1 Introduction

L'objectif de ce cours est d'introduire les problématiques liées à la transmission de l'information, du point de vue de la représentation de l'information et de l'adaptation aux contraintes du canal de communication.

Considérons deux correspondants distants qui souhaitent échanger une information : des données, de la voix, des images, de la vidéo... Nous supposons que cette information peut être représentée sous la forme d'un message composé d'éléments binaires.

FIG. 1.1 – Une communication.

Ce message binaire, objet abstrait, doit traverser un canal de communication bien concret : câble métallique, fibre optique, espace libre (air, vide, eau). L'*émetteur* doit donc adapter le message au canal physique :

- Dans le cas d'un câble métallique, l'information sera véhiculée *via* un courant électrique. Par exemple, un bit 0 sera codé par un certain niveau de tension, un bit 1 par un autre niveau.
- Sur une fibre optique, c'est l'émission ou non de lumière qui code un élément binaire.
- Enfin, pour la propagation dans l'espace libre, l'information est transmise par des ondes de nature adaptée à l'espace : ondes radio dans l'air et le vide, ondes acoustiques dans l'eau. Le signal émis prend généralement la forme d'une sinusoïde, dont l'amplitude, la fréquence ou la phase code l'information. Par exemple, un émetteur radio en modulation de fréquence numérique binaire effectue la transformation suivante :

$$\begin{array}{lll} 0 & \rightarrow & \text{Champ électromagnétique}\, S_0(t) = \sin(2\pi f_0 t) \quad \text{pendant}\, T \text{ s} \\ 1 & \rightarrow & \text{Champ électromagnétique}\, S_1(t) = \sin(2\pi f_1 t) \quad \text{pendant}\, T \text{ s} \end{array}$$

où T est le temps consacré à l'émission d'un élément binaire. La figure 1.2 illustre l'émission d'un message par un tel émetteur.

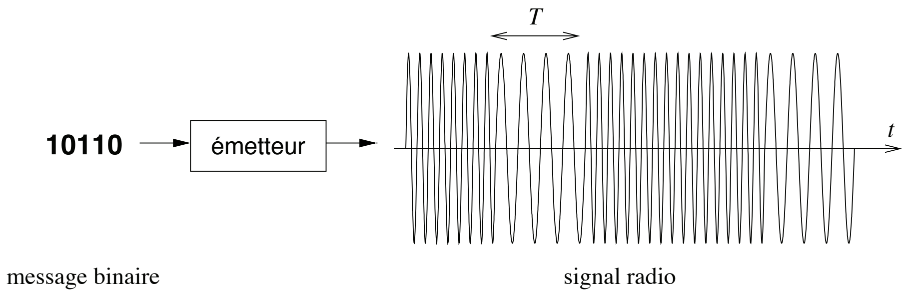

FIG. 1.2 – Émission d'un message par des symboles binaires : modulation de fréquence binaire.

Souvent, les éléments binaires sont transmis par blocs. À chaque mot de n éléments binaires est associé un *symbole* $S_i(t)$ appartenant un *alphabet* $\{S_1(t), S_2(t), ..., S_M(t)\}$, avec $M = 2^n$. Dans ce cas, le symbole est dit *M-aire* (pour $M = 2$ on dit binaire, pour $M = 4$, quaternaire). Un symbole est un *signal*, c'est-à-dire une grandeur physique fonction du temps (d'où la notation $S_i(t)$).

Par exemple, pour envoyer des mots de 2 éléments binaires sur un câble électrique, on définit un alphabet de 4 symboles, associant à chaque mot une tension :

$$\left.\begin{array}{lcl} 00 & \rightarrow & S_0(t) = -3 \text{ V} \\ 01 & \rightarrow & S_1(t) = -1 \text{ V} \\ 10 & \rightarrow & S_2(t) = +1 \text{ V} \\ 11 & \rightarrow & S_3(t) = +3 \text{ V} \end{array}\right\} \text{pendant } T \text{ s}$$

où T est la durée symbole. La figure 1.3 illustre la transmission d'un message par cet émetteur.

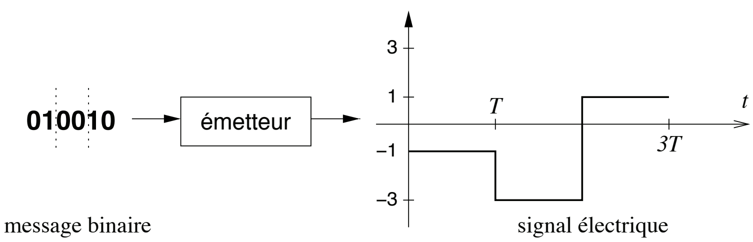

FIG. 1.3 – Émission d'un message par des symboles quaternaires.

