

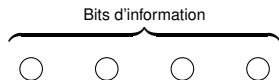
Étude des erreurs d'un décodeur LDPC *dans le standard DVB-S2*

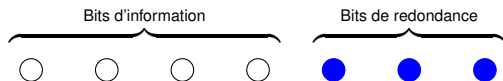
Jean-Christophe Sibel

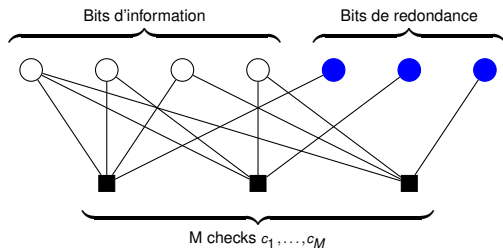
*IETR - INSA UMR 6164
OptiSat2 Project*

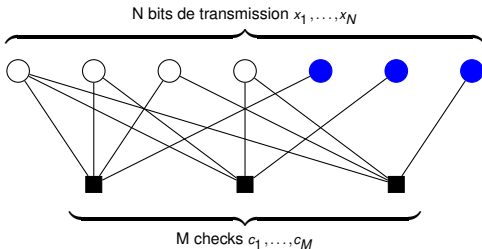
20 février 2014





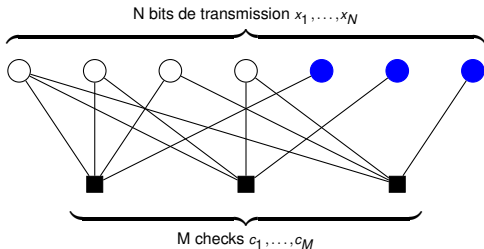




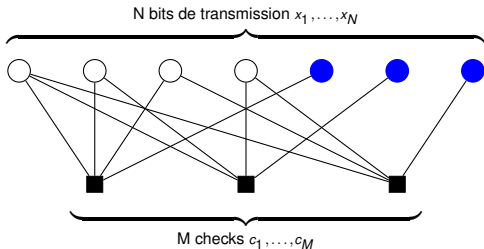


Graphe de Tanner du code de Hamming

- Matrice de parité $H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ (matrice d'adjacence entre bits et checks),
- $d_v(i) =$ nombre de "1" dans la colonne i de H (degré du bit X_i),
- $d_c(j) =$ nombre de "1" dans la ligne j de H (degré du check c_j).



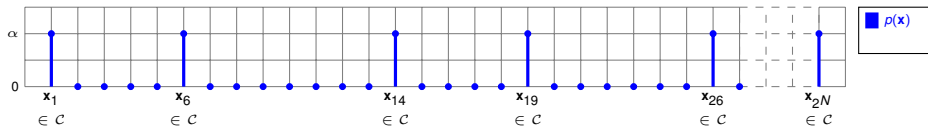
- un seul check non vérifié \Leftrightarrow mot \mathbf{x} rejeté ($\mathbf{x} \notin \mathcal{C}$),
- tous les checks vérifiés \Leftrightarrow mot \mathbf{x} accepté : **CODEWORD** ($\mathbf{x} \in \mathcal{C}$),



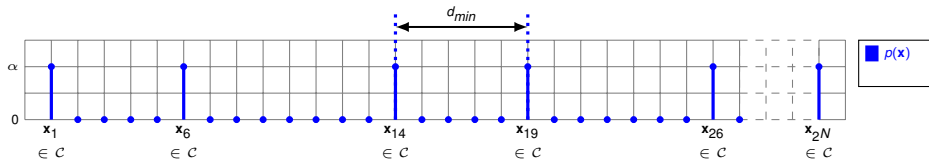
- un seul check non vérifié \Leftrightarrow mot \mathbf{x} rejeté ($\mathbf{x} \notin \mathcal{C}$),
- tous les checks vérifiés \Leftrightarrow mot \mathbf{x} accepté : **CODEWORD** ($\mathbf{x} \in \mathcal{C}$),
- définition d'une distribution *a priori*:

$$p(\mathbf{X} = \mathbf{x}) \propto \prod_{j=1}^M \mathbb{1}(c_j \text{ vérifié}), \quad \begin{array}{l} \mathbf{x} \notin \mathcal{C} \\ \mathbf{x} \in \mathcal{C} \end{array} \Leftrightarrow \begin{array}{l} p(\mathbf{x}) = 0 \\ p(\mathbf{x}) = \alpha > 0 \end{array}$$

Codewords

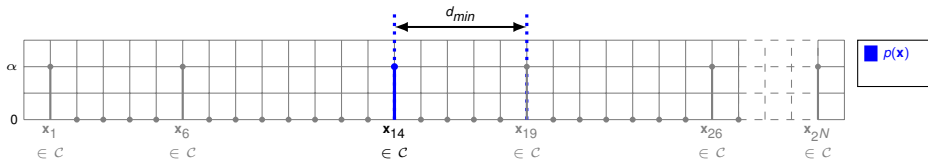


Codewords

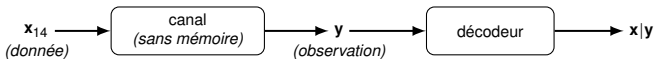


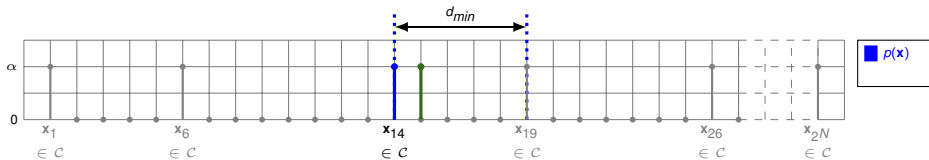
- d_{min} : plus petite distance (= nombre de bits différents) entre deux codewords,
- $d_{min} \gg 1$: code très robuste au bruit de canal.

Codewords

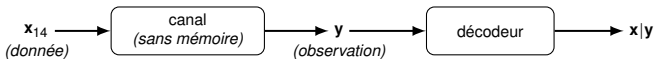


- d_{min} : plus petite distance (= nombre de bits différents) entre deux codewords,
- $d_{min} \gg 1$: code très robuste au bruit de canal.

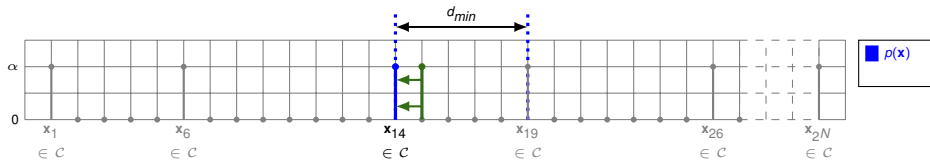




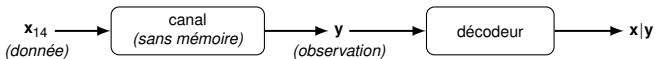
- d_{min} : plus petite distance (= nombre de bits différents) entre deux codewords,
- $d_{min} \gg 1$: code très robuste au bruit de canal.



- Cas 1 : le bruit renvoie $\mathbf{y} \equiv \mathbf{x}_{15}$. Codeword le plus proche :

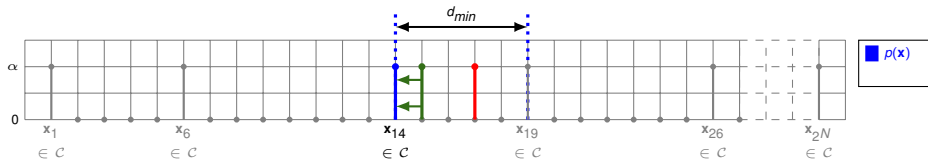


- d_{min} : plus petite distance (= nombre de bits différents) entre deux codewords,
- $d_{min} \gg 1$: code très robuste au bruit de canal.

