Télécommunications - TPs
Étude de transmissions en bande de base

Première année - Département Sciences du numérique

2021-2022

1 Introduction

L'objectif de ce travail est de vous initier à l'étude d'une chaine de transmission en bande de base, afin que vous soyez capables (via l'étude de quelques cas) :

- D'en évaluer l'efficacité spectrale et l'efficacité en puissance.
- D'identifier les solutions possibles pour l'optimiser en termes d'efficacité spectrale et d'efficacité en puissance.
- De comparer des chaines de transmission en termes d'efficacité spectrale et d'efficacité en puissance.

2 Schéma général des chaines de transmissions à étudier

Les chaines de transmission bande de base à implanter et étudier seront composées des éléments suivants :

2.1 Modulateur bande de base

- Information binaire à transmettre
  La génération de l'information binaire à transmettre (bits 0 et 1 équiprobables et indépendants) pourra être réalisée grâce à la fonction *randi* de Matlab.
- Mapping
  Un mapping devra être réalisé afin de passer de l'information binaire aux symboles a_k. Le mapping est un des élements qui pourra différer selon les modulateurs à étudier et implanter.
- Suréchantillonnage
  La suite d'impulsions de Dirac, espacées de la durée symbole T_s et pondérées par les symboles a_k issus du mapping, sera générée, en numérique, en insérant $N_s - 1$ zéros entre deux symboles a_k, si N_s représente le nombre d'échantillons utilisés par symbole (ou facteur de suréchantillonnage : $T_s = N_s T_e$, T_e étant la période d'échantillonnage). N_s devra être déterminé pour satisfaire aux paramètres physiques imposés (débit binaire, fréquence d'échantillonnage, ordre de la modulation).
- Filtrage de mise en forme
  La réponse impulsionnelle, $h(t)$, du filtre de mise en forme est un des éléments qui pourra différer selon les chaines de transmission à étudier et implanter. Ne seront implantés que des filtres de type RIF (à réponse impulsionnelle finie). Une fois la réponse impulsionnelle numérique générée ($h = [h(0)h(1)...h(N-1)]$, si N représente l'ordre du filtre), le filtrage pourra être réalisé en utilisant la fonction *filter* de matlab : *signal_filtre=filter(h,1,signal_a_filtrer)*.

2.2 Canal de propagation

Le canal de propagation sera donné en fonction de la chaine à étudier. Il sera modélisé, de manière générale par un filtre et/ou un ajout de bruit que l'on supposera blanc et gaussien de densité spectrale de puissance $S_n(f) = \frac{N_0}{2} \forall f$.

2.3 Démodulateur bande de base

- Filtrage de réception
  La réponse impulsionnelle, $hr(t)$, du filtre de réception est un des éléments qui pourra différer selon les chaines de transmission à étudier et implanter. La réponse impulsionnelle du filtre de réception sera, elle aussi, représentée par un tableau de valeurs (ou coefficients) : $hr = [hr(0)hr(1)...hr(N-1)]$, si N représente l'ordre du filtre, en supposant que l'on considère un filtre de type RIF (à réponse impulsionnelle finie). Le filtrage pourra être réalisé en utilisant la fonction *filter* de matlab :
  *signal_filtre=filter(hr,*1*,signal_a_filtrer)*.

- Echantillonnage
  Le signal filtré devra être échantillonné à $n_0 + mN_s$ pour revenir au rythme symbole, n_0 représentant le numéro de l'échantillon à prélever dans la période T_s composée de N_s échantillons en numérique ($t_0 = n_0 T_e$ et $T_s = N_s T_e$). Vous aurez à choisir et/ou à faire varier n_0. L'instant d'échantillonnage optimal n_0 pourra être déterminé grâce au tracé de la réponse impulsionnelle de toute la chaine, ou encore grâce à un diagramme de l'oeil tracé sans bruit en sortie du filtre de réception.

- Décisions sur les symboles
  Un détecteur à seuil sera utilisé pour prendre les décisions sur les symboles. Vous aurez à choisir le/les seuil(s) optimaux à utiliser (issus d'une règle de décision du maximum de vraissemblance pour des symboles supposés équiprobables)

- Demapping
  Un demapping devra être réalisé en vue de comparer les bits reçus aux bits émis dans l'objectif de calculer le taux d'erreur binaire de la transmission implantée. Le demapping devra être adapté au mapping utilisé.

