

## Une chaîne de communication sans fil

Jonathan Letessier, Baptiste Vrigneau, Yves Quéré, Annaïg Guennou  
 Moniteurs du CIES Grand Ouest  
 LEST UMR CNRS 6165, 6 avenue Victor Le Gorgeu-CS93837 Brest Cedex 3-France,  
 Email : prenom.nom@univ-brest.fr

**RESUME** Cet article présente une manipulation dont le but est d'éveiller la curiosité scientifique d'un large public pour les communications numériques sans fil. Pour ce faire, les notions de base sont introduites à l'aide d'une analogie avec une communication orale. L'orateur peut introduire des notions clés telles que le canal, le bruit et le codage des informations. La manipulation a pour but d'illustrer ces nouvelles notions lors d'une transmission numérique acoustique : deux ordinateurs échangent une image à l'aide de notes de musique. Le programme est entièrement réalisé sur le logiciel *Matlab*. L'originalité de cette manipulation est sa manière pédagogique de présenter une transmission sans fil, ce qui la rend attractive pour des étudiants, pour des lycéens et pour un plus large public. De plus, le niveau de complexité est adaptable grâce à sa modularité.

**Mots clés** : éveil scientifique, communication sans fil, transmission acoustique, *Matlab*.

### 1 INTRODUCTION

Les appareils communicants sans fil sont présents partout autour de nous, de la télévision au WiFi, en passant par les téléphones portables et les satellites, etc.. Ces appareils couramment utilisés n'en restent pas moins obscurs dans leur fonctionnement pour les étudiants et le grand public. Nous proposons dans cet article de rendre accessible le principe d'une transmission sans fil en se basant sur une analogie connue de tous, facilitant ainsi la compréhension. En effet, la communication "numérique" est mise en parallèle avec la communication orale afin de montrer que les connaissances et les phénomènes de ces deux communications sans fil sont très proches. La communication orale est naturelle pour la plupart des personnes et ce rapprochement permet de favoriser l'apprentissage et la mémorisation des notions abordées. Ces notions seront repérées dans le texte par la mise en forme suivante - *notion* -.

Partant du schéma simplifié d'une communication entre deux personnes, nous avons relié les communications numériques en une manipulation intermédiaire : nous proposons une « discussion » entre deux ordinateurs à l'aide d'ondes acoustiques (Figure 1). L'idée est d'échanger une information grâce à des notes de musique. Les figures 2 à 6 sont extraites d'un poster de format A0 accompagnant la manipulation.

La communication orale entre deux individus est le point de départ de notre présentation, Section 2, car elle regroupe toutes les notions nécessaires à la bonne compréhension d'une transmission sans fil. En Section 3, la transposition de cette communication naturelle en communication "numérique" est effectuée par la mise en parallèle des deux méthodes. La section 4 décrit le logiciel de communication acoustique, réalisé avec *Matlab*, en expliquant différentes parties du programmes: interface graphique, émetteur et récepteur. Un résumé des notions abordées, telles que le bruit, le codage, les fréquences etc. [1], associées à

leur illustration pour les deux types de communications est réalisé en Section 5. Ce résumé a pour but d'adapter la difficulté de compréhension en fonction du niveau du public ciblé. Enfin, une conclusion et des perspectives seront données en Section 6.

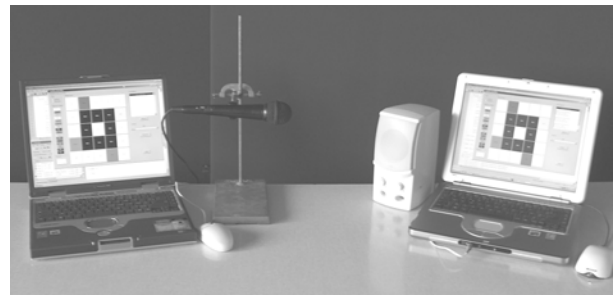


fig 1 : Photo de la manipulation

### 2 LA DISCUSSION ORALE : UNE COMMUNICATION SANS FIL

La communication orale entre des individus est un apprentissage débutant dès la naissance. Au cours des années, elle devient tellement instinctive que nous n'y prêtons même plus attention. Utilisant tous le même langage (notre langue maternelle) et corrigeant "automatiquement" les défauts introduits lors de la communication, nous oublions toutes les notions les plus basiques d'une communication sans fil.

