



Institut
Mines-Télécom

Techniques de codage de canal, modulation, et standards

13 Mai 2013

Marco Cagnazzo





Plan de la présentation

- **Introduction DVB et modèles de canal**
- Codage de canal
- Modulation
- Standards



Télévision numérique

- **Systeme de télévision basée sur la représentation numérique du signal vidéo**
- **Robustesse au bruit, aux interférences, aux pertes**
 - Codage de canal, modulation numérique
- **Meilleure exploitation de la bande**
 - Codage de source, compression avec et sans pertes

Télévision numérique

Source
analogique

Source numérique

A/D

Impacte

Codage
Source

Codage
Canal

Modulation

Canal numérique

Canal
analogique

Réception
analogique

Réception numérique

D/A

Impacte

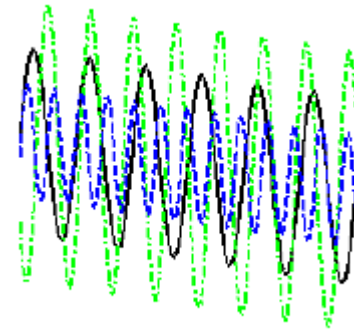
Décodage
Source

Décodage
Canal

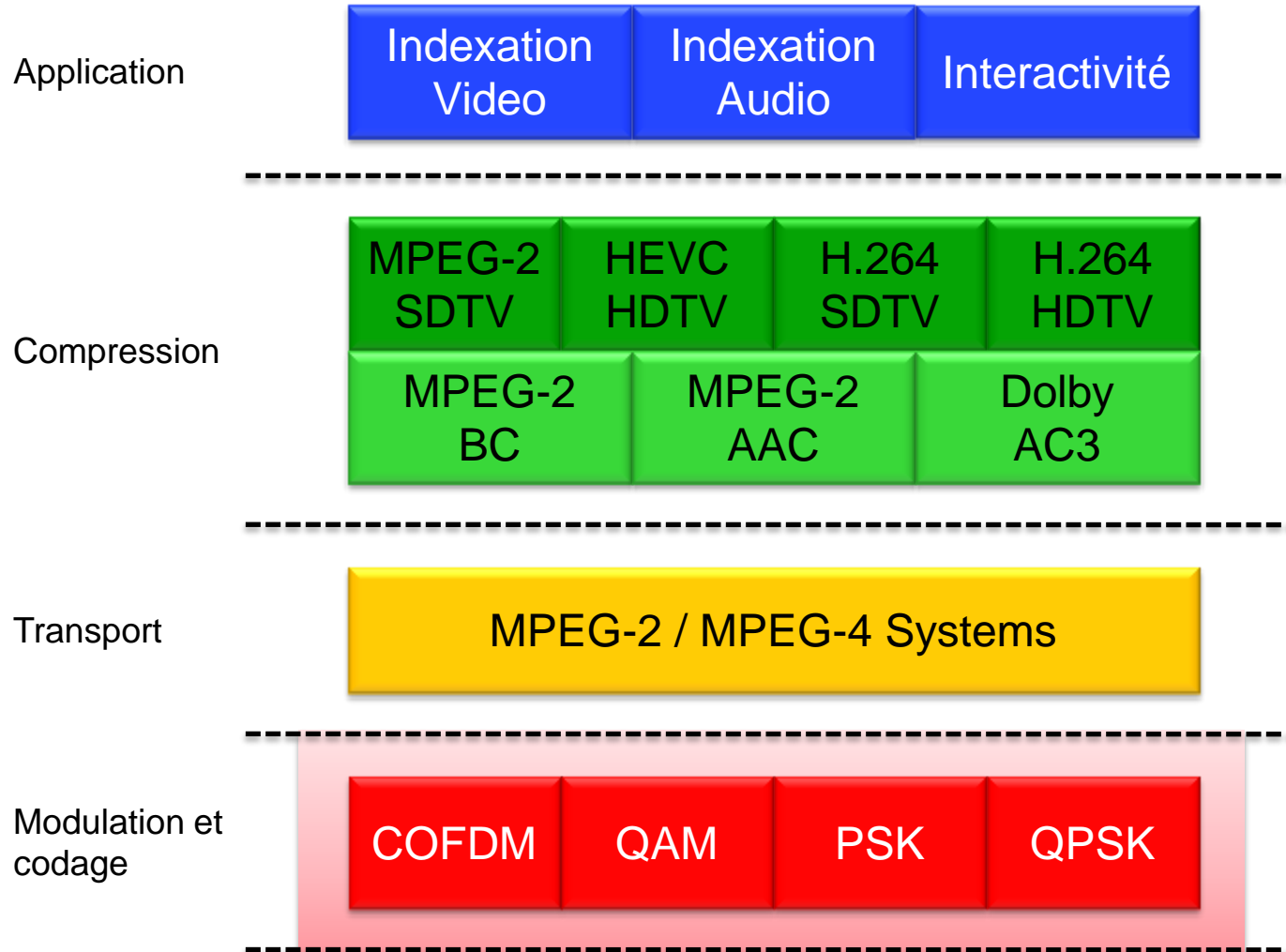
Démodulation

Systemes de TV Numérique: DVB

- Objectif : transmission de la vidéo numérique (après compression)
- Entrée : Paquets contenant la vidéo codé
- Sortie : Signal à envoyer sur le canal de transmission
- Problèmes : bruit, échos, Doppler, fading
- Solutions : codage de canal, entrelacement, modulation

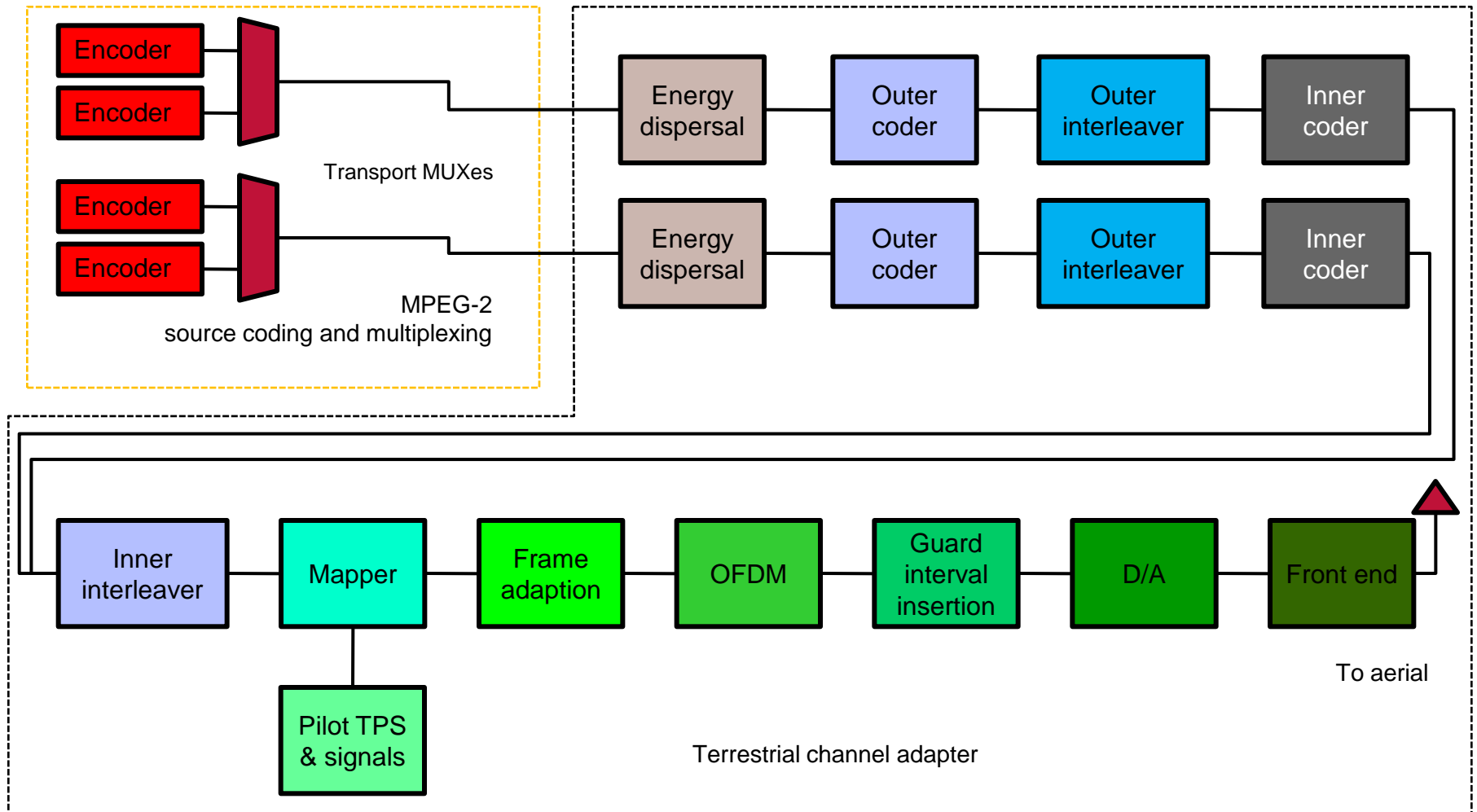


Pile de la TV numérique

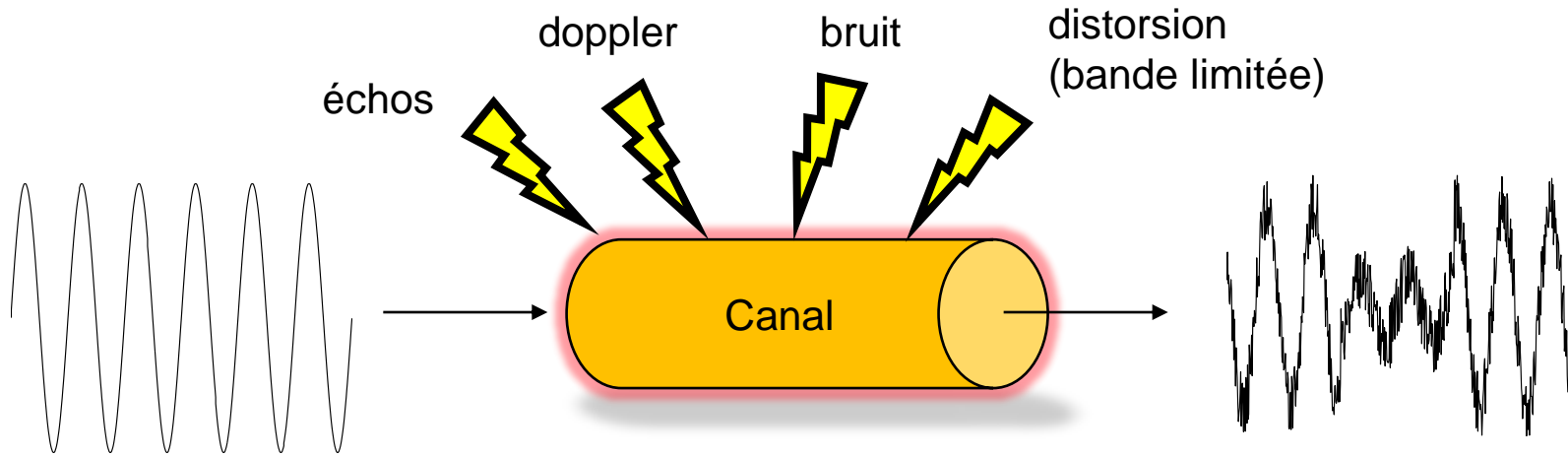


Canal physique

Vue d'ensemble : système DVB-T



Les modèles de canal analogique



C (cable) : transmission par câble

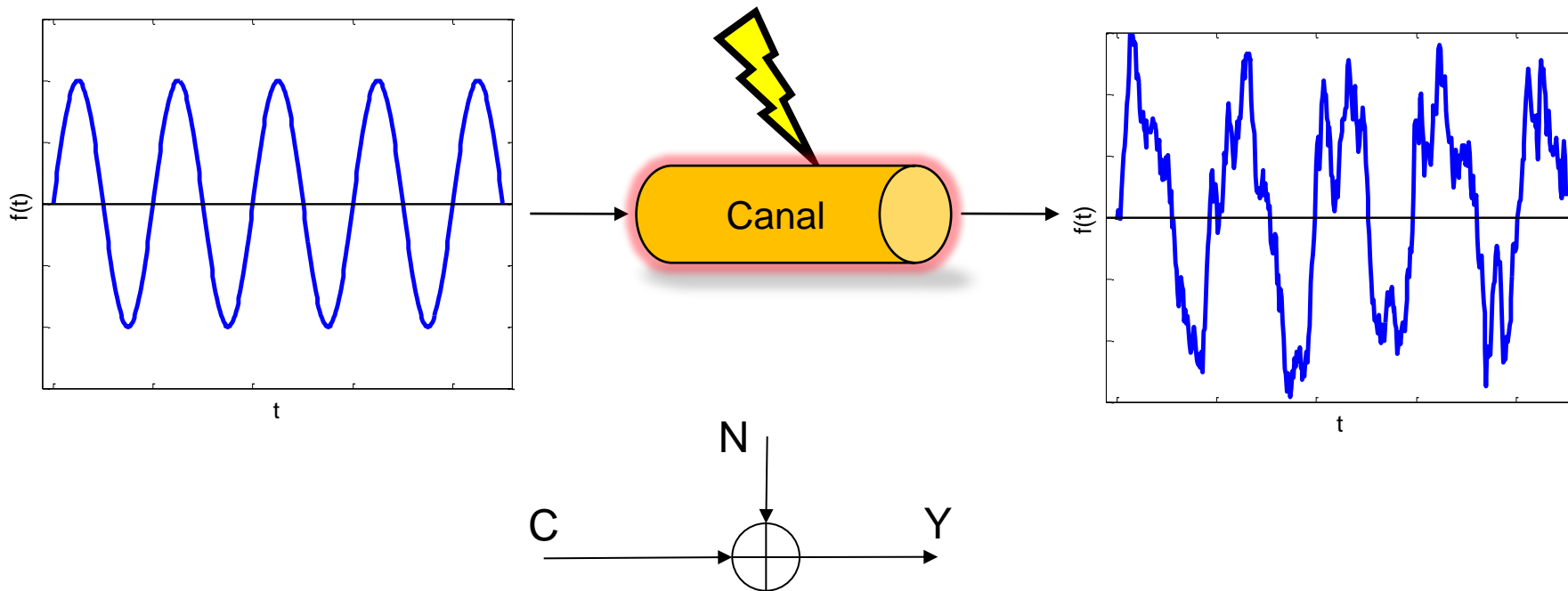
T (terrestrial) : transmission hertzienne fixe

H (handheld) : transmission hertzienne sur mobile

S (satellite) : transmission hertzienne fixe par satellite

SH (satellite-to-handheld) : transmission hertzienne mobile par satellite

Le bruit



Le bruit

■ Le bruit est modelé comme un phénomène aléatoire

- Complexité

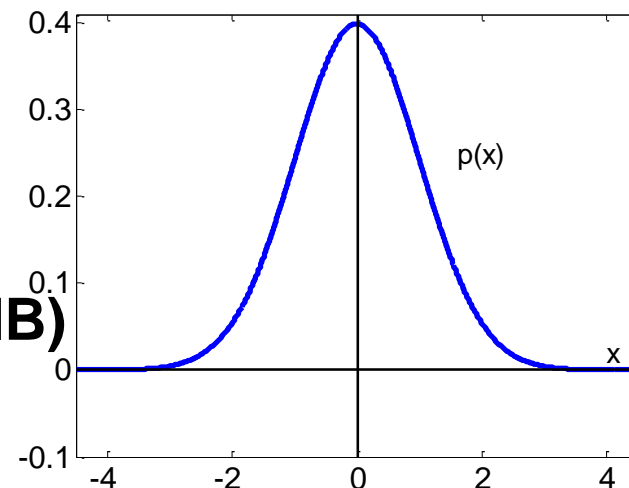
■ Modèle gaussien

- Théorème de la limite centrale : la superposition de causes nombreuses indépendantes engendre une distribution normale

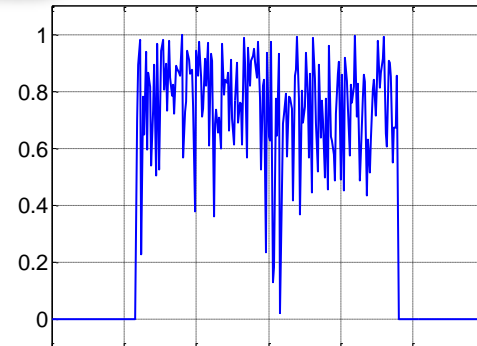
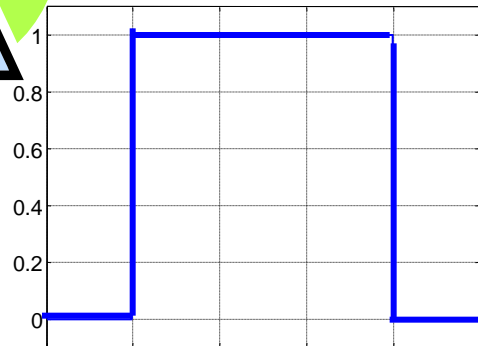
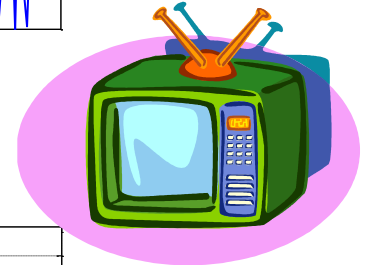
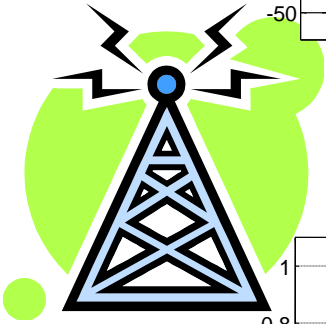
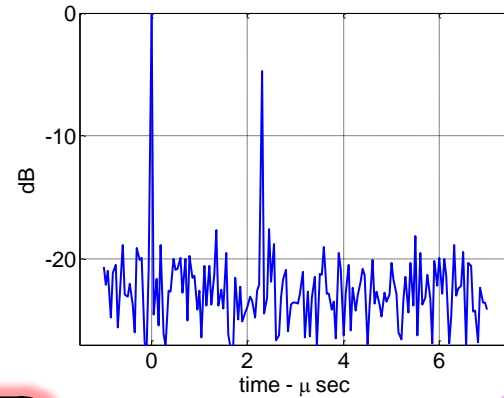
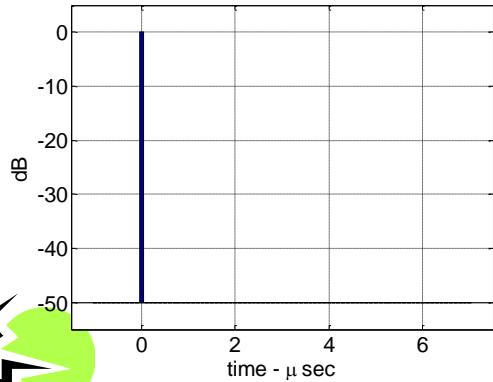
■ Additivité

■ Incorrélation

■ Carrier/Noise Ratio (dB)