On définit la *rapidité de modulation*, notée R, comme le nombre de symboles par seconde. On a donc $R = 1/T$. En général, on s'intéresse plutôt au *débit binaire* (noté

D), c'est-à-dire le nombre d'éléments binaires transmis par seconde. Dans le cas de symboles M-aires avec $M = 2^n$, R et D sont liés par :

$$D = nR = R \log_2 M$$

Le *récepteur* interprète les signaux physiques reçus en messages binaires. Cette interprétation est perturbée par le fait que le canal altère les signaux transmis. Si un câble métallique était un conducteur parfait, une tension de -1V à l'émission se traduirait par une tension de -1V en réception, ce qui faciliterait la tâche du récepteur. Malheureusement, du fait de l'agitation des porteurs de charges, des effets de surface du conducteur, des effets résistifs, inductifs et capacitifs... le signal reçu lors de l'émission d'un symbole $S_i(t)$ n'est plus $S_i(t)$ mais :

$$r(t) = F[S_i(t)] + \epsilon(t)$$

où F désigne un filtrage et $\epsilon(t)$ modélise un signal parasite, appelé *bruit*. Comme illustré par la figure 1.4 dans le cas d'une perturbation par le bruit seul, cette perturbation du signal de communication peut conduire le récepteur à se tromper dans l'interprétation, *i.e.* à détecter des messages binaires différents de ceux émis.

Les pertubations sont encore plus importantes dans le cas d'une transmission en espace libre, puisque le canal est partagé avec d'autres utilisateurs. À ces interférences inter-utilisateurs s'ajoutent les parasites électromagnétiques générés par les appareils électriques.

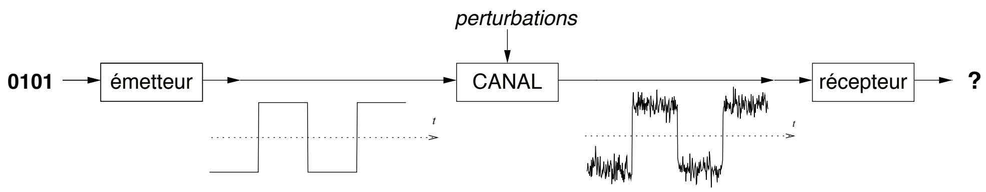

FIG. 1.4 – Perturbations du canal de transmission.

L'objectif d'un système de communication est d'assurer, pour tous les utilisateurs, le débit maximum avec la probabilité d'erreur binaire (probabilité de se tromper sur la valeur d'un bit) minimale. Nous verrons par la suite que ces deux objectifs sont contradictoires, de sorte qu'il faut trouver un compromis entre la qualité (débit et taux d'erreurs) souhaitée pour l'application visée et les contraintes imposées par le canal. Notons que le taux d'erreur acceptable dépend de l'application : alors que la transmission de la voix supporte un taux d'erreur de 10^{-6}, la transmission de données exige des probabilités d'erreur d'autant plus faibles que les données sont sensibles, typiquement 10^{-12}.

De telles probabilités d'erreur sont difficiles à obtenir avec les débits usuels, notamment sur le canal radio. C'est pourquoi des mécanismes de détection, voire de correction, des erreurs sont insérés dans la chaîne de communication, comme illustré par la figure 1.5 : il s'agit du *codage de canal*.

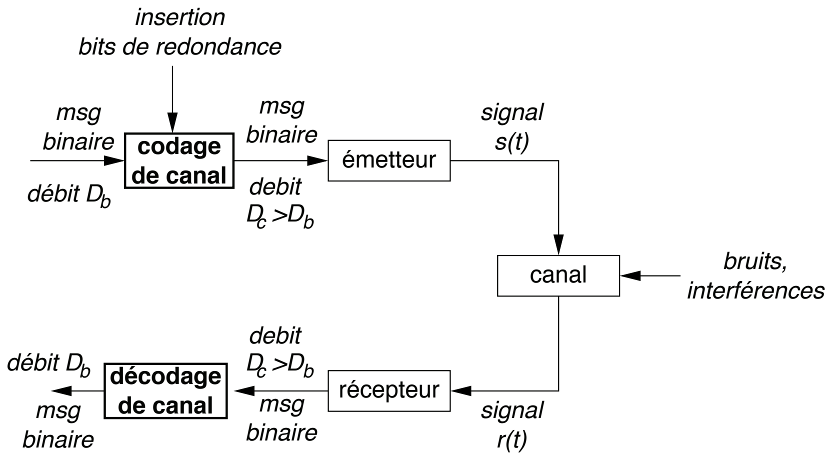

FIG. 1.5 – Insertion d'un codage de canal dans une chaîne de communication.

