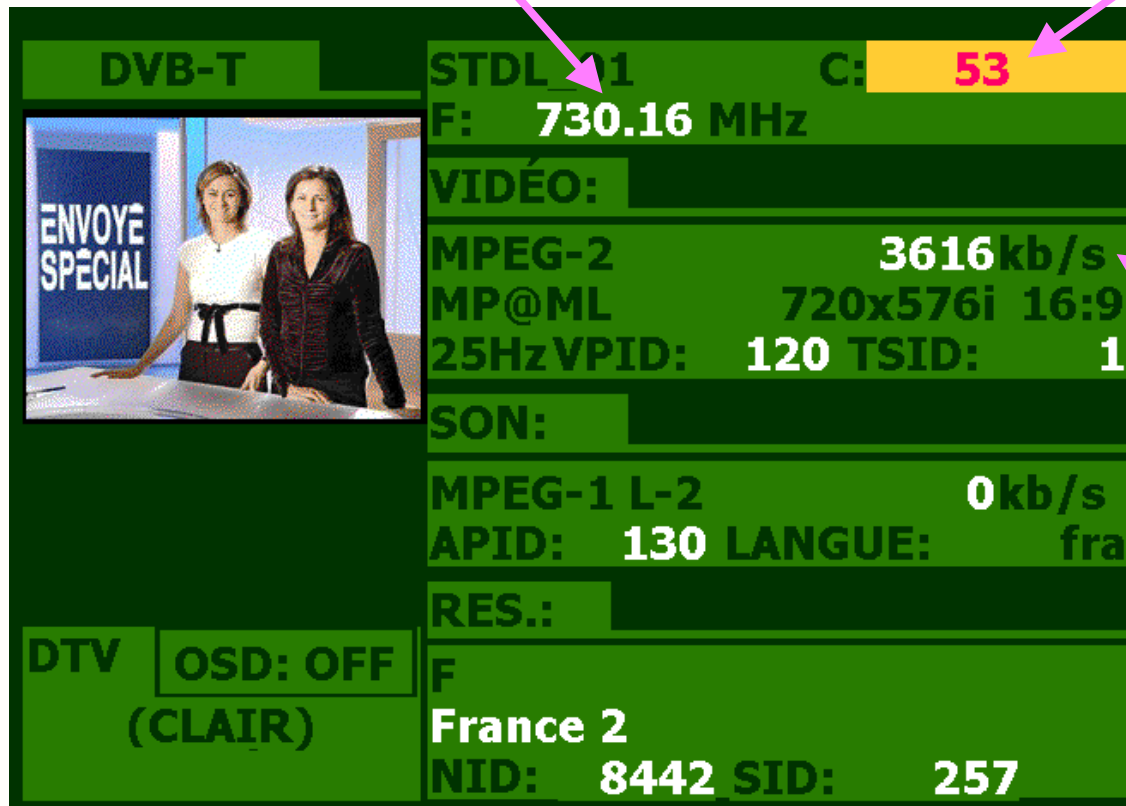
On retiendra donc les ordres de grandeur suivants pour une chaîne :



20- Exemple de mesure sur un signal reçu

fréquence (noter le décalage de +166 kHz)

canal



The screenshot displays a DVB-T signal measurement interface with the following parameters:

- DVB-T** (Mode)
- STDL: 1** (Standard)
- C: 53** (Channel number, highlighted in yellow)
- F: 730.16 MHz** (Frequency)
- VIDÉO:**
 - MPEG-2** (Video codec)
 - 3616kb/s** (Instantaneous bitrate)
 - MP@ML** (Profile)
 - 720x576i 16:9** (Resolution and aspect ratio)
 - 25Hz VPID: 120** (Video Packet ID)
 - TSID: 1** (Transport Stream ID)
- SON:**
 - MPEG-1 L-2** (Audio codec)
 - 0kb/s** (Instantaneous bitrate)
 - APID: 130** (Audio Packet ID)
 - LANGUE: fra** (Language)
- RES.: F** (Resolution)
- DTV** (Digital TV mode)
- OSD: OFF** (On-Screen Display)
- (CLAIR)** (Quality)
- France 2** (Channel name)
- NID: 8442** (Network ID)
- SID: 257** (Service ID)

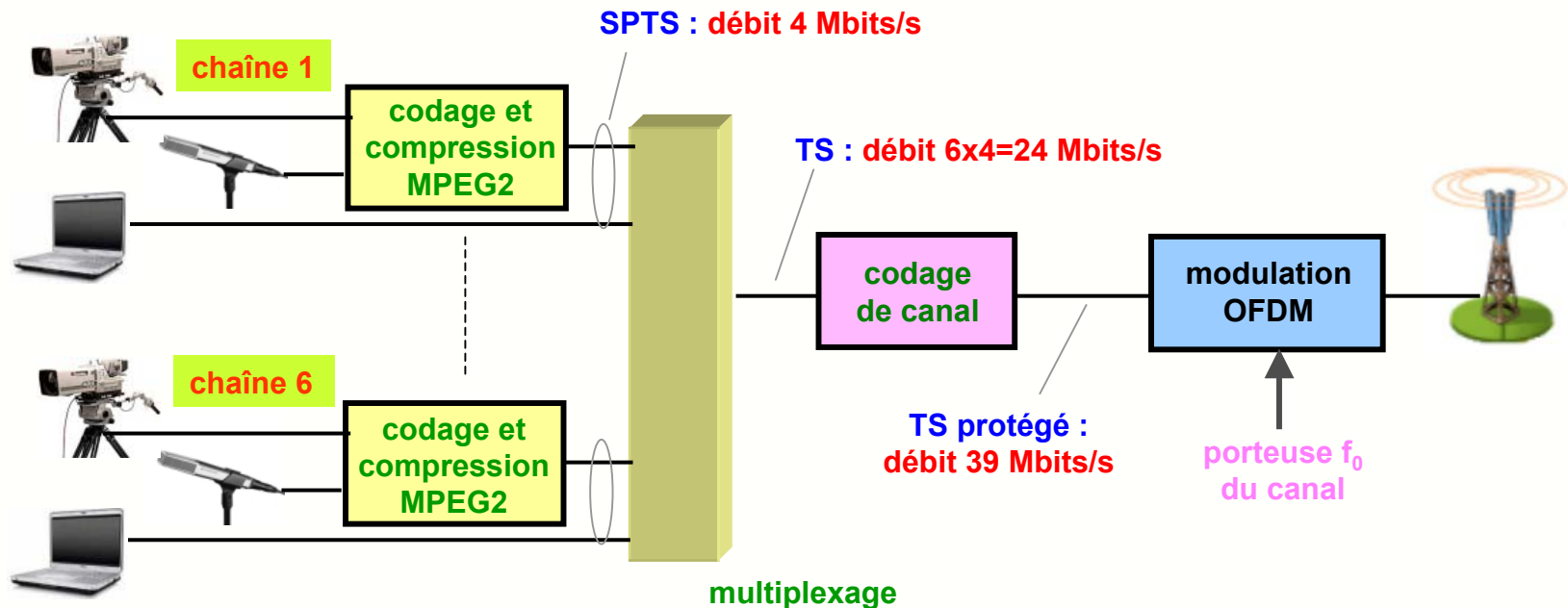
débit instantané

Question : si le canal permet 40 Mbits/s, pourquoi un multiplex n'offre-t-il pas 10 chaînes ?



21 - Protection des données

Réponse : parce que les données doivent être protégées contre les erreurs de transmissions !



La protection des données met en œuvre 2 techniques complexes de codage de canal :

- un codage Reed-Solomon qui ajoute à chaque paquet 16 bits de correction d'erreurs
⇒ le débit passe à : $24 \times 204 / 188 = 26$ Mbits/s

- un codage convolutif qui nécessite 3 bits pour en transmettre 2 (FEC23)
⇒ le débit passe à $26 \times 3 / 2 \approx 39$ Mbits/s



... pause ...

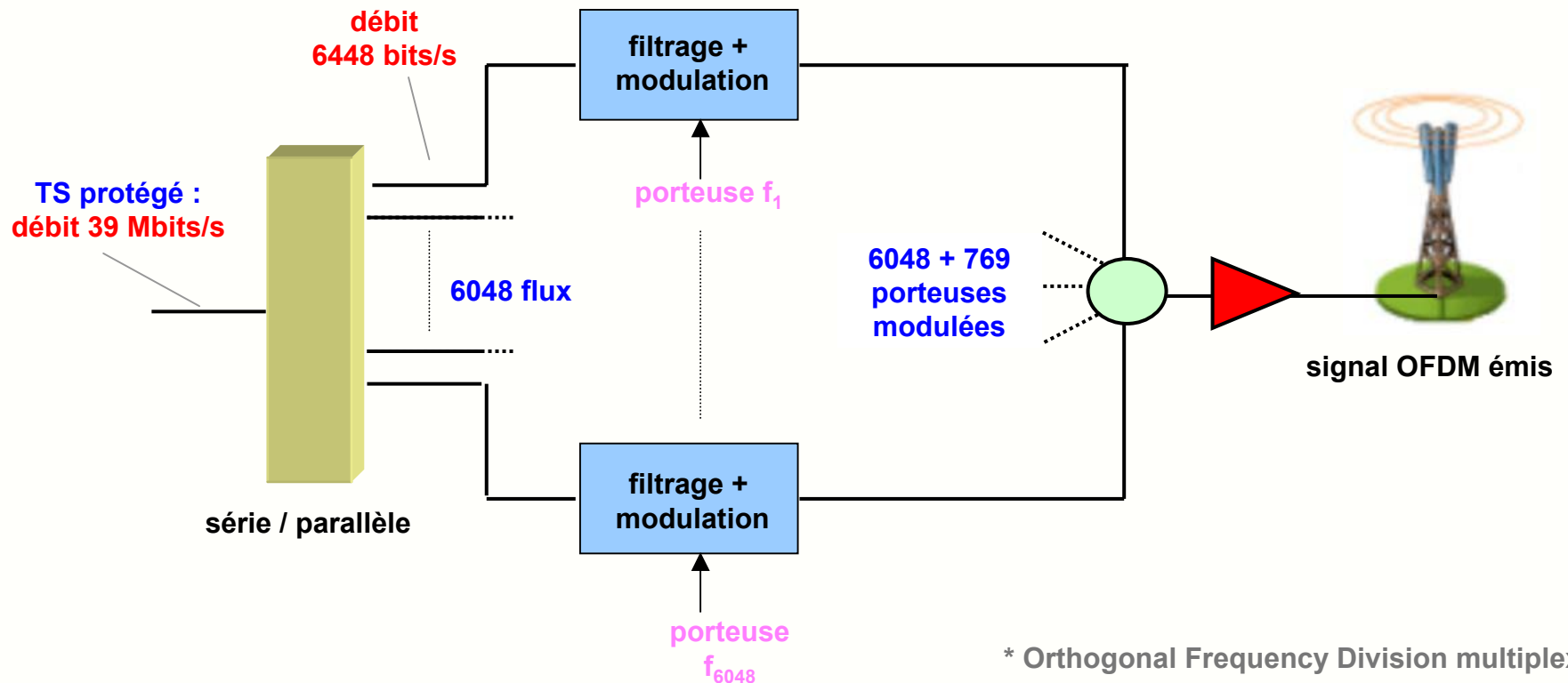




22- La modulation OFDM*

Pour la TNT, les autorités ont choisi une modulation à 6817 porteuses espacées de 1116 Hz :

