

« Concours CGénial-lycée »
Édition 2017 - 2018


orange™

Le lycée Charles de Gaulle de Caen, avec le soutien de Sciences-à-l'école et de la fondation CGénial, et en partenariat avec Orange, présente le projet :



Benjamin (TS)
Expérimentateur



Jade (1L)
Chercheuse



Thomas (TS)
Mathématicien



Lory (1L)
Chercheuse



Valentin (1S)
Expérimentateur



Violette (TS)
Expérimentatrice



Arthur (TS)
Programmeur



Aymeric (TS)
Programmeur

BODYCOM

« Peut-on transmettre des informations (musique, image,...)
en passant par le corps humain ? »



Octave (2nde)
Vidéaste



Gweltaz (1S)
Chercheur



Arthur (TS)
Programmeur



Elise (TS)
Expérimentatrice



Hugo (TS)
Expérimentateur



Caroline (1L)
Chercheuse



Paul (TS)
Expérimentateur



Noëlla (1S)
Chercheuse

Encadrés par M. Levionnais, enseignant en Sciences-Physiques

SOMMAIRE

Introduction, problématique et résumé, remerciements

I.	<u>Le Bodycom (ou IBC pour Intra-Body Communication), qu'est-ce que c'est ?</u>	p2
1.	Rencontre avec un ingénieur d'Orange à la fête de la science en Normandie	p2
2.	Comment le bodycom fonctionne-t-il ? Ce que nous avons appris chez Orange	p2
3.	Quels sont les usages possibles du bodycom ?	p2
4.	Quelles sont les questions éthiques soulevées par cette technologie ?	p3
	a. Normes de fonctionnement et de sécurité du NFC	
	b. Réalisation d'un sondage pour étudier les réactions des usagers potentiels	
II.	<u>Le défi : transmettre une image à travers le corps humain</u>	p5
1.	Recherche sur les dangers liés au passage du courant	p5
2.	Premières tentatives de conduction par le corps humain	p6
	a. Tentative n°1 : allumer une ampoule 3,5 V	
	b. Tentative n°2 : allumer une DEL	
	c. Tentative n°3 : transmettre de la musique (une mélodie)	
	d. Problèmes et solutions soulevés par ces expériences	
3.	Modélisation du corps humain et critère n°1 de choix de la fréquence de la porteuse	p9
	a. Modélisation par une résistance et utilisation de plaques de cuivre comme antennes	
	b. Comparaison de la fonction de transfert de Paul avec celle de la résistance	
	c. Etude approfondie : fonction de transfert de Paul avec présence d'un isolant	
4.	Transmission par le câble série RS232	p13
	a. Description du câble	
	b. Caractéristiques des signaux	
III.	<u>La chaîne de transmission réalisée et les problèmes rencontrés</u>	p15
1.	Première expérience de modulation et critère n°2 de choix de la fréquence de la porteuse ...	p15
	a. Circuit de modulation d'amplitude	
	b. Application à la modulation d'un signal carré	
2.	Démodulation	p17
	a. Circuit de démodulation d'amplitude et aspects mathématiques	
	b. Comment choisir les composants ?	
	c. Application à la démodulation d'un signal carré et problèmes rencontrés	
	d. Solution mise en place : utilisation d'un montage comparateur	
3.	Montée en fréquence du signal modulé	p20
4.	Chutes de tensions observées et solutions trouvées	p21
5.	Bande passante des composants électroniques utilisés	p21
IV.	<u>Codage et transmission d'une image numérique</u>	p22
1.	Codage RVB et durée de transmission	p22
2.	Programme Python d'émission de l'image	p23
3.	Programme Python de réception de l'image	p24
4.	Nos résultats expérimentaux et les problèmes rencontrés	p25

Conclusion

Sources



Vidéo du projet : <http://spc.re/CG2018>



INTRODUCTION



En début d'année scolaire le professeur de physique M. Levionnais a proposé aux élèves volontaires de participer au concours CGénial en réalisant un projet autour d'une thématique développée par les laboratoires **Orange Lab's** à Caen : le **Bodycom**, c'est-à-dire la communication par l'intermédiaire du corps humain. L'idée est de pouvoir utiliser le corps humain comme conducteur pour y faire passer des informations utiles.