Échos et fading

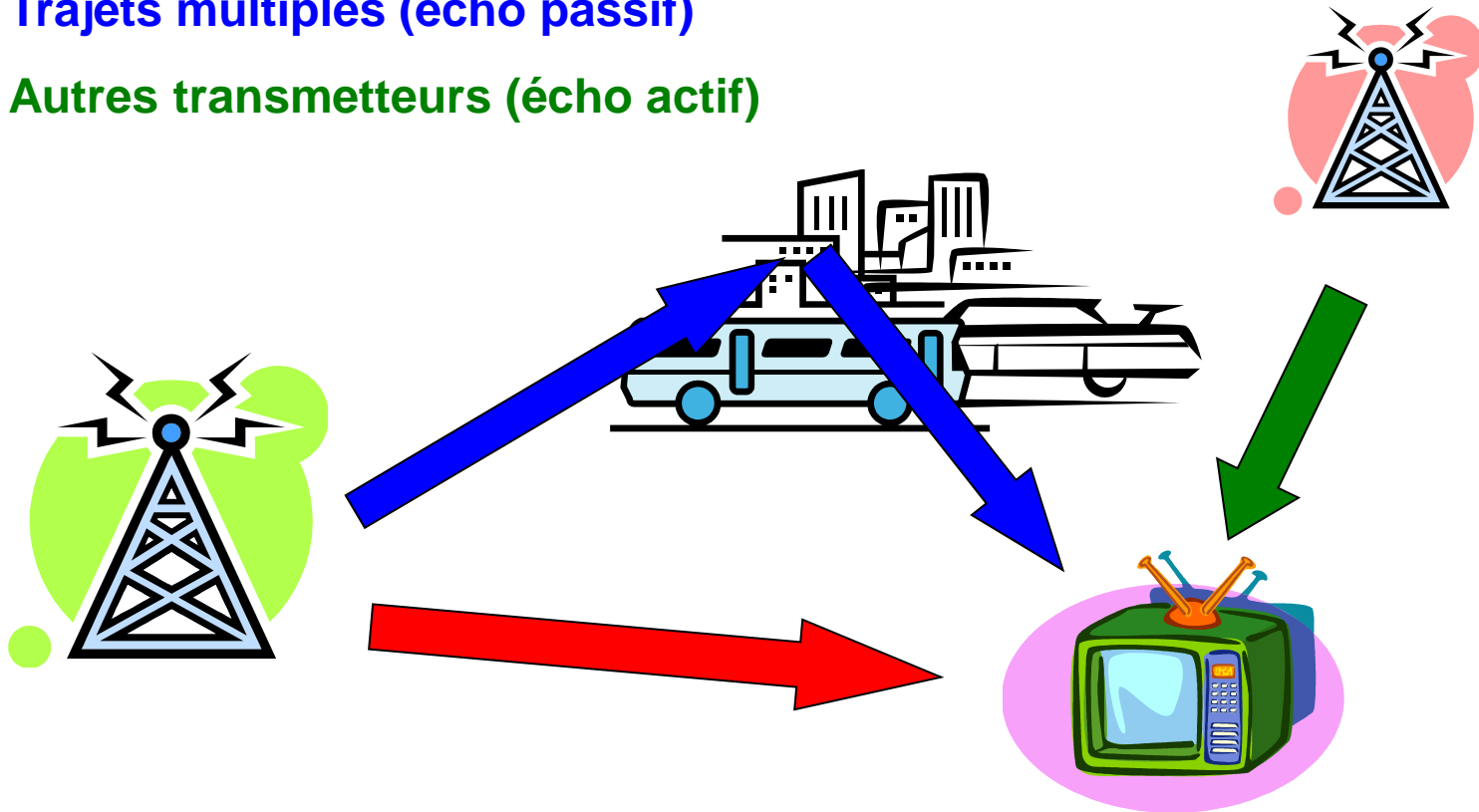


Fading - Echo

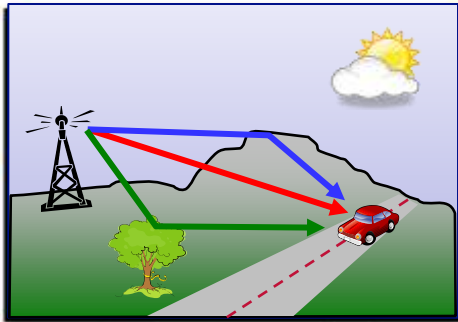
Échos

Cause:

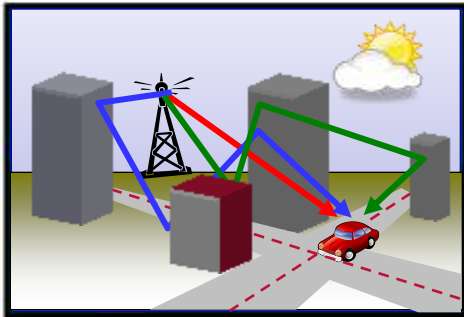
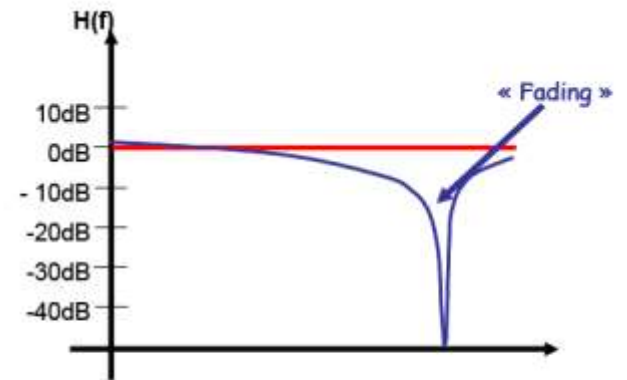
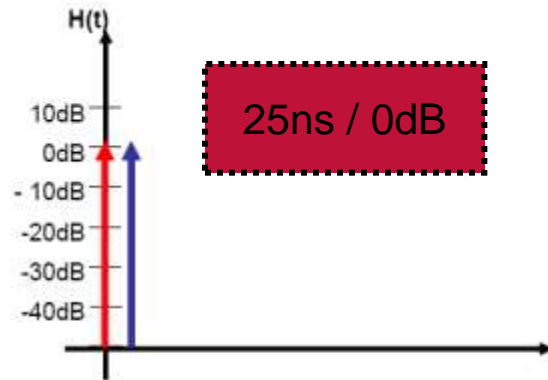
- 1) Trajets multiples (écho passif)
- 2) Autres transmetteurs (écho actif)



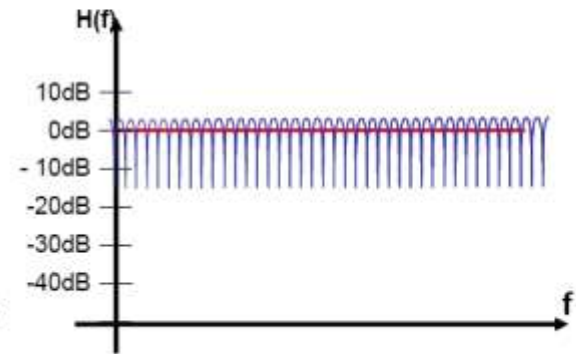
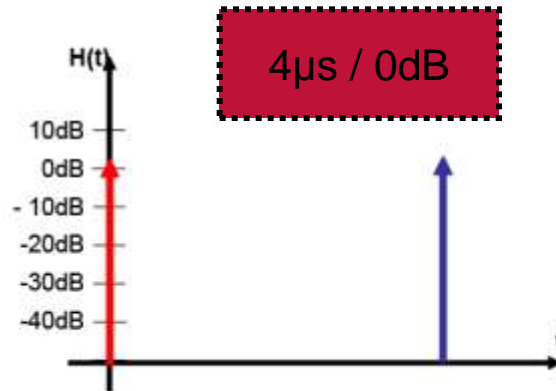
Échos



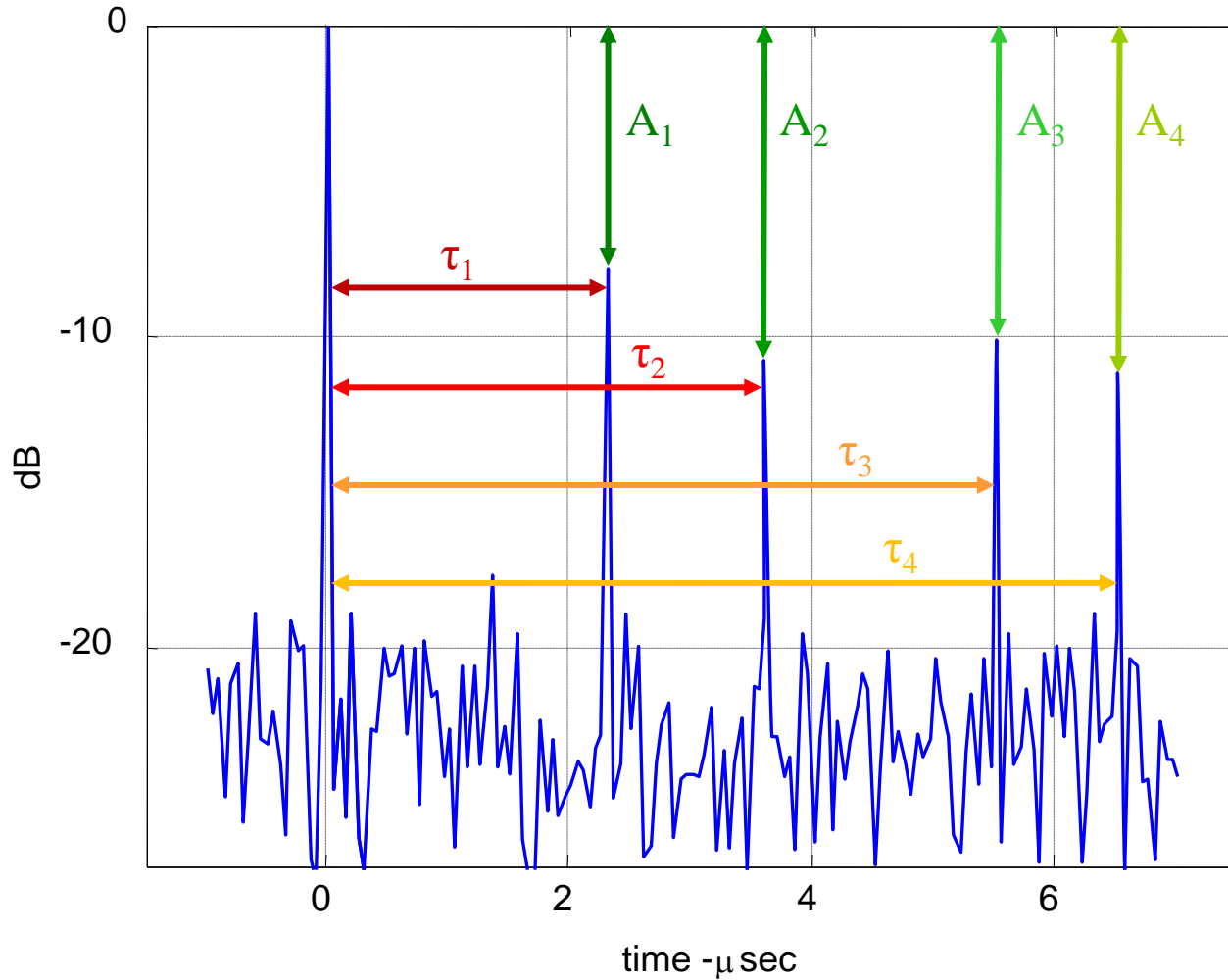
Rural Environment – Short echoes



Urban Environment – Long echoes



Réponse impulsionnelle de un canal avec écho



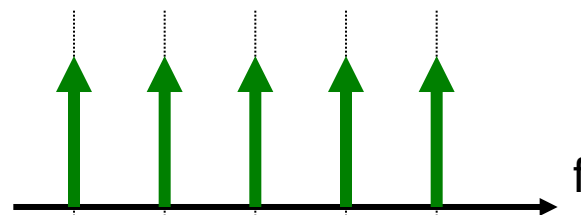
Paramètres du canal

$N(t)$: processus aléatoire, nombre d'échos
 $A_i(t)$: p.a., amplitude de l' i -ème écho
 $\tau_i(t)$: p.a., retard de l' i -ème écho

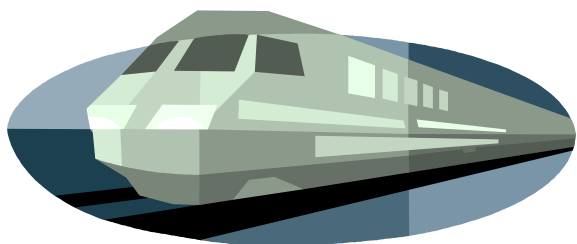
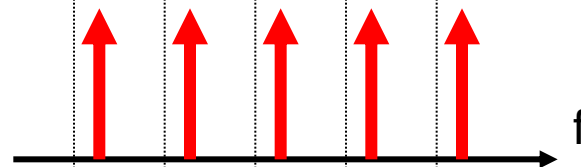
Doppler



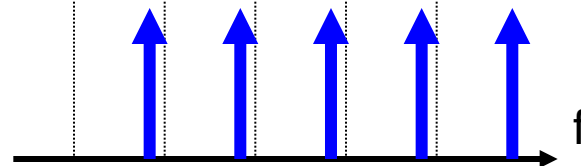
$v=0\text{km/h}$






$v=100\text{km/h}$



$v=300\text{km/h}$



Les perturbations de canal

|  |  |  |
|---|--|---|
| Bruit | Phénomène aléatoire Erreurs de transmission | C, T, H, S, SH |
| Sélectivité en fréquence | Fading | T, H, S, SH |
| Sélectivité en temps | La réponse du canal change | T, H, S, SH |
| Échos | Les échos interfèrent avec le trajet principal | T, H, S, SH |
| Doppler | Translation en fréquence des porteuses | H, SH |
| Obstacles | Long fading | SH |

C (cable) : transmission par câble

T (terrestrial) : transmission hertzienne fixe

H (handheld) : transmission hertzienne sur mobile

S (satellite) : transmission hertzienne fixe par satellite

SH (satellite-to-handheld) : transmission hertzienne mobile par satellite



Plan de la présentation

- Introduction DVB et modèles de canal
- **Codage de canal**
- Modulation
- Standards

Codage de canal

- **Principe : insertion de la redondance**
- **Messages naturels : redondance non contrôlée**
 - Exemple : texte
- **Messages numériques : contrôle de la redondance**
 - Codes à contrôle de parité, codes convolutionnels



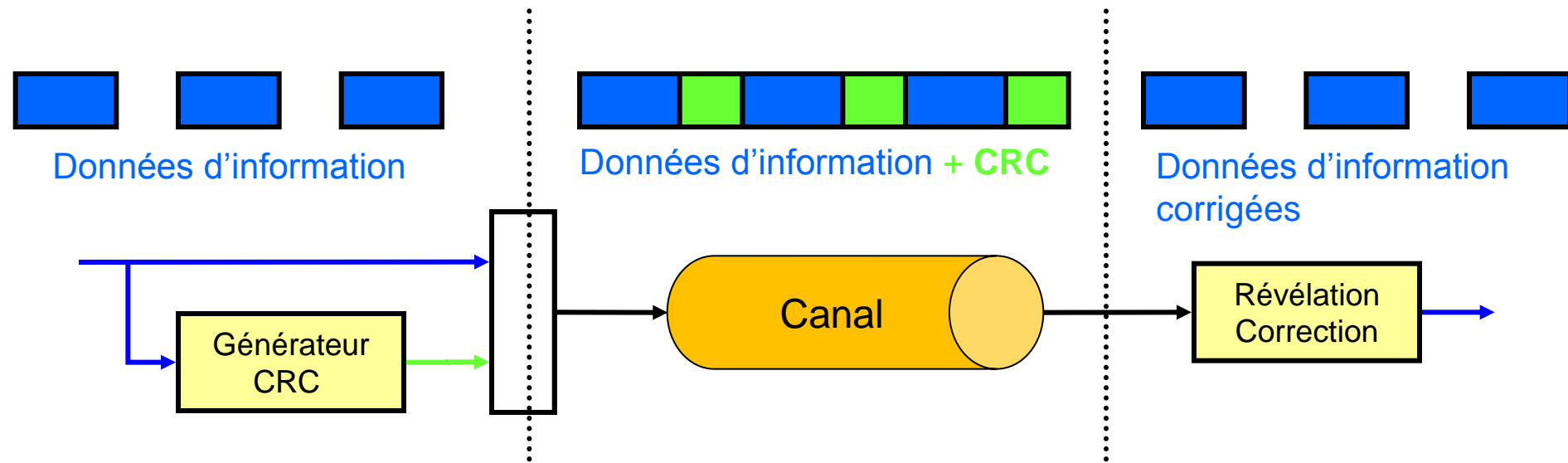
Codage de canal

- **Entrée : octets non protégés**
- **Sortie : octets protégés**

- **Bénéfice : robustesse aux erreurs**
 - Détection des erreurs
 - Correction des erreurs
- **Cout : Complexité, retard, redondance**

- **Méthode : insertion de redondance**

Outer encoding: Reed-Solomon



- Une somme de contrôle (CRC) est calculée pour chaque paquet
- Les données d'information restent accessibles
- Méthode commune en transmission et stockage
- Révélation et correction d'erreurs
- Performances réduites avec une longue suite d'erreurs
- Exemple: (204, 188, 8): 8 octets peuvent être corrigés par paquet

Les codes en blocs

Définition :

- Un code en blocs $C(n,k)$ associe à un bloc de k symboles en entrée un bloc de n symboles en sortie $\mathbf{x} \in X = \{0, 1\}^k \rightarrow \mathbf{y} \in C \subset \{0, 1\}^n$
- f est injective (parfaitement réversible)
- $k < n$
- Par convention, \mathbf{x} est un vecteur ligne
- Taux de codage : $R = k/n < 1$

Les codes en blocs

- X et C sont des espaces vectoriels sur le corps fini $B = \{0, 1\}$, $+_2, \cdot$
- Arithmétique *modulo 2*
- Distance de Hamming : $d(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j)$ nombre de bits différents
 - Espaces euclidiens
- Poids d'un mot de code : $w(\mathbf{c}) = d(\mathbf{c}, \mathbf{0})$
- En général : $d(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j) = w(\mathbf{c}_i + \mathbf{c}_j)$
- Distance minimale d'un code : $d_{\min} = \min_{i \neq j} d(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j)$

Exemple 1 : bit de parité

| | | | | | | | | | | |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Information | | | | | | | | | | Parité |

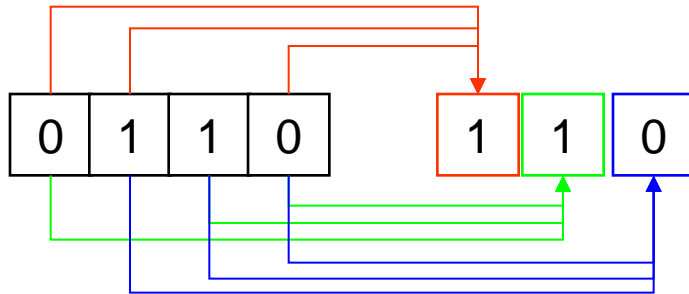
- $k=n-1$ bits d'informations
- 1 bit *de parité* de sorte que le nombre de 1 dans le mot de code soit pair
- Permet de détecter une erreur, mais *deux erreurs passent inaperçues !*
- Taux ? Distance minimale ?