- le flux de données à 39 Mbits/s est transformé en 6048 flux de débit $39\text{M}/6048 = 6,448$ kbits/s
- ces flux sont filtrés par des passe-bas puis modulent 6048 porteuses légèrement décalées
- 769 porteuses sont modulées par des signaux de synchronisation/service

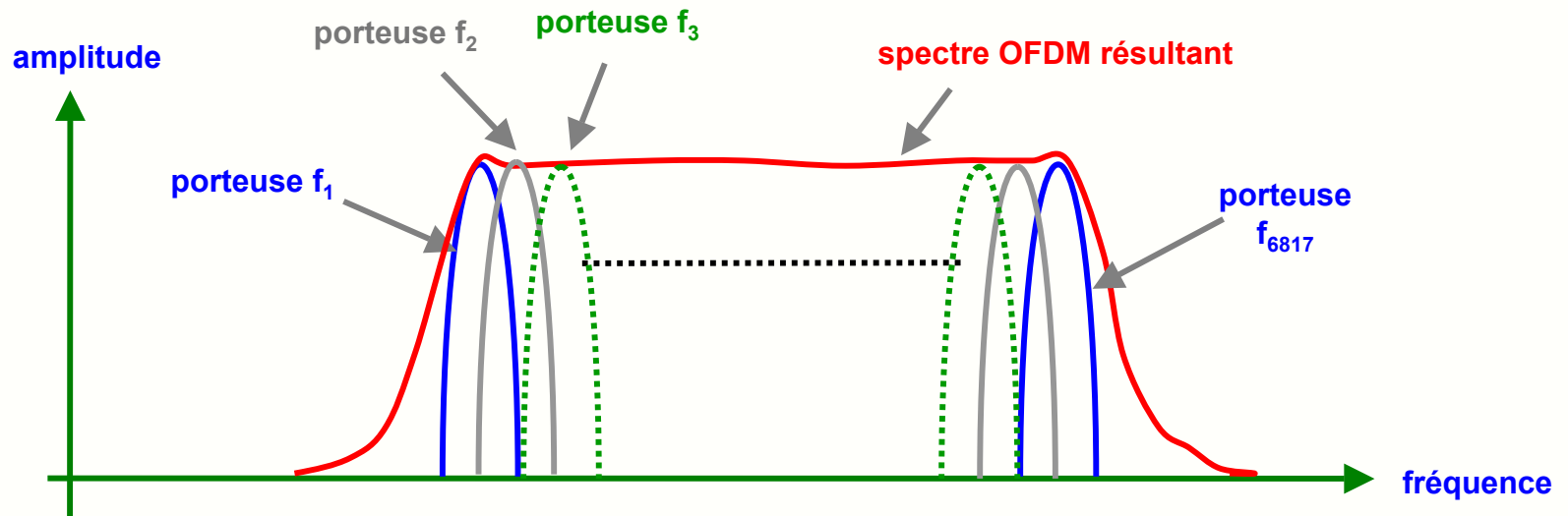


* Orthogonal Frequency Division multiplex



23- Spectre du signal modulé OFDM

Le spectre est constitué de la juxtaposition de 6817 porteuses espacées de 1116 Hz :

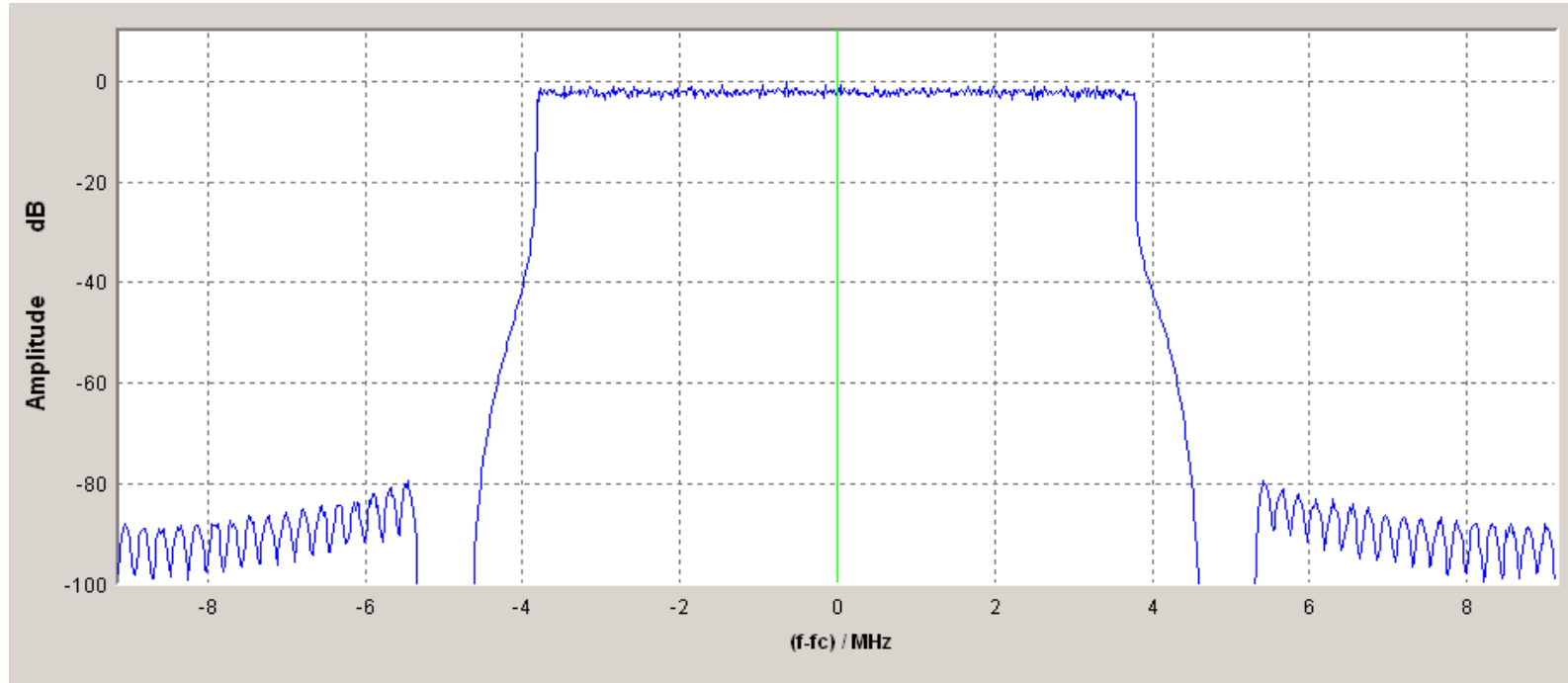


La structure très particulière de ce spectre explique sa **forme quasi rectangulaire**.

C'est une des manières les plus efficaces d'occuper complètement un canal de largeur donnée.



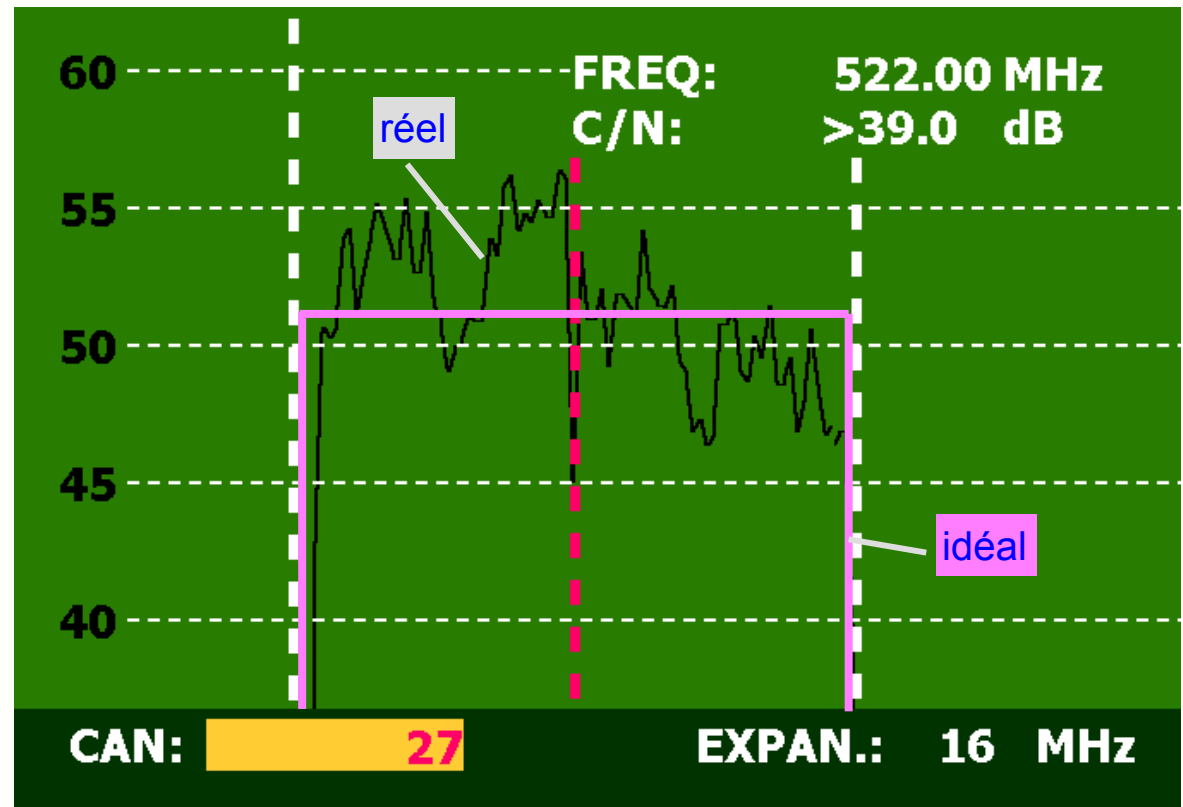
24- Spectre OFDM théorique



Spectre obtenu par simulation avec **WinIQSim** (Rhode+Schwarz)