3 Étude de modulateurs bande de base (Séquence 1 du cours)

3.1 Introduction

Ce premier travail va être dédié à l'étude des modulateurs bande de base et, en particulier, à l'identification des éléments ayant un impact sur l'efficacité spectrale obtenue pour la transmission.

3.2 Modulateurs à étudier et comparer

Le travail qui va vous être demandé va consister à étudier et comparer, en termes d'efficacité spectrale, les modulateurs suivants :

- Modulateur 1:
  - Mapping : symboles binaires à moyenne nulle.
  - Filtre de mise en forme : rectangulaire de durée $T_{s_1} = N_{s_1} T_e$ et de hauteur 1.
- Modulateur 2:
  - Mapping : symboles 4-aires à moyenne nulle.
  - Filtre de mise en forme : rectangulaire de durée $T_{s_2} = N_{s_2} T_e$ et de hauteur 1.
- Modulateur 3:
  - Mapping : symboles binaires à moyenne nulle.
  - Filtre de mise en forme : racine de cosinus surélevé. Vous pourrez utiliser la fonction rcosdesign.m de Matlab afin de générer la réponse impulsionnelle de ce filtre. Ce filtre a une bande fréquentielle finie, il a donc une réponse impulsionnelle infinie qui devra être tronquée afin de réaliser un filtre de type RIF. En utilisant $h = rcosdesign(\alpha, L, N_s)$; vous pouvez réaliser un filtre en racine de cosinus surélevé avec une réponse impulsionnelle de longueur $N = L \times N_s + 1$ échantillons (ou coefficients) et de roll off α (paramètre compris entre 0 et 1 qui fixe la largeur de bande).

3.3 Travail à réaliser

Les modulateurs précédemment décrits devront être implantés sous Matlab avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 24000$ Hz pour transmettre un même débit binaire $R_b = \frac{1}{T_b} = 3000$ bits par seconde.

1. Implantez chaque modulateur.

2. Pour chaque modulateur implanté :

   - Tracez le signal transmis avec une échelle temporelle en secondes.
   - Tracez la densité spectrale de puissance (DSP) du signal transmis avec une échelle fréquentielle en Hz.
   - Comparez le tracé obtenu pour la DSP avec celui de la DSP théorique du signal généré (superposition sur une même figure). La DSP théorique du signal généré par le premier modulateur a été calculée en cours et est reprise dans une vidéo de la séquence 1 (ici) La DSP du signal généré par le modulateur 2 s'en déduit simplement. La DSP théorique du signal généré par le modulateur 3 vous est donnée ci-dessous :

   $$S_x(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_s} \begin{cases} T_s \; if \;\; |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T_s} \\ \frac{T_s}{2}\left(1 + \cos\left(\frac{\pi T_s}{\alpha}\left(|f| - \frac{1-\alpha}{2T_s}\right)\right)\right) \; for \; \frac{1-\alpha}{2T_s} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T_s} \\ 0 \; elsewhere \end{cases} \tag{1}$$

   où σ_a^2 représente la variance des symboles émis.

3. Comparez les modulateurs implantés en termes d'efficacité spectrale. Pour cela vous pouvez tracer sur une même figure (grâce à *hold.m*), les DSP des signaux générés par les différents modulateurs étudiés afin de pouvoir les classer par ordre d'efficacité spectrale croissante. Identifier les éléments, les paramètres permettant, quand on implante un modulateur numérique en bande de base, d'augmenter l'efficacité spectrale de la transmission.

4 Étude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist (Séquence 2)

4.1 Introduction

Cette partie va être dédié à l'étude des interférences entre symboles dans une chaine de transmission et à l'intérêt d'y respecter le critère de Nyquist.
Pour cela, vous allez devoir implanter une chaine de transmission en bande de base sans bruit pour l'analyser en vous focalisant sur les interférences entre symboles : leur impact sur la transmission et l'influence du respect ou du non respect du critère de Nyquist.
La chaine de transmission à implanter devra l'être avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 24000$ Hz pour transmettre un débit binaire $R_b = \frac{1}{T_b} = 3000$ bits par seconde.
On considèrera un mapping binaire à moyenne nulle, un filtre de mise en forme et un filtre de réception de même réponse impulsionnelle rectangulaire de durée T_s et de hauteur 1.