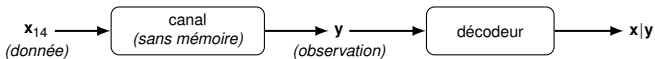


- Cas 1 : le bruit renvoie $\mathbf{y} \equiv \mathbf{x}_{15}$. Codeword le plus proche : $\mathbf{x}|\mathbf{y} = \mathbf{x}_{14}$ **GOOD !**

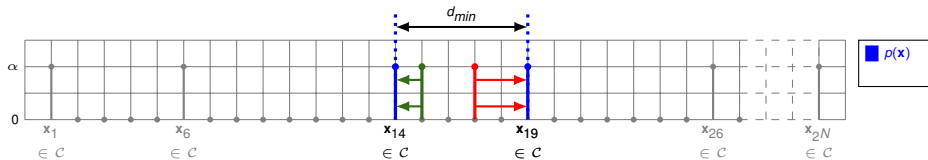
Codewords



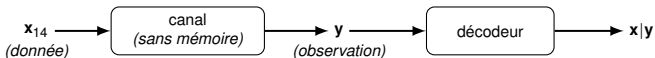
- d_{min} : plus petite distance (= nombre de bits différents) entre deux codewords,
- $d_{min} \gg 1$: code très robuste au bruit de canal.



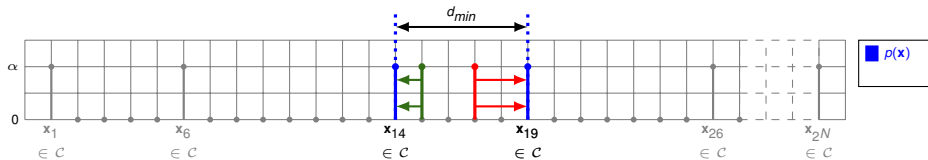
- Cas 1 : le bruit renvoie $\mathbf{y} \equiv \mathbf{x}_{15}$. Codeword le plus proche : $\mathbf{x}|\mathbf{y} = \mathbf{x}_{14}$ **GOOD !**
- Cas 2 : le bruit renvoie $\mathbf{y} \equiv \mathbf{x}_{17}$. Codeword le plus proche :



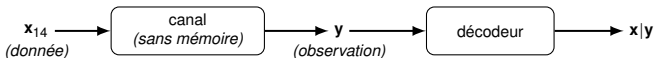
- d_{min} : plus petite distance (= nombre de bits différents) entre deux codewords,
- $d_{min} \gg 1$: code très robuste au bruit de canal.



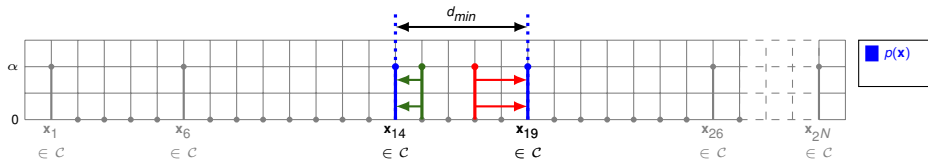
- Cas 1 : le bruit renvoie $\mathbf{y} \equiv \mathbf{x}_{15}$. Codeword le plus proche : $\mathbf{x}|\mathbf{y} = \mathbf{x}_{14}$ **GOOD !**
- Cas 2 : le bruit renvoie $\mathbf{y} \equiv \mathbf{x}_{17}$. Codeword le plus proche : $\mathbf{x}|\mathbf{y} = \mathbf{x}_{19}$ **BAD !**



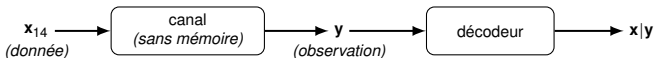
- d_{min} : plus petite distance (= nombre de bits différents) entre deux codewords,
- $d_{min} \gg 1$: **code très robuste au bruit de canal.**



- Cas 1 : le bruit renvoie $\mathbf{y} \equiv \mathbf{x}_{15}$. Codeword le plus proche : $\mathbf{x}|\mathbf{y} = \mathbf{x}_{14}$ **GOOD !**
- Cas 2 : le bruit renvoie $\mathbf{y} \equiv \mathbf{x}_{17}$. Codeword le plus proche : $\mathbf{x}|\mathbf{y} = \mathbf{x}_{19}$ **BAD !**
- Un code LDPC peut corriger $\frac{d_{min}-1}{2}$ erreurs.



- d_{min} : plus petite distance (= nombre de bits différents) entre deux codewords,
- $d_{min} \gg 1$: code très robuste au bruit de canal.



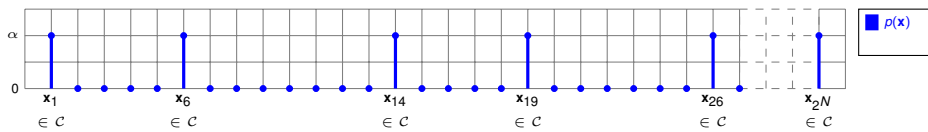
- Cas 1 : le bruit renvoie $\mathbf{y} \equiv \mathbf{x}_{15}$. Codeword le plus proche :
- Cas 2 : le bruit renvoie $\mathbf{y} \equiv \mathbf{x}_{17}$. Codeword le plus proche :
- Un code LDPC peut corriger $\frac{d_{min}-1}{2}$ erreurs.

Définition d'une distribution *a posteriori* $p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{x},\mathbf{y})}{p(\mathbf{y})}$ avec :

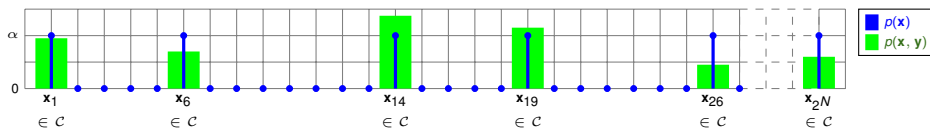
$$p(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = p(\mathbf{x})p(\mathbf{y}|\mathbf{x}) \propto \prod_{j=1}^M 1(c_j \text{ vérifié}) \prod_{i=1}^N p_i(y_i|x_i)$$

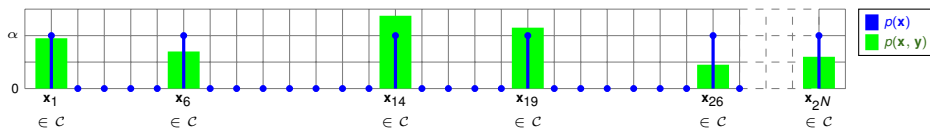
Décodeur : étant donnée \mathbf{y} , quel est le bon codeword, i.e. quel \mathbf{x} est le plus probable / maximise $p(\mathbf{x}, \mathbf{y})$?