25- Spectre OFDM réel



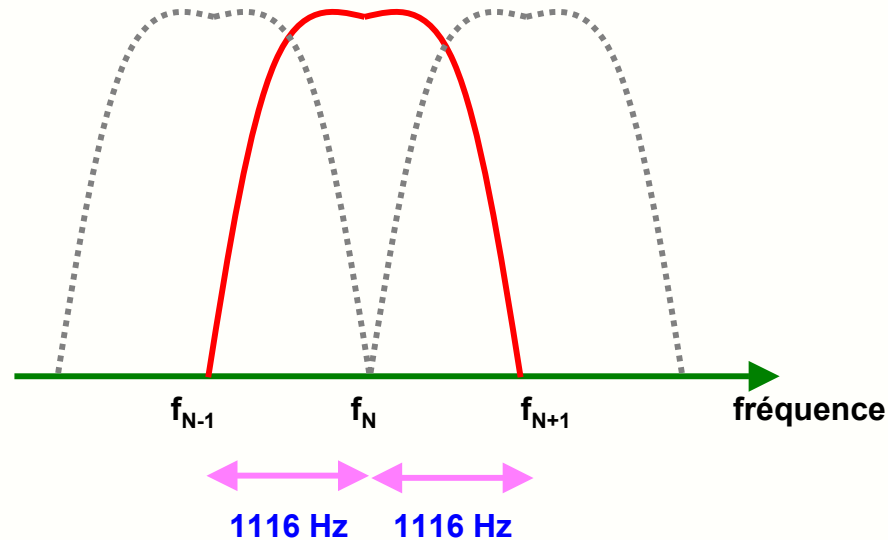
Remarques :

- on retrouve l'aspect quasi rectangulaire prévu par la théorie
- on note des irrégularités dans le niveau des différentes porteuses (± 5 dB environ)



26- Rapidité de modulation

Le récepteur peut démoduler ces 6817 porteuses, même si elles se recouvrent partiellement :



Chaque porteuse modulée peut donc avoir une largeur spectrale allant jusqu'à $2 \times 1116 = 2232$ Hz

⇒ la rapidité de modulation maximale pour chaque porteuse est :

$$R = 1116 \text{ bauds}$$

⇒ alors que de débit numérique par porteuse doit être de :

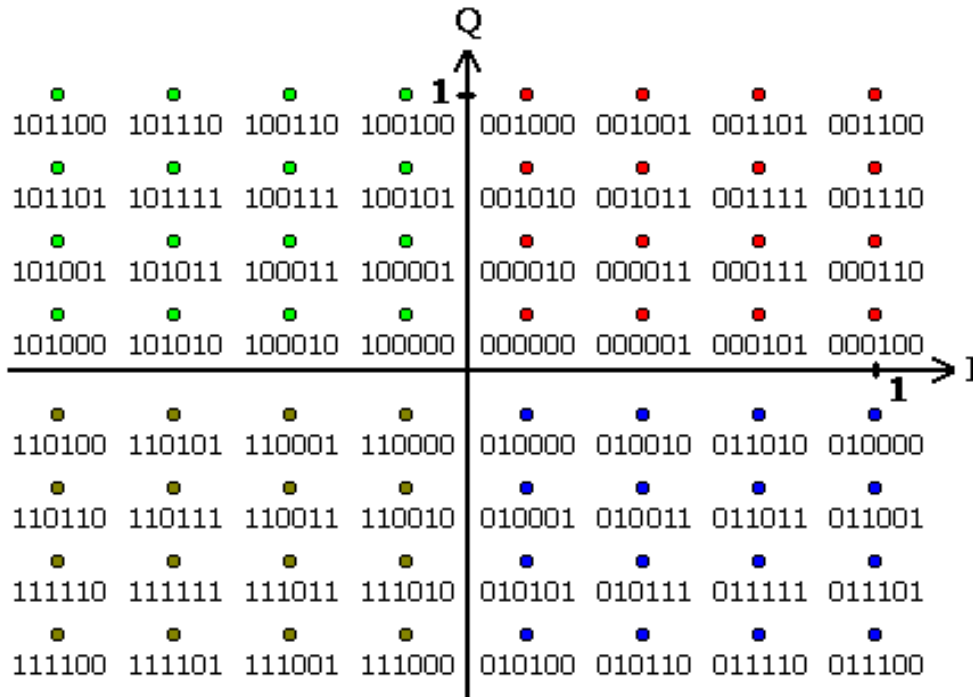
$$D = 6448 \text{ bits/s}$$

Conclusion : il faudra donc utiliser une modulation transmettant 6 bits/symbole !



27- Modulation 64-QAM d'une porteuse

Chaque porteuse est modulée par le signal binaire selon une modulation 64-QAM définie par la constellation suivante :



⇒ rapidité de modulation :
 $R = 6448/6 = 1075$ bauds

⇒ largeur du spectre de la porteuse modulée :
 $B \approx 1075 \times 2 = 2150$ Hz

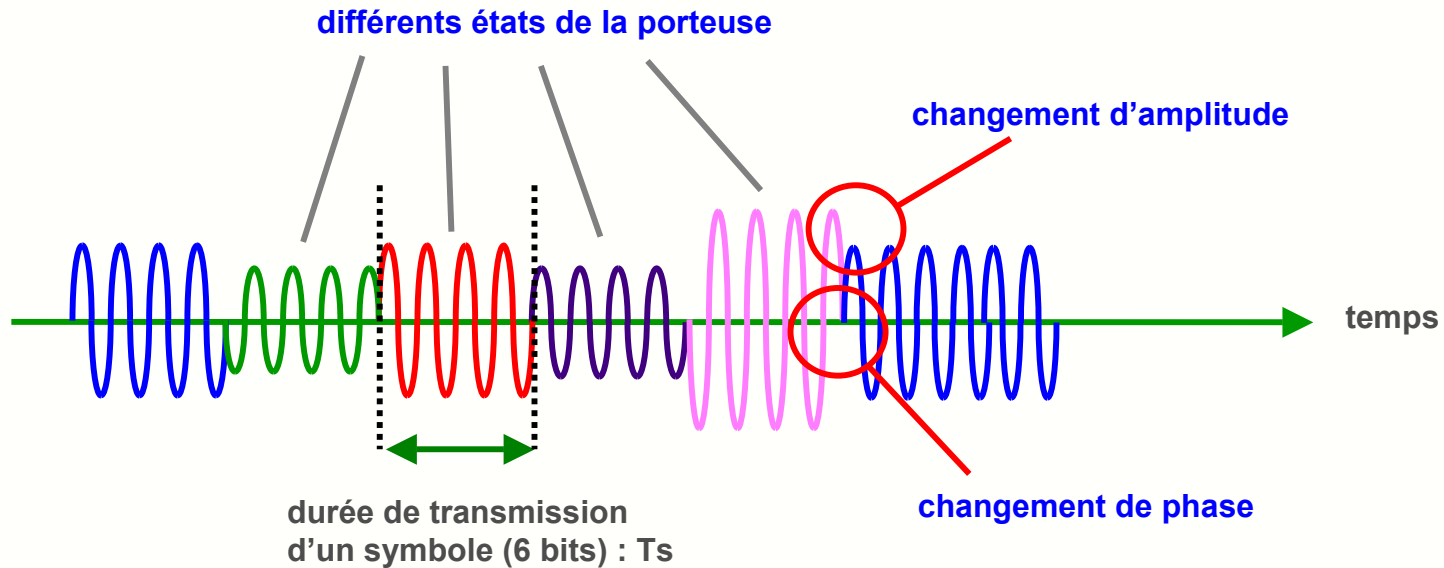
⇒ compatibilité avec la place disponible :

$B < B_{\max} = 2232$ Hz ouf !

- le signal à transmettre est divisé en tranches ou **mots de 6 bits (symboles)**
- à chaque mot de 6 bits correspond **un état** de la porteuse (amplitude et phase)
- l'état de la porteuse change donc tous les 6 bits

28- Allure temporelle d'une porteuse modulée

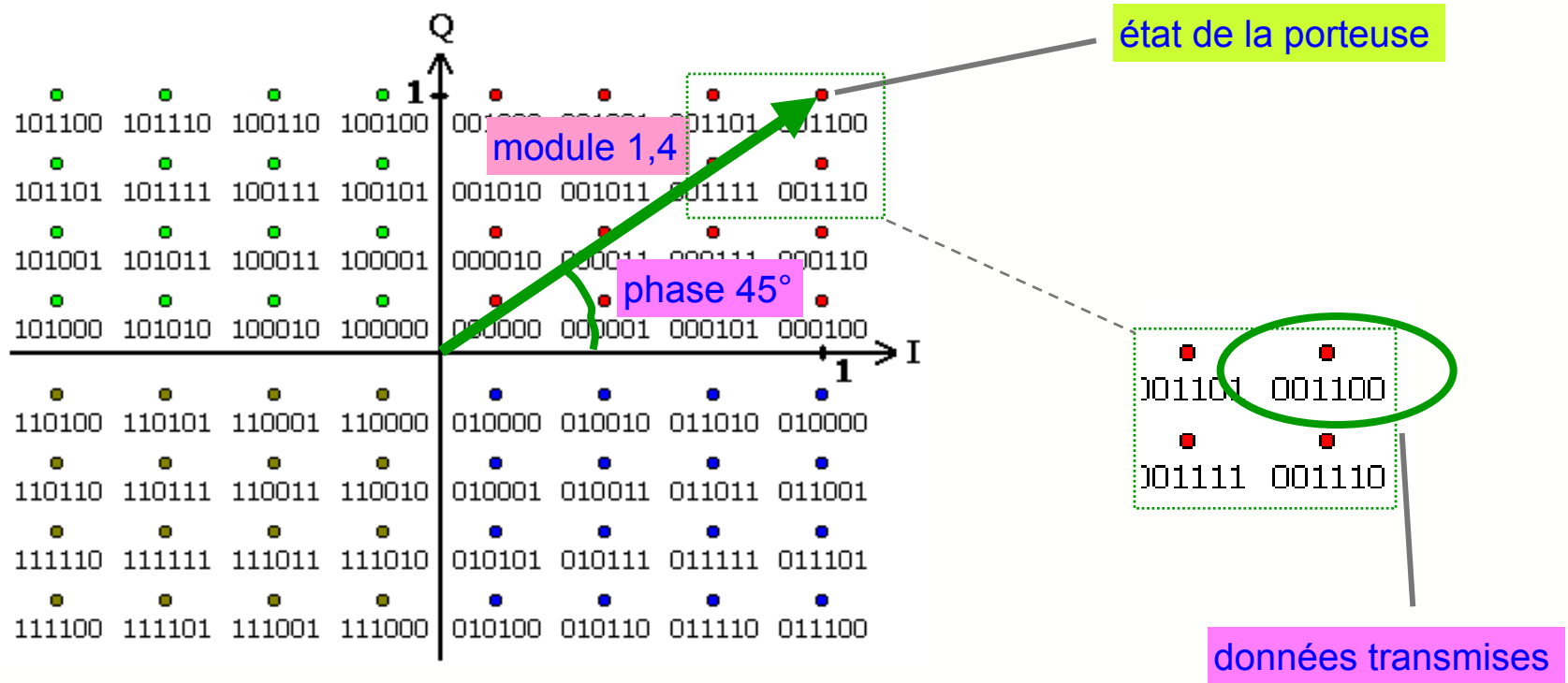
Une rapidité de modulation de $R = 1075$ bauds donne une durée de symbole : $T_s = 0,93$ ms