Exemple 2 : code de répétition

- La chaîne de bits est répétée $(2m+1)$ fois
- Ex: 01 → 010101
- $n = (2m+1) k$
- $R = 1/(2m+1)$
- $d_{\min} = (2m+1)$

- Simple, coûteux (R est petit), peu performant
- On peut détecter $2m$ erreurs
- On peut corriger m erreurs
- Le code de répétition est un code de contrôle de parité

Exemple 3 : code de Hamming (4,7)



- Le bit de parité en position 5 contrôle les positions 1,2,4,5
- Le bit de parité en position 6 contrôle les positions 1,3,4,6
- Le bit de parité en position 7 contrôle les positions 2,3,4,7
- Pour transmettre $6=0110$, on envoie le mot de code 0110110
- Si on reçoit **00**10110, on vérifie les parités
 - Bits 1,2,4,5 0001 pas OK
 - Bits 1,3,4,6 0101 OK
 - Bits 2,3,4,7 0010 pas OK
- La position de l'erreur est 2, car, comme le 4, il est concerné par tous les deux tests échoués. Mais 4 ne peut pas être erroné, car le test 2 est correct
- Possibilité de corriger une erreur.
- $R = 4/7$, $d_{\min} = 3$

Codes linéaires

- En pratique, on se restreint au cas linéaire où les opérations de codage et de décodage peuvent être effectuées comme des multiplications matricielles

$$f : \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y} = \mathbf{xG}$$

- f est un application linéaire entre les espaces vectoriels X des messages et C des mots de code
- G est dite matrice génératrice du code ; elle a taille $n \cdot k$

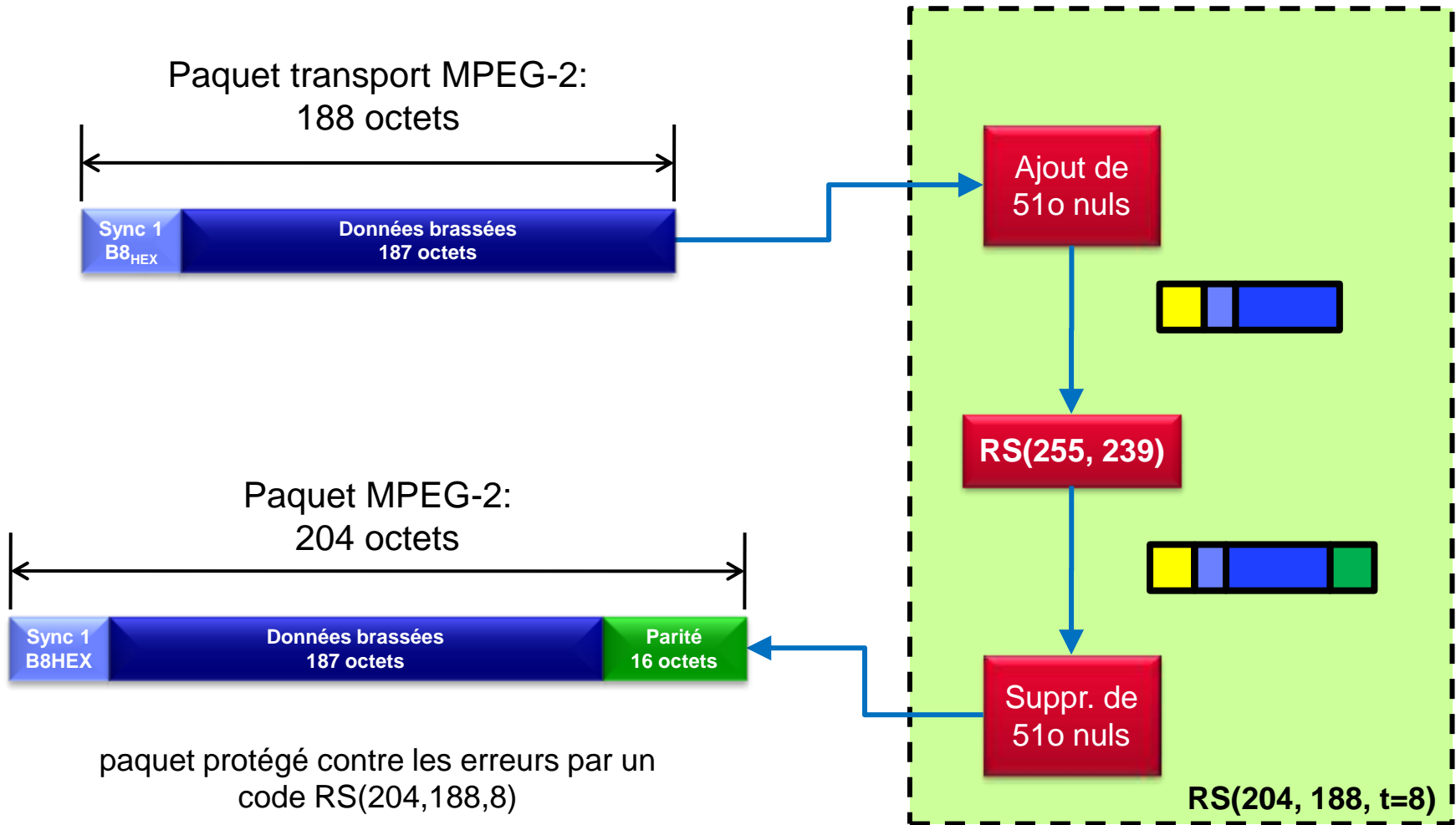
Codes cycliques

- **Sous-ensemble des codes linéaires**
- **Un code C est cyclique si pour tout mot de code $(c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n-1})$ alors le mot de code shifté $(c_{n-1}, c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n-2})$ appartient au code**
- **Ex: $\{000, 011, 101, 110\}$**
- **Intérêt : codage/décodage très simples**
- **Implémentation très efficace par registres à décalage**

Codes de Reed-Solomon

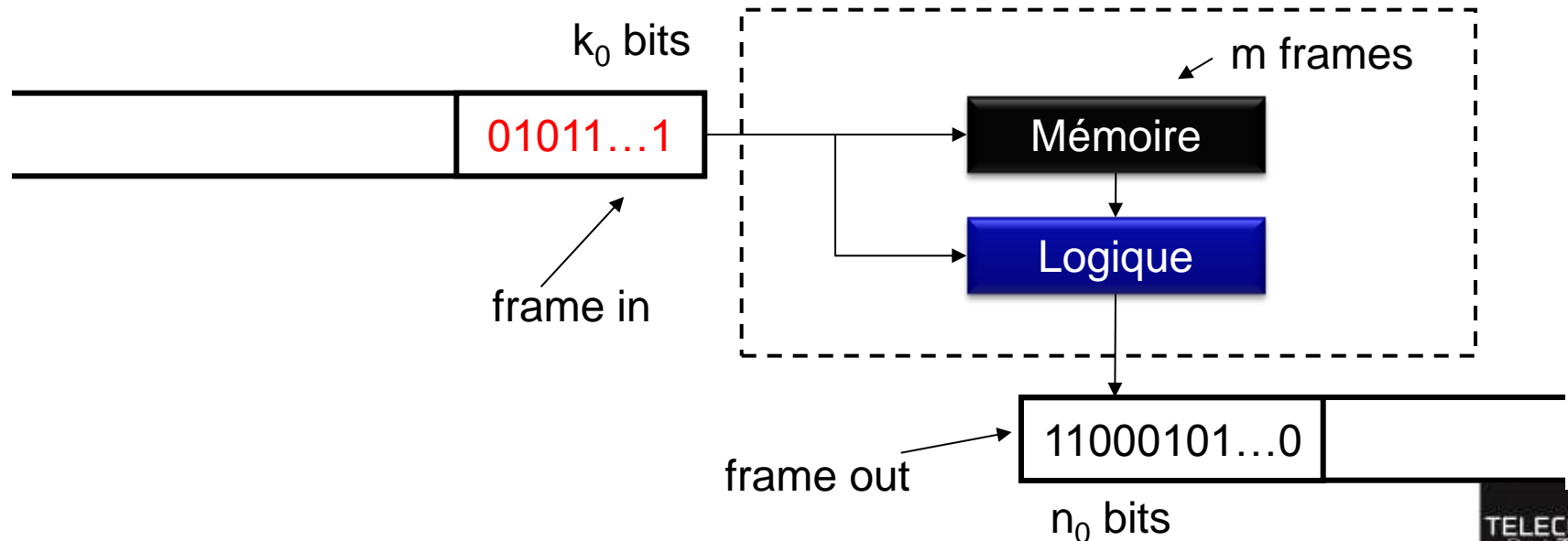
- Code cyclique définis sur un alphabet d'octets.
- Paramètres : $n = 2^m - 1$ $d_{\min} = n - k + 1$
- Il peut corriger jusqu'à $t = \text{floor}\left(\frac{n-k}{2}\right)$ erreurs dans un bloc de n éléments q -aires.
- Bien adapté pour corriger des erreurs en rafales (burst errors)
- Utilisé entre autre dans le codage des CD-ROM et en télévision numérique
- Au sein de DVB, utilisation du code RS(255,239,t=8) - raccourci en RS(204,188,t=8)- qui permet de corriger 8 octets erronés à l'aide de 16 octets de redondance

Application DVB



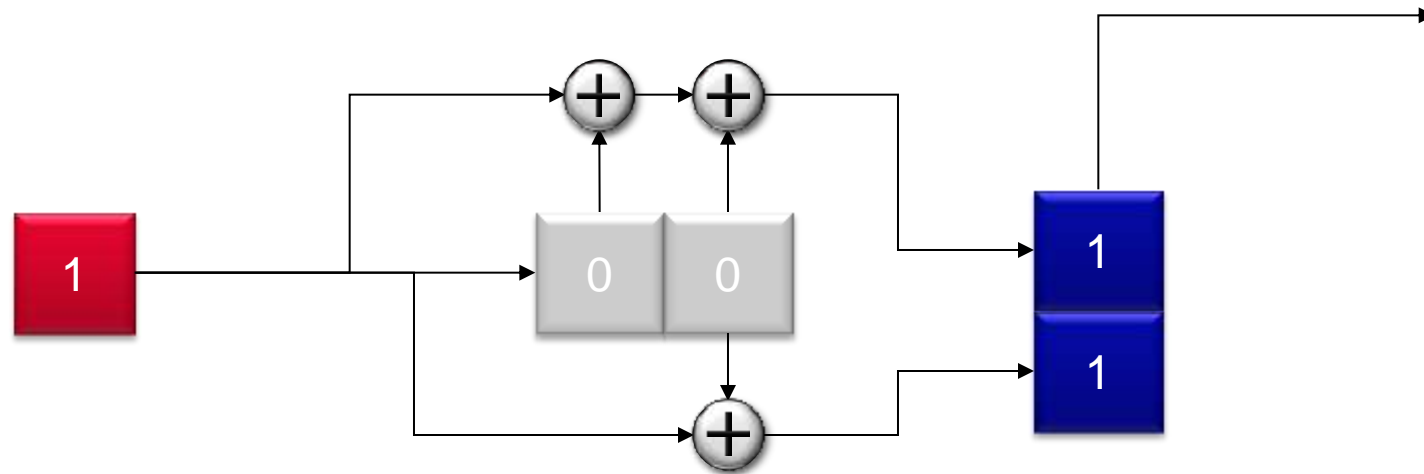
Inner coder: Codeur convolutif

- Reed-Solomon : codage par blocks (sans mémoire)
- On peut penser à un codage avec mémoire
- Taux de codage : $R = k_0 / n_0$



Codeurs convolutifs

- Codeur réalisé avec des registres à décalage et des ou exclusifs

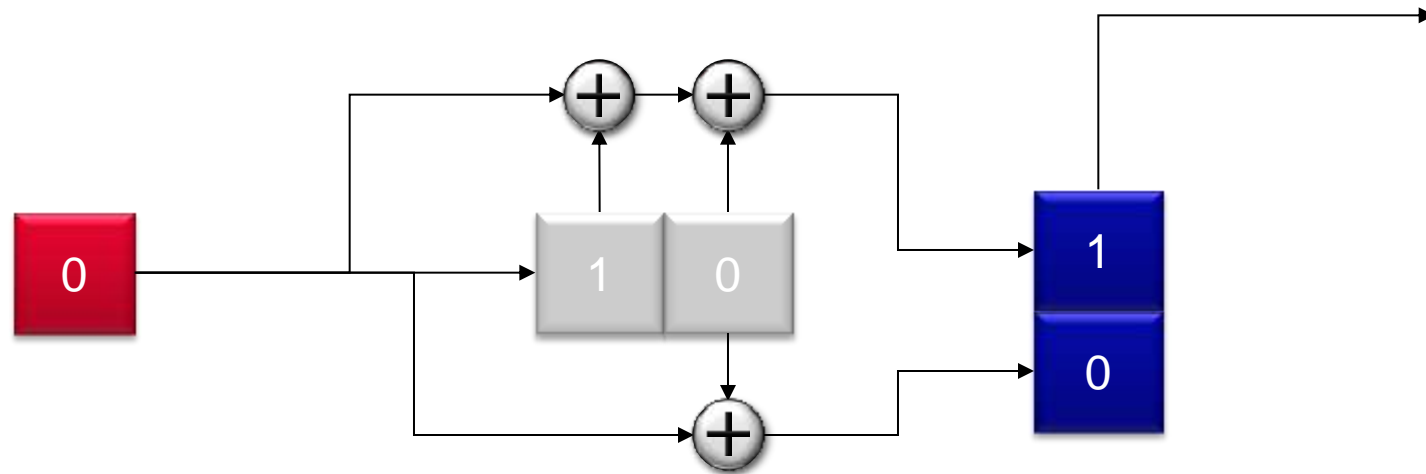


Input: 1 0 0 1

Output: 11

Codeurs convolutifs

- Codeur réalisé avec des registres à décalage et des ou exclusifs

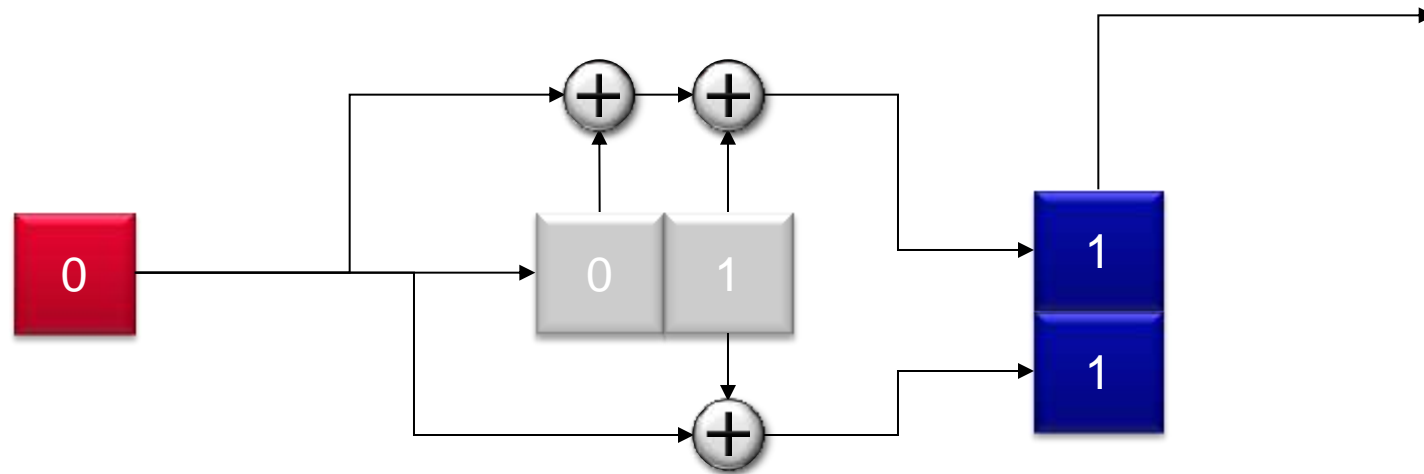


Input: 1 0 0 1

Output: 11 10

Codeurs convolutifs

- Codeur réalisé avec des registres à décalage et des ou exclusifs

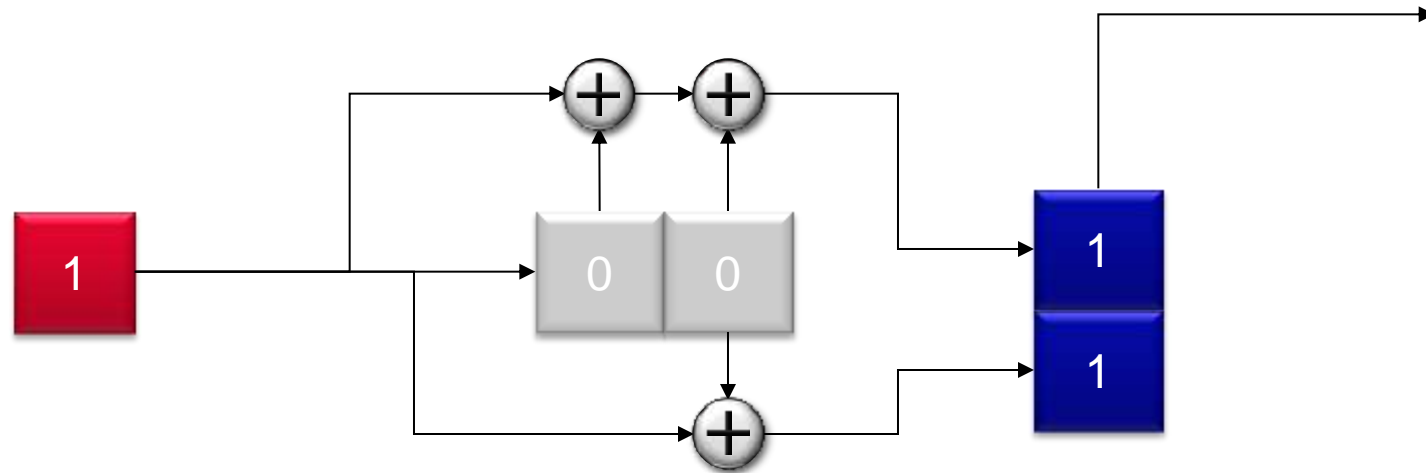


Input: 1 0 0 1

Output: 11 10 11

Codeurs convolutifs

- Codeur réalisé avec des registres à décalage et des ou exclusifs

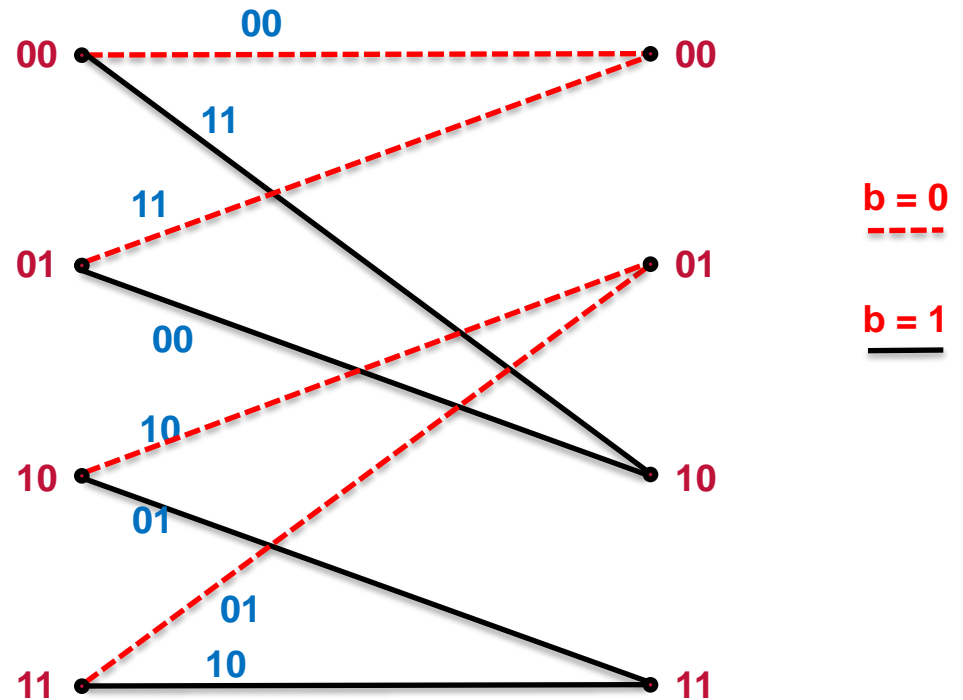
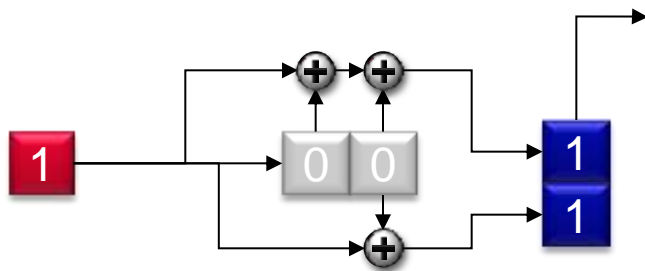


Input: 1 1 0 1

Output: 11 10 11 11

Représentation treillis

- Représentation très utile pour le décodage
- Les nœuds du treillis représentent les différents états possibles du codeur
- Les branches, les différentes transitions d'un nœud à l'autre
- Ex: partant de l'état 00, l'arrivée d'un 0 mène le codeur à l'état 00, et l'arrivée d'un 1 mène le codeur à l'état 10. Sur chaque branche on trouve le mot codé.