Décodage

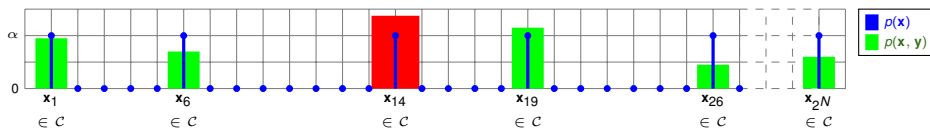


Décodage



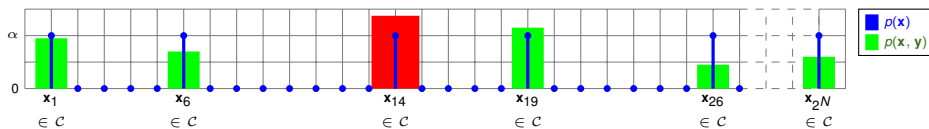


Algorithme : parcourir tous les mots possible pour trouver celui qui maximise $p(\mathbf{x}, \mathbf{y})$.



$$p(x_{14}, y) > p(x_n, y), \quad \text{pour tout index } n \neq 14$$

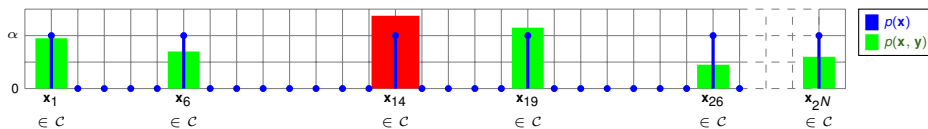
Algorithme : parcourir tous les mots possible pour trouver celui qui maximise $p(x, y)$.



$$p(\mathbf{x}_{14}, \mathbf{y}) > p(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}), \quad \text{pour tout index } n \neq 14$$

Algorithme : parcourir tous les mots possible pour trouver celui qui maximise $p(\mathbf{x}, \mathbf{y})$.

Problème : trouver le bon codeword \equiv recherche parmi 2^N mots binaires.
 $N \gg 1$ (ex: DVB-S2, $N = 64800$) donc **recherche infaisable**.



$$p(\mathbf{x}_{14}, \mathbf{y}) > p(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}), \quad \text{pour tout index } n \neq 14$$

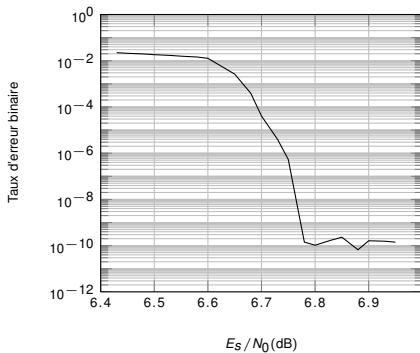
Algorithme : parcourir tous les mots possible pour trouver celui qui maximise $p(\mathbf{x}, \mathbf{y})$.

Problème : trouver le bon codeword \equiv recherche parmi 2^N mots binaires.
 $N \gg 1$ (ex: DVB-S2, $N = 64800$) donc **recherche infaisable**.

Solution : approximer \mathbf{x} par $\hat{\mathbf{x}}$ à l'aide d'un décodeur itératif :

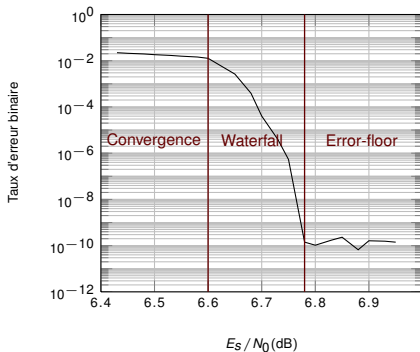
- **Belief Propagation (BP)** / Viterbi / Forward-Backward / BCJR / Sum-Product (complexité en $\mathbf{N.d}_V$),
- Min-Sum,
- Décodeurs Itératifs à Alphabets Finis (FAID),
- BP Généralisé (GBP),
- optimisation sous contraintes (concave-convex procedure),
- ...

Code pratique : standard DVB-S2, rendement $R = 3/4$, modulation 8-PSK, canal sans mémoire à bruit blanc gaussien additif.

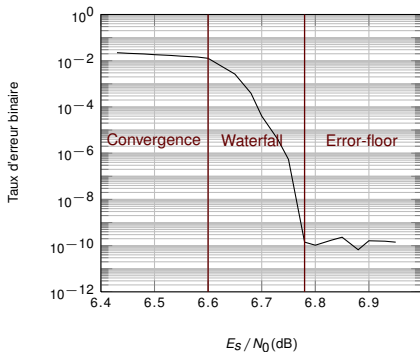


Décodeur BP

Code pratique : standard DVB-S2, rendement $R = 3/4$, modulation 8-PSK, canal sans mémoire à bruit blanc gaussien additif.

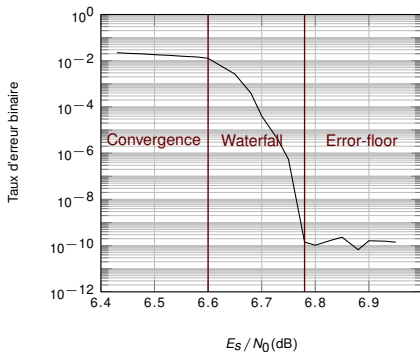


Code pratique : standard DVB-S2, rendement $R = 3/4$, modulation 8-PSK, canal sans mémoire à bruit blanc gaussien additif.



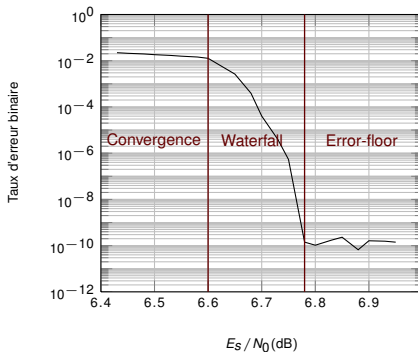
- pourquoi des erreurs ? d_{min} trop petite, processus itératif dégradé par la présence de cycles,

Code pratique : standard DVB-S2, rendement $R = 3/4$, modulation 8-PSK, canal sans mémoire à bruit blanc gaussien additif.



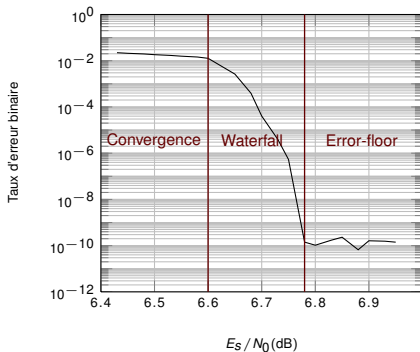
- pourquoi des erreurs ? d_{min} trop petite, processus itératif dégradé par la présence de cycles,
- peut-on les annuler ? *post-processing*,

Code pratique : standard DVB-S2, rendement $R = 3/4$, modulation 8-PSK, canal sans mémoire à bruit blanc gaussien additif.



- pourquoi des erreurs ? d_{min} trop petite, processus itératif dégradé par la présence de cycles,
- peut-on les annuler ? *post-processing*,
- peut-on les éviter ? *design de codes*,

Code pratique : standard DVB-S2, rendement $R = 3/4$, modulation 8-PSK, canal sans mémoire à bruit blanc gaussien additif.



- pourquoi des erreurs ? d_{min} trop petite, processus itératif dégradé par la présence de cycles,
- peut-on les annuler ? *post-processing*,
- peut-on les éviter ? *design de codes*,
- peut-on les modéliser ? aujourd'hui.

