

Préparation à l'agrégation de Sciences-Physiques ENS Physique

Physique pour les chimistes - Transmission d'information

I) Introduction

Ce TP-cours est destiné à vous fournir quelques outils pour comprendre comment sont traitées et transportées les informations. Dans la plupart des applications actuelles, la nature de l'information transportée est numérique, dans une première partie nous verrons comment les textes, les images et les sons peuvent être codés sous une forme numérique. Nous évoquerons en particulier la quantité d'information qu'il est nécessaire d'utiliser pour coder un objet analogique aux spécificités bien définies. L'information numérique est par nature indépendante du médium de stockage et facilement manipulable mathématiquement ce qui permet de lui appliquer des opérations de compression avec ou sans perte. Nous verrons brièvement en quoi consistent ces compressions. Les télécommunications sont l'ensemble des moyens mis en œuvre pour déplacer l'information. Nous présenterons et illustrerons le principe des réseaux actuellement utilisés.

II) Information numérique

Les objets physiques qui nous entourent ne sont pas numériques : les images sont le résultat de la réponse des yeux et du système neuronal aux stimuli correspondants au champ électromagnétique visible, les sons sont le résultat de la réponse des oreilles et du système neuronal aux stimuli correspondants aux ondes sonores. L'idée de la numérisation est de réaliser un enregistrement sous forme de données numériques, c'est-à-dire une suite de nombres, qui peut ensuite permettre de reproduire un champ électromagnétique et un champ sonore susceptible de provoquer des stimuli semblables de nos capteurs physiologiques et par là même permettre une interprétation semblable à l'original par notre cerveau.

1) Le texte

L'information contenue dans une page manuscrite est principalement donnée par la succession des caractères alphabétiques. En codant sous forme de nombres binaires ces caractères ainsi que les glyphes les plus courants (les chiffres, la ponctuation, etc.) on peut coder une page manuscrite comme la succession des nombres représentant ces caractères. Les informations textuelles se prêtent remarquablement à la compression sans perte. Le code morse est un précurseur du codage binaire.

2) Le son et la conversion analogique numérique

Prenons l'exemple du son : Le champ sonore est caractérisé par une quantité continue (la pression locale) définie sur un espace défini (le lieu d'écoute). La morphologie de l'auditeur humain permet de réduire la complexité de l'enregistrement du champ sonore à deux points correspondants à l'endroit des mesures réalisées : les deux oreilles. On parle de stéréophonie. Cependant, même en supposant cette simplification, la tâche de l'enregistrement reste a priori extrêmement difficile, car la pression est une quantité continue, et par conséquent, un nombre binaire aussi grand soit-il ne peut représenter qu'avec une certaine fidélité la pression réelle (qui n'appartient pas nécessairement aux décimaux). Fort heureusement, les mesures psychoacoustiques montrent que l'auditeur humain n'est pas capable de distinguer l'amplitude d'un son en dessous d'une certaine quantité (de l'ordre de quelques dizaines de μPa). De cette sensibilité, on déduit la taille du nombre nécessaire pour coder suffisamment

précisément la pression. On fixe aussi une borne supérieure. Si cette borne est dépassée lors de l'enregistrement, la restitution sera nécessairement déficiente et on a alors une saturation. Le problème de l'amplitude du son est donc résolu, reste le second problème de la variation continue de la pression avec le temps. Les mesures psychoacoustiques montrent que l'oreille humaine perçoit les sons compris entre 20 et 20 000 Hz. Un théorème dû à Shannon des Bell Labs (Bell : l'inventeur du téléphone) énonce le fait suivant :

La représentation discrète d'un signal analogique par des échantillons régulièrement espacés exige une fréquence d'échantillonnage supérieure au double de la fréquence maximale présente dans ce signal.

Une numérisation à la fréquence de 44 kHz (CD actuel) permet donc de garantir la fidélité de la restitution sonore.