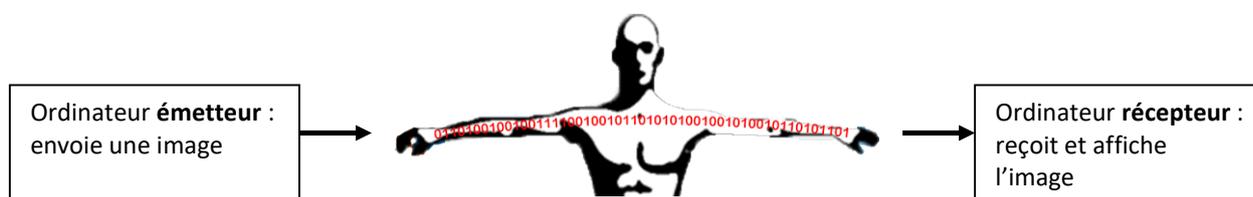
En effet la société Orange travaille depuis plusieurs années sur une méthode de communication nouvelle, qui permettrait de payer ses achats sans sortir sa carte bancaire de la poche ni même son téléphone portable, le paiement se ferait d'un simple geste de la main sur une borne adaptée (sans la toucher), les informations passant à travers le corps humain.

Problématique et résumé de l'objectif pour le concours CGénial

« Peut-on transmettre des informations en passant par le corps humain ? »

L'objectif du projet est de répondre à la problématique ci-dessus en simulant un exemple possible d'application dans le domaine médical : la transmission d'une ordonnance d'un médecin à un patient. On peut ainsi imaginer que le patient approche sa main d'une borne spécialisée (sans la toucher) et l'ordonnance est transmise de l'ordinateur du médecin vers le téléphone du patient en passant à travers le corps et les vêtements (puisque le téléphone est souvent dans une poche). Le même procédé pourrait ensuite être utilisé pour transmettre l'ordonnance du patient au pharmacien.

L'ordonnance du médecin sera simulée par une **image numérique** envoyée par un **1^{er} ordinateur**. Cette image devra passer à travers les **bras** d'un élève et s'afficher sur un **2^{ème} ordinateur**. La réalisation expérimentale serait alors la suivante :



Contraintes : il ne doit pas y avoir de contact direct des mains sur les bornes (émettrice et réceptrice), et en l'absence du corps humain l'information ne doit pas être transmise.

Remerciements

Avant de commencer la présentation du projet nous aimerions remercier ceux sans qui ce projet n'aurait pas pu être possible. Merci d'abord à Jean-Luc le préparateur de physique qui nous a été d'une grande aide. Merci à Octave et à ses talents de vidéaste à l'origine de la vidéo du projet. Merci également à l'entreprise Orange qui nous a présenté le champ des possibilités qu'ouvrait la communication d'information à travers le corps pendant la fête de la Science. Merci à l'ingénieur M. Payeur qui a suivi nos recherches afin de nous fournir des informations nous permettant d'avancer, cette collaboration avec Orange a été une aide précieuse tout au long du projet. Nous remercions également la fondation CGénial d'avoir accepté notre demande de financement pour un générateur. Enfin nous voudrions adresser un grand merci à notre professeur de Physique-Chimie M. Levionnais qui en plus de nous avoir fait découvrir le projet, nous a guidé tout au long de celui-ci permettant alors son aboutissement. Nous adressons ainsi nos plus sincères remerciements à toutes ces personnes qui ont rendues le projet encore plus génial !

I. Le Bodycom (ou IBC pour Intra-Body Communication), qu'est-ce que c'est ?



1. Rencontre avec un ingénieur d'Orange à la fête de la science en Normandie

A la fête de la science le samedi 14 octobre 2017 nous avons rencontré l'ingénieur qui travaille sur le Bodycom, ainsi que le doctorant qui travaille avec lui actuellement. Ils nous ont fait une démonstration de la communication entre un **ordinateur portable** et un **téléphone portable** en passant par le **corps humain**, dont voici le schéma de transmission :



Ordinateur portable → circuit de modulation + émission par l'antenne → Corps humain → Antenne dans la coque du téléphone portable (réception) → Circuit de démodulation → **Téléphone portable**



2. Comment le Bodycom fonctionne-t-il ? Ce que nous avons appris chez Orange

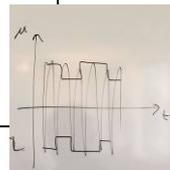
Orange utilise des antennes dites « **NFC** » (pour Near Field Communication c'est à dire communication en champ proche) qui émettent une **onde porteuse** de fréquence **13,56 MHz** (onde radio). Ces ondes sont émises avec une courte portée d'où le terme de « communication en champ proche ».