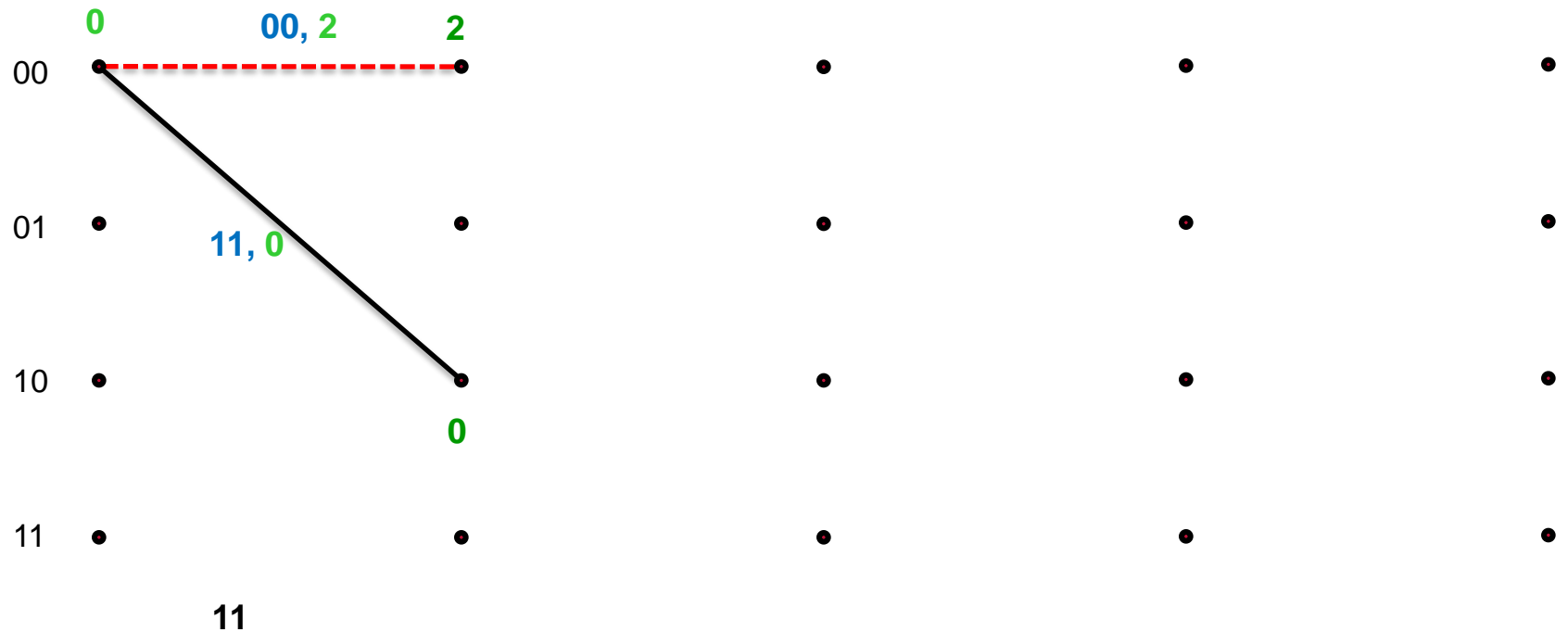
Décodage – algorithme de Viterbi

- Données avant codage : 1001
- Après codage: 11 10 11 11
- Données reçues: 11 00 11 11

Algorithme :

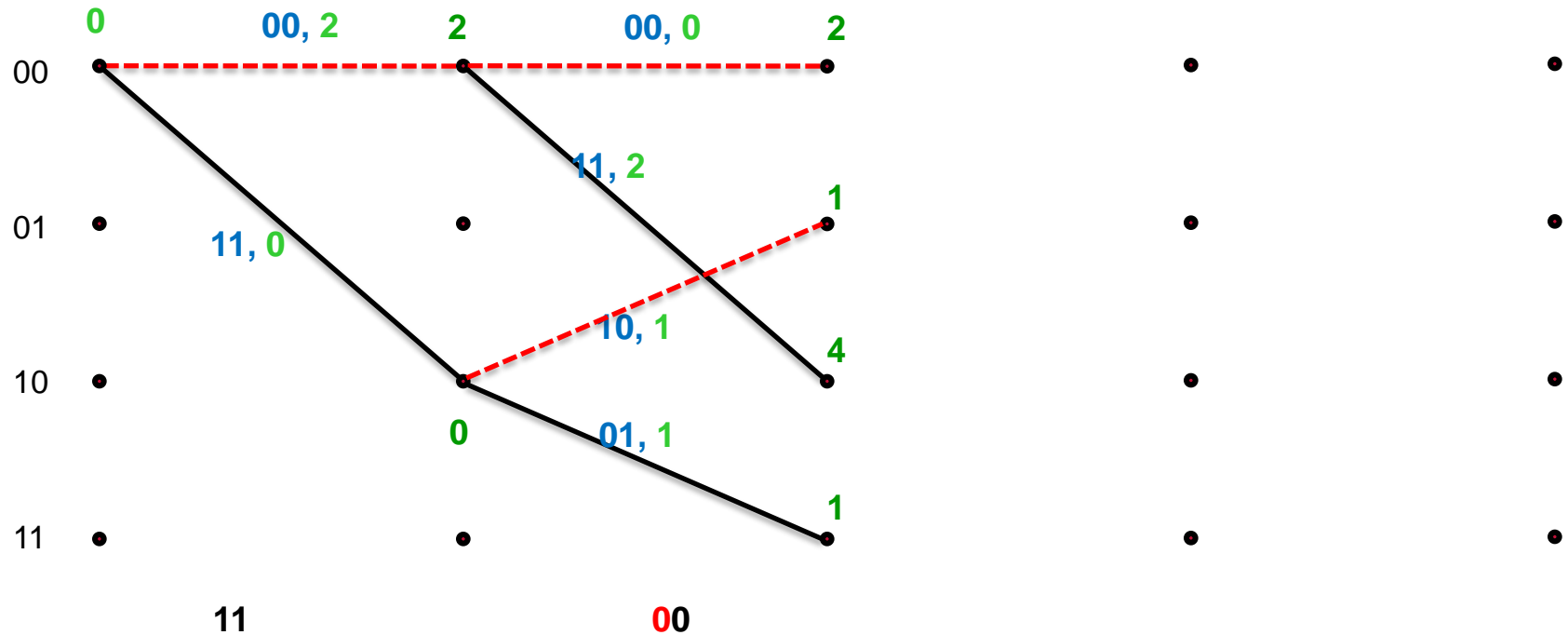
- 1) On part de l'état 00
- 2) On parcourt le treillis en évaluant la probabilité à posteriori (nb bit erronés qui auraient déterminé la même sortie)
- 3) À chaque pas on retient que les parcours les plus probables
- 4) À la fin on choisit le parcours le plus probable

Décodage – algorithme de Viterbi



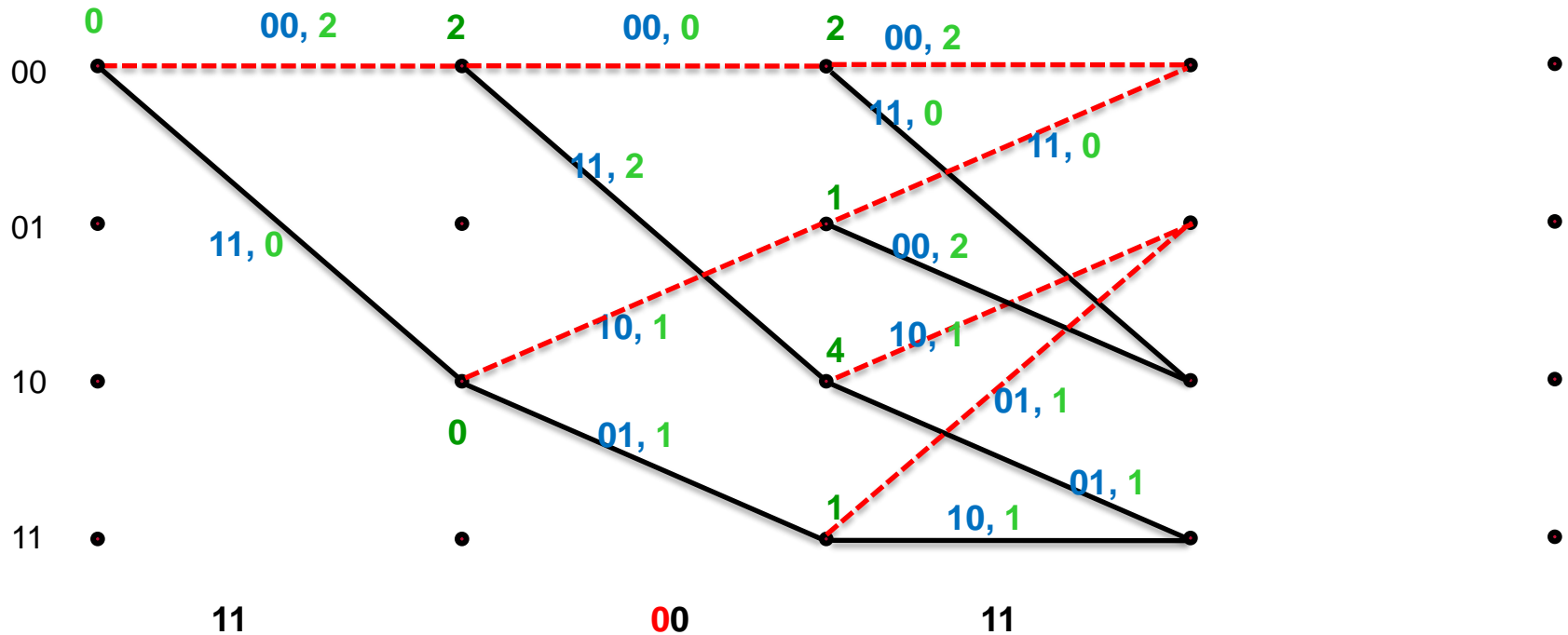
2 possibles chemins

Décodage – algorithme de Viterbi



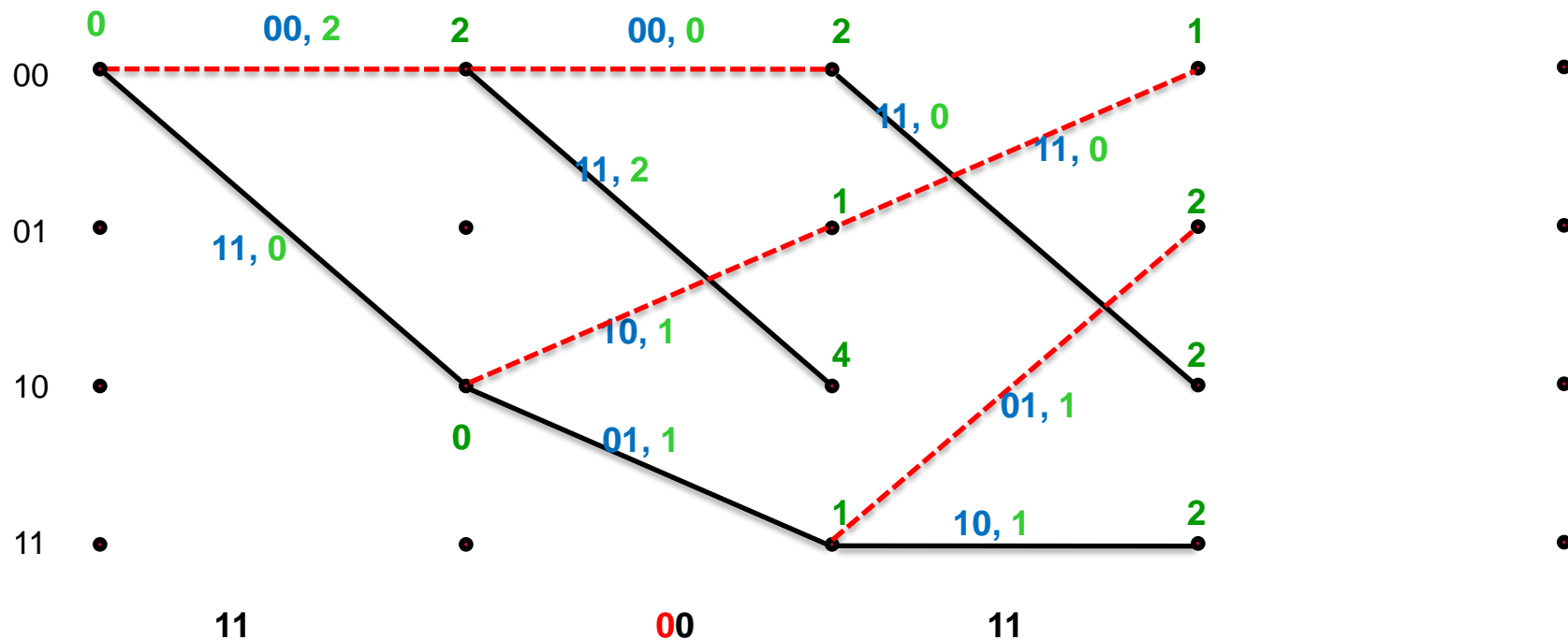
4 possibles chemins

Décodage – algorithme de Viterbi



8 possibles chemins

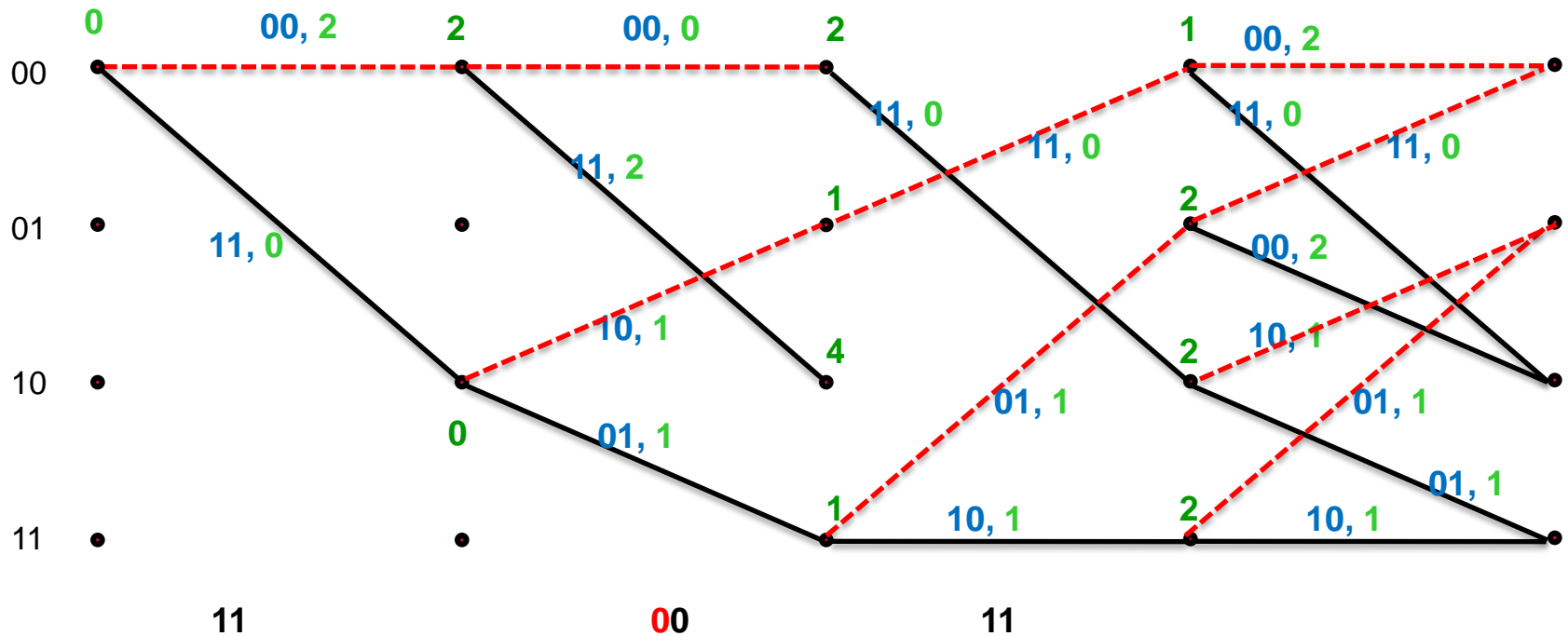
Décodage – algorithme de Viterbi



Un seul chemin retenu par état !