- Vous disposez d'un convertisseur analogique numérique de démonstration. En utilisant un générateur basse fréquence, montrer la conversion analogique d'une tension continue en nombre binaire à l'aide de l'afficheur (en tension continue), puis à l'aide d'un oscilloscope (en alternatif). Changer la profondeur et la fréquence de numérisation, comment régler l'oscilloscope pour bien mettre en évidence les modifications ?
- Ce boîtier dispose d'une entrée microphone et d'une sortie audio mono. Réaliser un montage pour montrer l'effet de la profondeur de numérisation sur le son restitué.
- Réaliser un enregistrement de votre voix avec un microphone et le logiciel *Audacity* en choisissant une fréquence de numérisation différente. Montrez que la fidélité de la reconstitution augmente avec la fréquence de numérisation jusqu'à devenir imperceptible. Expliquer cela par une analyse fréquentielle de votre voix.
- Utiliser un générateur basse fréquence ainsi qu'un oscilloscope numérique rapide à transformée de Fourier pour illustrer le théorème de Shannon. Commencer par injecter une sinusoïde de faible fréquence et observer la transformée de Fourier à l'oscilloscope. Quelle est l'étendue et la résolution de la transformée de Fourier ? Comment celles-ci varient-elles en fonction des paramètres d'acquisition et pourquoi ? Pourquoi le pic de Fourier associé à l'excitation n'est-il pas infiniment fin et à quoi correspond sa largeur ? Choisir un réglage d'acquisition et augmenter progressivement la fréquence du signal pour faire sortir le pic de l'étendue de la transformée de Fourier. Qu'observez-vous au-delà de cette limite ? En quoi cela est-il une illustration du théorème de Shannon ?

3) L'image

L'image présente plusieurs difficultés supplémentaires par rapport au son : le champ électromagnétique doit en effet être codé sur l'espace des directions visibles par les yeux. Ceci est réalisé en séparant l'image en un tableau d'éléments supposés homogènes : les pixels. Une image numérisée est donc décrite par la succession de la composition en couleur de ces pixels. Pour déterminer la taille de ces pixels, on utilise la densité des capteurs visuels de l'œil qui est telle que deux rayons lumineux séparés d'un angle inférieur à une minute d'arc (1/60 de degré) ne peuvent pas être distingués. La densité de pixels par une unité de longueur (ppp : pixel-per-point) est fonction de l'application choisie (photographie, cinéma, etc.).

Une difficulté spécifique à l'image vient du fait qu'une image statique correspond à un champ électromagnétique non statique. D'autre part, l'œil percevant la lumière entre 400 et 800 nm, la fréquence maximale du champ e.m. correspondant est de 1000 THz environ, ce qui correspondrait en utilisant le théorème de Shannon à numérisation à un rythme de 2000 THz, une solution totalement

irréaliste dans l'état actuel de la technologie. La physiologie de l'œil permet cependant de résoudre cette difficulté : les cônes sont des photodétecteurs très large bande et sont au nombre de trois. De ce fait, on peut reproduire les stimuli visuels en excitant sélectivement les trois types de cônes (trichromie). C'est ce que l'on réalise en utilisant la synthèse additive RVB.

- Réaliser une synthèse en codage RVB, et en NB avec *The Gimp*, utiliser différentes profondeurs de couleur (Menu couleur/postériser). Comment sont codées les couleurs ? Pourquoi existe-t-il différents systèmes chromatiques (RGB, HSV, CMYB) et à quoi correspondent-ils ? Dans quel contexte est-on susceptible de les utiliser ?

4) Compression de l'information

Les sons et images que nous percevons comportent une grande part de redondance. Par exemple, un silence enregistré prend autant de place sur un disque dur qu'une symphonie de même durée, pourtant, au sens habituel du terme, il n'y a aucune information dans le silence. La compression consiste à utiliser une transformation mathématique du signal de manière à diminuer la taille nécessaire pour la décrire. Deux méthodes sont possibles : la compression sans perte qui permet de reconstituer exactement le message numérique d'origine et la compression avec pertes qui utilise les spécificités des réponses psychoacoustiques humaines pour supprimer une partie des informations non perçues ou interprétées par le cerveau et donc superflues. La technique standard de compression sans perte consiste à repérer les motifs binaires apparaissant fréquemment dans le fichier décrivant les données. On classe les motifs par ordre de fréquence d'apparition et on attribue à chacun un mot binaire d'autant plus petit que sa fréquence d'apparition est importante. Cette technique nécessite de construire un dictionnaire en début de fichier de manière à permettre la traduction inverse. On définit l'efficacité de la compression par le ratio de la taille de l'objet numérique comprimé sur la taille de l'original. La compression avec perte est bien sûr beaucoup plus efficace que la compression sans perte, mais elle ne permet pas l'exploitation ultérieure d'un détail de l'original (exemple zoom photo).