Résumé :

1. Emission avec une antenne « **NFC** » en champ proche.



2. Technique de « **modulation d'amplitude** »

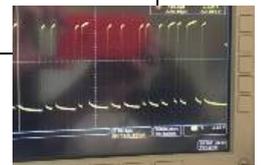


7. « **Démodulation** » pour retrouver le signal d'origine.

orange **IBC**



3. Le **signal binaire (0 et 1)** à transmettre est obtenu à l'aide d'un signal électrique **carré** qui alterne entre deux niveaux « bas » et « haut ».



4. **Onde porteuse** de fréquence 13,56 MHz.

6. Antennes « **NFC** » réceptrice.

5. Utilisation des **propriétés conductrices** du corps humain et de la **propagation des ondes électromagnétiques** à travers lui.

3. Quels sont les usages possibles du Bodycom ?

Pour répondre à la question des usages nous avons fait un « brainstorming » au tableau d'où il est ressorti plusieurs idées essentielles d'un point de vue pratique dans la vie courante :

Nous utilisons de nombreuses cartes au quotidien que ce soit des cartes bancaires, de fidélité, de bibliothèque, de self, de transport, de sécurité sociale, etc. Ces cartes seraient alors toutes regroupées dans le téléphone mobile et la technologie **Bodycom** serait mise à profit pour utiliser toutes ces cartes sans même sortir son téléphone de sa poche ou de son sac, par un simple contact de la main sur une borne adaptée. Ainsi par le biais d'ondes qui traverseraient le corps, on enverrait les informations à la borne destinée à cet usage en posant la main dessus.

Par exemple **chez le médecin l'ordonnance** serait transmise au téléphone du **patient** puis ensuite au **pharmacien** d'un seul geste de la main tandis que la **carte vitale** et la **carte de mutuelle** seraient mises à jour simultanément.

Les avantages de cette pratique sont nombreux. Tout d'abord on peut imaginer que la borne ira directement rechercher « la bonne carte » dans le téléphone et il n'y aurait éventuellement plus besoin de retenir le code de chaque carte ou bien un code unique permettrait de gérer toutes les cartes (ceci doit cependant rester un choix de l'utilisateur). De plus cela éviterait les pertes (qui n'a jamais fait tomber ses cartes en les sortant du sac ?) mais surtout **cela rendrait impossible les vols à l'arraché** de la carte bancaire ou du mobile puisque tout resterait au fond de la poche. Et si le téléphone venait à être égaré il peut être retrouvé en le géo-localisant ou bien les données peuvent être facilement restaurées puisque ce sont des données numériques, ce qui n'est pas le cas des cartes physiques.

Surtout on peut imaginer que cette technologie soit une **aide importante** pour les personnes en **situation de handicap** : une personne à mobilité réduite ou à qui il manquerait un bras ou l'avant-bras pourrait plus facilement valider ses tickets dans les transports en commun : bus, métro (souvent bondés), ou payer chez les commerçants en posant simplement une partie de son corps sur la borne adéquate.

4. Quelles sont les questions éthiques soulevées par cette technologie ?

a. Normes de fonctionnement et de sécurité du NFC



Avant de nous intéresser aux questions éthiques il était important de faire un point sur les **normes** utilisées dans le domaine des **communications par mobiles** afin de les comparer aux normes du **NFC**. Les téléphones portables utilisent les fréquences d'émission 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz (3G), 800 MHz et 2600 MHz (4G).

Les portables suivent plusieurs normes en matière de sécurité :

- Le **SAR** (Specific Absorption Rate) ne doit pas dépasser **2 W/kg** (exemple : une personne de 70 kg ne doit pas recevoir plus de 140 W). En effet, l'absorption par la chair d'ondes électromagnétiques entraîne une élévation de la température. Plus le SAR d'un appareil radioélectrique est faible, moins cet appareil a le potentiel d'être dangereux pour la santé car les tissus de l'utilisateur reçoivent moins d'énergie.
- Il en découle que le champ électrique ne doit pas dépasser une certaine valeur, de l'ordre de 40 à 60 V/m suivant les fréquences.