Question : si la porteuse a une amplitude de 1,414 et une phase de 45° , quelle est l'information transmise ?



29- Exemple de symbole transmis

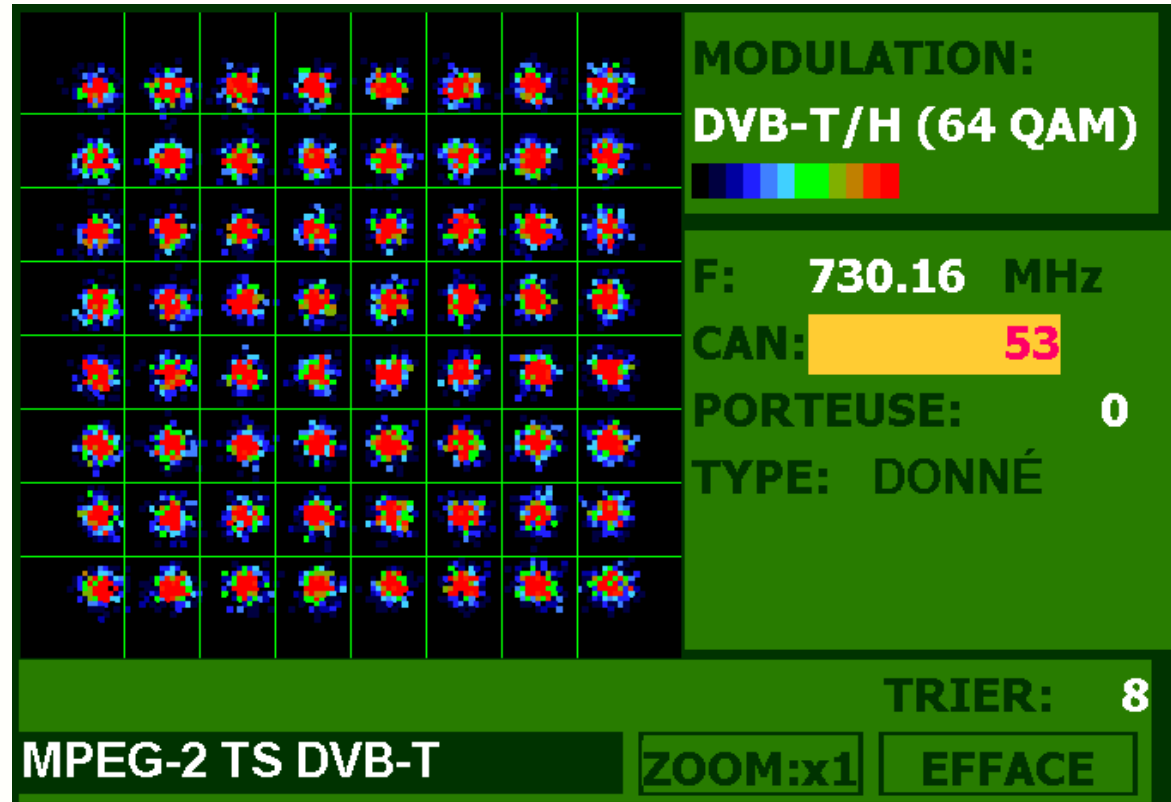
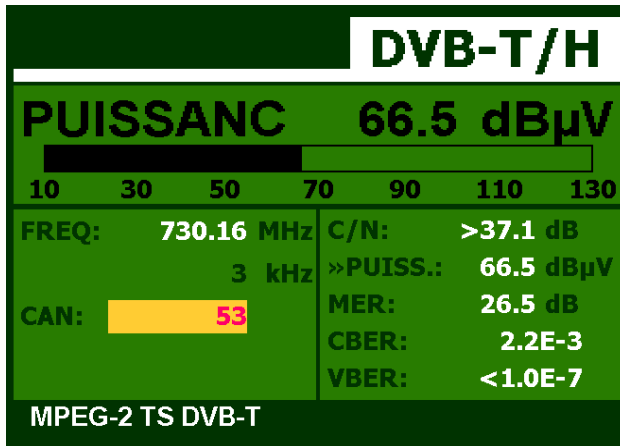


Réponse : l'information transmise est « 001100 », la porteuse reste dans son état durant 0,93 ms



30- Constellation des états pour une bonne réception

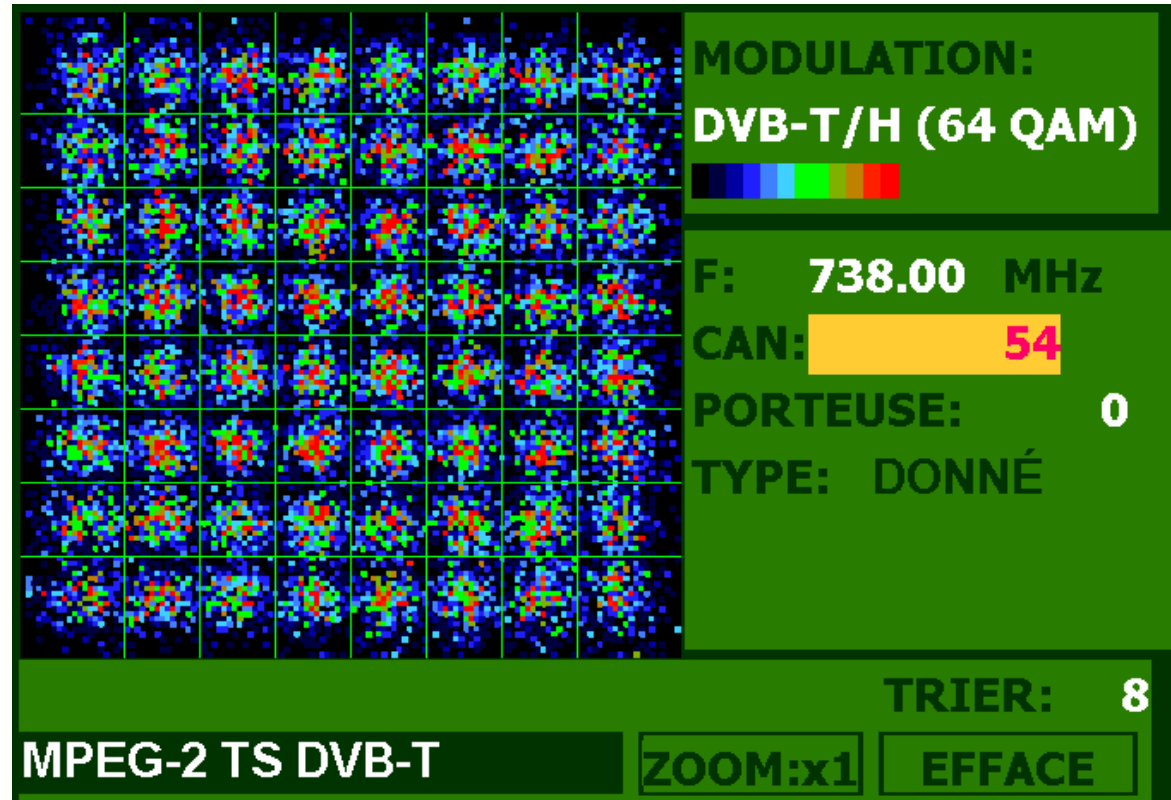
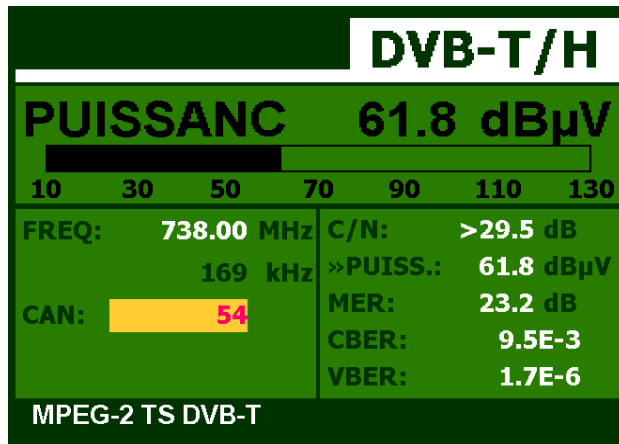
La constellation est bonne, les 64 états sont bien séparés, le récepteur pourra reconnaître les symboles et récupérer les données correspondantes.





31 - Constellation des états pour une mauvaise réception

La constellation n'est pas bonne, les 64 états ne sont pas bien distincts, le récepteur risque de confondre les symboles : il y aura des erreurs de transmission !