- En utilisant *The Gimp*, convertissez une image PNG (non compressée) en image JPEG (comprimée avec une qualité de 5 %). Comparer les deux images.
- Faites de même avec un fichier son en utilisant le logiciel *VLC* (compression mp3 avec perte).

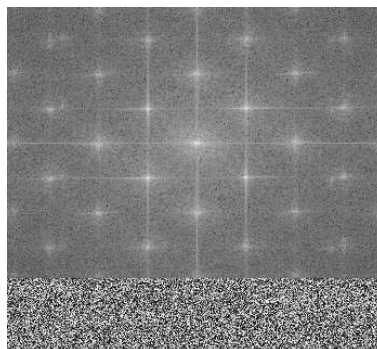
La compression est fondamentale pour l'échange efficace d'un grand nombre de données sur un réseau de télécommunication comme nous allons le voir.

5) Traitement des données numériques

L'intérêt des données numériques par rapport aux données stockées au format analogique est la facilité et la rapidité avec laquelle elles peuvent être copiées et modifiées. Leur modification est rendue particulièrement simple par leur caractère numérique qui en fait une simple transformation mathématique. Il est ainsi possible de modifier a posteriori le texte, le son et les images. Par exemple, on peut modifier une photographie pour enlever ou modifier un élément gênant (toutes les images imprimées aujourd'hui sont modifiées ainsi), on peut ajouter un écho sur un son ou bien corriger la justesse d'une voix dans une chanson après l'enregistrement. La liste des modifications n'est pas envisageable, mais il est intéressant de remarquer que la plupart de ces modifications sont basées sur un mécanisme physique (l'écho, le flou, le changement de teinte). Nous allons nous intéresser à une technique particulièrement intéressante du point de vue physique : le détramage. Le scan des images imprimées fait apparaître une trame due au motif d'impression utilisé. Le détramage consiste à appliquer une transformation mathématique pour faire disparaître la trame sans altérer trop l'image. Le

détramage est basé sur l'utilisation de la transformée de Fourier : la trame est un motif de petite taille périodique dans deux directions d'espace. Dans l'espace de Fourier, elle se manifeste par l'apparition de répliques de l'image, c'est l'équivalent des ordres de diffraction par un réseau. En supprimant ces répliques, on supprime aussi l'information sur la trame de petite taille, la transformée de Fourier inverse permet alors de récupérer une image sans trames.

- Cette manipulation nécessite l'utilisation de Gimp >2.8 ainsi que du plugin gratuit G'Mic. Ce plugin ne fonctionne pas sous Windows XP ni sur les ordinateurs ayant été infectés par un malware. Ouvrir une image possédant une trame. En faire la transformée de Fourier directe avec G'Mic (Menu Filtres/G'MIC QT). Vous remarquerez que l'image obtenue est constituée de 2 panneaux : l'un contenant l'intensité de la transformée de Fourier, l'autre contenant la phase, il ne faut pas modifier la partie contenant la phase. Utiliser l'outil pinceau (ou l'outil réparer pour un résultat optimal) pour recouvrir de noir les ordres de diffraction autre que l'ordre 0. Appliquer une transformée de Fourier inverse et comparer.



III) Télécommunications

Deux modes de communication à distance existent : la communication libre et la communication guidée.

1) Typologie

La communication libre est à l'œuvre lorsqu'un émetteur et un récepteur veulent communiquer, mais que leur position relative est inconnue ou susceptible de varier. C'est celle qui est à l'œuvre dans la voix, la diffusion de la radio et de la télévision, les talkies-walkies. Elle a l'avantage de permettre une large diffusion (radio et télévision) simultanément et à moindre coût énergétique. En revanche, elle ne permet pas une communication longue distance (rayonnement dispersé) et la bande passante disponible est limitée (saturation du réseau).