La technologie **NFC** quant à elle fonctionne à une fréquence de **13,56 MHz**. Sa distance de communication est relativement faible, inférieure à 10 cm. Le SAR du NFC est d'environ **0,1 W/kg** (à 5 mm), ou de **0,05 W/kg** (à 15 mm), ce qui est largement inférieur au 2 W/kg des téléphones portables.

Bilan : à priori la technologie NFC ne présente pas de risques. De plus il y a un **point important à comprendre** : pour le bodycom (ou IBC) les normes de fonctionnement des bornes de paiement NFC sont **inchangées**, ainsi le fait que l'information passe à travers le corps pour communiquer **ne rend pas la technologie plus dangereuse**. A l'heure actuelle lorsque vous effectuez un **paiement sans contact** avec votre carte bancaire, des ondes à 13,56 MHz passent déjà à travers votre corps lorsque vous approchez votre main de la borne, tout comme les ondes des téléphones portables passent en permanence à travers notre corps car elles se propagent dans tous les directions et dans tous les milieux.

Conclusion : la nouveauté est que dans le **Bodycom** les ondes qui traversent notre corps ont une **réelle utilité** puisqu'on s'en sert pour communiquer. Les réticences potentielles liées à cette technologie sont alors liées au fait que **les personnes prennent conscience que des ondes les traversent**, alors que cette prise de conscience n'a pas lieu lors d'un paiement par carte sans contact comme actuellement.

b. Réalisation d'un sondage pour étudier les réactions des usagers potentiels

Bien que présentant de nombreux avantages, notre projet nous a fait nous poser des questions sur ses inconvénients et ses dangers. Voici quelques questions qui ont émergées :



- Y-a-t-il un risque de piratage de nos données en nous touchant la main ?
- Le téléphone « reconnaîtra » t-il son propriétaire ? Afin d'éviter une utilisation non contrôlée. En particulier si quelqu'un nous touche la main lors d'un paiement, qui sera débité ?
- Nos empreintes et toutes nos données personnelles seront-elles fichées et enregistrées lors du premier passage sur une borne ?
- Quel est le ressenti des usagers suite à la prise de conscience du fait que des ondes traversent leur corps lors de l'utilisation du Bodycom ou même du sans contact actuel ? Est-ce moral d'utiliser le corps à cet effet ?

Les 1ères questions sont plutôt d'ordre technique et législatif, nous nous sommes donc davantage intéressées à la dernière. Afin de connaître les avis et les craintes des personnes sur ce projet, nous avons réalisé un sondage de 17 questions que vous trouverez en intégralité à l'adresse suivante, et qui est orienté sur les questions de **paiement** : <http://spc.re/sondageCG18>



Le rapport complet est accessible ici (attention certains pourcentages sur les questions à choix multiples sont mal calculés par le site, nous avons dû refaire les calculs) : <http://spc.re/rapportCG18>



Nous avons trié et organisé les 110 réponses obtenues (au moment de ce rapport) auprès d'élèves, professeurs, parents et ami(e)s. Voici certaines réponses :

Q.7. Utilisation du paiement sans contact actuel	Oui	49%
	Non	51%
Q.8. Idée de payer sans avoir à sortir son téléphone ou sa carte ?	plutôt positif	40%
	plutôt négatif	29%
	neutre	8%
	Non classées	23%
Q.9. Idée de payer en posant simplement sa main sur la borne ?	plutôt positif	35%
	plutôt négatif	30%
	neutre	8%
	Non classées	27%
Q.10. Bodycom plus dangereux que le paiement sans contact actuel ?	Oui	45%
	Non	55%
Q.12. Prêt à utiliser ce mode de paiement (Bodycom) ?	Oui	45%
	Non	55%
Q.14. Craintes en ce qui concerne les ondes de manière générale ?	Oui	56%
	Non	44%
Q.16. Craintes plus importante si les ondes passaient par votre corps ?	Oui	70%
	Non	30%

Résultats : nous avons repéré les réponses qui revenaient régulièrement :

Sans grande surprise la plupart des gens sont **inquiets** à cause des effets que pourraient avoir les ondes (**56%** craignent les ondes et jusqu'à **70%** s'ils prennent conscience qu'elles passent dans le corps). Malgré tout un grand nombre aimerait **payer sans sortir son téléphone** ou sa carte de sa poche (**40%**) et beaucoup sont **prêts à utiliser le Bodycom** (**45%**).