4.2 Étude sans canal de propagation

Vous allez devoir, dans un premier temps, étudier la chaine de transmission sans canal de propagation, c'est-à-dire sans bruit mais également sans filtrage introduit par le canal (réponse impulsionnelle du canal $h_c(t) = \delta(t)$). Ce qui revient à étudier uniquement le bloc modulateur/démodulateur.

1. Implantez le bloc modulateur/démodulateur proposé jusqu'à la sortie du filtre de réception.

2. Tracez le signal en sortie du filtre de réception. Ce tracé vous parait-il conforme à ce qui est attendu en théorie ? Expliquez votre réponse.

3. Tracez la réponse impulsionnelle globale de la chaine de transmission, g. Vous pouvez utiliser la fonction *conv.m* de Matlab pour réaliser un produit de convolution.

4. Déterminez, à partir du tracé de g, l'instant n_0 optimal permettant d'échantillonner aux instants sans interférences entre symboles $n_0 + mN_s$. Expliquez votre choix.

5. Tracez le diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception. Vous pouvez utiliser pour cela l'instruction *plot(reshape(z,N_s,length(z)/N_s))*, si z représente le signal en sortie du filtre de réception et que vous souhaitez tracer ce diagramme de l'oeil sur une durée correspondant à N_s échantillons.
6. A partir du diagramme de l'oeil tracé retrouve t-on l'instant n_0 optimal permettant d'échantillonner aux instants sans interférences entre symboles $n_0 + mN_s$? Expliquez votre réponse.
7. Echantillonnez le signal en sortie du filtre de réception à $n_0 + mN_s$ avec le n_0 optimal déterminé et vérifiez que le taux d'erreur binaire obtenu est bien égal à 0. On utilisera un détecteur à seuil, avec seuil en 0, pour prendre les décisions sur les symboles et on adaptera le demapping au mapping réalisé.
8. Echantillonnez le signal en sortie du filtre de réception à n_0+mN_s, avec $n_0 = 3$. Estimez le taux d'erreur binaire de la transmission en utilisant le même détecteur et le même mapping que précédemment. Expliquez le résultat obtenu.

4.3 Étude avec canal de propagation sans bruit

Vous allez maintenant considérer un canal de propagation à bande limitée BW mais qui n'introduit pas de bruit. Pour cela, vous devez reprendre la chaine de transmission implantée précédemment, avec un échantillonnage aux instants optimaux, et ajouter un filtre passe-bas représentant le canal de propagation.

La réponse impulsionnelle d'un filtre passe-bas peut être obtenue, sous Matlab, de la manière suivante :

$$hc = (2 * fc/Fe) * sinc(2 * (fc/Fe) * [-(N-1)/2 : (N-1)/2])$$

où fc représente la fréquence de coupure (BW ici) et N l'ordre du filtre (voir le cours de traitement numérique du signal sur la synthèse de filtres RIF ou l'annexe).

1. Pour $BW = 8000$ Hz:
   - Tracez la réponse impulsionnelle globale de la chaine de transmission.
   - Tracez le diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception.
   - Représentez, sur la même figure, $|H(f)H_r(f)|$ et $|H_c(f)|$, où $H(f)$ est la réponse en fréquence du filtre de mise en forme, $H_r(f)$ la réponse en fréquence du filtre de réception et $H_c(f)$ la réponse en fréquence du filtre canal.
   - Déterminez le TEB de la transmission en présence de ce canal et expliquez le résultat obtenu en vous appuyant sur les trois tracés précédents.
2. Pour $BW = 1000$ Hz:
   - Tracez la réponse impulsionnelle globale de la chaine de transmission.
   - Tracez le diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception.
   - Représentez, sur la même figure, $|H(f)H_r(f)|$ et $|H_c(f)|$, où $H(f)$ est la réponse en fréquence du filtre de mise en forme, $H_r(f)$ la réponse en fréquence du filtre de réception et $H_c(f)$ la réponse en fréquence du filtre canal.
   - Déterminez le TEB de la transmission en présence de ce canal et expliquez le résultat obtenu en vous appuyant sur les trois tracés précédents.