Cette partie propose de décomposer, de façon simplifiée, les mécanismes d'une communication orale entre deux individus Mr. A et Mr. B. L'individu A doit faire dessiner une image à l'individu B (Figure 2). Ainsi, Mr. A joue le rôle d'*émetteur* et Mr. B celui du *récepteur*. Les étudiants ou le public visé peuvent être mis à contribution pour cette partie afin qu'ils se rendent compte des différents points clés d'une transmission.

Avant de communiquer l'image, A et B sont obligés de se mettre d'accord sur la façon de transmettre l'image : un **protocole** est défini. Les différents points importants sont :

- la **synchronisation** : A annonce qu'il commence à décrire l'image en disant tout naturellement « Je commence ». B reconnaît ces mots et sait alors que les informations sur l'image vont suivre.

- Le **format** : l'image est composée de « pixels » et une solution simple pour transmettre la couleur de ces pixels est de découper l'image en lignes et colonnes. L'émetteur donne alors les couleurs des pixels de la première ligne puis de la seconde et ainsi de suite. Pour simplifier le fonctionnement, le nombre de pixel est connu par A et B.

- Le **codage** : cette étape associe une couleur de pixel à un mot du langage utilisé (le français par exemple).

L'individu A peut alors produire un signal sonore - **la modulation** - respectant ce protocole. L'individu B doit ensuite récupérer les mots entendus - **la démodulation** - puis reconstruire l'image élément par élément - **décodage** -.

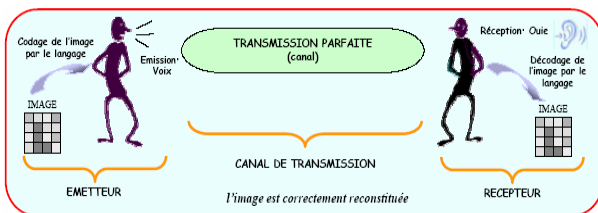


fig 2 : Communication "parfaite" par la voix entre deux individus

L'émetteur A et le récepteur B peuvent maintenant communiquer une image l'un vers l'autre car ils savent se comprendre. Sans aucun bruit et dans une pièce, B pourra reconstruire l'image originale de A sans **erreurs**. Afin de rendre plus difficile la transmission, A et B peuvent s'éloigner l'un de l'autre, ainsi la voix sera plus affaiblie - **atténuation** -. Des personnes peuvent parler ou taper des mains pour rendre la compréhension de B moins facile - **bruit** -. L'émetteur A, lors de l'expérience va naturellement augmenter ou diminuer la puissance de sa voix suivant la distance qui le sépare de B et le niveau de bruit qu'il perçoit. Intuitivement, l'individu A connaît la notion de puissance émise par rapport au bruit ambiant - **rapport signal sur bruit**-. L'introduction d'**écho** est plus difficile, mais une personne faisant guise de perroquet peut simuler ce phénomène. La Figure 3 récapitule une transmission imparfaite due à la propagation - **canal** - lors de la communication orale.

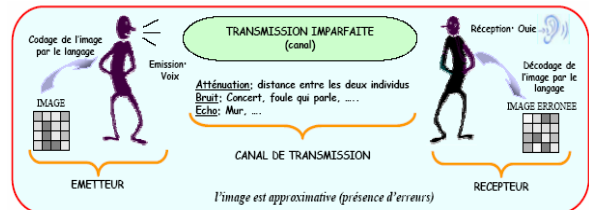


fig 3 : Communication "imparfaite" entre deux individus

Toutes les notions fondamentales d'une communication sans fil sont maintenant introduites. Pour se rapprocher un peu plus du monde numérique tel que le téléphone portable, cette communication orale va être transposée sur deux ordinateurs pour reproduire l'émetteur, Mr. A, et le récepteur, Mr. B.