Événements d'erreurs

Définition : étant donné le codeword \mathbf{x} émis, l'événement d'erreurs est la séquence des bits qui diffèrent entre \mathbf{x} et $\hat{\mathbf{x}}$

Événements d'erreurs

Définition : étant donné le codeword \mathbf{x} émis, l'événement d'erreurs est la séquence des bits qui diffèrent entre \mathbf{x} et $\hat{\mathbf{x}}$

Analyse d'un événement d'erreurs
2 méthodes complémentaires

chemins graphiques entre les bits de l'événement d'erreur
(*cycles, trapping sets, stopping sets, ...*)

réaction du décodeur en régime forcé
(*oscillation, chaos, divergence, ...*)

Événements d'erreurs

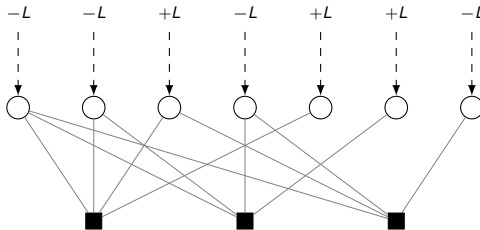
Définition : étant donné le codeword \mathbf{x} émis, l'événement d'erreurs est la séquence des bits qui diffèrent entre \mathbf{x} et $\hat{\mathbf{x}}$

Analyse d'un événement d'erreurs
2 méthodes complémentaires

chemins graphiques entre les bits de l'événement d'erreur
(cycles, trapping sets, stopping sets, ...)

réaction du décodeur en régime forcé
(oscillation, chaos, divergence, ...)

Régime forcé : affecter des observations en sortie du canal, forcer les LLRs à des valeurs extrêmes $\{-L, +L\}$



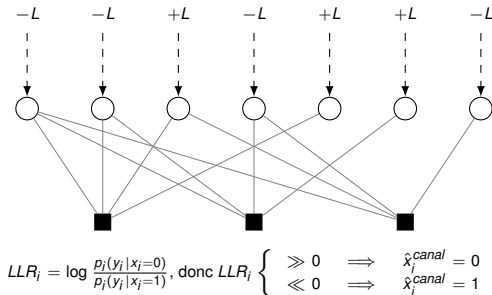
Définition : étant donné le codeword \mathbf{x} émis, l'événement d'erreurs est la séquence des bits qui diffèrent entre \mathbf{x} et $\hat{\mathbf{x}}$

Analyse d'un événement d'erreurs
2 méthodes complémentaires

chemins graphiques entre les bits de l'événement d'erreur
(cycles, trapping sets, stopping sets, ...)

réaction du décodeur en régime forcé
(oscillation, chaos, divergence, ...)

Régime forcé : affecter des observations en sortie du canal, forcer les LLRs à des valeurs extrêmes $\{-L, +L\}$



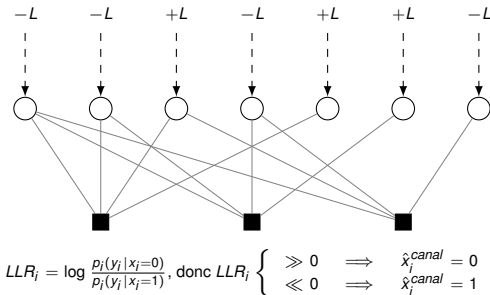
Définition : étant donné le codeword \mathbf{x} émis, l'événement d'erreurs est la séquence des bits qui diffèrent entre \mathbf{x} et $\hat{\mathbf{x}}$

Analyse d'un événement d'erreurs
2 méthodes complémentaires

chemins graphiques entre les bits de l'événement d'erreur
(cycles, trapping sets, stopping sets, ...)

réaction du décodeur en régime forcé
(oscillation, chaos, divergence, ...)

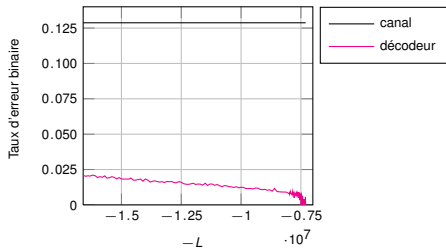
Régime forcé : affecter des observations en sortie du canal, forcer les LLRs à des valeurs extrêmes $\{-L, +L\}$



On envoie le codeword tout-à-zéro, le canal est sans effet si tous les LLRs sont positifs.
En régime forcé, on inflige des LLRs très négatifs $-L$ de manière contrôlée.

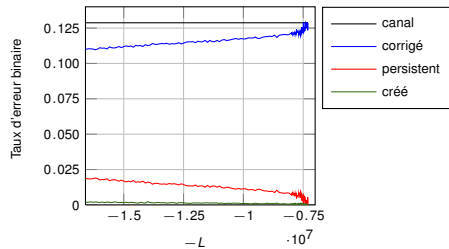
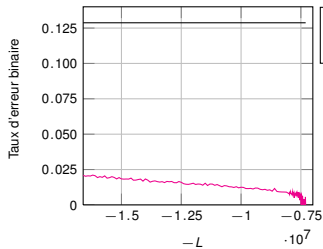
Régime forcé

Code LDPC DVB-S2, rendement 3/4



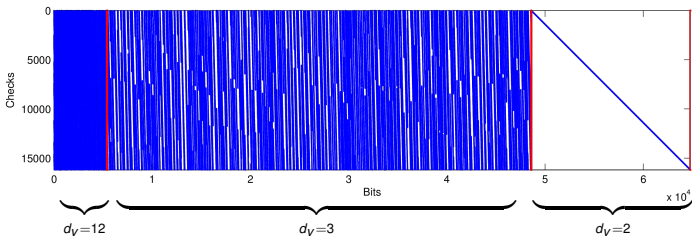
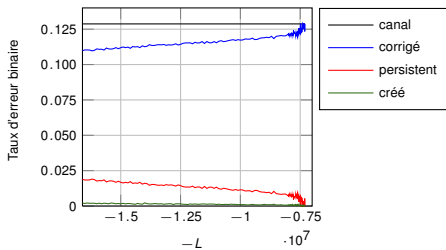
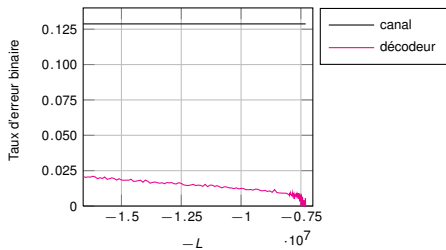
Régime forcé

Code LDPC DVB-S2, rendement 3/4



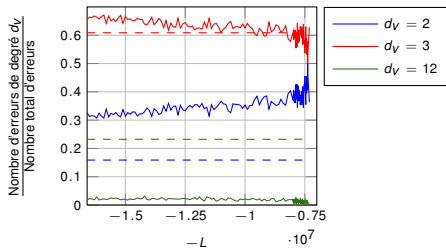
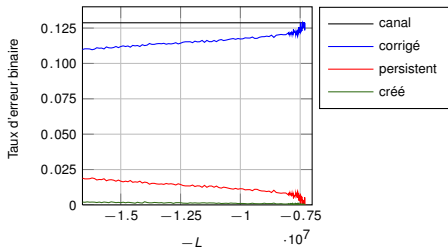
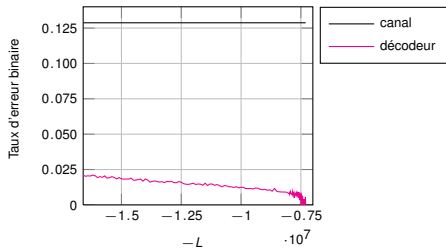
Régime forcé