32- Mesure de la qualité de la modulation

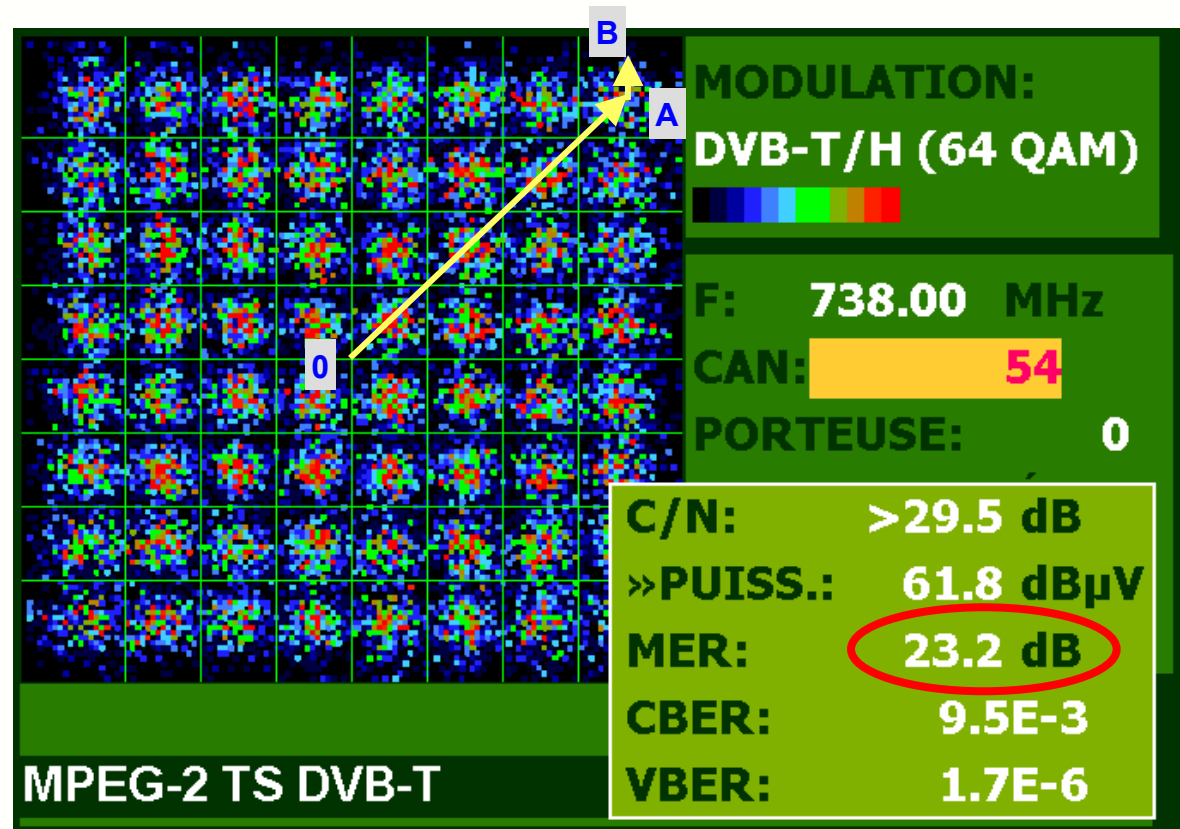
La qualité de la modulation des 6817 porteuses est mesurée par le MER (Modulation Error Ratio).
Il renseigne sur la distance entre le point idéal A de la constellation et le point réel B.

Formule de calcul :

$$\text{MER} = 20 \cdot \log(\text{OA}/\text{AB})$$

Ici : $\text{OA} = 65 \text{ mm}$ et $\text{AB} = 5 \text{ mm}$,
soit $\text{MER} = 20 \cdot \log(65/5) = 22,3 \text{ dB}$

Le MER affiché par le testeur est une valeur moyenne sur un grand nombre d'états.

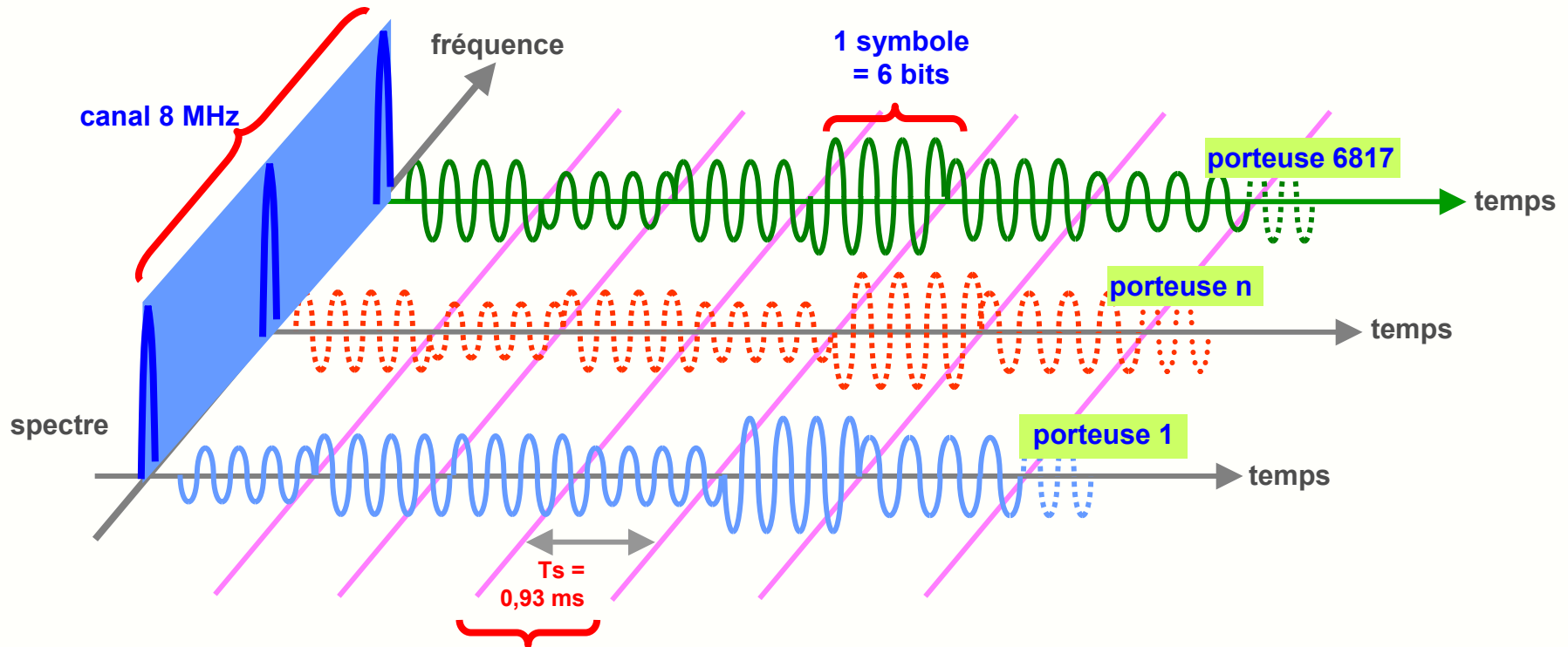


Plus le MER est élevé, plus l'image est de qualité, un **MER = 20 dB** étant un minimum.



33- Vision globale du signal OFDM émis

- 6817 porteuses espacées de 1116 Hz, dont 6048 transportant des informations « image+son »
- chaque porteuse peut avoir 64 états différents (amplitude et/ou phase)
- chaque état correspond à la transmission de 6 bits et dure 0,93 ms



$$6048 \text{ porteuses utiles} \times 6 \text{ bits} / 0,93 \text{ ms} = 39 \text{ Mbits/s}$$



... pause ...



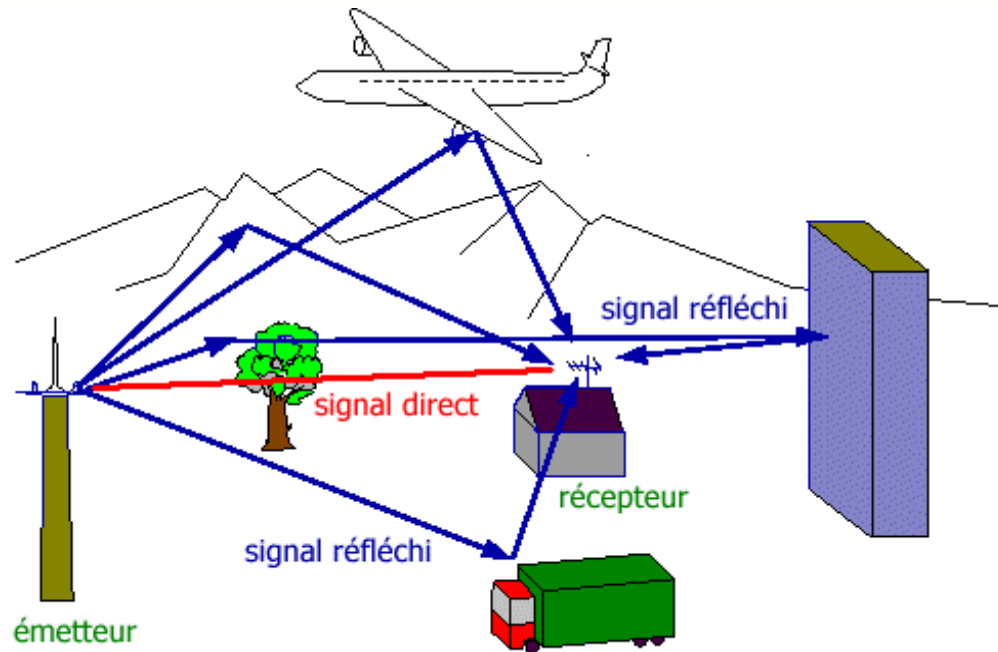
Installateurs d'antennes UHF au sommet de l'Empire State Building (New York)





34- Le problème des trajets multiples

En TNT, il est fréquent que l'antenne de réception reçoive, en plus du signal direct, des signaux réfléchis sur des obstacles (immeubles, reliefs etc...) :



Ces réflexions jouent sur le niveau du signal reçu, et sont particulièrement sensibles en milieu urbain ou montagneux.