5 Étude de l'impact du bruit, filtrage adapté, taux d'erreur binaire, efficacité en puissance (Séquence 3)

5.1 Introduction

Cette dernière partie va être dédié à l'étude du bruit dans la chaine de transmission numérique : impact du bruit introduit par le canal sur la transmission, influence du filtrage adapté, calcul et estimation du taux d'erreur binaire (TEB).

Pour cela, vous allez devoir implanter sous Matlab différentes chaines de transmission, les analyser et les comparer en vous focalisant, cette fois, sur leur efficacité en puissance : influence du respect ou du non respect du critère de filtrage adapté, influence du mapping.

Les chaines de transmission proposées devront toujours être implantées, dans un premier temps, sans bruit puis un bruit gaussien devra être ajouté au signal émis. Il sera généré de la manière suivante :

$$bruit = \sigma_n * randn(1, length(x));$$

avec x qui représente le signal à bruiter et σ_n^2 la puissance du bruit souhaitée.
σ_n^2 est donnée, en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur $\frac{E_b}{N_0}$, par (voir démonstration en annexe) :

$$\sigma_n^2 = \frac{P_x N_s}{2\log_2(M)\frac{E_b}{N_0}},$$

où N_s représente le facteur de suréchantillonage, M l'ordre de la modulation et P_x la puissance du signal à bruiter (signal en sortie du modulateur bande de base). P_x peut être obtenue sous matlab de la manière suivante : $P_x = mean(abs(x).\hat{}2)$.

5.2 Chaine de référence

On va, dans un premier temps reprendre la chaine de transmission implantée sans canal dans la section précédente, avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 24000$ Hz, pour transmettre un débit binaire $R_b = 3000$ bits par seconde : mapping binaire à moyenne nulle, réponses impulsionnelles des filtres de mise en forme et de réception, h et h_r, rectangulaires de durée T_s et de hauteur 1, échantillonnage aux instants $n_0 + mN_s$ optimaux, détecteur à seuil, avec seuil en 0, pour prendre les décisions sur les symboles et demapping adapté au mapping réalisé.
Vous commencerez par vérifier que, sur cette chaine sans bruit, le TEB obtenu est bien nul puis vous introduirez le bruit et, à partir de cette chaine de transmission bruitée :

1. vous observerez le diagramme de l'oeil pour différentes valeurs de E_b/N_0 afin de visualiser l'impact du bruit.
2. vous tracerez le taux d'erreur binaire obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) en décibels pour des valeurs allant de 0 à 8 dB. Attention à la précision de vos mesures pour les TEBs simulés (voir en annexe).
3. vous comparerez, en les traçant sur une même figure, le TEB simulé et le TEB théorique de la chaine étudiée. Ce tracé doit permettre de valider le bon fonctionnement de votre chaine de transmission.

5.3 Première chaine à étudier, implanter et comparer à la chaine de référence

On considèrera maintenant un mapping binaire à moyenne nulle et les réponses impulsionnelles des filtres de mise en forme et de réception, h et h_r, données par la figure 1.
La fréquence d'échantillonnage sera prise égale à 24000 Hz, pour transmettre un débit binaire $R_b = 3000$ bits par seconde.

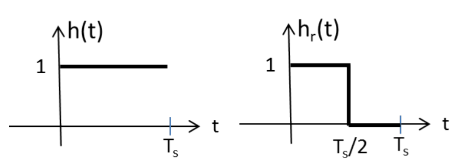

Figure 1: Réponses impulsionnelles des filtres d'émission et de réception.

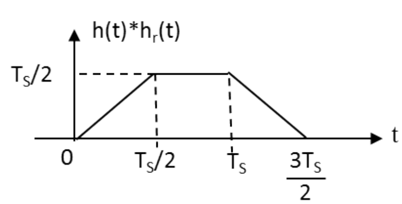

Figure 2: Produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$.

5.3.1 Implantation de la chaine sans bruit

1. Tracez un diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée T_s (N_s échantillons) afin de déterminer les instants optimaux d'échantilllonnage n_0+mN_s. Expliquez votre choix pour n_0. Le tracé du diagramme de l'œil est-il conforme à à ce qui est attendu en théorie ? Expliquez votre réponse.

2. En utilisant les instants optimaux d'échantillonnage puis un détecteur à seuil, avec seuil optimal, vérifiez que le TEB obtenu est bien nul.