Code LDPC DVB-S2, rendement 3/4



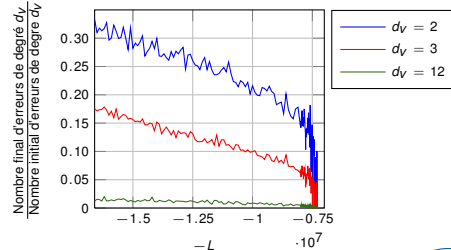
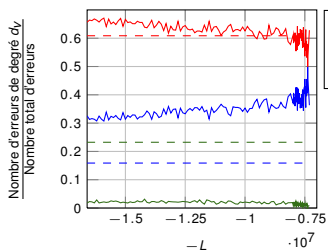
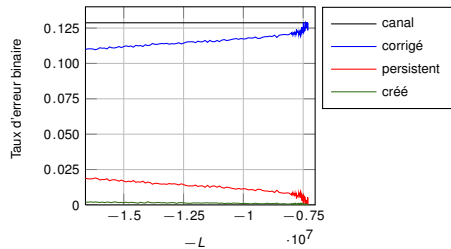
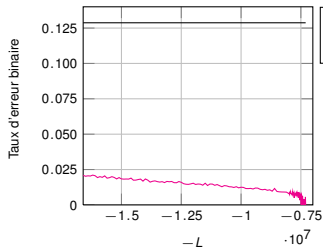
Régime forcé

Code LDPC DVB-S2, rendement 3/4



Régime forcé

Code LDPC DVB-S2, rendement 3/4



Observations :

- les bits en erreurs de degré 12 sont bien corrigés,
- les bits en erreurs de degrés 2 et 3 sont problématiques,
 - ★ erreurs persistentes importantes,
 - ★ erreur créées non nulles

Observations :

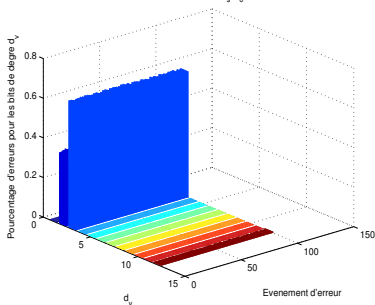
- les bits en erreurs de degré 12 sont bien corrigés,
- les bits en erreurs de degrés 2 et 3 sont problématiques,
 - ★ erreurs persistentes importantes,
 - ★ erreur créées non nulles

Suite de l'analyse :

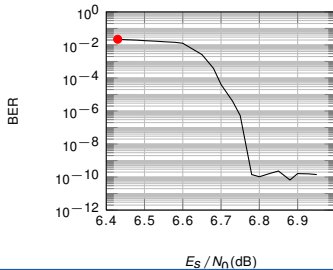
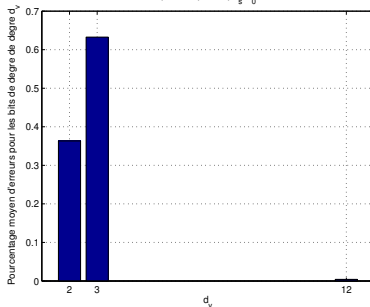
- mise en situation réelle :
 - ★ modulation 8PSK,
 - ★ canal additif gaussien,
 - ★ LLRs non forcés,
- extraction de valeurs moyennes :
 - ★ dépendance au degré des bits,
 - ★ dépendance au SNR

Taux d'erreurs par degré en situation réelle

DVB-S2, R = 3/4, 8PSK, $E_s/N_0 = 6.4\text{dB}$

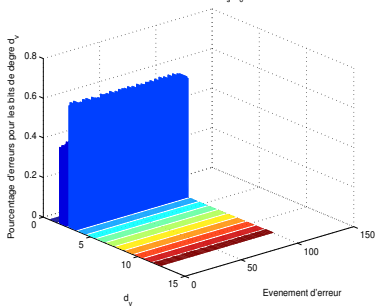


DVB-S2, R = 3/4, 8PSK, $E_s/N_0 = 6.4\text{dB}$

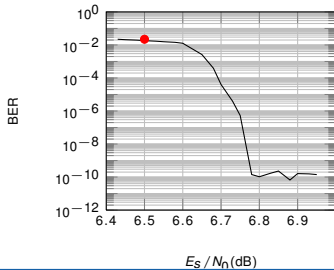
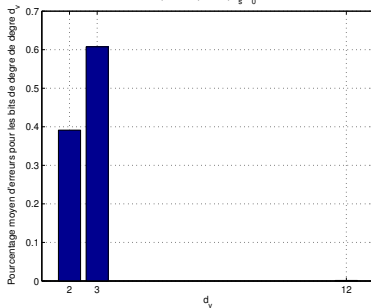


Taux d'erreurs par degré en situation réelle

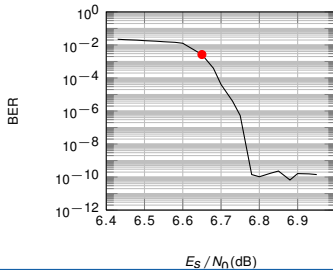
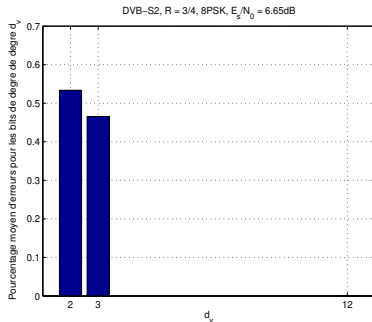
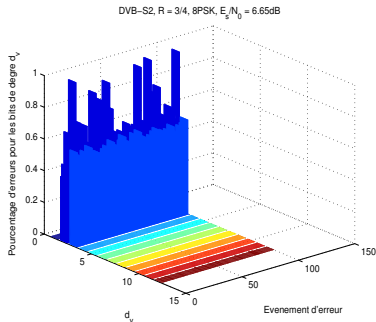
DVB-S2, R = 3/4, 8PSK, $E_s/N_0 = 6.5\text{dB}$



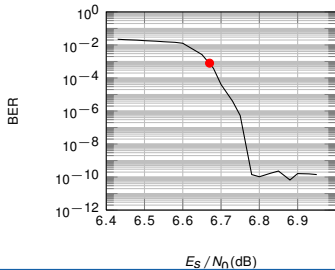
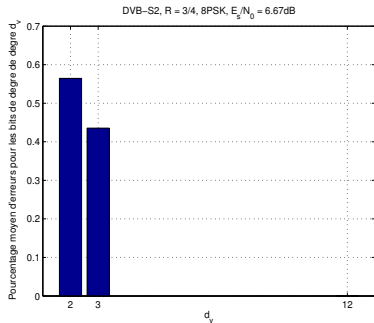
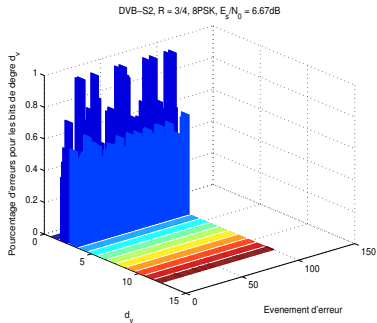
DVB-S2, R = 3/4, 8PSK, $E_s/N_0 = 6.5\text{dB}$



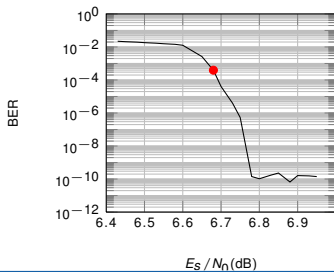
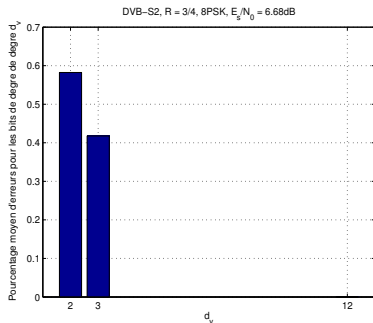
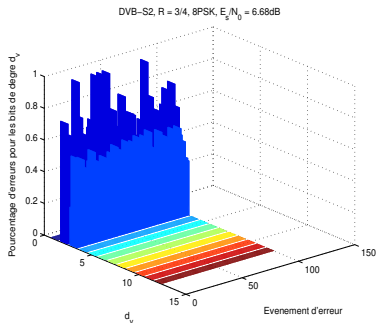
Taux d'erreurs par degré en situation réelle