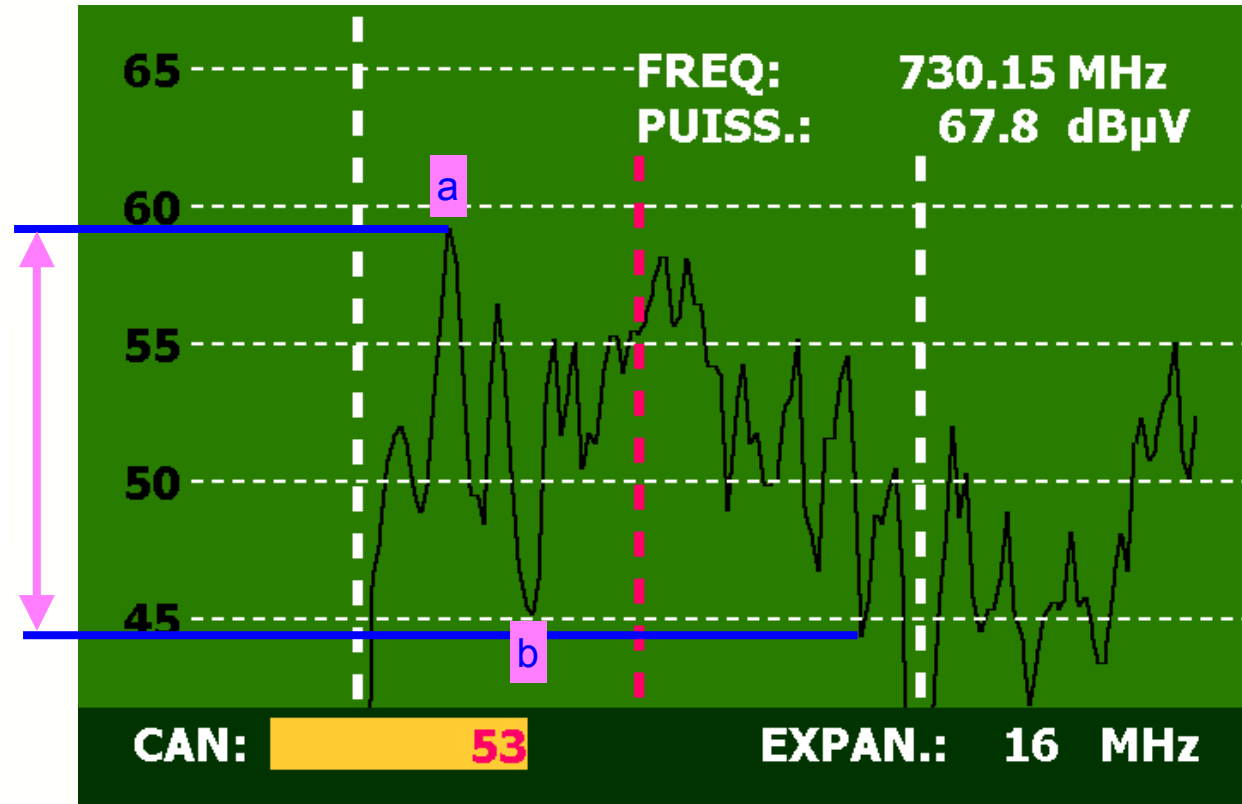


35- Les irrégularités de niveau reçu

Ces réflexions jouent sur le niveau reçu pour chaque porteuse car elles peuvent :

- renforcer le signal si elles arrivent en phase avec le signal direct (a) ou
- atténuer le signal si elles arrivent en opposition de phase (b)

Variations de
niveau reçu :
 $\pm 7,5$ dB

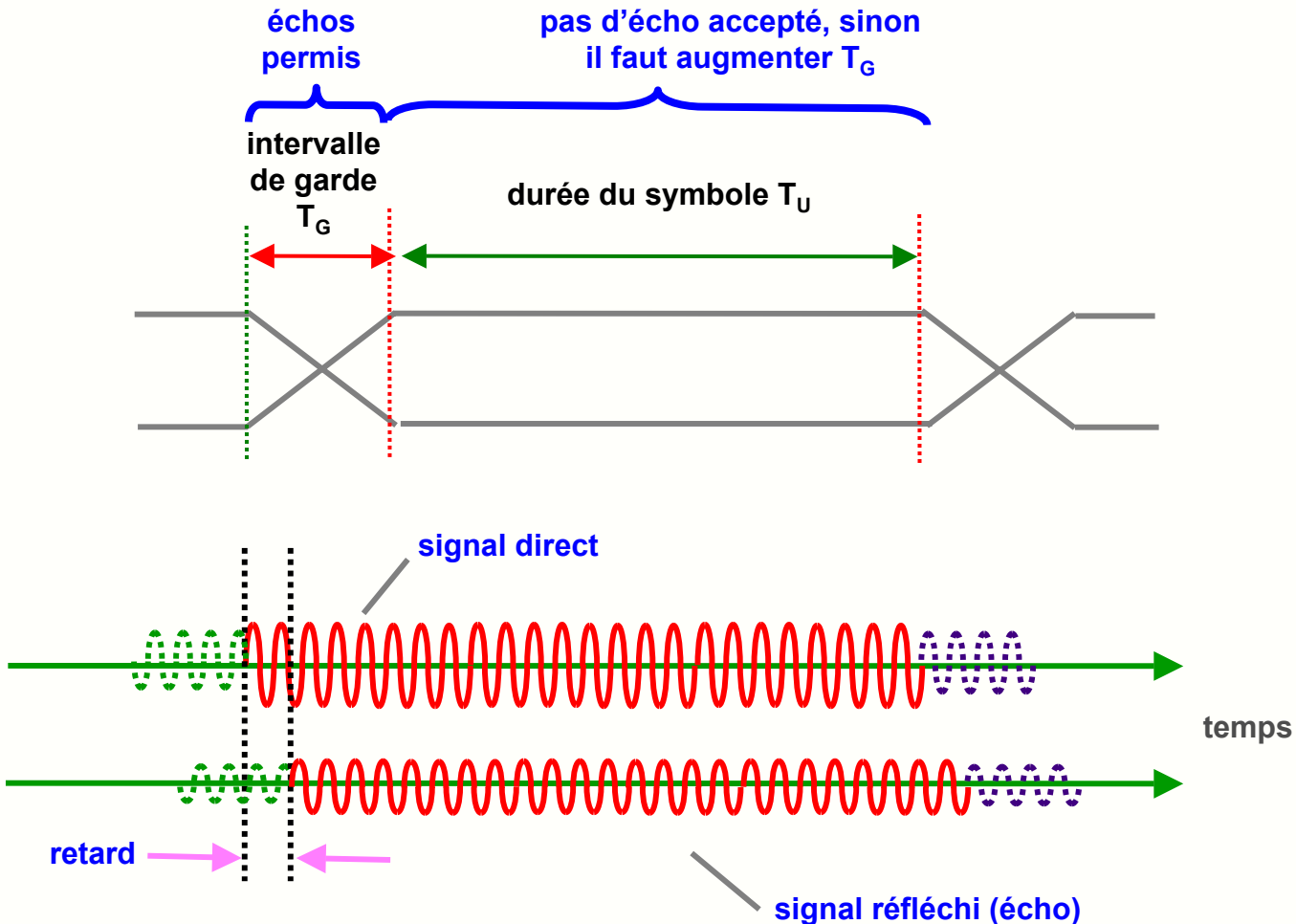


Le récepteur ne reçoit donc pas toutes les 6817 porteuses avec un niveau identique.



36- Les interférences inter-symboles

Pour être sûr que les signaux direct et réfléchi reçus correspondent à un même symbole, on introduit un intervalle de garde durant lequel le récepteur n'essaye pas de reconnaître le symbole :



En France :

$$T_U = 896 \mu\text{s}$$

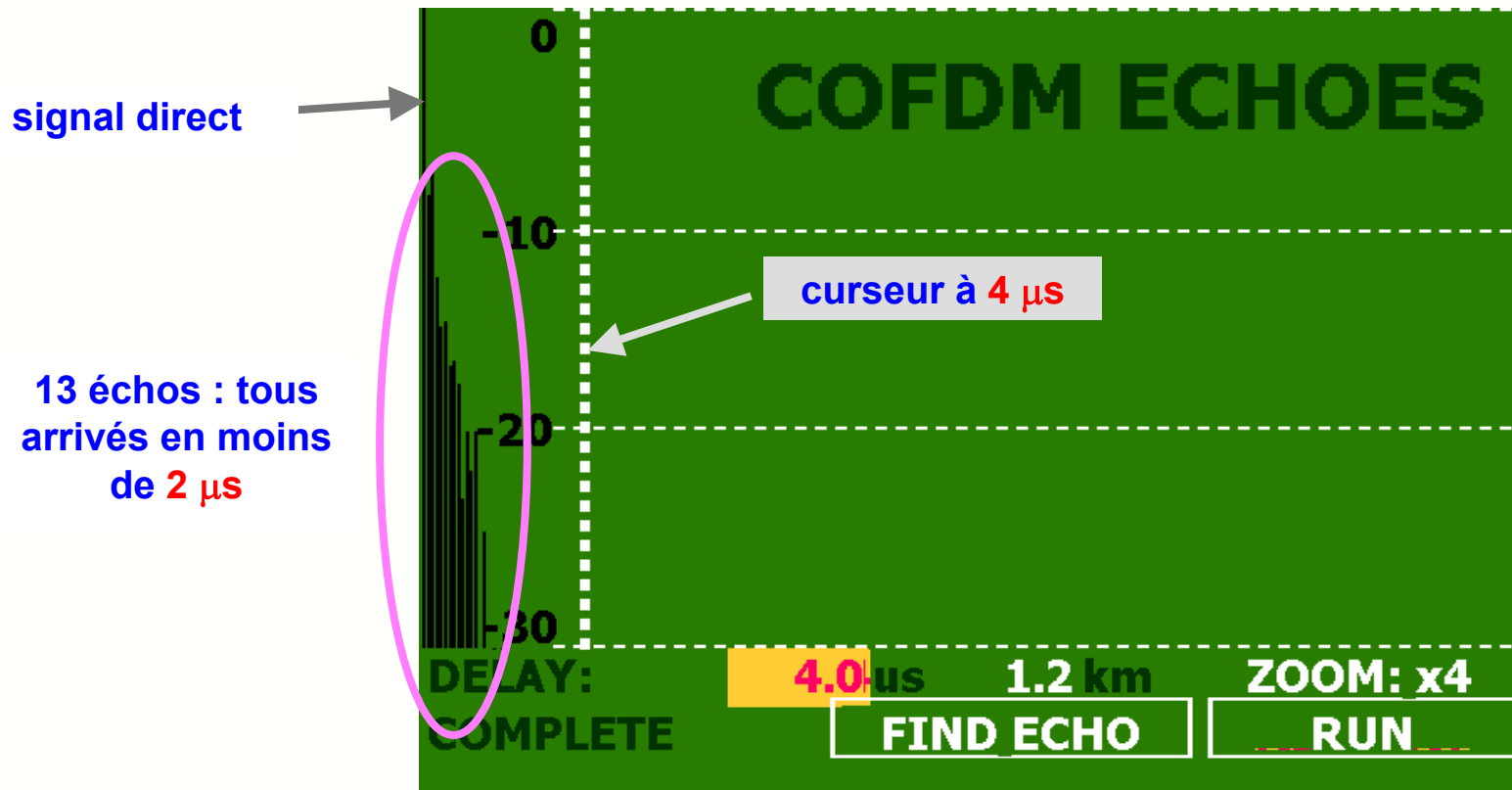
$$T_G = T_U/32 = 28 \mu\text{s}$$

soit un trajet
supplémentaire :