### 3 UNE COMMUNICATION NUMERIQUE ACOUSTIQUE

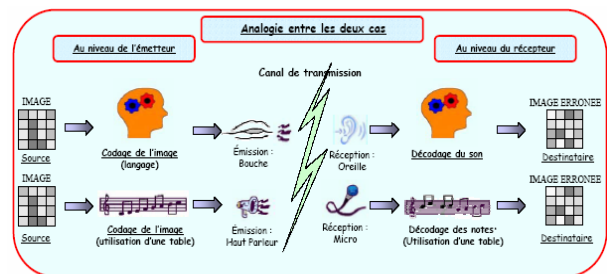


fig 4 : Analogie entre l'homme et la machine

L'idée de cette manipulation est de mettre en parallèle la communication orale décrite précédemment avec une communication numérique acoustique. La figure 4 résume l'analogie entre ces deux communications. Les ordinateurs n'étant pas dotés de la parole, nous avons utilisé des notions plus simples. Reprenons les différents points :

- la **synchronisation** : l'émetteur annonce le début de sa transmission à l'aide d'un signal sinusoïdal de fréquence croissante durant sa durée d'émission. Ce signal est appelé « chirp ».

- Le **format** : l'image de départ est identique donc le format reste le même.

- Le **codage** : ce ne sont plus des mots mais une table de codage (figure 5) qui associe une couleur à une note.

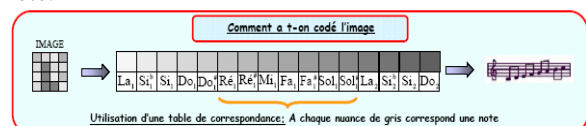


fig 5 : Codage de la couleur en notes de musique - la modulation -

- La **modulation** : l'ordinateur construit et émet l'onde sonore correspondant aux notes

- Les organes de transmission, la bouche et les cordes

vocales, sont remplacés par un haut-parleur - *antenne d'émission* - et l'organe de réception, l'oreille, devient un microphone - *antenne de réception* -.

- Le *décodage* : cette partie est la plus délicate. En effet, c'est le cerveau qui gère cette partie lors d'une discussion. Sans nul doute, cet organe est le plus complexe du corps humain. L'ordinateur remplace le raisonnement et l'apprentissage du cerveau par des calculs et des données en mémoire. Ainsi, il faut fournir à l'ordinateur une méthode mathématique permettant de reconnaître le signal de synchronisation et les notes émises afin de reconstruire l'image. Le récepteur et l'émetteur doivent avoir le même protocole et le même codage.

La manipulation que nous proposons reprend tous ces points. Deux ordinateurs équipés « d'organes artificiels » vont échanger des informations et le principe est rappelé dans la figure 6. Nous allons maintenant détaillé le programmes développé sur PC.

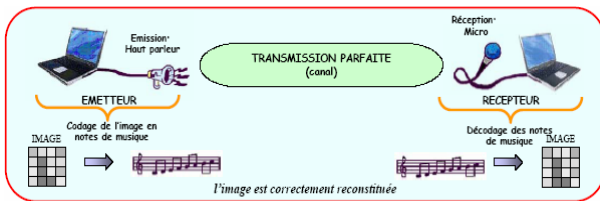


fig 6 : Communication numérique acoustique

#### 4 LE LOGICIEL DE COMMUNICATION ACOUSTIQUE

Le matériel nécessaire au fonctionnement du logiciel est standard : deux ordinateurs équipés d'une carte son (une sortie et une entrée microphone), une enceinte pour l'émetteur et un microphone pour le récepteur.

Le logiciel de transmission acoustique a été réalisé à l'aide de Matlab. Afin d'assurer une prise en main intuitive du logiciel, une interface graphique a été développée à l'aide de l'outil guide [3].