Le codage de canal consiste à insérer dans le message binaire des bits de redondance, de telle sorte que le message codé ait une structure particulière. En réception, le décodeur de canal vérifie si cette structure est bien respectée. Dans le cas contraire, une erreur est détectée et éventuellement corrigée. Le codage de canal a pour inévitable contre-partie une augmentation du débit, si l'on souhaite maintenir le débit de données utiles. On cherchera donc des codages efficaces, *i.e.* offrant la meilleure protection pour une augmentation de débit minimale.

Un exemple de codage de canal est le *code de parité*. Il consiste à ajouter à un message de n éléments binaires $a_0 a_1 ... a_{n-1}$ un $(n+1)^{eme}$ élément a_n tel que le nombre total de bits égaux à 1 soit pair. Le bit a_n peut donc être défini par :

$$a_n = \oplus_{i=0}^{n-1} a_i$$

où $\oplus$ désigne l'addition binaire (modulo 2). Soit $a'_0 a'_1 ... a'_{n-1} a'_n$ le message reçu. Du fait des erreurs de transmission, les a'_i peuvent être différents des a_i. On détecte une erreur si la parité n'est pas respectée, c'est-à-dire si $a'_n \neq \oplus_{i=0}^{n-1} a'_i$. En revanche, le respect de la parité en réception ne permet pas de conclure à l'absence d'erreurs. Il suffit en effet que le nombre d'erreurs soit pair pour que la parité soit toujours respectée. D'autre part, lorsqu'une erreur est détectée, rien ne permet de la corriger.

De manière générale, chaque codeur de canal est caractérisé par un *pouvoir de détection* d'erreurs et un *pouvoir de correction* (respectivement 1 et 0 dans l'exemple).

Aux deux extrêmités de la chaîne de communication se trouvent des humains, qui échangent non pas des éléments binaires, mais des textes, de la voix, de la musique, des images fixes ou animées, c'est-à-dire une information multimédia qui n'est pas nécessairement sous forme numérique. La chaîne doit donc être étoffée d'un dernier maillon, le *codage de source* (voir figure 1.6), qui consiste à *numériser* l'information, si nécessaire (*a contrario*, un texte tapé est déjà sous forme numérique). L'information ainsi numérisée nécessite parfois des débits de transmission non disponibles. Le codage de source peut alors comporter une étape de *compression* de l'information.

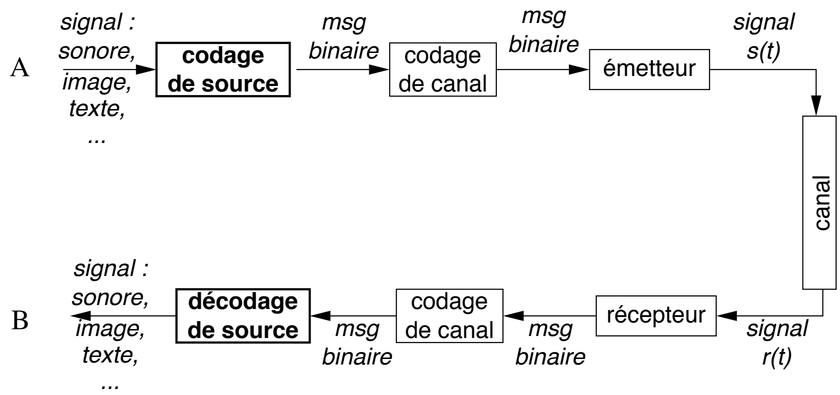

FIG. 1.6 – Chaîne de communication avec codage et décodage de source.

La figure 1.7 illustre le codage de source dans le cas de la transmission de la voix en téléphonie filaire classique. Les vibrations acoustiques captées par le microphone sont transformées en un signal électrique analogique. Celui-ci est d'abord échantillonné à 8 kHz (8000 échantillons par seconde). Chaque échantillon est codé en virgule fixe, sur 8 bits. Le flux binaire est transmis et, en réception, les opérations inverses sont réalisées : décodage des échantillons puis conversion numérique-analogique.