- Réaliser l'émission a.m. d'une fréquence sonore produite par un GBF et recevoir cette émission à l'aide d'un dispositif de votre fabrication et d'une radio réglée sur la porteuse. Choisir de préférence la fréquence d'émission la plus élevée pour la porteuse (pourquoi ?) et utiliser un amplificateur de gain 1 en amont de l'antenne pour garantir une émission efficace. Réaliser une communication en morse.

La communication guidée est à l'œuvre lorsque l'émetteur et le récepteur sont reliés directement par le canal de communication. C'est le cas avec le téléphone fixe, la connexion par fibre optique, le télégraphe. Elle permet des communications très longue distance pour un faible coût énergétique.

- Montrer comment transférer une communication en morse à l'aide d'un guide de lumière et d'une lampe.
- Réaliser un montage permettant de mettre en évidence la durée de propagation d'une impulsion électrique dans un long câble coaxial (>100m). Expliquer quantitativement pourquoi vous devez utiliser un générateur d'impulsions courtes pour vos expériences (Philips PM5712). Mesurer ce temps de propagation. Expliquer comment vous avez choisi les impédances des appareils et des éléments électroniques que vous avez dû utiliser.
- Utiliser un laser modulé en intensité pour transférer un signal sonore (en utilisant la sortie jack d'une radio) en impulsion lumineuse. Un boîtier destiné à convertir le signal audio de sortie de la radio en un signal électronique utilisable par le laser modulable est à votre disposition. Le détail de son fonctionnement est donné dans la notice 306.

La téléphonie mobile est une communication hybride, car les antennes du réseau au plus proches des émetteurs et récepteurs ne sont pas directives.

a) Caractéristiques générales d'un signal modulé en amplitude

Dans le cas général, un signal de modulation d'amplitude s'écrit en fonction du temps :

$$s(t) = [A + B \cos(\omega_1 t)] \times \cos(\omega_0 t),$$

où $\omega_1 = 2\pi f_1$ et $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_1 étant la fréquence de modulation (typiquement 0.5 kHz) et f_0 celle de la porteuse (typiquement 50 kHz).

L'amplitude du signal varie entre $a = A - B$ et $b = A + B$. On est amené à définir le taux de modulation par $m = \frac{b-a}{b+a} = \frac{B}{A}$, soit $B = mA$. Le signal $s(t)$ peut s'écrire :

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos(\omega_0 t) + \frac{B}{2} \cos((\omega_0 + \omega_1)t) + \frac{B}{2} \cos((\omega_0 - \omega_1)t) \\ &= A \left[\cos(\omega_0 t) + \frac{m}{2} \cos((\omega_0 + \omega_1)t) + \frac{m}{2} \cos((\omega_0 - \omega_1)t) \right]. \end{aligned}$$

Le spectre en fréquence d'un tel signal comprend donc les fréquences f_0 , $f_0 + f_1$ et $f_0 - f_1$, mais pas la fréquence f_1 .

Remarque : ne pas confondre modulation et addition $s_{add}(t) = A \cos(\omega_0 t) + B \cos(\omega_1 t)$. **La modulation d'amplitude est une opération multiplicative donc non linéaire.** Dans l'addition, illustrée sur la figure, l'amplitude est constante et le spectre comprend les fréquences f_0 et f_1 .