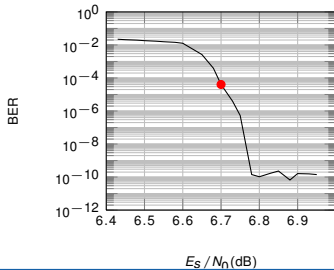
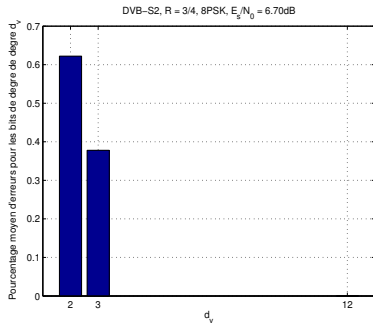
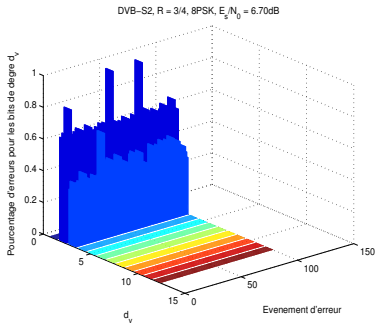
Taux d'erreurs par degré en situation réelle



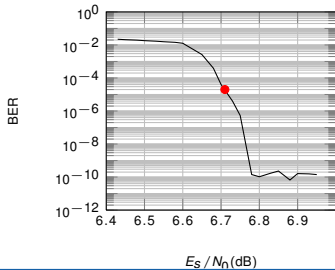
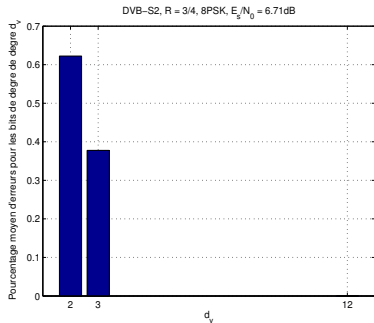
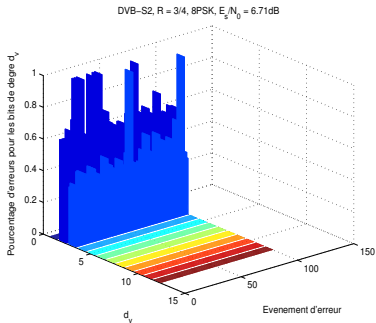
Taux d'erreurs par degré en situation réelle



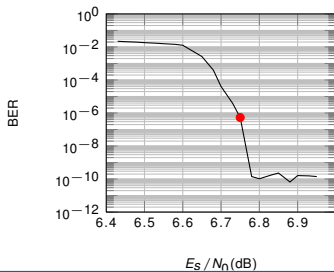
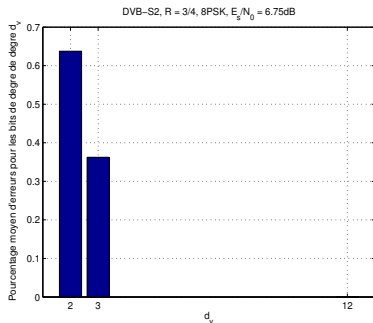
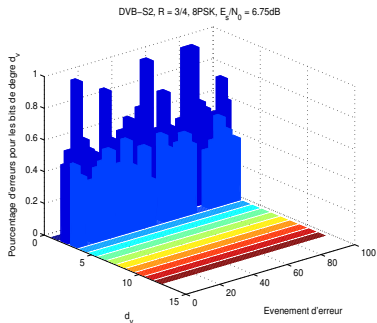
Taux d'erreurs par degré en situation réelle



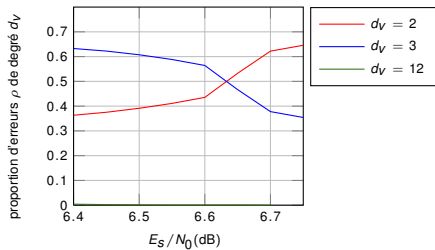
Taux d'erreurs par degré en situation réelle



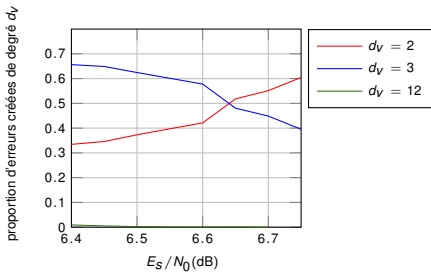
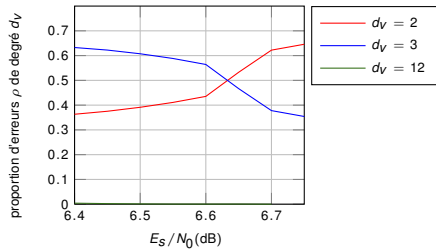
Taux d'erreurs par degré en situation réelle



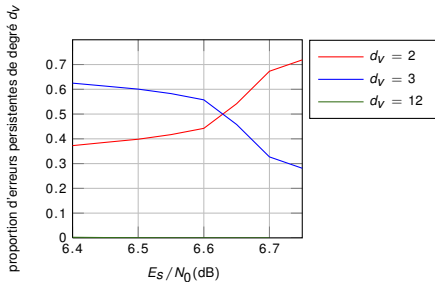
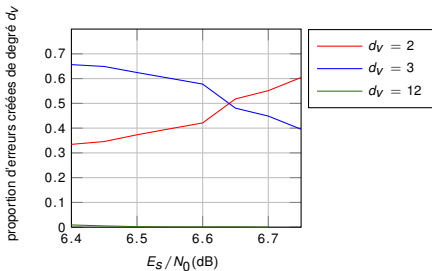
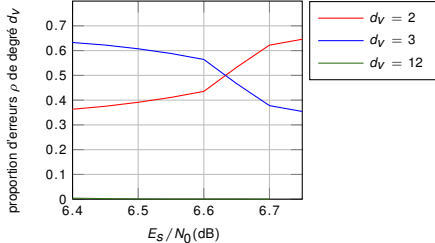
Statistiques par degré en situation réelle



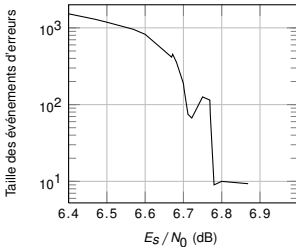
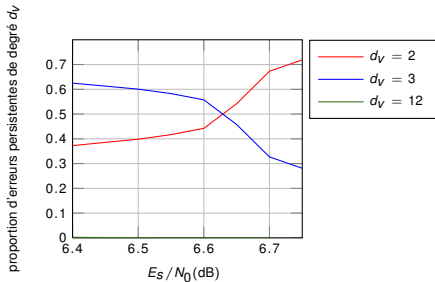
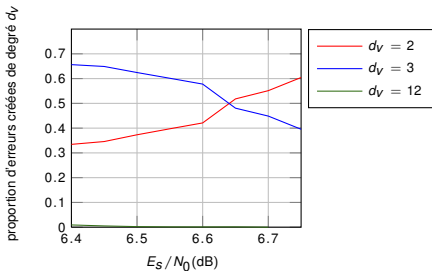
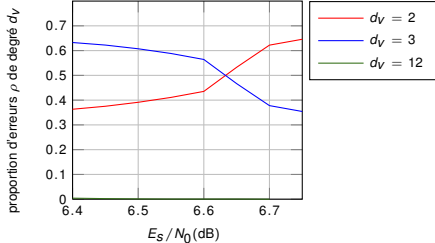
Statistiques par degré en situation réelle



Statistiques par degré en situation réelle



Statistiques par degré en situation réelle



Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :

Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,

Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,

Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,

Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,
- taille de l'événement d'erreurs décroissant avec le SNR.

Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,
- taille de l'événement d'erreurs décroissant avec le SNR.

Modélisation : pour une réalisation de canal à SNR donné

Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,
- taille de l'événement d'erreurs décroissant avec le SNR.

Modélisation : pour une réalisation de canal à SNR donné

- soit N_e le nombre d'erreurs à infliger,

Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,
- taille de l'événement d'erreurs décroissant avec le SNR.

Modélisation : pour une réalisation de canal à SNR donné

- soit N_e le nombre d'erreurs à infliger,
- soit $N_2 = \rho_2 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 2 à infliger,

Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,
- taille de l'événement d'erreurs décroissant avec le SNR.

Modélisation : pour une réalisation de canal à SNR donné

- soit N_e le nombre d'erreurs à infliger,
- soit $N_2 = \rho_2 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 2 à infliger,
- soit $N_3 = \rho_3 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 3 à infliger,

Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,
- taille de l'événement d'erreurs décroissant avec le SNR.

Modélisation : pour une réalisation de canal à SNR donné

- soit N_e le nombre d'erreurs à infliger,
- soit $N_2 = \rho_2 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 2 à infliger,
- soit $N_3 = \rho_3 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 3 à infliger,
- soit $N_{12} = \rho_{12} \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 12 à infliger,

Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,
- taille de l'événement d'erreurs décroissant avec le SNR.

Modélisation : pour une réalisation de canal à SNR donné

- soit N_e le nombre d'erreurs à infliger,
- soit $N_2 = \rho_2 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 2 à infliger,
- soit $N_3 = \rho_3 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 3 à infliger,
- soit $N_{12} = \rho_{12} \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 12 à infliger,

⇒ la modélisation d'événement d'erreurs / simulateur d'erreurs "typiques" en sortie du décodeur est possible !

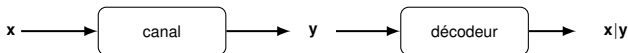
Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,
- taille de l'événement d'erreurs décroissant avec le SNR.

Modélisation : pour une réalisation de canal à SNR donné

- soit N_e le nombre d'erreurs à infliger,
- soit $N_2 = \rho_2 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 2 à infliger,
- soit $N_3 = \rho_3 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 3 à infliger,
- soit $N_{12} = \rho_{12} \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 12 à infliger,

⇒ la modélisation d'événement d'erreurs / simulateur d'erreurs "typiques" en sortie du décodeur est possible !



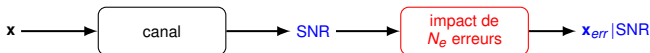
Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,
- taille de l'événement d'erreurs décroissant avec le SNR.

Modélisation : pour une réalisation de canal à SNR donné

- soit N_e le nombre d'erreurs à infliger,
- soit $N_2 = \rho_2 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 2 à infliger,
- soit $N_3 = \rho_3 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 3 à infliger,
- soit $N_{12} = \rho_{12} \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 12 à infliger,

⇒ la modélisation d'événement d'erreurs / simulateur d'erreurs "typiques" en sortie du décodeur est possible !



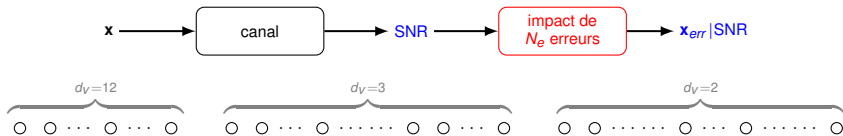
Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,
- taille de l'événement d'erreurs décroissant avec le SNR.

Modélisation : pour une réalisation de canal à SNR donné

- soit N_e le nombre d'erreurs à infliger,
- soit $N_2 = \rho_2 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 2 à infliger,
- soit $N_3 = \rho_3 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 3 à infliger,
- soit $N_{12} = \rho_{12} \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 12 à infliger,

⇒ la modélisation d'événement d'erreurs / simulateur d'erreurs "typiques" en sortie du décodeur est possible !



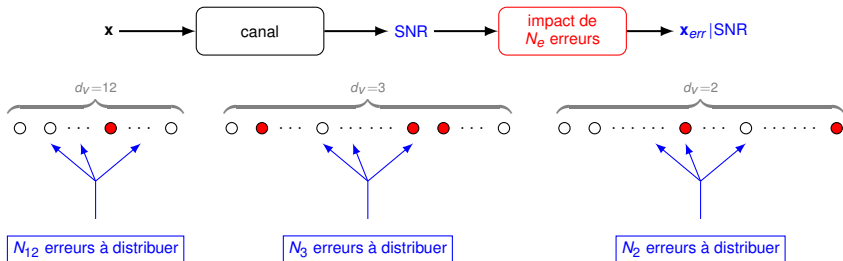
Observations :

- trois zones pour trois comportements selon le SNR :
 - ★ zone de convergence : plus d'erreurs de degré 3, erreurs de degré 2 importantes, erreurs de degré 12 très en-dessous,
 - ★ waterfall : croisement entre les taux d'erreurs de degré 2 et degré 3,
 - ★ error floor : plus d'erreurs de degré 2, erreurs de degré 3 non négligeable, erreurs de degré 12 inexistantes,
- taille de l'événement d'erreurs décroissant avec le SNR.

Modélisation : pour une réalisation de canal à SNR donné

- soit N_e le nombre d'erreurs à infliger,
- soit $N_2 = \rho_2 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 2 à infliger,
- soit $N_3 = \rho_3 \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 3 à infliger,
- soit $N_{12} = \rho_{12} \times N_e$ le nombre d'erreurs de degré 12 à infliger,

⇒ la modélisation d'événement d'erreurs / simulateur d'erreurs "typiques" en sortie du décodeur est possible !



Question : étant donné N_2 , N_3 , N_{12} , comment distribuer les erreurs ?

Solution exacte : sélectionner les bits selon leurs connexions dans le graphe.

Question : étant donné N_2 , N_3 , N_{12} , comment distribuer les erreurs ?

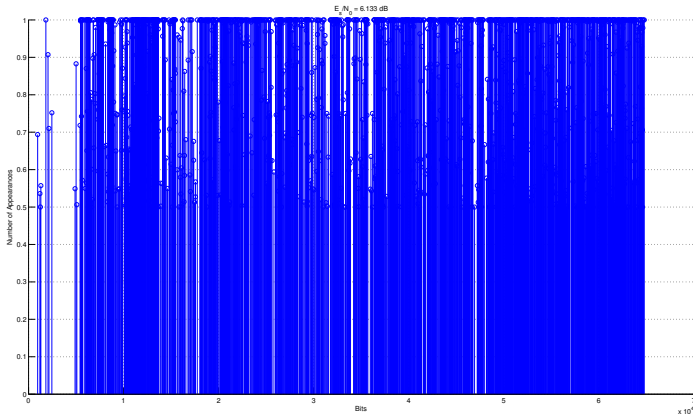
Solution exacte : sélectionner les bits selon leurs connexions dans le graphe.

Solution approchée : sélectionner les bits le plus souvent en erreurs.