La manipulation se déroule de la manière suivante :

- le récepteur lance l'enregistrement,
- l'émetteur génère le signal sonore,
- le récepteur analyse le signal reçu (post-traitement) et affiche l'image estimée,
- l'image sur le poste émetteur et celle sur le poste récepteur peuvent alors être comparées.

Il est à noter que les deux utilisateurs doivent être coordonnés.

##### 4.1 L'interface graphique

La figure 7 montre l'interface graphique du logiciel. L'interface est à la fois, soit émetteur, soit récepteur. L'utilisateur jouant le rôle de l'émetteur crée l'image en sélectionnant une couleur dans la table de codage, puis en cliquant sur les pixels de l'image centrale à colorier. L'utilisateur a un panel de 16 couleurs différentes correspondant chacune à une note de musique distincte.

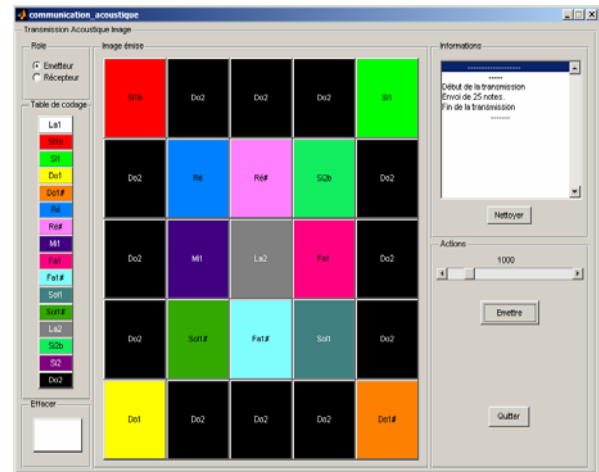


fig 7 : Interface graphique du logiciel

Une fois l'image construite, il suffit de cliquer sur le bouton Emettre pour transmettre l'image. Sur le poste récepteur, un deuxième utilisateur doit juste sélectionner la fonction du poste (récepteur) ce qui renomme le bouton Emettre en Recevoir et cliquer sur celui-ci. Un bouton Effacer permet d'obtenir une image vierge. Un ascenseur règle la durée des notes émises. Cette durée doit être identique sur les deux postes. D'autre part des informations concernant le bon ou le mauvais déroulement du programme sont affichées dans une zone de texte.

##### 4.2 L'émetteur

La gestion du son est prise en charge entièrement par des fonctions de Matlab gérant les échanges de données avec la carte son.

L'algorithme de l'émetteur est le suivant :

- 1) génération d'un alphabet des 16 signaux temporels où un signal correspond à une note de musique. Rappelons que chaque note a une fréquence précise et connue,
- 2) récupération des couleurs composant l'image à émettre,
- 3) traduction des couleurs en notes à l'aide de la table de codage,
- 4) concaténation des signaux correspondant à ces notes,
- 5) insertion du signal de synchronisation (chirp) au début du signal à émettre,
- 6) envoi du signal à la carte son.

##### 4.3 Le récepteur

L'algorithme du récepteur est le suivant :

- 1) enregistrement du son,
- 2) récupération des données, (figure 8)

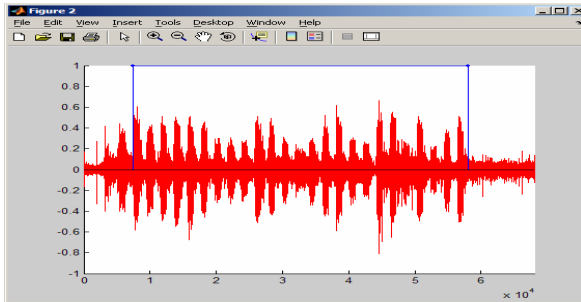


fig 8 : visualisation du signal enregistré dans des conditions correctes et détection du signal utile dans la fenêtre bleue

3) filtrage du signal dans la bande utile : le but de ce filtrage est d'éliminer les fréquences parasites,

4) détection du signal utile à l'aide du signal de synchronisation : la position du chirp dans le signal reçu correspond à un pic de corrélation maximal (figure 9),