$$X = c T_G = 8,3 \text{ km}$$



37- Exemple de relevé d'échos

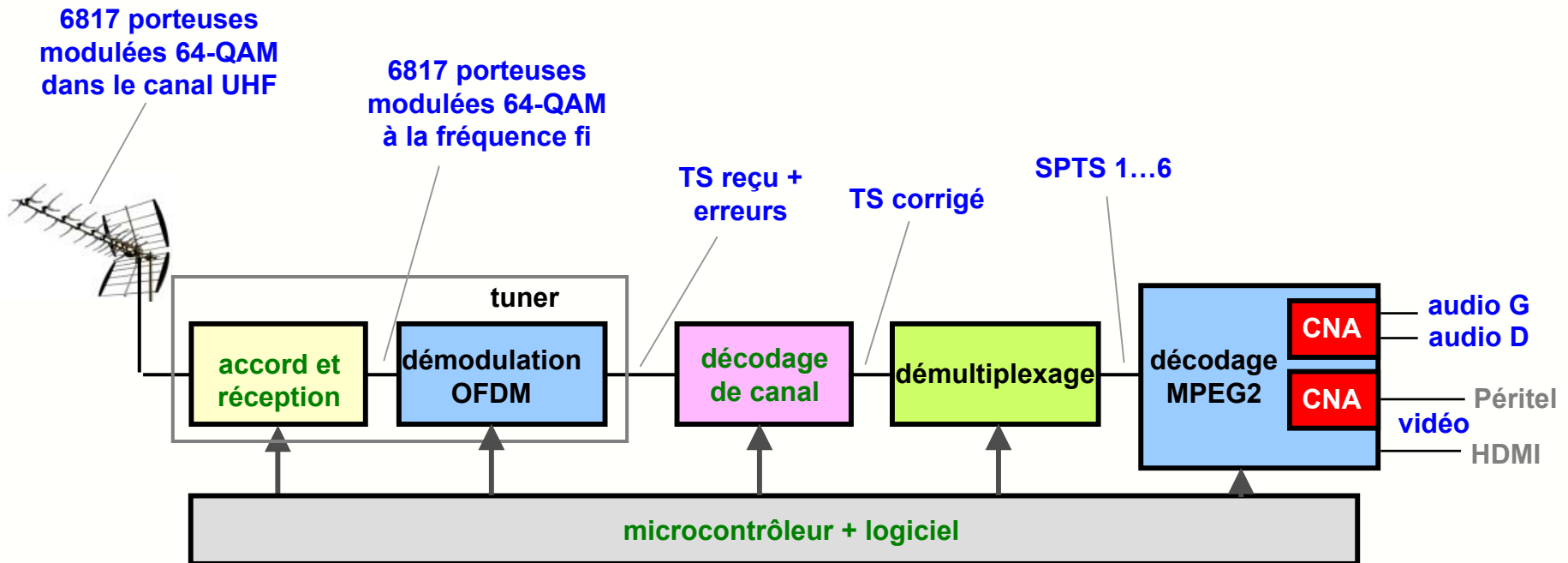


Remarques :

- en présence de réflexions lointaines, l'intervalle de garde peut être monté à $T_U/16$, $T_U/8$ ou $T_U/4$ au détriment bien-sûr du débit
- l'intervalle de garde permet aussi d'utiliser le même canal pour deux ou plusieurs émetteurs arrosant la même zone (distance max entre les émetteurs de quelques dizaines de km)



38- Structure d'un adaptateur TNT

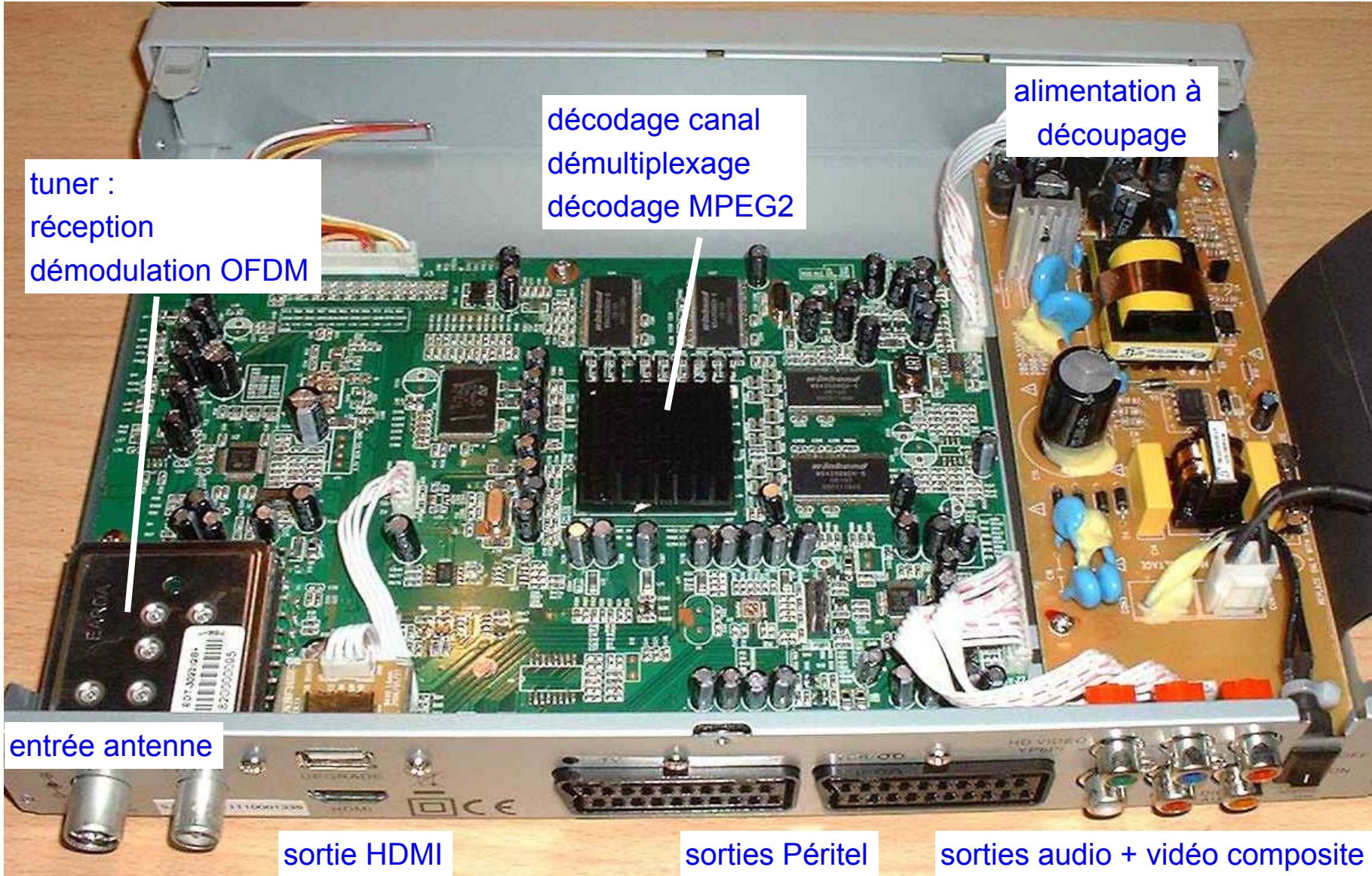


On retrouve dans l'adaptateur TNT les fonctions inverses de l'émetteur :

- le canal désiré est sélectionné par un étage de réception à changement de fréquence
- le signal en sortie du filtre fi est démodulé pour récupérer le Transport Stream
- le décodage de canal corrige, quand c'est possible, les erreurs de transmission
- le démultiplexeur récupère les paquets correspondant à la chaîne sélectionnée
- le décodeur MPEG2 reconstitue les signaux audio et vidéo