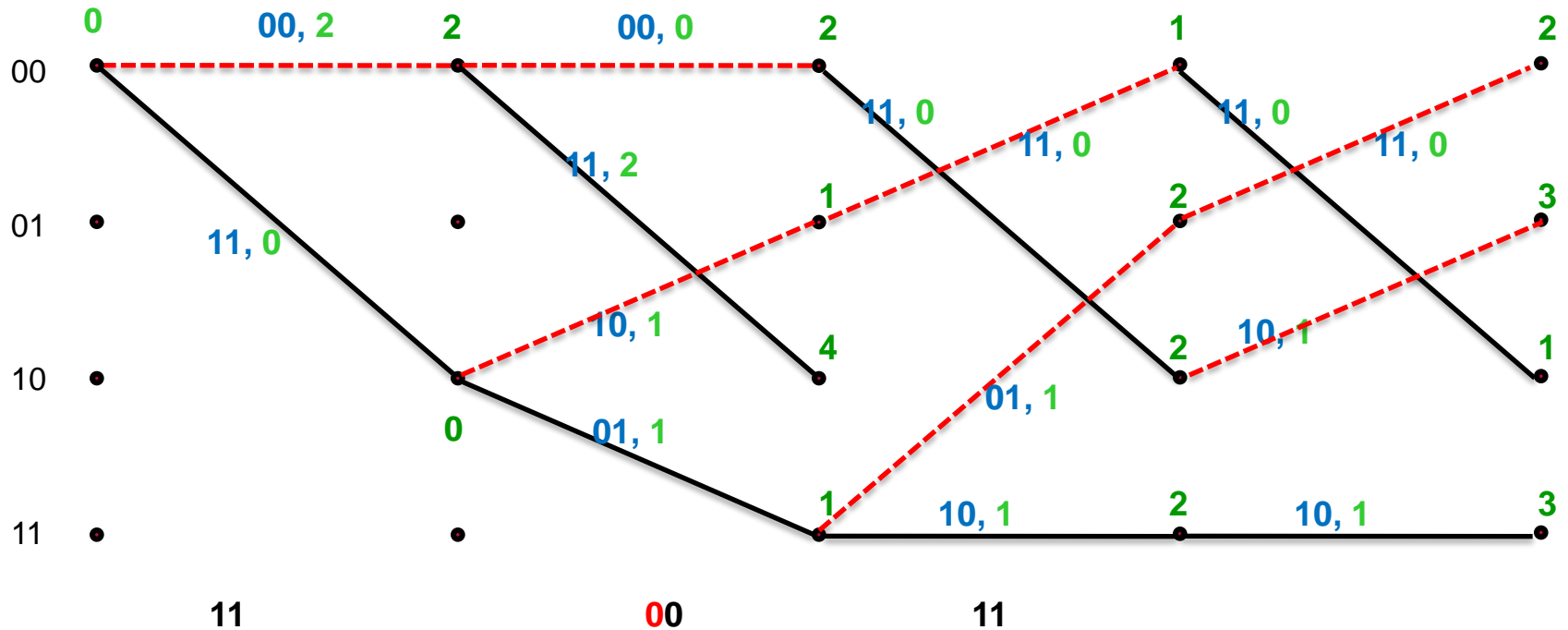
4 possibles chemins

Décodage – algorithme de Viterbi



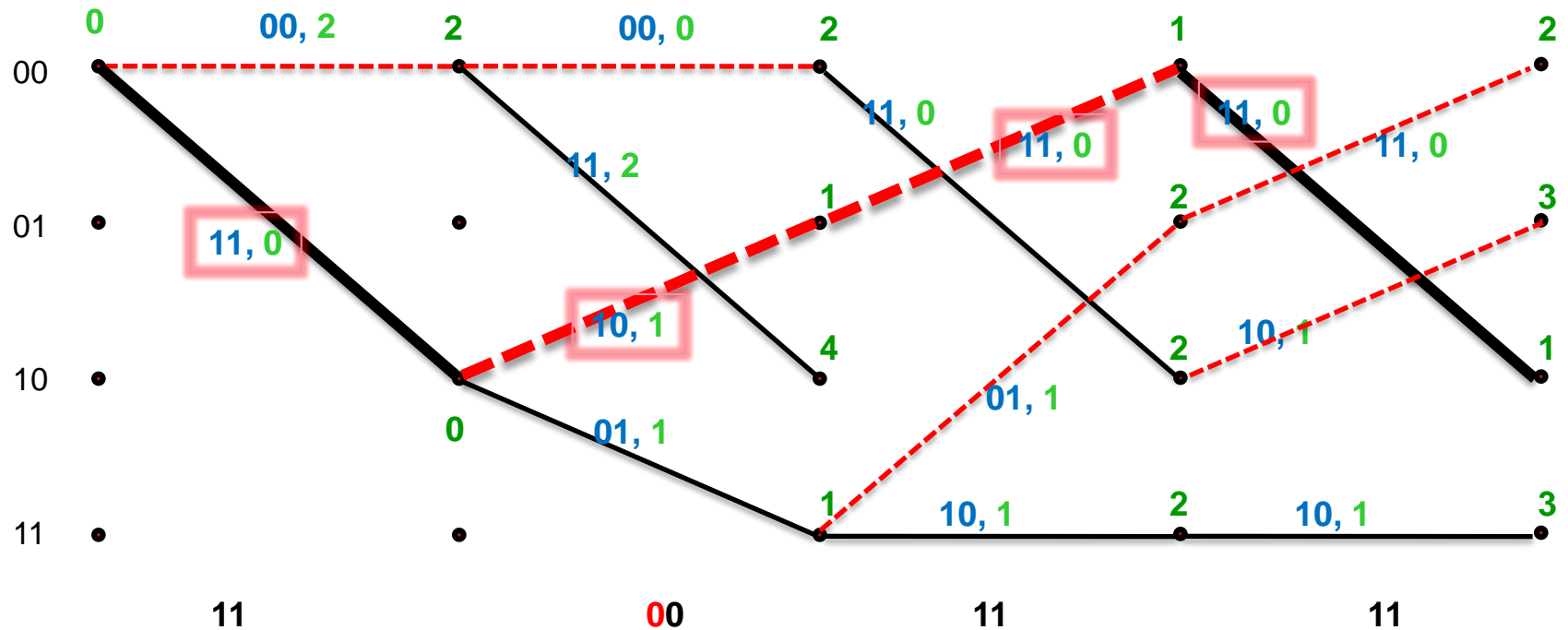
8 possibles chemins

Décodage – algorithme de Viterbi



4 possibles chemins

Décodage – algorithme de Viterbi



Chemin retenu

Décodage – algorithme de Viterbi

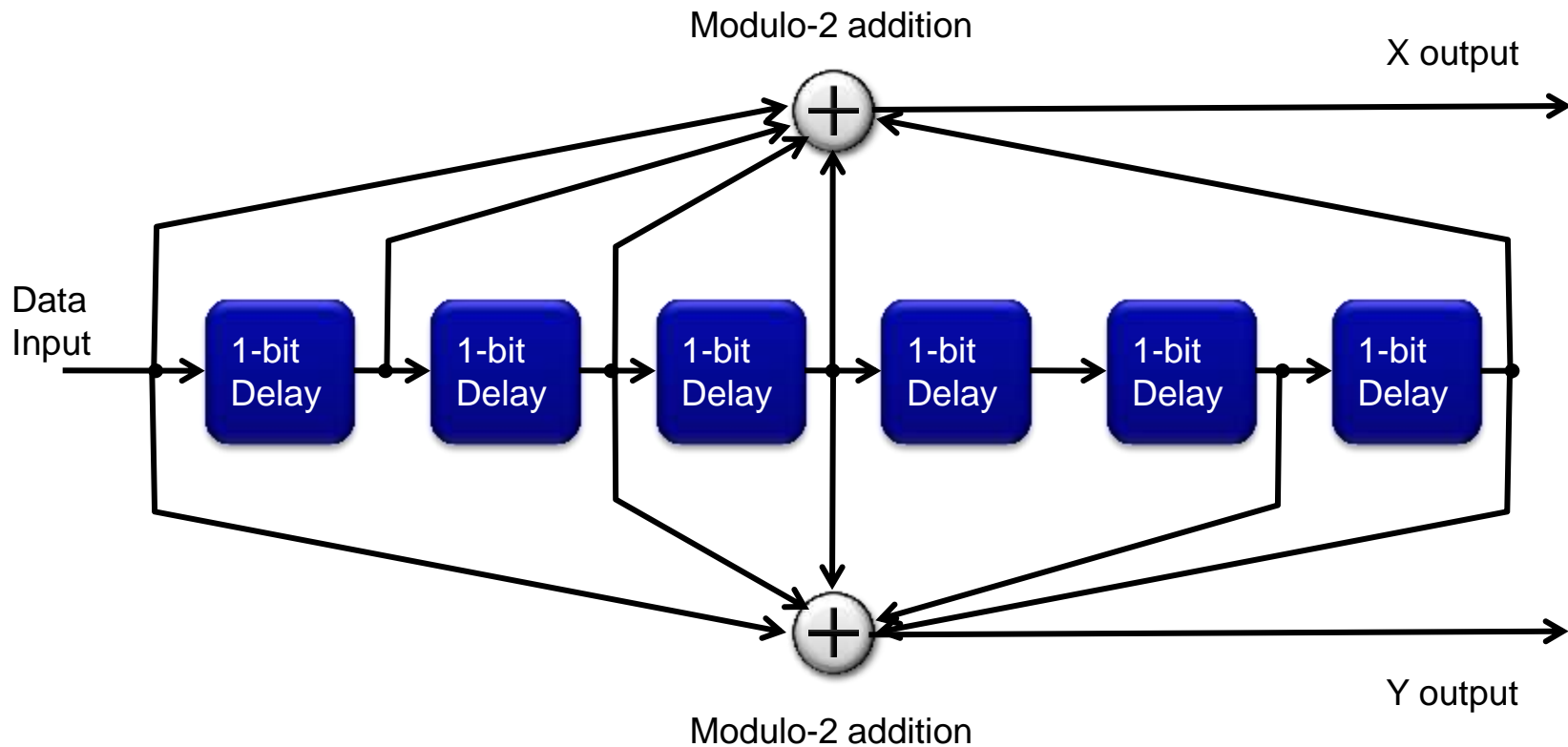
- **Complexité linéaire avec la taille des données**
- **Décodage optimale si on peut attendre la fin de la séquence**
 - Décodage sous-optimale mais avec des excellentes performances si on attend $\approx 5 \cdot m$ symboles (convergence des chemins)



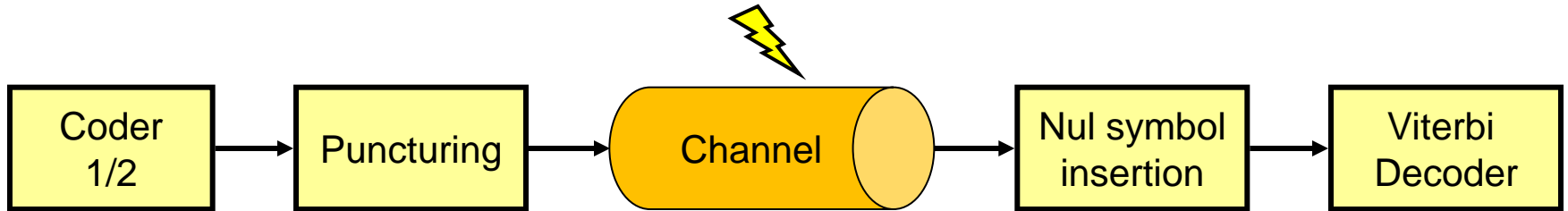
Codeur convolutif DVB

- **Deux canaux en sortie avec le même débit que l'entrée**
- **Taux de codage (rendement) 1/2**
 - Redondance 100%
 - Haute capacité de détection d'erreurs
- **Implémentation très simple**
- **On peut réduire la redondance en écartant délibérément certains bits (poinçonnage)**

Inner coder: Codeur convolutif



Poinçonnage



Data

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 |
|----|----|----|----|----|----|

Encoded data
Rate = 1/2

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 |
| Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 |

Punctured data
Rate = 3/4

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| X1 | Y1 | Y2 | X3 | X4 | Y4 | Y5 | X6 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|

Received data
with null symbol

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| X1 | 0 | X3 | X4 | 0 | X6 |
| Y1 | Y2 | 0 | Y4 | Y5 | 0 |

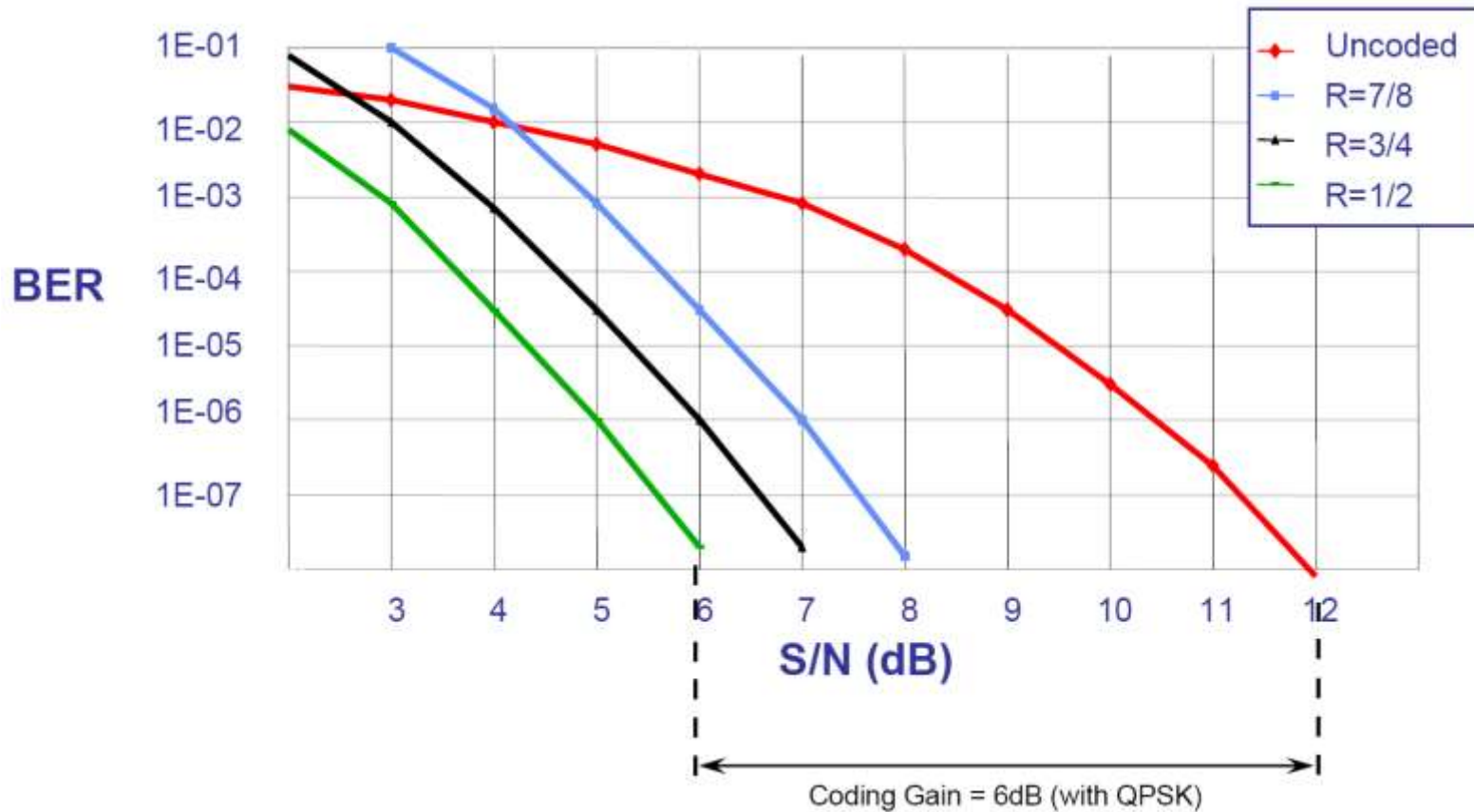
Data

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 |
|----|----|----|----|----|----|

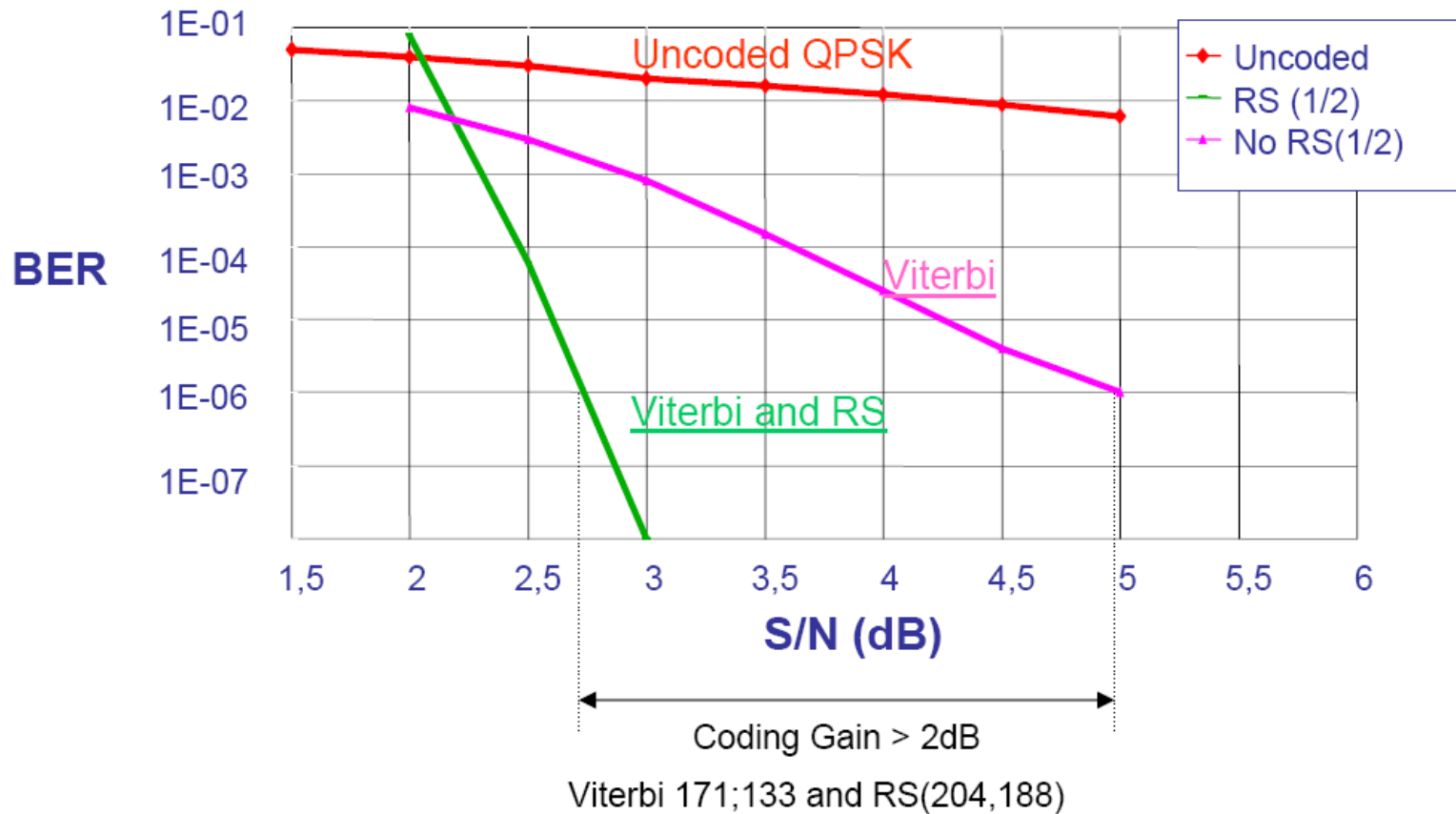
Schémas de poinçonnage

| | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1/2 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 |
| | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | X6 | Y7 |
| 2/3 | X1 | 0 | X3 | 0 | Y5 | 0 | X7 |
| | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | X6 | Y7 |
| 3/4 | X1 | 0 | X3 | X4 | 0 | X6 | X7 |
| | Y1 | Y2 | 0 | Y4 | Y5 | 0 | Y7 |
| 5/6 | X1 | 0 | X3 | 0 | X5 | X6 | 0 |
| | Y1 | Y2 | 0 | Y4 | 0 | Y6 | Y7 |
| 7/8 | X1 | 0 | X3 | 0 | X5 | 0 | X7 |
| | Y1 | Y2 | 0 | Y4 | 0 | Y6 | 0 |

Performance du codeur convolutif



Performance convolutif + Reed Solomon

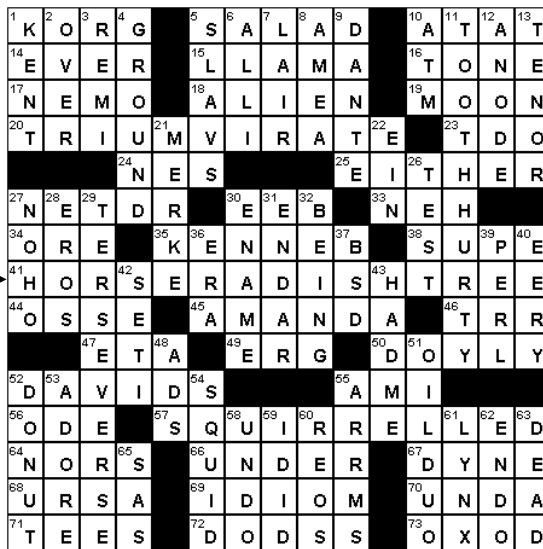


Turbo Coding

- **Créé dans les années 90 à ENST-Bretagne**
- **Implémenté en 3G-Mobile: UMTS, CDMA2000, W-CDMA**
- **Adopté en DVB-RCS, DVB-RTC, DVB-SH**
- **Excellente capacité de correction d'erreurs**
- **Codage**
 - Deux codeurs convolutif
 - Un codeur traite les données d'entrée
 - L'autre traite les données entrelacées
- **Décodage**
 - Algorithme itérative
 - Deux décodeurs en parallèle

Principe du Turbo Coding

Original word



Across

- 1 Keyboard maker
- 5 Fruit or cucumber
- 10 Star War's Vehicle
- 14 "Worst episode ____"
- 15 Winamp mascot
- 16 Pitch
- 44 NASA's clever astronomy experiment?
- 45 Last name Hugginkiss
- 46 Investment yld.
- 47 Greek letter
- 49 Unit of energy

Redundancy #1
Across

Down

- 1 Newsman Brockman
- 2 Clock lead-in
- 3 Two notes
- 4 The third prong
- 5 Eastern European people
- 6 "____ Wanna Do"
- 7 Den
- 32 Human follower
- 36 Baseball Stat
- 37 UNIX variant
- 39 CGI scripting language
- 40 Creepy
- 42 Alien-seeking org.