Un tel codage de source nécessite un débit de 64 kbit/s, qui n'est pas adapté aux communications mobiles : le canal de communication doit en effet être partagé avec tous les utilisateurs, ce qui limite le débit. On peut observer sur le signal échantillonné que la différence entre deux échantillons successifs est faible. Ainsi, en codant non pas la valeur de chaque échantillon mais la différence de chaque échantillon avec son prédécesseur, on peut se contenter de 4 bits par échantillon et ainsi réduire de moitié le débit. On peut aller plus loin : chaque échantillon peut en effet s'exprimer comme une combinaison linéaire des 10 précédents, plus une petite erreur. Finalement, en exploitant ces redondances dans le signal de parole, le codeur de parole GSM atteint un débit de 13 kbit/s, soit un taux de compression de 5 sans perte notable de qualité audio. Les derniers codeurs HVXC (Harmonic Vector Excitation Coding) permettent de descendre à 5 kbit/s.

Les différentes notions survolées dans ce chapitre introductif seront abordées comme suit.

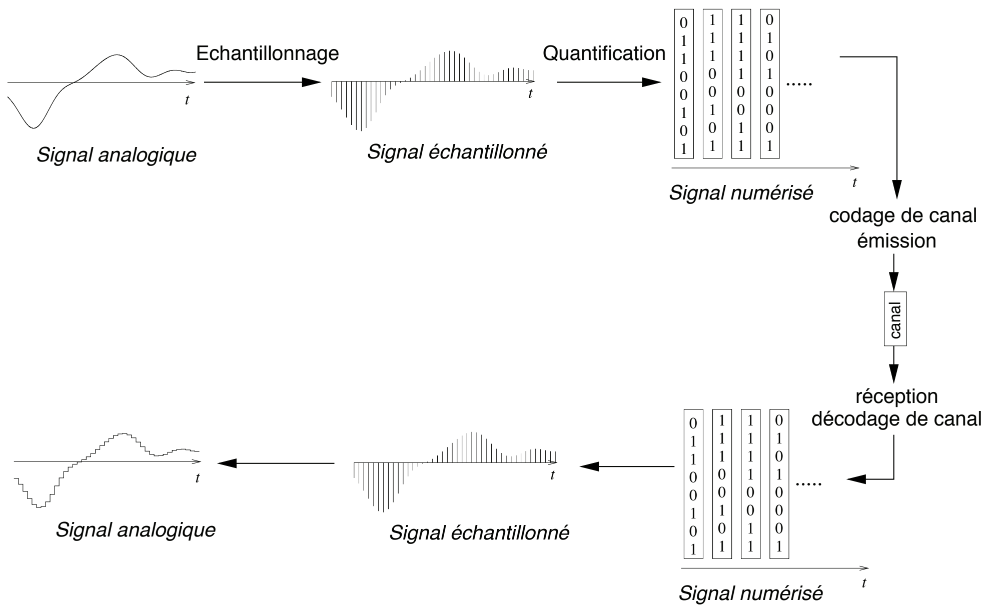

FIG. 1.7 – Numérisation et transmission d'un son.

Dans un premier temps, nous ferons abstraction du caractère physique du canal de communication et considèrerons toute la partie de la liaison de l'entrée de l'émetteur à la sortie du récepteur selon le modèle du *canal binaire*, *i.e.* un canal "boîte noire", dont l'entrée et la sortie sont des flux binaires. Le chapitre 2 sera consacré au codage de canal, le chapitre 3 au codage de source.

Puis nous étudierons la transmission de l'information selon la nature du canal. La détection optimale d'un message binaire sur un canal bruité sera abordée dans le chapitre 4. Dans le chapitre 5, nous présenterons d'autres contraintes physiques du canal, qui impliquent une adaptation du signal de communication en termes de bande passante et de fréquence d'émission (voir chapitre 6 sur les modulations de porteuse).

Le chapitre 7 abordera les différentes manières de partager le canal, problématique centrale dans les communications radio, où le canal est unique. Nous étudierons les différents types de multiplexage : temporel, fréquentiel, spatial et par code.

Enfin, ces différentes "briques" de la chaîne de communication seront assemblées dans l'étude globale de systèmes de communication, GSM et UMTS.