39- Intérieur d'un adaptateur TNT



tuner :
réception
démodulation OFDM

décodage canal
démultiplexage
décodage MPEG2

alimentation à
découpage

entrée antenne

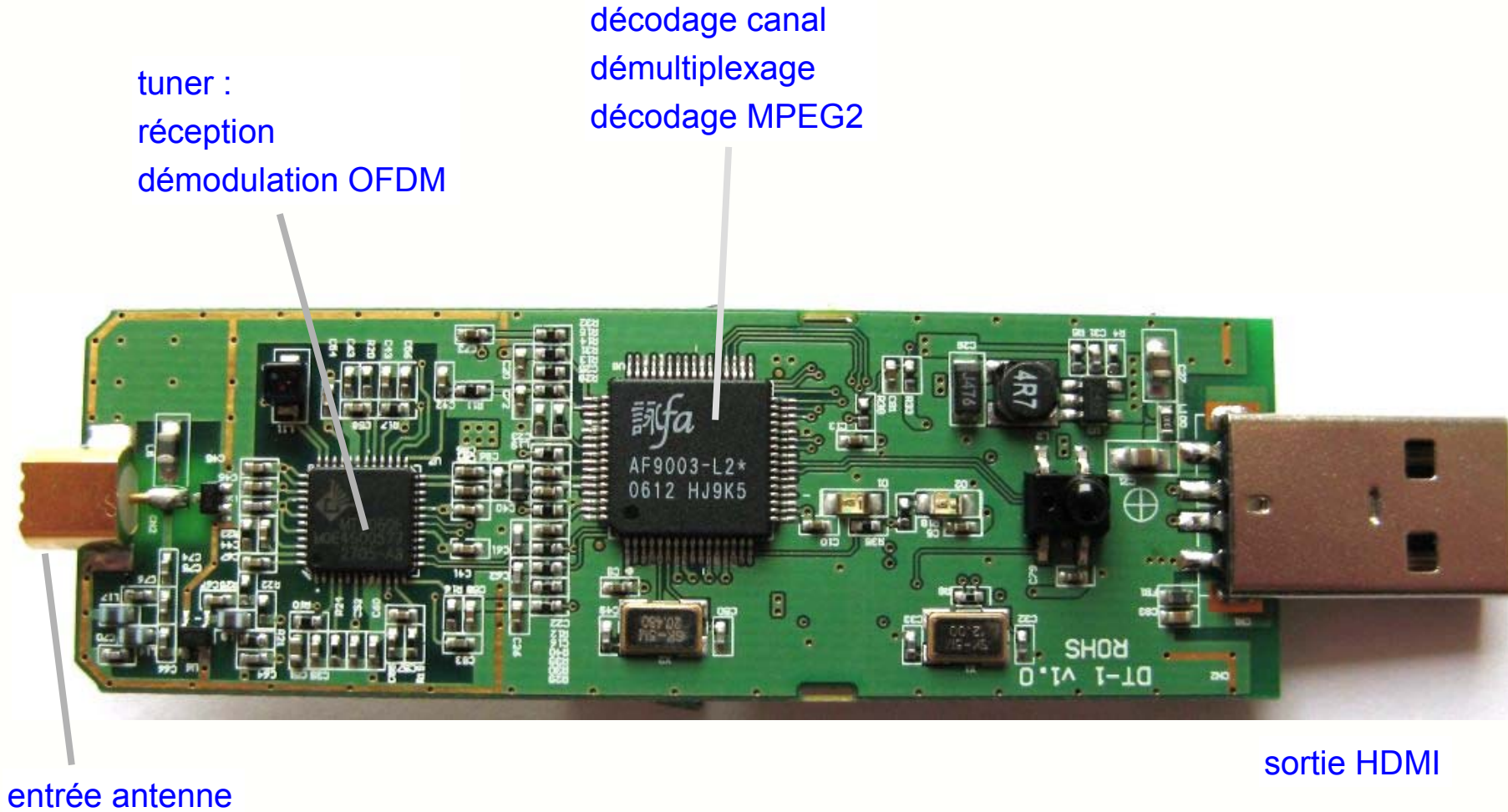
sortie HDMI

sorties Péritel

sorties audio + vidéo composite

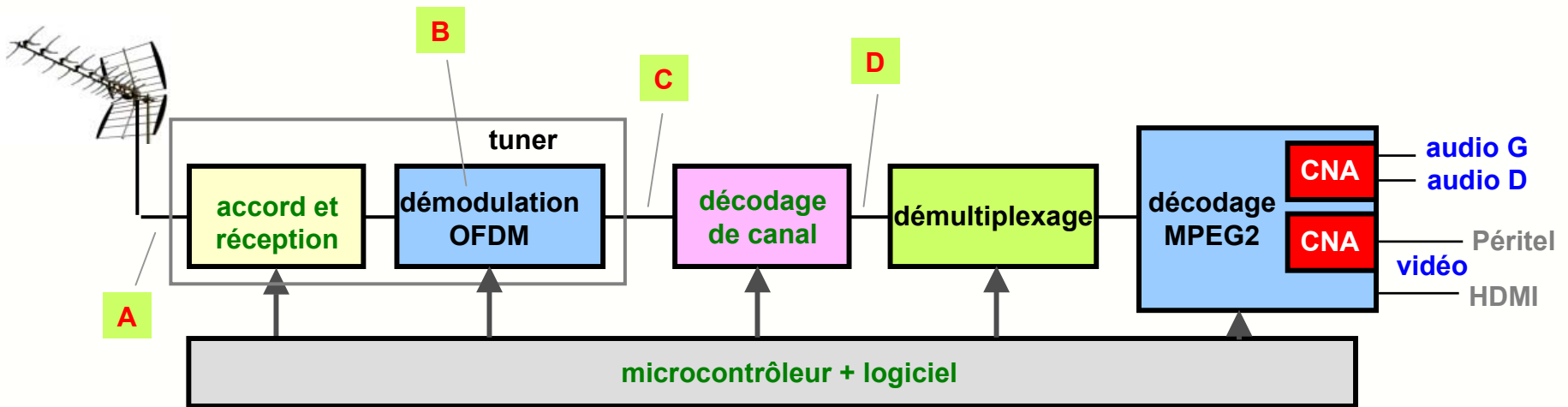


40- Intérieur d'un adaptateur TNT-USB





41 - Les mesures sur le signal TNT



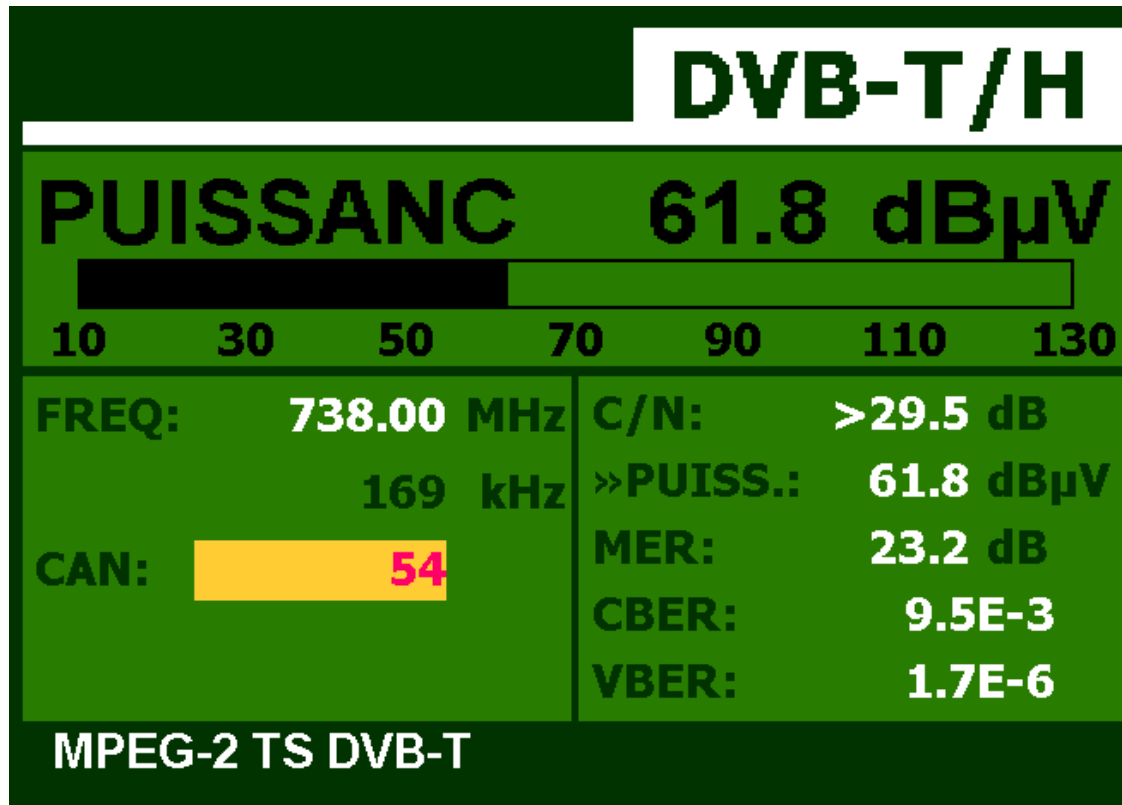
La qualité du signal reçu peut être surveillée aux différentes étapes du traitement du signal :

- qualité du signal à l'antenne (puissance, rapport porteuse/bruit = C/N) en **A**
- qualité de la modulation 64QAM (constellation, MER) en **B**
- qualité du TS reçu avant correction des erreurs (CBER) en **C**
- qualité du TS reçu après correction des erreurs (VBER) en **D**



42- Mesure de la qualité de réception

Un mesureur de champ moderne donne accès à ces mesures de qualité du signal TNT :




On constate que le taux d'erreurs après correction ($VBER = 1,7 \cdot 10^{-6}$ soit 1 bit sur 588240) est plus faible qu'avant correction ($CBER = 9,5 \cdot 10^{-3}$ soit 1 bit sur 105), ce qui est **normal** !

43- Critères de qualité en réception TNT

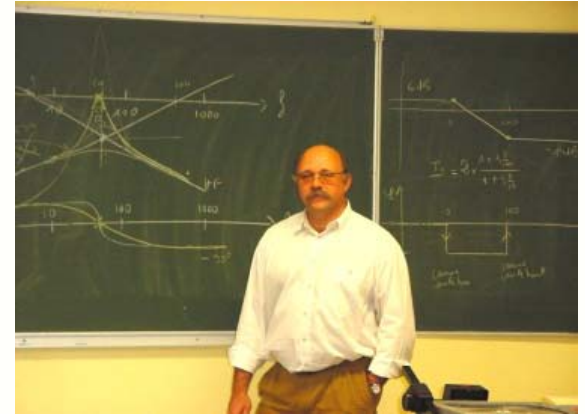
En TV analogique, la qualité se dégrade progressivement selon le niveau reçu.
La TNT présente un seuil brusque entre un fonctionnement correct et une perte totale d'image.

Efficacité de la correction d'erreurs



| Niveau à l'antenne | Qualité de l'image | CBER | VBER |
|-------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------|
| 55 dBμV | très bonne | $<10^{-5}$ | $<10^{-8}$ |
| 50 dBμV | minimum recommandé | 10^{-4} | 10^{-7} |
| 45 dBμV | encore satisfaisante | 10^{-3} | |
| 40 dBμV | apparition de petits défauts | $5 \cdot 10^{-3}$ | 10^{-4} |
| 35 dBμV | apparition de mosaïques, gels | | |
| 30 dBμV | dysfonctionnements insupportables | 10^{-2} | |
| 25 dBμV | écran noir | $>10^{-2}$ | |

Le seuil limite est atteint lorsque le le CBER dépasse les **$5 \cdot 10^{-3}$** soit 1 erreur tous les 200 bits.
Au-delà de ce seuil, la correction d'erreur n'est plus efficace et la qualité se dégrade rapidement.



FIN