Question : étant donné N_2 , N_3 , N_{12} , comment distribuer les erreurs ?

Solution exacte : sélectionner les bits selon leurs connexions dans le graphe.

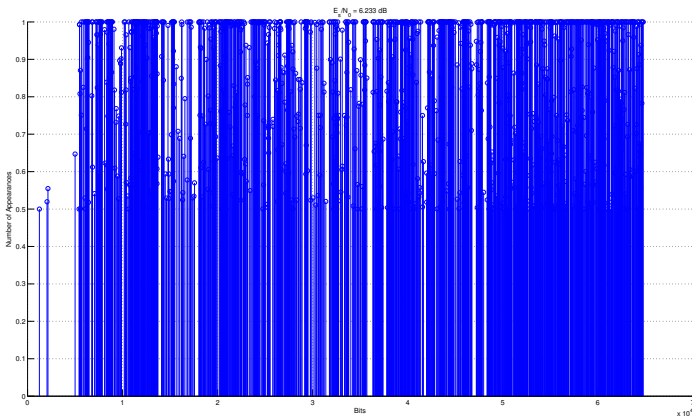
Solution approchée : sélectionner les bits le plus souvent en erreurs.



Question : étant donné N_2 , N_3 , N_{12} , comment distribuer les erreurs ?

Solution exacte : sélectionner les bits selon leurs connexions dans le graphe.

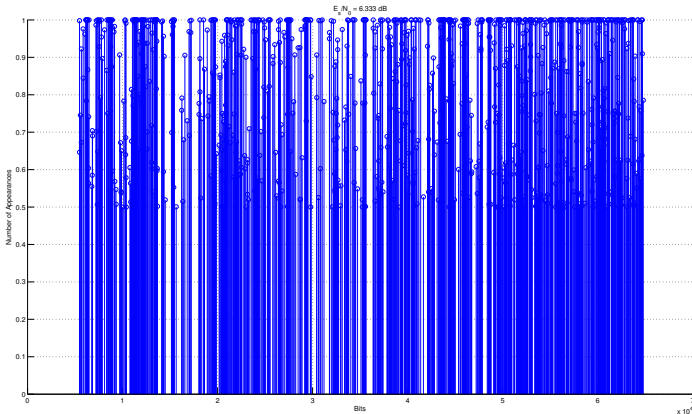
Solution approchée : sélectionner les bits le plus souvent en erreurs.



Question : étant donné N_2 , N_3 , N_{12} , comment distribuer les erreurs ?

Solution exacte : sélectionner les bits selon leurs connexions dans le graphe.

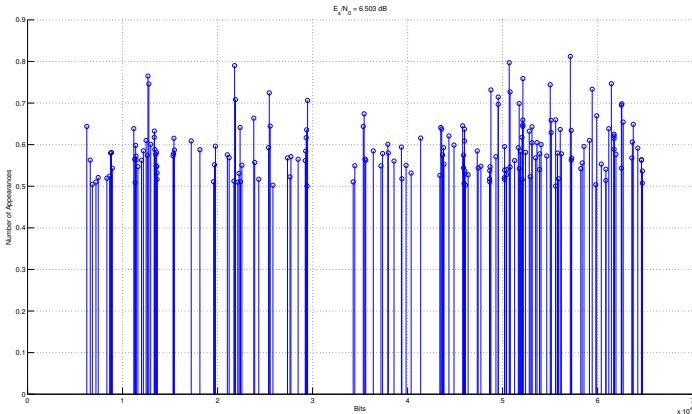
Solution approchée : sélectionner les bits le plus souvent en erreurs.



Question : étant donné N_2, N_3, N_{12} , comment distribuer les erreurs ?

Solution exacte : sélectionner les bits selon leurs connexions dans le graphe.

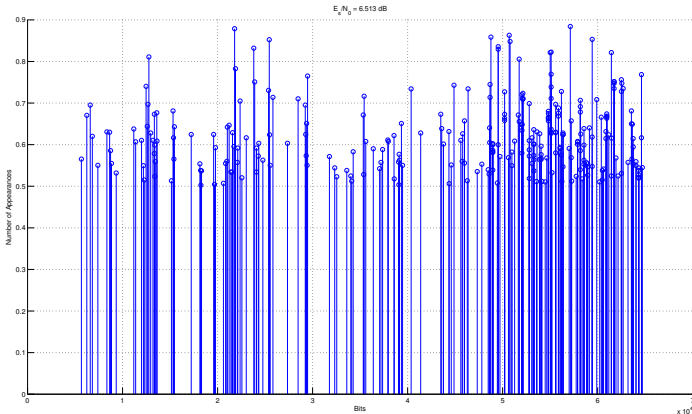
Solution approchée : sélectionner les bits le plus souvent en erreurs.



Question : étant donné N_2 , N_3 , N_{12} , comment distribuer les erreurs ?

Solution exacte : sélectionner les bits selon leurs connexions dans le graphe.

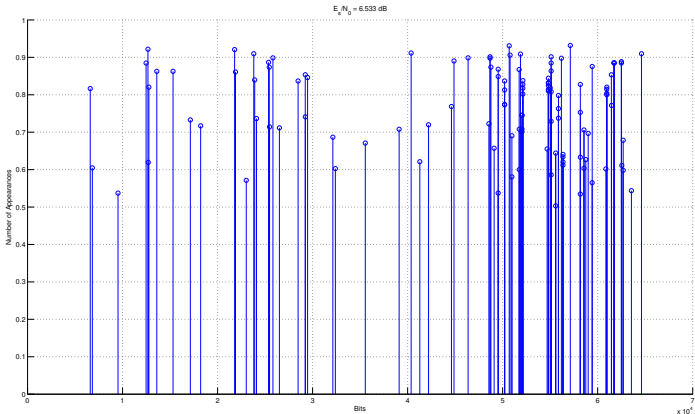
Solution approchée : sélectionner les bits le plus souvent en erreurs.



Question : étant donné N_2, N_3, N_{12} , comment distribuer les erreurs ?

Solution exacte : sélectionner les bits selon leurs connexions dans le graphe.

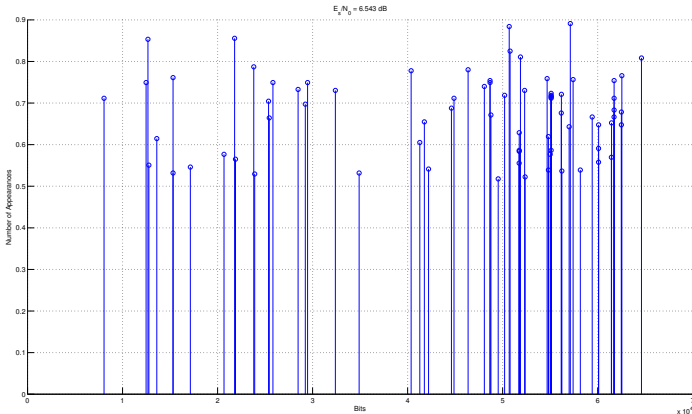
Solution approchée : sélectionner les bits le plus souvent en erreurs.



Question : étant donné N_2 , N_3 , N_{12} , comment distribuer les erreurs ?

Solution exacte : sélectionner les bits selon leurs connexions dans le graphe.

Solution approchée : sélectionner les bits le plus souvent en erreurs.



Question : étant donné N_2, N_3, N_{12} , comment distribuer les erreurs ?

Solution exacte : sélectionner les bits selon leurs connexions dans le graphe.

Solution approchée : sélectionner les bits le plus souvent en erreurs.