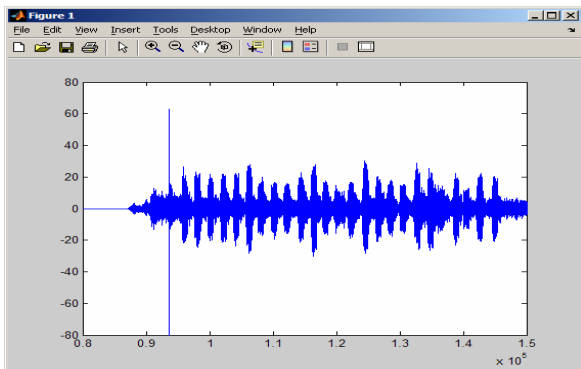


fig 9 : corrélation du signal avec le « chirp » et apparition d'un pic

5) découpage du signal d'information en fenêtre correspondant à une note,

6) détection des notes : le même alphabet de l'émetteur est créé puis la note retenue est celle correspondant à l'élément de l'alphabet donnant le maximum de corrélation avec la fenêtre étudiée (Figure 10),

7) traduction des notes en couleurs et affichage de l'image.

D'autres méthodes [2] pour la détection des notes peuvent être implémentées afin de comparer et/ou d'améliorer les performances: analyse temps fréquence, transformée de Fourier discrète associée à un maximum de vraisemblance...

Dans un but d'illustrer un cours ou une démonstration, tous les signaux jugés utiles peuvent être affichés. Ainsi, la figure 11 permet d'illustrer le bruit généré par le public : présence d'impulsions parasites (claquement de mains) ou d'un bruit moins important existant durant une partie de l'enregistrement.

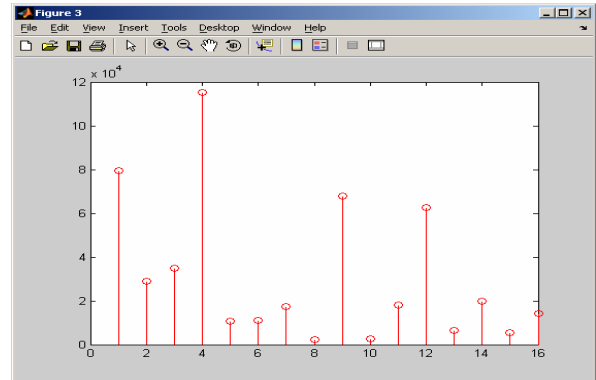


fig 10 : Les différentes valeurs de corrélation afin d'estimer la note

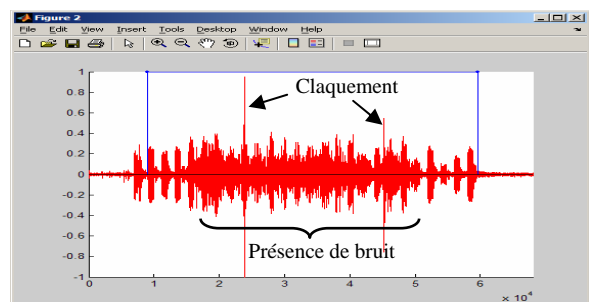


fig 11 : visualisation du signal enregistré dans des conditions dégradées : bruit important et deux claquement de mains

## 5 LES NOTIONS PEDAGOGIQUES ABORDEES

Le tableau 1 récapitule les différentes notions que nous avons traitées dans les sections précédentes et donne leurs explications suivant le cas de la communication orale et celui de la manipulation acoustique. Pour chaque notion, la mise en œuvre théorique ou pratique est donnée.

Des notions plus complexes telles que les fréquences et le spectre, sont facilement intégrables et présentables lors de la manipulation en rajoutant les affichages adéquats. De plus, en montrant la bande de fréquence occupée par les différents types de communications et les différents types d'ondes utilisés par chacune d'entre elle (Figure 12), une extension peut être faite en expliquant les capteurs nécessaires pour chaque type de communication : ouïe pour l'orale, œil pour la lumière, antenne pour les ondes électromagnétique etc..