5.3.2 Implantation de la chaine avec bruit

Rajoutez le bruit à la chaine précédente et :

1. Observez le diagramme de l'œil pour différentes valeurs de E_b/N_0.

2. Tracez le taux d'erreur binaire obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) en décibels. On prendra des valeurs de $(E_b/N_0)_{dB}$ allant de 0 à 8 dB. Attention à la précision de vos mesures pour les TEBs simulés (voir en annexe).

3. Comparez, en les traçant sur une même figure, le TEB simulé au TEB théorique de la chaine étudiée (voir TD2). Ce tracé doit permettre de valider le bon fonctionnement de votre chaine de transmission.

4. Comparez le TEB obtenu par simulation pour la chaine de transmission étudiée au TEB obtenu par simulation (ou au TEB théorique) de la chaine de référence (comparaison en termes d'efficacité en puissance). La similitude ou différence obtenue devra être expliquée. La chaine éventuellement la plus efficace en puissance devra être identifiée, en expliquant ce qui la rend éventuellement plus efficace.

5. Cette chaine de transmission est-elle plus efficace spectralement que la chaine de référence (voir premier travail réalisé sur les modulateurs bande de base) ? Expliquez ce qui la rend éventuellement plus efficace.

5.4 Deuxième chaine à étudier, implanter et comparer à la chaine de référence

On considèrera un mapping 4-aire à moyenne nulle (symboles $a_k \in \{-3,-1,1,3\}$) et des réponses impulsionnelles des filtres de mise en forme et de réception, h et h_r, rectangulaires de hauteur 1 et de durée T_s.
La fréquence d'échantillonnage sera prise égale à 24000 Hz, pour transmettre un débit binaire $R_b = 3000$ bits par seconde.
On pourra utiliser les lignes de codes suivantes pour réaliser le mapping et le demapping 4-aire :

- Mapping : $Symboles = (2 * bi2de(reshape(bits, 2, length(bits)/2).') - 3).'$;
  si $bits$ représente le vecteur contenant l'information binaire à transmettre. $Symboles$ contiendra alors les symboles issus du mapping.

- Demapping : $BitsDecides = reshape(de2bi((SymbolesDecides + 3)/2).', 1, length(bits))$;
  si $SymbolesDecides$ représente le vecteur contenant les symboles en sortie du bloc décision. $BitsDecides$ contiendra alors l'information binaire retrouvée, à comparer avec l'information binaire transmise pour calculer le taux d'erreur binaire.

5.5 Implantation de la chaine sans bruit

1. Tracez un diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception afin de déterminer les instants optimaux d'échantillonnage et les seuils optimaux de décision (détecteur à seuil). Expliquez les choix réalisés. Les résultats obtenus sont-ils conformes à la théorie ? Expliquez votre réponse.

2. En utilisant les instants optimaux d'échantillonnage puis un détecteur à seuil, avec seuils optimaux, vérifiez que le TEB obtenu est bien nul.

5.6 Implantation de la chaine avec bruit

1. Tracez le taux d'erreur symbole (TES) obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) en décibels. On prendra des valeurs du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) en décibels allant de 0 à 8 dB.

2. Comparer, en les traçant sur une même figure, le TES obtenu par simulation sur la chaine implantée au TES théorique donné ci-dessous :

$$TES = \frac{3}{2}Q\left(\sqrt{\frac{4}{5}\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

pour une transmission de symboles 4-aires indépendants prenant leurs valeurs dans $\pm 1, \pm 3$, en utilisant une chaine de transmission respectant le critère de Nyquist, le critère de filtrage adapté et utilisant les instants optimaux d'échantillonnage et seuils optimaux de décision. Ce tracé doit permettre de valider le bon fonctionnement de votre chaine de transmission.

3. Tracez le taux d'erreur binaire (TEB) obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) en décibels.

4. Comparez le TEB obtenu par simulation sur la chaine implantée au TEB suivant :

$$TEB = \frac{3}{4}Q\left(\sqrt{\frac{4}{5}\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

La similitude ou différence obtenue devra être expliquée. La chaine éventuellement la plus efficace en puissance devra être identifiée, en expliquant ce qui la rend éventuellement plus efficace.