Redundancy #2
Down

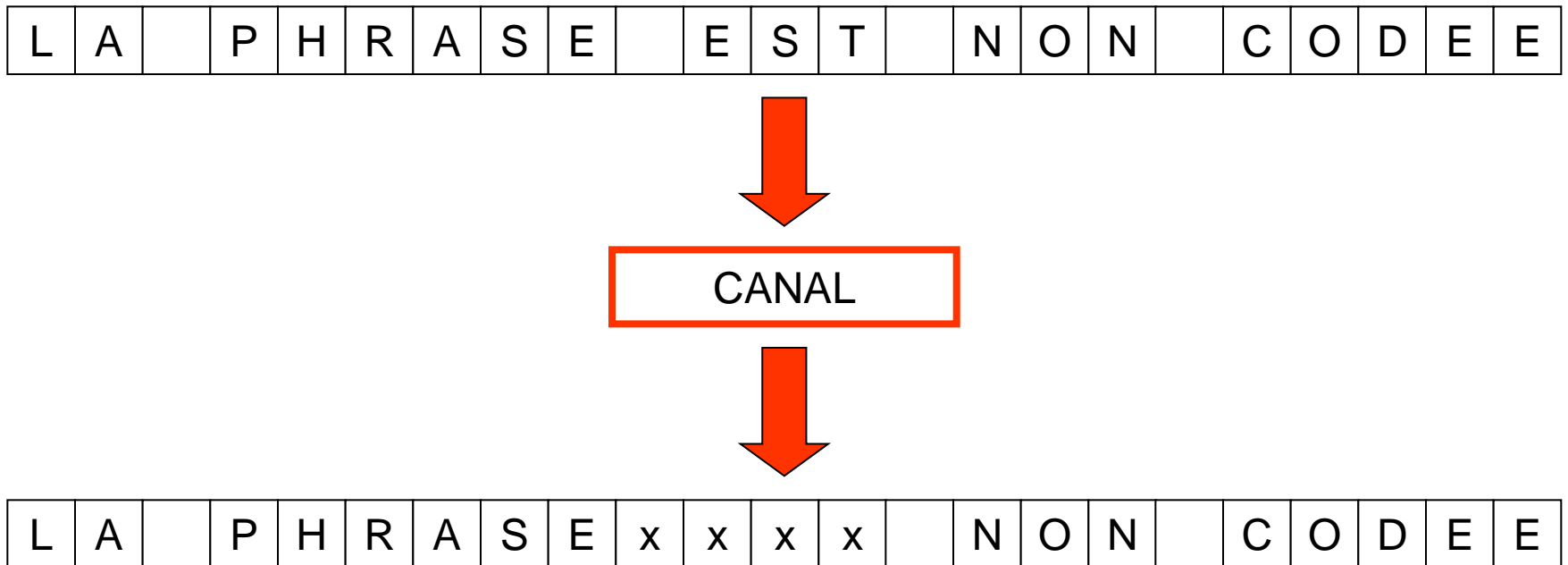
Low Density Parity Check

- Gallager, 1962
- LDPC a été le premier codage qui permettait de performances proches aux limites de Shannon
- Difficultés d'implémentation, oublié pour 30 ans
- Nouveau intéresse dans les années 90
- En 2003, un code LDPC a été choisi pour le standard DVB-S2 (transmission par satellite)
- En 2006, un code LDPC a été choisi pour le standard hybride CMMB
- Les codes LDPC sont aussi utilisés dans le standard 10GBase-T Ethernet et dans WiMax

Low Density Parity Check

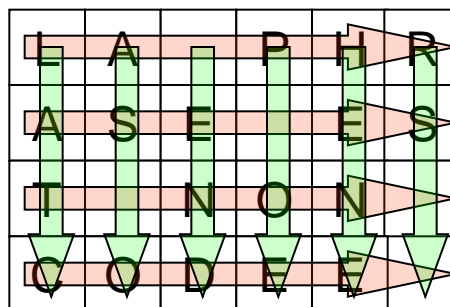
- **Utilise de matrices de parité creuses**
- **Même performance des Turbo Codes, avec complexité inférieure**
- **Décodage itérative très efficace**
- **Besoins de mémoire**

Entrelacement – Rafales d'erreurs



Entrelacement – Rafales d'erreurs

L A P H R A S E E S T N O N C O D E E



Entrelacement

L A T C A S O E N D P O E H E N E R S

Entrelacement – Rafales d’erreurs

L A P H R A S E E S T N O N C O D E E

Entrelacement

L A T C A S O E N D P O E H E N E R S

CANAL

L A T C A S O x x x x O E H E N E R S

De-entrelacement

L A x H R A S x E S T x O N C O x E E



Entrelacement

■ Entrelacement en temps

- Rafales d'erreurs

■ Entrelacement en fréquence

- Symboles consécutives n'occupent pas canaux adjacents
- Mitige le *deep fading*

■ Virtual time interleaver:

- Octets du même mot de code RS étalés dans le temps

Résumé

- **Le décodage du code convolutionnel corrige les erreurs indépendantes mais a tendance à laisser des paquets d'erreurs**
 - Comme le décodage dépend des données actuelles mais aussi des précédentes, une erreur à t a de l'influence sur le décodage à $t+1$...
 - Ces paquets sont refractionnés avec le désentrelacement, en ne laissant souvent que des erreurs corrigibles par le code de Reed-Solomon RS.

- **Le poinçonnage permet d'attendre différents taux de codage sans modifier le codeur**
 - Gestion *software* du taux de codage

Bilan du codage de canal: Performances et contraintes

■ Retard

- Taille de l'entrelacement
- Blocs plus grands → meilleures performance de codage

■ Complexité

- Algorithme de décodage
- Nombre d'itérations

■ Efficience spectrale

- Coding rate

■ Autres

- Interleaver
- Puncture pattern





Plan de la présentation

- Introduction DVB et modèles de canal
- Codage de canal
- **Modulation**
- Standards



Modulation

- **Objectif : Associer à une suite de symboles un signal à envoyer sur le canal analogique**
- **Entrée : suite de bits, octets**
- **Sortie : forme d'onde**
- **Technique : association entre symboles et paramètres du signal (porteuse sinusoïdale)**
- **Critères : Probabilité d'erreur**
- **Coûts : Bande, puissance, complexité**

Modulation

- Pour transmettre le symbole $x_k \in \{0, 1 \dots, M - 1\}$ on *module* une forme d'onde dans le k -ème intervalle de symbole

$$\forall t \in I_k \triangleq [(k - 1)T, kT[, \\ s(t) = s(t - (k - 1)T, x_k)$$

- Pour simplicité, les M fonctions $s(t, x_k)$ sont créées en modifiant les paramètres d'un seul type de signal

Bases des modulations

- Un signal sinusoïdal s'écrit de manière générale :

$$s(t) = A \cos(2\pi f t + \phi)$$

- on peut moduler cette porteuse en agissant sur le paramètre :
 - A : modulation d'amplitude
 - f : modulation de fréquence
 - ϕ : modulation de phase

Types de modulation

- Modulation d'amplitude :

$$\forall t \in I_k, \quad s(t, x_k) = A(x_k) \cos(2\pi f t)$$

- Modulation de phase :

$$\forall t \in I_k, \quad s(t, x_k) = A \cos[2\pi f t + \phi(x_k)]$$

- Modulation en quadrature :

$$\forall t \in I_k, \quad s(t, x_k) = A(x_k) \cos[2\pi f t + \phi(x_k)]$$

- Modulation de fréquence :

$$\forall t \in I_k, \quad s(t, x_k) = A \cos[2\pi f(x_k)t]$$

- Signal reçu

Canal avec mémoire : $\forall t, r(t) = h * s(\cdot, \mathbf{x}) + n(t)$

Canal AWGN : $\forall t \in I_k, r(t) = s(t, x_k) + n(t)$



Types de modulation

- **Amplitude shift keying (ASK)**
 - Bande limitée, besoins en puissance
- **Phase shift keying (PSK)**
 - Bande limitée, pas de contraintes de linéarité
- **Quadrature amplitude modulation (QAM)**
 - Bande limitée, besoins en puissance, condition de linéarité
- **Frequency shift keying (FSK)**
 - Besoins en bande, économe en puissance

Représentation dans l'espace des signaux

- Le signal reçu est projeté sur la base :

$$s_I(t) = \cos(2\pi ft)$$

$$s_Q(t) = \sin(2\pi ft)$$

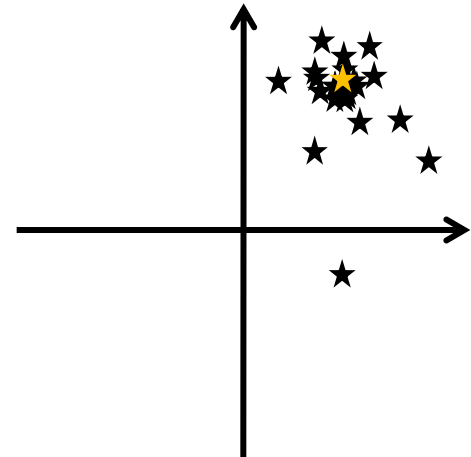
- Cela permet d'estimer les paramètres du signal transmis :

$$r(t) = A \cos(2\pi ft + \phi) + n(t)$$

$$= r_1 s_I(t) + r_2 s_Q(t)$$

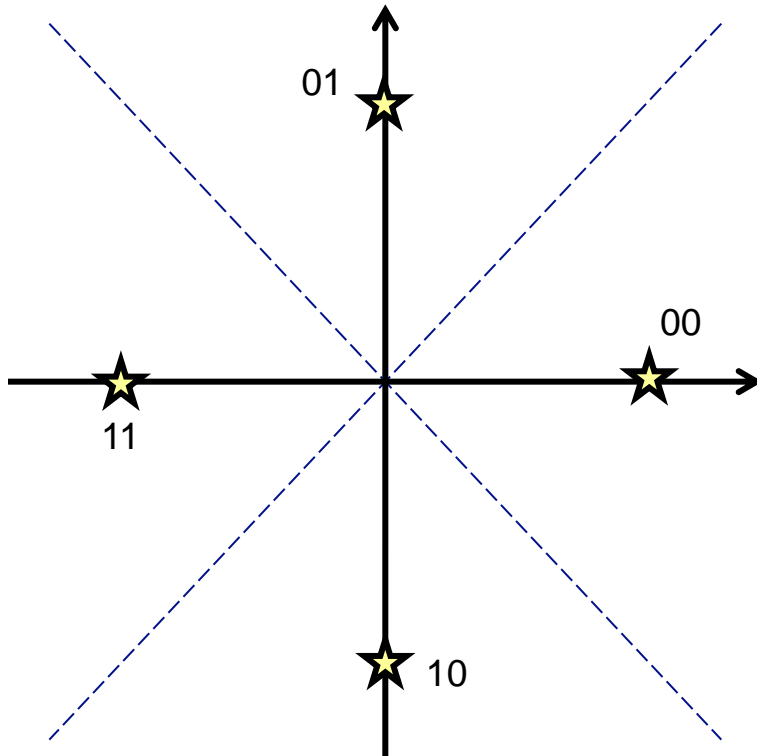
$$r_1 = \langle r(t), s_I(t) \rangle = A \cos \phi + n_1$$

$$r_2 = \langle r(t), s_Q(t) \rangle = A \sin \phi + n_2$$



DVB-S

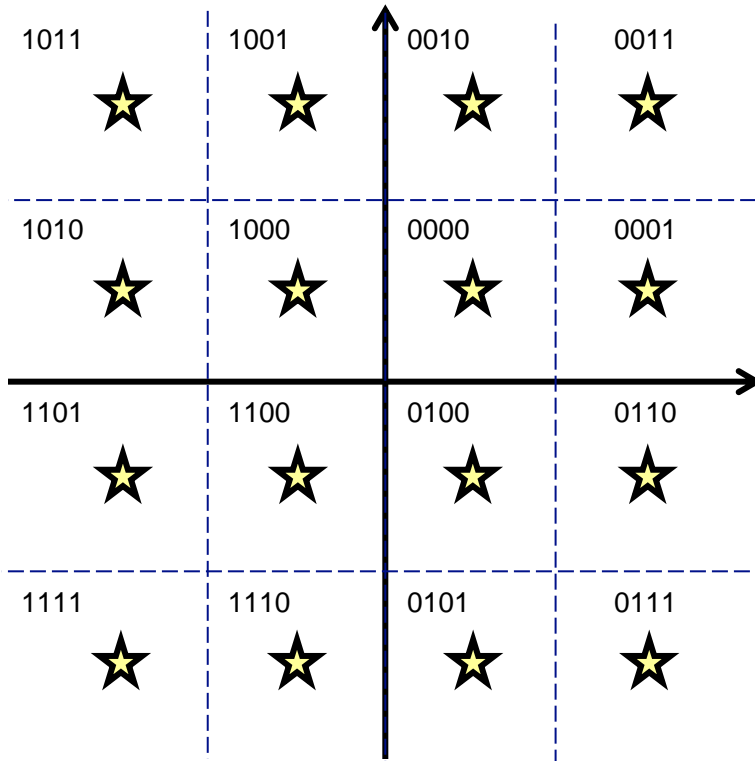
- Transmission satellite : codes de corrections puissants et modulation la moins sensible possible aux distorsions de phase et d'amplitude.
 - Transmission énormément bruitée et tubes des transpondeurs travaillant en saturation : impossible de travailler avec une information modulée en amplitude
- modulation QPSK (Quaternary Phase Shift Keying ou modulation à déplacement de phase à 4 états).



$$\forall t \in I_k,$$
$$s(t, x_k) = A \cos[2\pi f t + \phi(x_k)]$$
$$\phi(x_k) \in \left\{ \psi + \frac{2n\pi}{M} \right\}$$

DVB-C

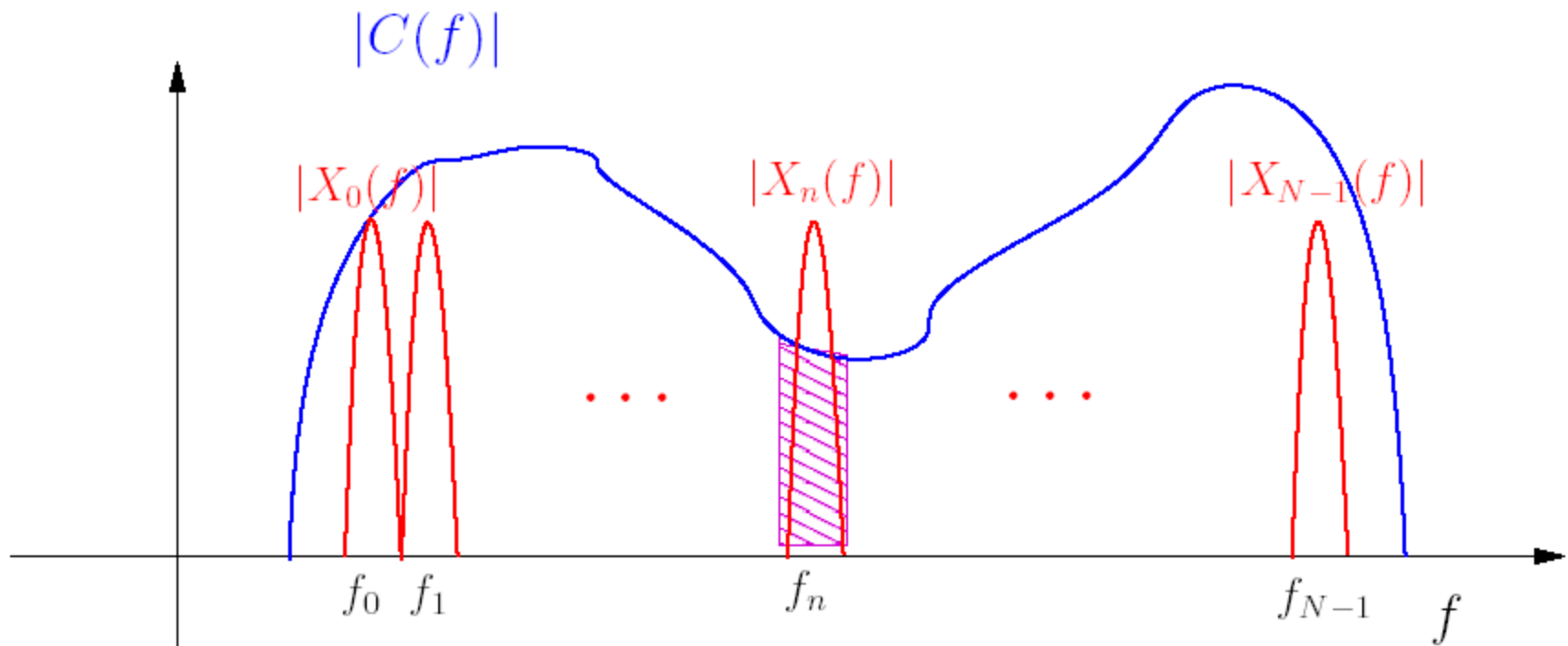
- **Transmission par câble:**
 - milieu peu bruité
 - bande réduite
- **Modulation à efficacité maximale, c'est à dire transportant un maximum de bit par symbole : modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation)**



$$\forall t \in I_k,$$
$$s(t, x_k) = A(x_k) \cos[2\pi f t + \phi(x_k)]$$
$$= s_1 s_I(t) + s_2 s_Q(t)$$

$$s_1 = A(x_k) \cos \phi(x_k)$$
$$s_2 = -A(x_k) \sin \phi(x_k)$$

Modulations multiporteuses (DVB-T, H, SH)



Il faut une estimation de la réponse du canal à chaque porteuse (sous-bande)

Principe de la modulation OFDM

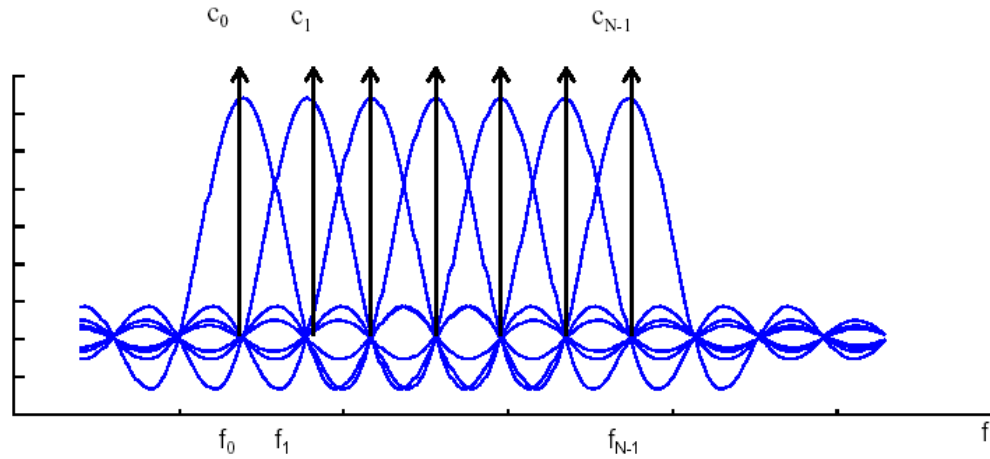
- Groupement des données numériques par paquet de N
- Séquence de N données : $\mathbf{x}_k = \{c_0, c_1, \dots, c_{N-1}\}$
- T_u durée symbole : temps entre 2 séquences de N données.
 - Canaux à faible débit → Robustesse à l'IES
- Chaque donnée c_k module (QAM) un signal à la fréquence f_k
- Le signal d'un symbole Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) est :

$$s(t, x_k) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{2j\pi f_n t}$$

- On montre que le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est $1/T_u$

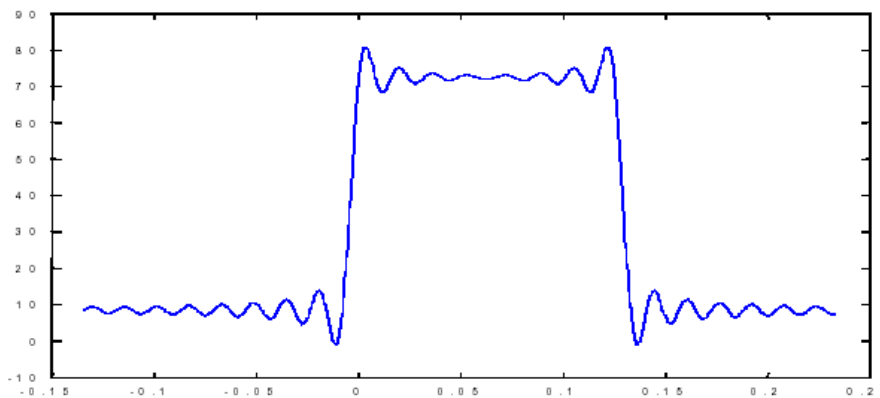
Spectre

■ Spectre des différentes porteuses :