Notions scientifiques	Communication orale	Manipulation acoustique	Mise en œuvre (théorique ou matériel)
Synchronisation	« Je commence »	Chirp (sinus à fréquence croissante)	Corrélation
Emetteur et récepteur	La personne qui parle et celle qui écoute	L'ordinateur qui émet un son et celui qui enregistre	2 ordinateurs, une enceinte et un micro
Protocole	Méthode de communication identique (langue)	Association couleur-note, sens de lecture de l'image	Géré par l'interface graphique
Bruit	Ambiance sonore (foule, musique)	Paroles, cris, claquement de mains	Participation du public
Puissance sonore	Augmentation ou diminution de la puissance de la voix	Augmentation ou diminution du volume du haut-parleur	Utilisation d'une enceinte avec amplificateur
Rapport puissance sonore sur la puissance du bruit (RSB)	B distingue plus ou moins bien les mots de A selon la puissance de la voix et la puissance du bruit	L'enregistrement du signal est plus ou moins dégradé	Visualisation du signal noyé ou pas dans le bruit
Erreurs (Taux d'Erreur)	Comparaison sur papier des deux images	Comparaison avec les écrans des deux images	Estimation des erreurs par le public : influence du bruit généré
Modulation	La voix	Les notes de musique	Modulation de fréquence associée à la théorie musicale
Estimation	De façon naturelle l'individu B estime et interprète le mot qu'il a entendu	Le récepteur compare la note reçue avec toutes les notes possibles et la plus ressemblante sera choisie	Corrélation de l'alphabet avec la note à estimer
Canal de propagation	Atténuation, écho	Canal identique	Visualisation du signal enregistré

Tableau 1 : Récapitulatif des notions abordées

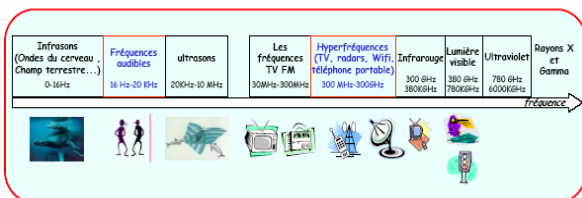


fig 12 : spectre fréquentiel des ondes audibles, inaudibles et visibles

## 6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour expliquer de façon pédagogique le principe d'une communication sans fil entre les appareils que nous côtoyons, téléphone portable, ordinateur, nous sommes partis du fait qu'une communication orale entre deux individus repose sur les mêmes principes. Ainsi, toutes les notions de base nécessaires à la compréhension d'une communication sans fil ont été introduites en partant d'un exemple simple : l'envoi d'une image par un individu A à un autre individu B.

Une fois les notions abordées, notre manipulation permet d'illustrer l'introduction d'un cours sur les télécommunications ou servir à l'éveil scientifique lors de rencontre avec un public néophyte. Cet exemple concret permet d'illustrer la chaîne complète dans un cas idéal. Elle permet également d'ajouter du bruit de façon à détériorer la transmission : problème de synchronisation, erreurs... La force de cette manipulation est l'évolutivité. En effet, nous avons proposé une méthode d'estimation mais l'implantation d'autres solutions est tout à fait possible. D'autre part, si le bruit est contrôlé par l'ordinateur, la manipulation peut mettre en avant des améliorations comme des codes correcteurs ou d'autres types de modulation (étalement par saut de fréquence). Un autre point fort est l'adaptabilité au niveau du public : nous pensons

qu'elle peut être utilisée dans un cours universitaire lors de l'introduction mais aussi pour un éveil scientifique chez des adultes néophytes ou des enfants. Nous avons d'ailleurs pu tester l'application sur ce public et les réactions étaient tout à fait satisfaisantes et encourageantes. Le programme et une notice d'aide seront disponibles en ligne.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1.P. Lecoy, *Technologies des télécommunications*, Germes
- 2.J.G. Proakis, *Digital communications*, Electrical and computer Engineering, McGraw-Hill
3. Matlab, [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)