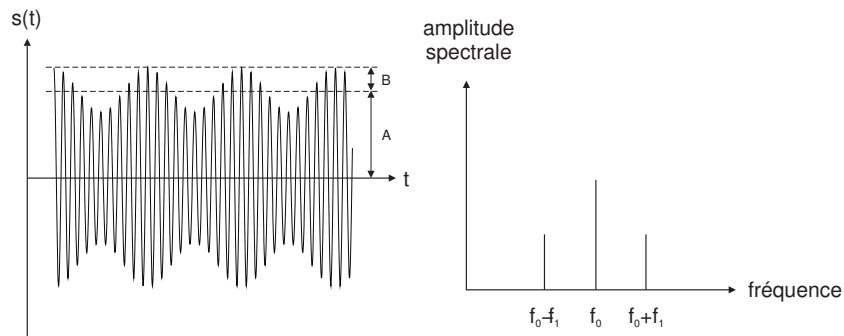


FIG. 1 – Caractéristiques d'un signal modulé en amplitude

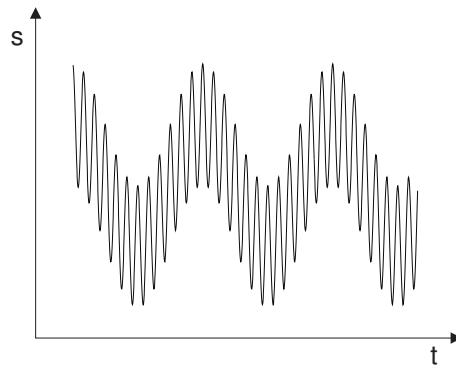


FIG. 2 – Somme de deux signaux sinusoïdaux

2) Comparaison historique des supports physiques

La première télécommunication est la parole. Quels sont le débit informationnel, la vitesse de transport, la portée et la puissance nécessaire pour émettre et transporter le message. À quel type de télécommunication cela correspond-il ?

Même question pour le pony express et le télégraphe.

3) Y a-t-il une limite au transport de l'information ?

La vitesse du transport de l'information est limitée par la vitesse de la lumière. Actuellement, les dispositifs les plus efficaces sont les fibres optiques monomodes. Ces fibres contiennent un canal de télécommunication qui peut transférer la lumière sur une bande passante de l'ordre de la centaine de GHz pour les monomodes. (Moins pour les fibres multimodes, pourquoi ?) Les dispositifs actuellement utilisés fonctionnent autour de 1570 nm du fait du minimum d'absorption du matériau les constituant (silice). Pour optimiser l'utilisation de la bande passante, celle-ci est divisée en canaux dont l'acheminement est piloté par le réseau. On parle de multiplexage.

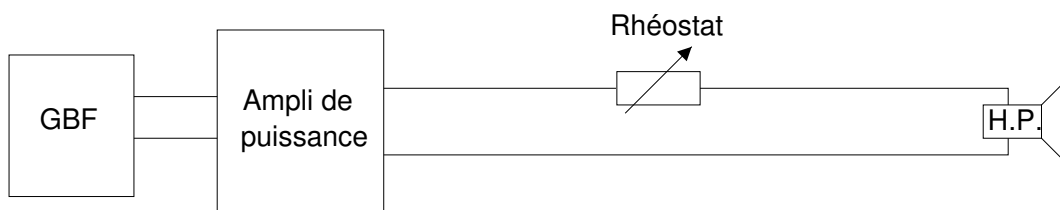
Le débit maximal d'information est théoriquement limité par un autre théorème dû à Shannon : le théorème de la limite du canal bruyant. Ce théorème indique que le débit en bit/s/Hz de bande passante est limité par le rapport signal à bruit. Les meilleurs réseaux optiques actuellement déployés atteignent des débits de l'ordre d'un facteur 4 en dessous de cette limite (un facteur 2 est atteint en laboratoire). Cette limite est donc sur le point d'être atteinte et de nouvelles stratégies vont être nécessaires dans un avenir proche.

4) Un problème connexe : le transport de la puissance électrique

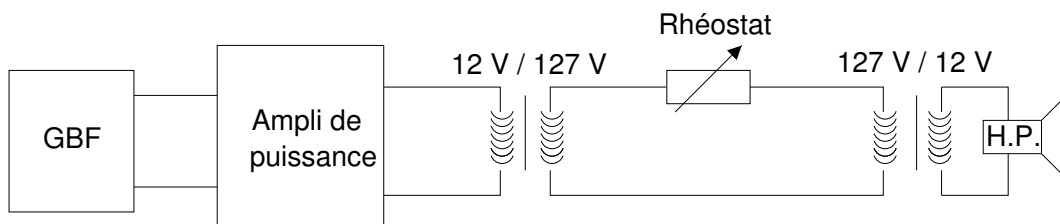
Référence : Bruhat, *Électricité*, page 641.