5. Comparez le TEB obtenu par simulation sur la chaine implantée au TEB obtenu pour la chaine de référence. Leur similitude ou différence devra être expliquée. La chaine éventuellement la plus efficace en puissance devra être identifiée, en expliquant ce qui la rend éventuellement plus efficace.

6. Cette chaine de transmission est-elle plus efficace spectralement que la chaine de référence (voir premier travail réalisé sur les modulateurs bande de base) ? Expliquez ce qui la rend éventuellement plus efficace.

6 Annexes

6.1 Puissance de bruit à introduire dans les chaines de transmission

On introduit un bruit de densité spectrale de puissance $N_0/2$ dans la bande F_e. La variance du bruit à introduire est donc donnée par :

$$\sigma_n^2 = \frac{N_0}{2}F_e = \frac{E_s}{2\frac{E_s}{N_0}}F_e = \frac{P_xT_s}{2\frac{E_s}{N_0}}F_e = \frac{P_xN_s}{2log_2(M)\frac{E_b}{N_0}}$$

où

- E_s représente l'énergie par symbole à l'entrée du récepteur : $E_s = \log_2(M)E_b$, si E_b représente l'énergie binaire à l'entrée du récepteur et M l'ordre de la modulation,
- T_s représente la durée symbole,
- N_s représente le facteur de suréchantillonnage : $T_s = N_sT_e$, $T_e = 1/F_e$ étant la période d'échantillonnage
- P_x représente la puissance du signal à bruiter (signal en sortie du modulateur bande de base).

6.2 Précision sur les mesures de TEB

Le TEB peut être modélisé par une somme de variables aléatoires X_k prenant leurs valeurs dans l'ensemble $\{0, 1\}$ avec les probabilités $P[X_k = 0] = 1 - p$ (pas d'erreur) et $P[X_k = 1] = p$ (erreur) :

$$TEB = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} X_k.$$

L'erreur quadratique relative sur le TEB est donnée par :

$$\epsilon^2 = \frac{\sigma_{TEB}^2}{m_{TEB}^2},$$

où m_{TEB} et σ^2_{TEB} représentent, respectivement, la moyenne et la variance sur l'estimation du TEB.
La précision sur les mesures de TEB sera donnée par ϵ. On peut écrire :

$$m_{TEB} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} E\left[X_k\right] = \frac{1}{N} N\left(1 \times p + 0 \times (1-p)\right) = p$$

et

$$\sigma^2_{TEB} = E\left[\left(\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} X_k\right)^2\right] - p^2 = \frac{1}{N^2}\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{N} E\left[X_k X_i\right] - p^2$$

- si $k = i$ (N cas) alors $E\left[X_k^2\right] = 1^2 \times p + 0^2 \times (1-p) = p$
- si $k \neq i$ ($N^2 - N$ cas) alors $E\left[X_k X_i\right] = E\left[X_k\right] E\left[X_i\right] = p^2$

D'où :

$$\sigma^2_{TEB} = \frac{1}{N^2}\left\{Np + \left(N^2 - N\right)p^2\right\} - p^2 = \frac{p(1-p)}{N}$$

On constate que la variance de l'erreur tend vers 0 quand N augmente et on peut écrire l'erreur quadratique relative sur le TEB de la manière suivante :

$$\epsilon^2 = \frac{\sigma^2_{TEB}}{m^2_{TEB}} = \frac{1-p}{Np} \simeq \frac{1}{Np} \; pour\ p << 1$$

On obtient alors :

- le nombre d'élément binaire à générer, N, de manière à obtenir une précision ϵ fixée sur la mesure d'un TEB dont la valeur est, a priori, connue. Par exemple, si on veut mesurer un TEB de 10^{-2} avec une précision de 10%, il faudra générer $N = \frac{1}{10^{-2} \times (10^{-1})^2} = 10^4$ bits.
- le nombre de simulations à réaliser si la valeur à mesurer pour le TEB n'est pas, a priori, connue. On fera alors des simulations jusqu'à observer $1/\epsilon^2$ erreurs pour obtenir une mesure avec une précision ϵ fixée. Par exemple, si on veut mesurer le TEB avec une précision $\epsilon = 10\%$, il faudra compter les erreurs jusqu'à en obtenir $1/\epsilon^2 = 10^2$ avant de considérer la mesure de TEB obtenue comme disposant de la précision requise.