• orthogonalité :
recouvrement des spectres
mais pas d'IES

■ Spectre du signal OFDM pour 8 porteuses :



• bande de fréquence
occupée de manière
optimum

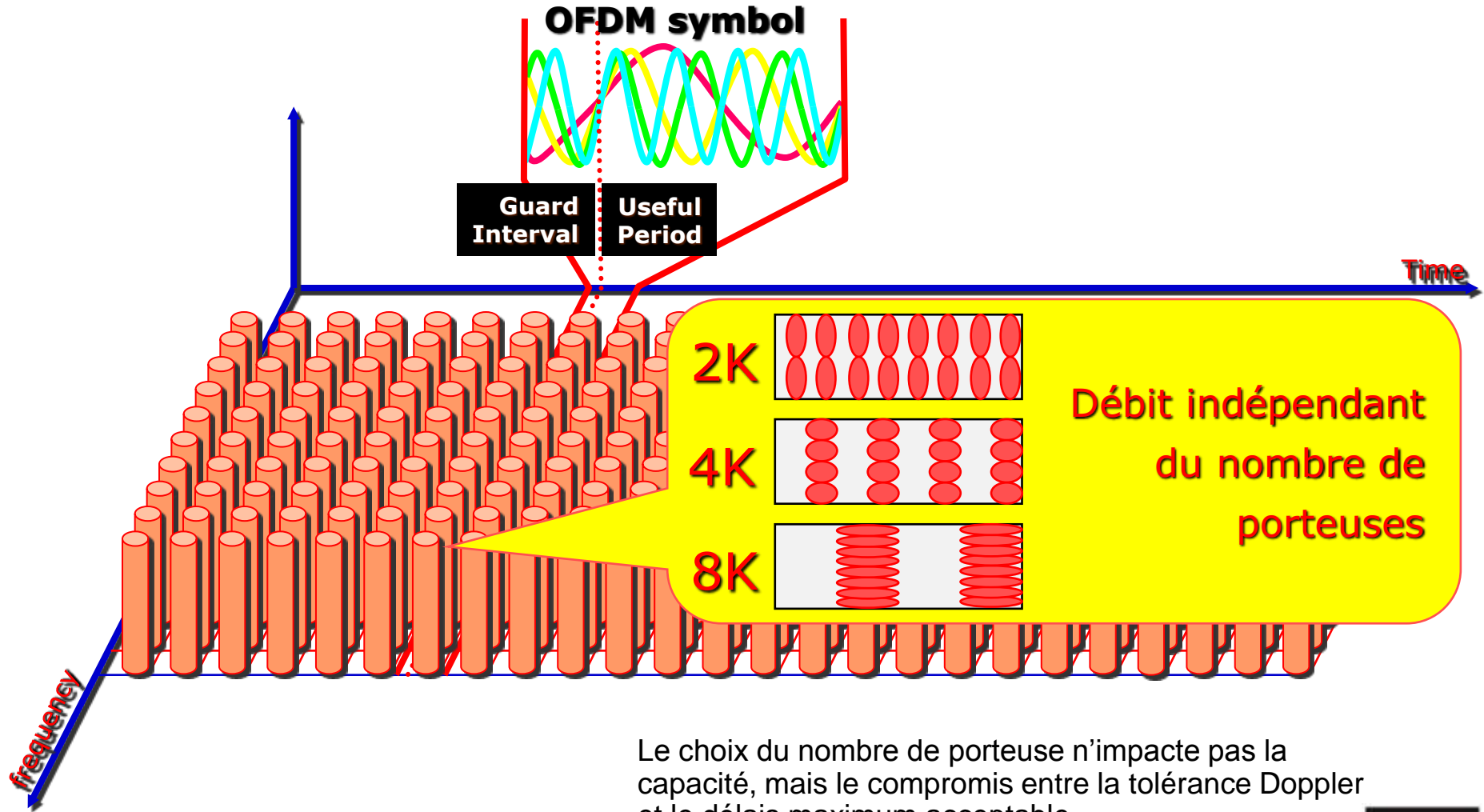
Intervalle de garde

- Un symbole émis parvient au récepteur sous forme de plusieurs symboles atténués et retardés
- Un symbole émis à iT_u peut se superposer avec un écho du symbole émis à la période $(i-1)T_u$

→ Interférences

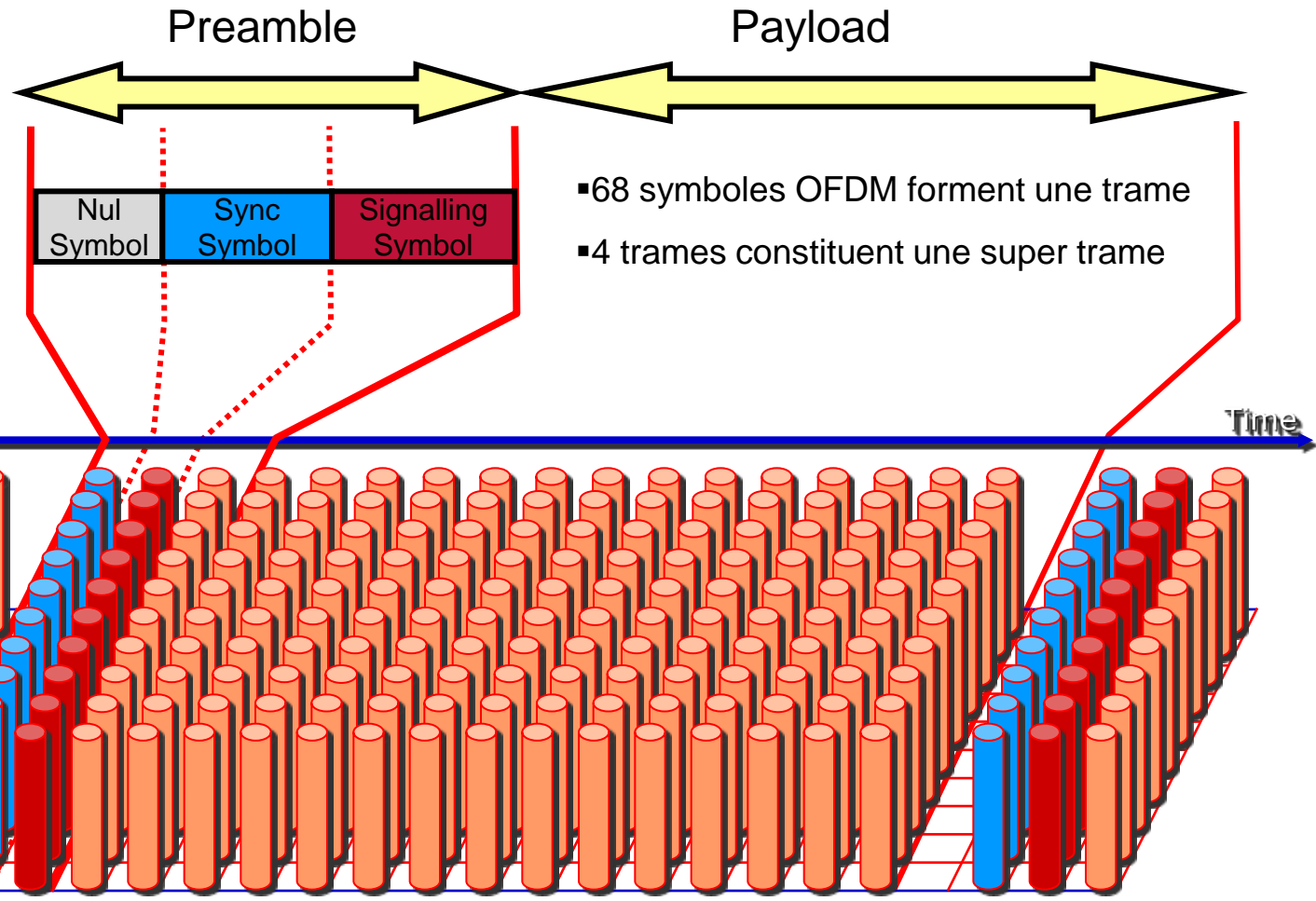
- **Solution** : précéder chaque symbole d'un intervalle de garde d'une durée Δ
- la durée d'un symbole est alors $T = T_u + \Delta$, Δ plus grand que T_m le plus grand des retards apparaissant dans le canal
- **Inconvénient** : diminution du débit

Signal OFDM



Le choix du nombre de porteuse n'impacte pas la capacité, mais le compromis entre la tolérance Doppler et le délais maximum acceptable

Synchronisation avec préambule





Synchronisation avec préambule

- Le *Nul Symbol* facilite la synchronisation (frame detection)
- Le symbole de synchro permet la synchronisation temporelle du démodulateur
- Le *Signalling Symbol* contient de l'information complémentaire (services)

Structure de la trame OFDM dans DVB-T

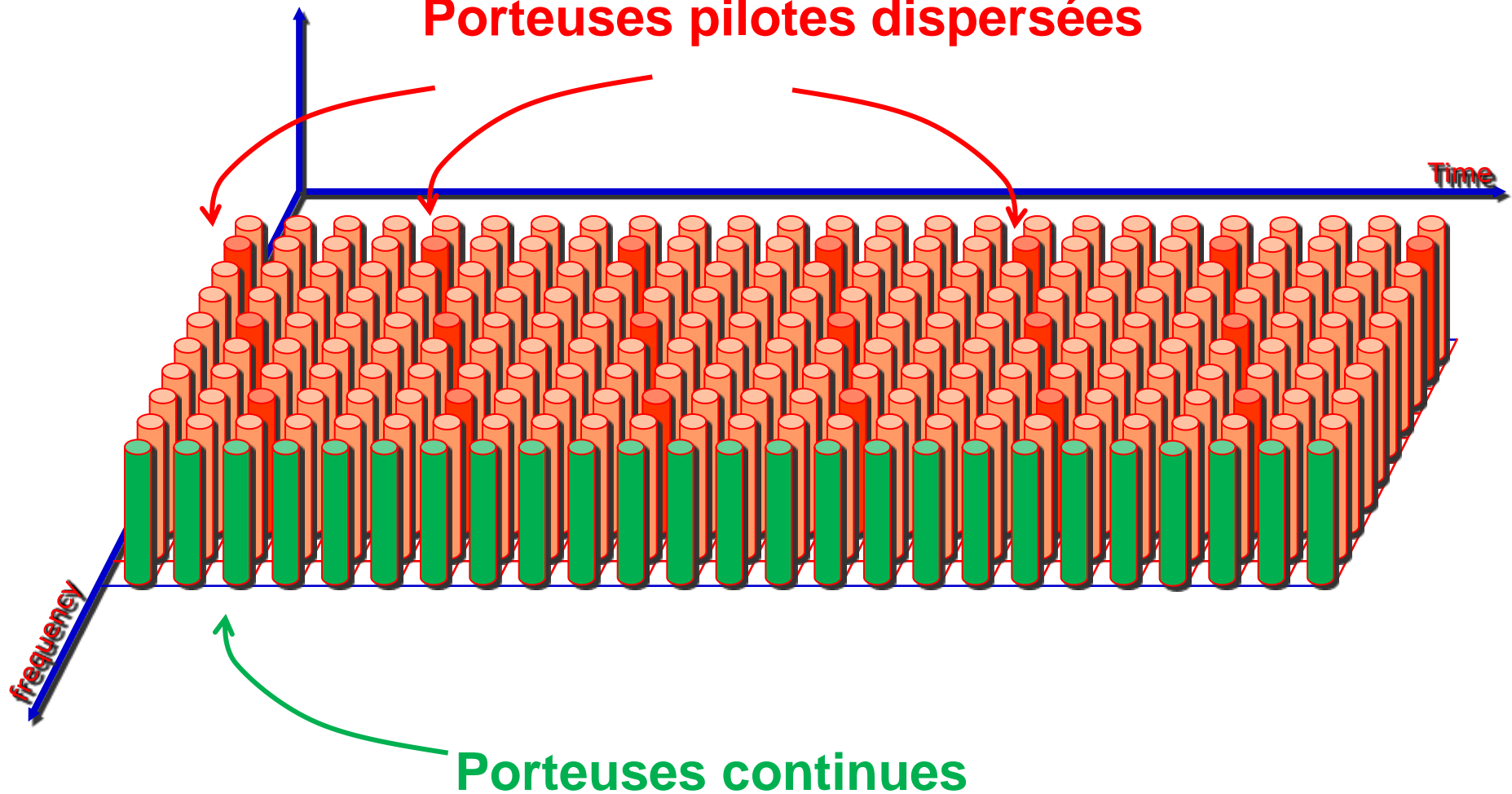
- **En ajoute aux données, une trame OFDM contient**
 - Porteuses pilotes dispersées
 - Porteuses pilotes fixes
 - Porteuses pour la transmission des paramètres (TPS)

Porteuses pilotes dans DVB-T

- **Modulées avec données connues (PRBS)**
- **Robustes (augmentation de puissance)**
- **Utiles pour**
 - la synchronisation temporelle
 - la synchronisation fréquentielle
 - l'estimation du canal
- **Porteuses pilotes dispersées**
 - sur des symboles prédéfinis, à intervalles réguliers
- **Porteuses continues**
 - sur des symboles prédéfinis, tout le long de la transmission

Porteuses pilotes dans DVB-T

Porteuses pilotes dispersées



Porteuses TPS :

Transmission Parameter Signalling

- **Les porteuses TPS donnent des informations sur :**
 - le n° de la trame dans la super trame
 - le type de modulation (QPSK, QAM 16 ou QAM 64)
 - l'information de hiérarchie
 - l'intervalle de garde Δ
 - les rendements de codes internes
 - le mode de transmission (2k/8k)



Porteuses TPS : Transmission Parameter Signalling

■ Utilisent 68 bits par trame




- un bit sur 68 symboles en position prédéfinie
- 1 bit d'initialisation
- 16 bits de synchronisation
- 37 bit d'information (dont 23 utilisés)
- 14 bits de redondance (code correcteur d'erreurs)

C/N et QEF

- Selon le schéma de transmission, il existe un C/N minimum pour achever la condition QEF
 - Quasi Error Free \leftrightarrow 1 erreur par heure \leftrightarrow BER=10⁻¹¹

| Modulation | Code rate | Required C/N for BER = 2×10^{-4} after Viterbi QEF after Reed-Solomon | | | Bitrate (Mbit/s) | | | |
|------------|-----------|--|----------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | | Gaussian channel | Ricean channel (F ₁) | Rayleigh channel (P ₁) | $\Delta/T_U = 1/4$ | $\Delta/T_U = 1/8$ | $\Delta/T_U = 1/16$ | $\Delta/T_U = 1/32$ |
| QPSK | 1/2 | 3,1 | 3,6 | 5,4 | 4,98 | 5,53 | 5,85 | 6,03 |
| QPSK | 2/3 | 4,9 | 5,7 | 8,4 | 6,64 | 7,37 | 7,81 | 8,04 |
| QPSK | 3/4 | 5,9 | 6,8 | 10,7 | 7,46 | 8,29 | 8,78 | 9,05 |
| QPSK | 5/6 | 6,9 | 8,0 | 13,1 | 8,29 | 9,22 | 9,76 | 10,05 |
| QPSK | 7/8 | 7,7 | 8,7 | 16,3 | 8,71 | 9,68 | 10,25 | 10,56 |
| 16-QAM | 1/2 | 8,8 | 9,6 | 11,2 | 9,95 | 11,06 | 11,71 | 12,06 |
| 16-QAM | 2/3 | 11,1 | 11,6 | 14,2 | 13,27 | 14,75 | 15,61 | 16,09 |
| 16-QAM | 3/4 | 12,5 | 13,0 | 16,7 | 14,93 | 16,59 | 17,56 | 18,10 |
| 16-QAM | 5/6 | 13,5 | 14,4 | 19,3 | 16,59 | 18,43 | 19,52 | 20,11 |
| 16-QAM | 7/8 | 13,9 | 15,0 | 22,8 | 17,42 | 19,35 | 20,49 | 21,11 |
| 64-QAM | 1/2 | 14,4 | 14,7 | 16,0 | 14,93 | 16,59 | 17,56 | 18,10 |
| 64-QAM | 2/3 | 16,5 | 17,1 | 19,3 | 19,91 | 22,12 | 23,42 | 24,13 |
| 64-QAM | 3/4 | 18,0 | 18,6 | 21,7 | 22,39 | 24,88 | 26,35 | 27,14 |
| 64-QAM | 5/6 | 19,3 | 20,0 | 25,3 | 24,88 | 27,65 | 29,27 | 30,16 |
| 64-QAM | 7/8 | 20,1 | 21,0 | 27,9 | 26,13 | 29,03 | 30,74 | 31,67 |

Les perturbations de canal: les solutions

|  |  |  |
|---|--|---|
| Bruit | Phénomène aléatoire Erreurs de transmission | Codage (redondance) Interleaving |
| Sélectivité en fréquence | Fading | Modulation MP Interleaving freq. |
| Sélectivité en temps | La réponse du canal change | Interleaving |
| Échos | Les échos interfèrent avec le trajet principal | Intervalle de garde |
| Doppler | Translation en fréquence des porteuses | Distance entre les porteuses |
| Obstacles | Long fading | Interleaving de longue durée |

Plan de la présentation

- Introduction DVB et modèles de canal
- Codage de canal
- Modulation
- **Standards**
 - DVB-C, DVB-C2, DVB-T, DVB-T2, DVB-S, DVB-S2, DVB-H, DVB-SH
 - Standards non-européens

Standards DVB

■ Joint Technical Committee (1990)

- ETSI : European Telecommunications Standards Institute
- EBU : European Broadcasting Union
- CENELEC : Comité Européen de Normalisation ELECTrotechnique

■ Digital Video Broadcasting (DVB) Project (1993)

- Consortium d'acteurs du marché
- Objectif : établir le cadre pour la diffusion de services TV basés sur la vidéo numérique (MPEG-2 à l'origine)



Standards DVB

■ Cable

- DVB-C, DVB-C2

■ Satellite

- DVB-S, DVB-S2

■ Numérique Terrestre

- DVB-T, DVB-T2

■ Terminaux mobiles

- DVB-H

■ Hybride (satellite/mobile)

- DVB-SH

- Finalisé en décembre 1994
- Standard Européen EN 300 429

- Distribution par câble

- Brassage des données
- Codage Reed-Solomon
- Entrelacement
- 5 types de modulation QAM (16 à 256)
- Filtrage en bande base pour réduire l'interférence entre symboles

■ Besoin d'un nouveau standard pour le câble

- Réseaux câble saturés
- Meilleures performances nécessaires (zapping)
- Compatibilité avec les systèmes satellite

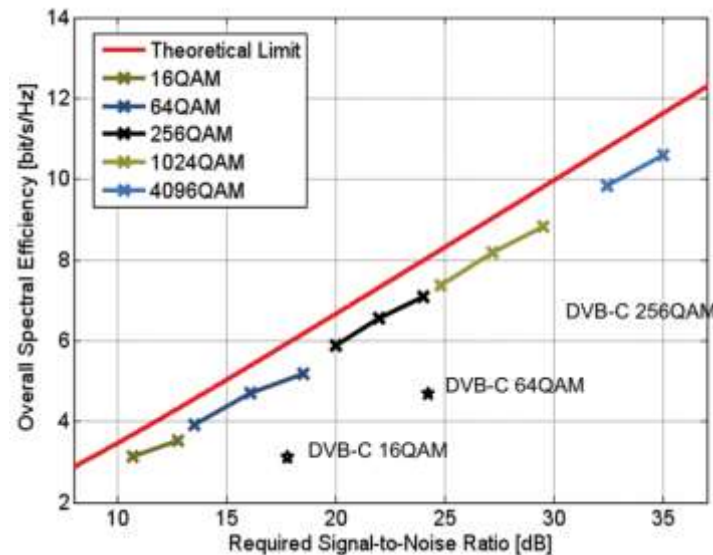
■ Nouvelles techniques de modulation et de codage de canal (OFDM)