Le transport de l'électricité à distance pose lui aussi des problèmes spécifiques de conception du réseau. On propose une expérience qualitative, qui illustre pourquoi EDF a tout intérêt à transporter le courant via des lignes à haute voire très haute tension.

Réaliser le montage ci-dessous : La résistance R modélise la résistance de la ligne de transport (entre la centrale et l'utilisateur final). Travailler à fréquence assez basse (à cause des transformateurs utilisés plus loin).



Régler l'amplitude du signal BF pour avoir un son fort lorsque $R = 0$, puis faire croître R jusqu'à ce que le son soit quasi inaudible. En utilisant deux transformateurs identiques, passer en ligne "haute tension" comme indiqué sur la figure ci-dessous. Interpréter en ramenant toutes les impédances sur la sortie de l'ampli de puissance (c.f. III Annexe).



IV) Acquisition de données

L'acquisition de données à partir de signaux physiques de toute nature utilise des dispositifs variés que nous ne pourrions couvrir tous. L'ensemble des chaînes de mesure a cependant des caractéristiques communes, car elles mettent toutes en œuvre une conversion du signal observé en un signal électrique suivi de son amplification puis de sa numérisation et enfin de son stockage (cette dernière étape n'étant pas toujours évidente pour les dispositifs produisant une forte quantité d'information comme les caméras). Nous allons étudier ici 2 capteurs : le lecteur de codes-barres et le télémètre laser.

1) Lecteur de codes-barres

La lecture de code-barre consiste à transformer l'information spatiale du code-barre en une information temporelle. Il y a deux méthodes usuelles : la première (utilisée dans les caisses enregistreuses) consiste à balayer un faisceau laser à la manière d'un phare et à mesurer l'intensité du signal réfléchi sur le code-barre en fonction du temps. La deuxième consiste à enregistrer la réflexion d'un pinceau lumineux sur le code-barre, sur une barre CCD linéaire. Une forte intensité provoque l'accumulation

de charge sur le capteur CCD et l'image est enregistrée dans la barrette sous cette forme. La lecture de l'état de la barrette CCD est réalisée en appliquant une tension aux bornes de celle-ci ce qui provoque la migration des charges vers l'amplificateur de sortie. Le signal reçu par le capteur est un courant dépendant du temps qui est converti en une tension dépendant du temps reproduisant le profil d'intensité le long de la barrette. Ainsi, dans ce cas aussi, une information spatiale a été convertie en une information temporelle.

- Réaliser un lecteur de code-barre en utilisant un faisceau laser agrandi (il y a une diode laser disposant de son télescope accolé dans la collection), d'un code-barre (vous utiliserez un marqueur sur un miroir ou une lame de verre), et d'une barrette CCD linéaire. Utiliser un oscilloscope pour afficher le signal capté par le code barre. Déterminer la vitesse de lecture de la barrette CCD.

Attention : la barrette CCD linéaire est très sensible et entre rapidement dans un régime de saturation pour lequel les données ne sont plus interprétables. Pour vous assurer de son bon fonctionnement, il faut placer deux polariseurs croisés (fournis) devant le capteur pour couper le flux lumineux et l'augmenter en introduisant un petit angle entre les deux polariseurs tout en s'assurant que la réponse en tension du détecteur n'est pas saturée.

2) Mesure de la vitesse de la lumière

L'information émise sous forme de signal électromagnétique se déplace à la célérité de la lumière. Nous disposons d'un appareil constitué d'un générateur d'impulsions lumineuses ainsi que d'une photodiode rapide (dans le même boîtier) pour la détermination de la vitesse de groupe d'un paquet d'ondes lumineuses.

- Réaliser une mesure de la célérité de la lumière à l'aide de ce dispositif. À noter qu'il faut travailler avec un bras de mesure d'au moins 5 mètres pour pouvoir faire une mesure précise. On fera varier la longueur du bras de mesure pour s'affranchir de la calibration de l'appareil. Par ailleurs, on utilisera un catadioptré sur la sortie secondaire verticale pour disposer d'une référence de temps (voir la notice 620 pour plus de détails).