2 Codage de canal

Le bruit et les interférences du canal, qui dégradent les signaux de communication transmis, provoquent des erreurs de détection en réception. Pour un niveau de bruit et d'interférences donné, la probabilité d'erreur peut être réduite en augmentant la puissance d'émission, puisqu'elle est une fonction décroissante de celle-ci (voir chapitres 4 et 6). Cependant, cette augmentation de puissance n'est pas toujours souhaitable : d'une part elle se traduit par un acroissement de la consommation électrique du terminal, à éviter pour des terminaux sans-fil ; d'autre part, dans le cas d'une transmission en espace libre, elle augmente les interférences inter-utilisateurs, ce qui accroît la probabilité d'erreur.

Une autre solution est le codage de canal (voir fig 2.1), qui consiste à ajouter au message binaire des bits de redondance, de telle sorte que le message codé ait une structure particulière. En réception, le décodeur de canal vérifie si cette structure est bien respectée. Dans le cas contraire, une erreur est détectée et éventuellement corrigée. Nous présenterons dans ce chapitre deux types de codage : le codage en bloc linéaire et le codage convolutif.

Le codage de canal a pour inévitable contre-partie une augmentation du débit, si l'on souhaite maintenir le débit de données utiles. On cherchera donc des codages offrant la meilleure protection pour une augmentation de débit minimale. Cette efficacité pourra être mesurée par :

- le *rendement* du codeur $R = D_b/D_c$, où D_b et D_c représentent le débit binaire respectivement avant et après le codage ;
- le *gain de codage*, c'est-à-dire la réduction de puissance permise par le codage de canal pour une probabilité d'erreur donnée. Par exemple, pour le codeur considéré sur la figure 2.2, le gain de codage pour une probabilité d'erreur de 10^{-6} est de 0,8 décibels (réduction de puissance de 10,5 à 9,7).

2.1 Le canal binaire symétrique

La partie de la liaison de l'entrée de l'émetteur à la sortie du récepteur (voir fig 2.1) peut être considérée comme un *canal binaire*, *i.e.* une “boîte noire” dont l'entrée et la sortie sont des flux binaires. Les phénomènes physiques à l'œuvre dans le canal réel sont donc laissés de côté, pour se concenter simplement sur la transformation binaire entre l'entrée et la sortie. Par ailleurs, on supposera ici que ce canal est *sans mémoire*, c'est-à-dire que chaque élément binaire en sortie ne dépend que de l'élément binaire en entrée (et pas des précédents).

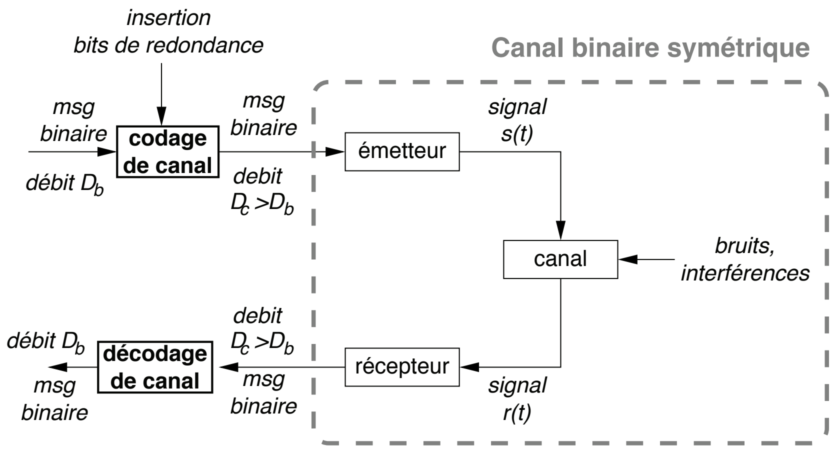

FIG. 2.1 – Place du codage de canal dans une chaîne de communication.

Ce canal binaire est considéré comme *symétrique*, *i.e.* :

$$\mathrm{P}(r_0|s_1) = \mathrm{P}(r_1|s_0)$$

où s_i (respectivement r_i) représente l'événement "émission (resp. réception) de l'élément binaire i". On peut montrer que :

$$\mathrm{P}(r_0|s_1) = \mathrm{P}(r_1|s_0) = P_e$$

où P_e désigne la probabilité d'erreur binaire.

Ainsi, le *canal binaire symétrique* peut être représenté selon le diagramme de transition de la figure 2.3.

On peut également représenter le canal binaire symétrique par la transformation qu'il opère sur le flux binaire (fig 2.4). Il s'agit ici d'une simple opération logique : pour un bit x en entrée,

- une erreur de transmission se traduit par l'addition (modulo 2) d'un bit $e = 1$;
- l'absence d'erreur de transmission se traduit par l'ajout d'un bit $e = 0$.