- Efficacité spectrale : +30% par rapport à DVB-C

■ Historique

- Avril 2010 : DVB-C2 *specification* (EN302769), tests
- Févr. 2012 : Production de masse
- Avril 2012 : premiers décodeurs disponibles

| | DVB-C | DVB-C2 |
|--------------------|------------------------------|--|
| Input Interface | Single Transport Stream (TS) | Multiple Transport Stream and Generic Stream Encapsulation (GSE) |
| Modes | Constant Coding & Modulation | Variable Coding & Modulation and Adaptive Coding & Modulation |
| FEC | Reed Solomon (RS) | LDPC + BCH |
| Interleaving | Bit-Interleaving | Bit- Time- and Frequency-Interleaving |
| Modulation | Single Carrier QAM | COFDM |
| Pilots | Not Applicable | Scattered and Continual Pilots |
| Guard Interval | Not Applicable | 1/64 or 1/128 |
| Modulation Schemes | 16- to 256-QAM | 16- to 4096-QAM |



Source: www.dvb.org
 Juillet 2012

- **Standard développé dans les années '90 (1993-1997)**
- **Standard européen EN 300 744**
 - Dernière version : V1.6.1 (2009-01)
- **Spécifie les trames, le codage de canal et la modulation pour la télévision numérique terrestre (TNT)**
- **Le plus commun système de TNT : 200 millions d'appareils en plus de 45 pays (octobre 2012)**
- **Développé après le DVB-C et DVB-S (difficulté techniques)**

DVB-T: caractéristiques techniques

| | |
|------------------------|------------------|
| Bandwidths | 6, 7, 8MHz |
| Synchronization | Pilot carriers |
| Waveforms | OFDM [2k, 8k] |
| OFDM Mapping | QPSK/16QAM/64QAM |
| Inner Coding | Convolutional |
| Outer Coding | Reed-Solomon |
| Guard interval | 4 options |

- Compromis entre robustesse et capacité
- Base du DVB-H
- Support au SFN



DVB-T Services

- **SDTV**
- **Radio numérique**
- **Services interactives**
- **HDTV**
- **IP datacasting (multi-protocol encapsulation)**

Marchés du DVB-T

| | DVB-T | | | DVB-T2 | | |
|----------------------------------|------------|---------|----------|-----------|---------|----------|
| | Adopted | Planned | Deployed | Trial | Adopted | Deployed |
| Number of countries | 45 | 5 | 71 | 7 | 35 | 16 |
| Total adopted or deployed | 121 | | | 51 | | |

Plus de 200 million de décodeurs DVB-T vendus dans le monde (octobre 2012)

Source: www.dvb.org
octobre 2012

- ***Analogue switch off*: bande disponible en UHF**
- **Nouvelles et plus performantes techniques en modulation et codage**

- **Spécification DVB-T2 approuvé en 2008**
- **Test sur le terrain : RAI Research Centre (Turin) en Mars 2009.**
- **Standard européen adopté en Septembre 2009 (EN 302 755).**

DVB-T2 et DVB-T: comparaison technique

| | DVB-T | DVB-T2 (new/improved options in bold) |
|---------------------------------|--|---|
| FEC | Convolutional Coding+Reed Solomon 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 | LDPC + BCH 1/2, 3/5 , 2/3, 3/4, 4/5 , 5/6 |
| Modes | QPSK, 16QAM, 64QAM | QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM |
| Guard Interval | 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 | 1/4, 19/128 , 1/8, 19/256 , 1/16, 1/32, 1/128 |
| FFT Size | 2k, 8k | 1k , 2k, 4k , 8k, 16k , 32k |
| Scattered Pilots | 8% of total | 1% , 2% , 4% , 8% of total |
| Continual Pilots | 2.0% of total | 0.4%-2.4% (0.4%-0.8% in 8K-32K) |
| Bandwidth | 6, 7, 8 MHz | 1.7 , 5 , 6, 7, 8, 10 MHz |
| Typical data rate (UK) | 24 Mbit/s | 40 Mbit/s |
| Max. data rate (@20 dB C/N) | 31.7 Mbit/s | 45.5 Mbit/s |
| Required C/N ratio (@24 Mbit/s) | 16.7 dB | 10.8 dB |

Codage de canal plus performant (et plus complexe)

Beaucoup plus d'options de codage et modulation permettent une adaptation très fine aux condition de transmission

Prix décodeur : DVB-T, 20 USD ; DVB-T2, 45 USD

Source: www.dvb.org

Septembre 2012

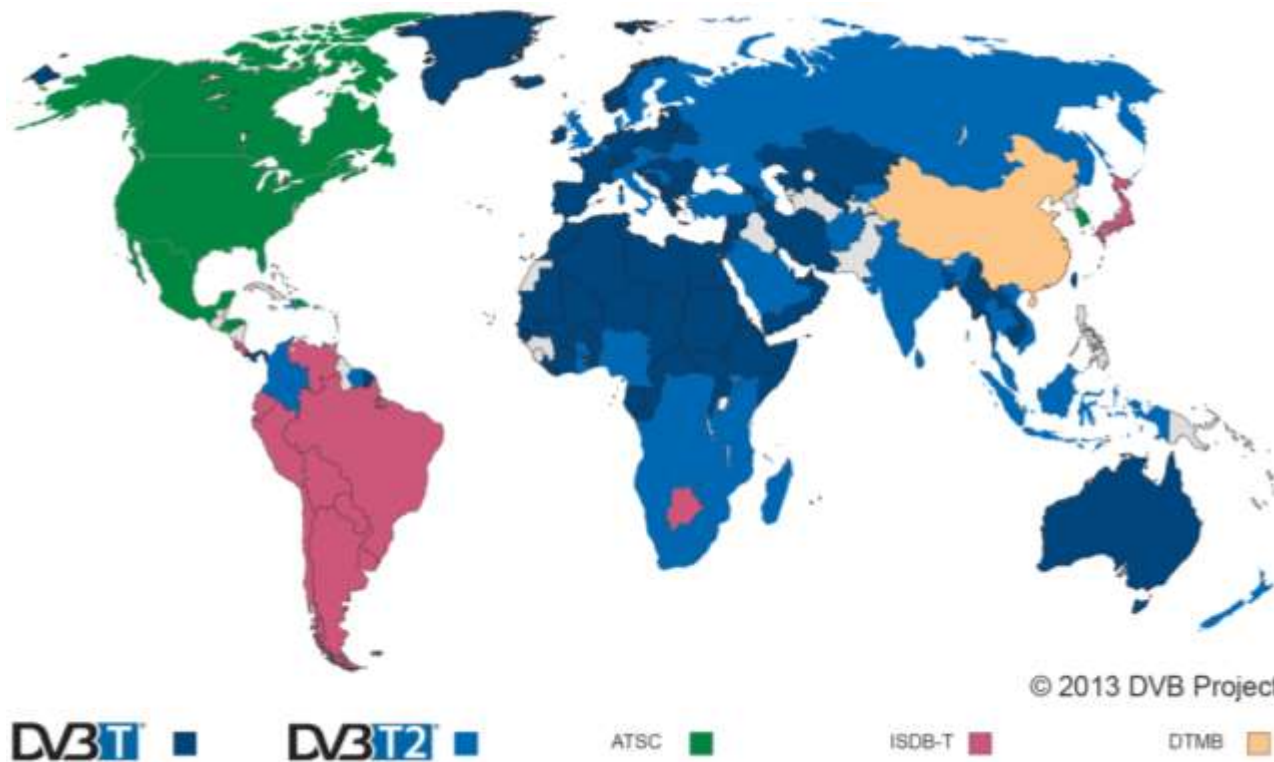
DVB-T2: marchés

- **DVB-T est capable de supporter SDTV (MPEG2+DVB-T, Australie) et l'HDTV (MPEG4+DVB-T, France)**
- **Services avancés : TV, Internet, Laptop, In-car services**
- **Transmissions commencées en UK, tests pour le HDTV sur DVB-T2 en Suède et Danemark**

- **En France le CSA considère le passage au DVB-T2+HD « inéluctable » (Rapport du 11/08/2011)**
 - Horizon 2020
 - TDF : Plateforme de test à l'ImaginLab de Rennes (Mars 2012)

DVB-T/T2: marchés

Source: www.dvb.org
Janvier 2013



| Norme | DVB-T / T2 | ATSC | ISDB-T | DTMB | Undecided |
|-------|------------|------|--------|------|-----------|
| Pays | 143 | 8 | 11 | 3 | 46 |

Autres normes TNT

États-Unis : ATSC

- **ATSC A/53 (1996, rev. 2009/2011)**
- **Modulation 8VSB (Vestigial-Side-Band)**
 - Meilleur rapport entre puissance de crête et puissance moyenne que COFDM
 - Mais moins robuste au chemins multiples/fading
- **Codage de canal**
 - Reed-Solomon + Convolutional Code

Autres normes TNT

Chine et Japon

■ Chine : DTMB

- Norme GB20600 (2006)
- Modulation TDS-OFDM
- Codage de canal avec LDPC

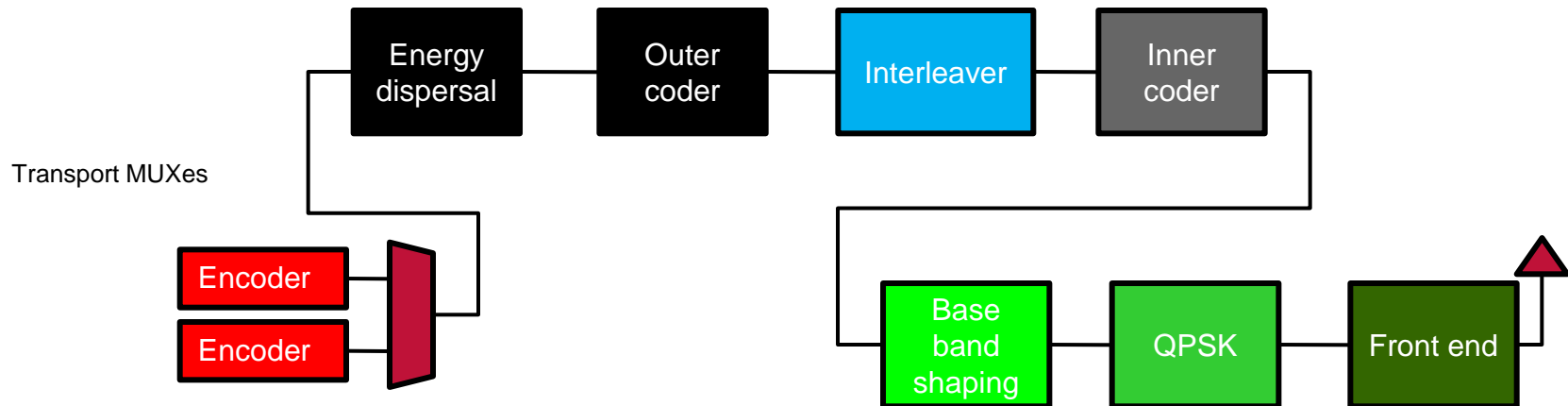
■ Japon (et Amérique du Sud): ISDB-T

- Très similaire à DVB-T
- OFDM
- Reed-Solomon et Convolutional Code

- **Premier système de TV numérique par satellite : 1994 (Thaïlande et Afrique du Sud)**
- **Standard européen EN 300 421**
 - Dernière version : 08/1997
- **Plus de 100 millions de décodeurs vendus dans le monde**
- **Graduellement remplacé par DVB-S2**

- **Entrée : Données MPEG-2 transport multiplexer**
- **Sortie : Signal à envoyer au satellite**

- Transport multiplex adaptation and randomization for energy dispersal;
- Outer coding (i.e. Reed-Solomon);
- Convolutional interleaving;
- Inner coding (i.e. punctured convolutional code);
- Baseband shaping for modulation;
- Modulation QPSK



- **Finalisé en Mars 2005**
- **Standard européen EN 302 307**
 - Dernière version : 08/2009
- **Evolutions dans les communications satellite depuis DVB-S (1997):**
 - Nouveaux schémas de codage de canal
 - Codage et modulation avec priorité (SDTV/HDTV)
 - *Adaptive Coding and Modulation* pour les individus (services interactifs en unicast, services pour les professionnels)
- **Désormais présent sur tout nouveau décodeur satellitaire**

DVB-S2

- **DVB-S2 est un système flexible pour plusieurs types de communications satellite**
- **Caractéristiques :**
 - Adapter au flux d'entrée flexible (simple/multi flux)
 - Code de correction d'erreurs puissant (LDPC+BCH), approchant les limites théoriques
 - Flexibilité dans le débit de codage : poinçonnage de $\frac{1}{4}$ à $\frac{9}{10}$
 - Quatre constellations de signaux optimisé pour les transpondeurs satellitaires: QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK
 - Trois formes de spectre, avec roll-off 0,35, 0,25 et 0,20;
 - Optimisation du codage et de la modulation pour chaque frame, avec l'*Adaptive Coding and Modulation (ACM)*

DVB-S et DVB-S2

| Satellite EIRP (dBW) | 51 | | 53.7 | |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| System | DVB-S | DVB-S2 | DVB-S | DVB-S2 |
| Modulation & Coding | QPSK 2/3 | QPSK 3/4 | QPSK 7/8 | 8PSK 2/3 |
| Symbol Rate (Mbaud) | 27.5 ($\alpha = 0.35$) | 30.9 ($\alpha = 0.2$) | 27.5 ($\alpha = 0.35$) | 29.7 ($\alpha = 0.25$) |
| C/N (in 27.5MHz) (dB) | 5.1 | 5.1 | 7.8 | 7.8 |
| Useful Bitrate (Mbit/s) | 33.8 | 46 (gain = 36%) | 44.4 | 58.8 (gain = 32%) |
| Number of SDTV Programmes | 7 MPEG-2 15 AVC | 10 MPEG-2 21 AVC | 10 MPEG-2 20 AVC | 13 MPEG-2 26 AVC |
| Number of HDTV Programmes | 1-2 MPEG-2 3-4 AVC | 2 MPEG-2 5 AVC | 2 MPEG-2 5 AVC | 3 MPEG-2 6 AVC |

DVB-S2: marchés

- **Utilisé avec H.264/MPEG-4 AVC pour la vidéo HD**
 - Irlande et Royaume Uni (BSkyB)
 - Allemagne (Premiere)
 - Italie (Sky)
 - USA (DirectTV)
- **Applications professionnelles**
 - EBU est passé de DVB-S à DVB-S2 en 2006
- **ITU recommande DVB-S2 pour les systèmes de diffusion flexibles par satellite**
- **Droits de propriété intellectuelle pas chères (0.50 \$ par récepteur)**



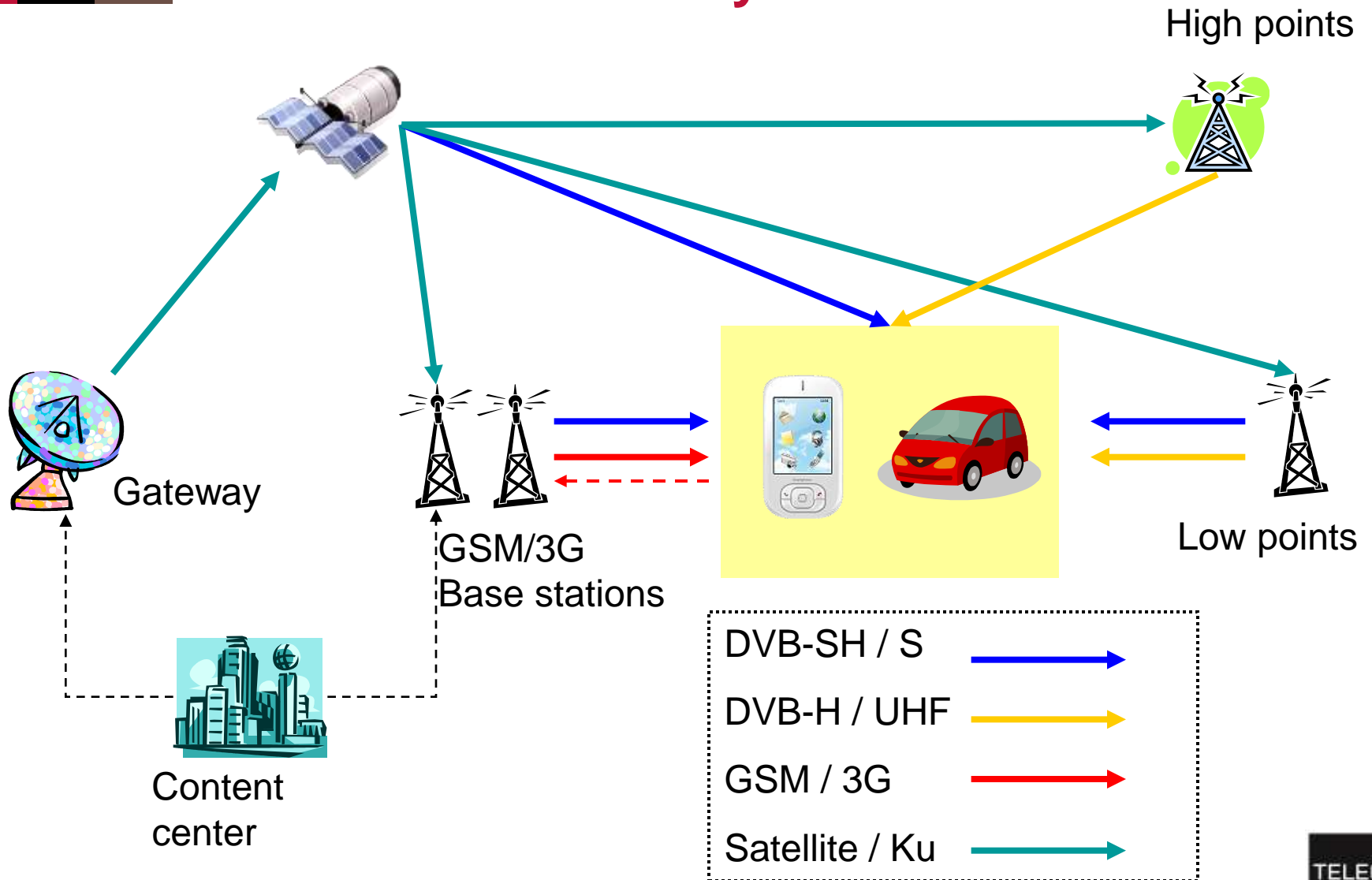
- **Standard européen**
 - EN 302 304, 11/2004
- **DVB-T physical layer**
- **avec outils spécifiques pour la mobilité**
 - Protection Doppler (Mode 4k)
 - Protection bruit impulsionnel (MPE-FEC)
 - Time slicing (réduction de la consommation de puissance)
- **Services Multimédia basés sur IP**
 - H.264
- **Déployé de 2006 à 2012 dans plusieurs pays**
- **Arrêté en 2012...**
 - Futur : DVB-NGH ?

Chinese Mobile Multimedia Broadcasting

- Implémenté officiellement depuis le 1er Novembre 2006
- Candidate à être le standard national pour la TV numérique mobile en Chine
- Le standard CMMB est basé sur la technologie STIMI
- Standard chinois : pas de propriété intellectuelle (PI)
 - **prés de 2 milliards d'Euros par an épargnés pour la PI !**
- Architecture de distribution : Hybride Satellite + Terrestre
- DTMB est officiellement standardisé, CMMB ne l'est pas
- DTMB : HD et SD; CMMB : basse résolution (176x144 pixels)



Satellite-Handheld Hybrid Architecture



CMMB: mise en œuvre

- Couverture **317 villes**
 - **accords signés avec 27 provinces**

- **Tarification: 4 classes d'utilisateurs**
 - Un mois à 12 Yuan, ≈1,20€
 - Six mois à 72 Yuan, ≈7,20€
 - Un an à 144 ou 120 Yuan, ≈14/12€
 - Trois ans à 452 ou 300 Yuan, ≈45/30€
 - Revenu moyenne en Chine: ≈2300€/an, 14 fois moins qu'en France

- **Terminaux: plus de 1000 modèles qui supportent CMMB disponibles sur le marché chinois**

Merci de votre attention!

Marco Cagnazzo
cagnazzo@telecom-paristech.fr