Certaines questions permettaient aux sondés de **s'exprimer librement** : il ressort que certains pensent que ce moyen de paiement est inutile, ou bien que l'on ne se rendrait plus compte de ce que l'on dépense. Certains ont également peur de se faire couper la main par des voleurs qui voudraient dérober leur argent, tout simplement parce qu'ils n'ont pas dû comprendre le principe, ils doivent penser qu'on leur planterait une puce dans leur main, ce qui n'est pas le cas du Bodycom.

D'un autre côté plusieurs personnes ont également répondu qu'il s'agissait d'une bonne idée, que cela pourrait être pratique au quotidien et utile dans le sens où il y aurait moins de vol et où cela ferait gagner du temps.

Bilan : d'après notre étude le principe du Bodycom est **accueilli plutôt positivement** si les utilisateurs ont l'assurance que les ondes sont sans danger pour le corps, et si le procédé trouve des applications utiles et pratiques. **Aucune personne n'a trouvé amoral** d'utiliser le corps à cet effet. Il faudrait cependant approfondir l'étude avec un échantillon plus large.

II. Le défi : transmettre une image à travers le corps humain

1. Recherches sur les dangers liés au passage du courant

Nous avons tout d'abord identifié les éventuels risques de mise en place de nos expériences. Nous avons effectué des recherches pour connaître les différents seuils. Voici les données trouvées :

Intensité	Effets
0 à 0,5 mA	Aucune sensation
1 mA	Seuil de perception
1 à 3 mA	Sensation sans douleur
3 à 10 mA	Sensation douloureuse
10 mA	Seuil de la perte de contrôle musculaire
30 mA	Seuil de paralysie respiratoire
130 mA	Seuil de fibrillation cardiaque
250 mA	Fibrillation cardiaque dans 99,5% des cas
4 à 5 A	Paralysie cardiaque, arrêt du cœur, peut être réversible
Plus de 5 A	Brûlures des tissus

Il était fondamental que l'intensité à laquelle nous allions être exposée ne devait donc pas excéder **3 mA**.

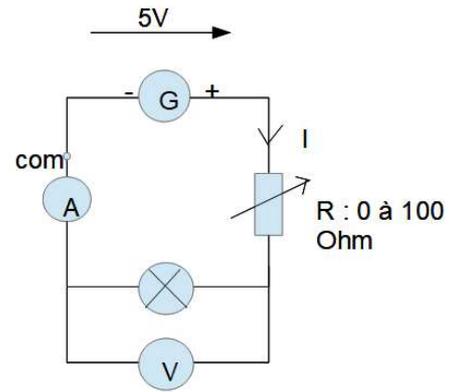


2. Premières tentatives de conduction par le corps humain

a. Tentative n°1 : allumer une ampoule 3,5V



Le premier objectif était de déterminer l'intensité nécessaire dans un circuit électrique pour allumer une ampoule de 3,5 V. Le montage est le suivant :



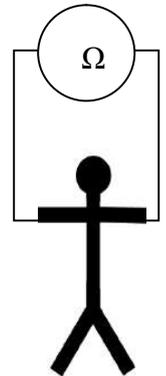
Résultats : en faisant varier la valeur de la résistance, nous avons constaté que l'intensité minimale dans le circuit pour allumer la lampe de 3,5 V était de **78,2 mA** obtenue avec une résistance **R = 50 Ω**. Ce qui correspond au seuil de vision de l'ampoule allumée dans la pénombre.

Peut-on réaliser cette expérience en remplaçant la résistance du circuit ci-dessus par le corps humain ?

- Si le corps est assez conducteur (résistance faible) alors cette expérience est trop dangereuse car l'intensité (78,2 mA) est au dessus du seuil de paralysie respiratoire. Il était donc nécessaire de connaître la résistance du corps humain.

Quelle est la résistance du corps humain ?

- L'effet du corps humain sur un circuit électrique peut s'apparenter à première vue à celui d'une résistance. Nous nous sommes alors demandé quelle pouvait être la valeur de cette résistance. Nous l'avons mesurée plusieurs fois avec un ohmmètre (câbles électriques tenus entre le pouce et l'index de chaque main) pour faire une **étude statistique** sur différents élèves à partir de séries de 20 mesures.



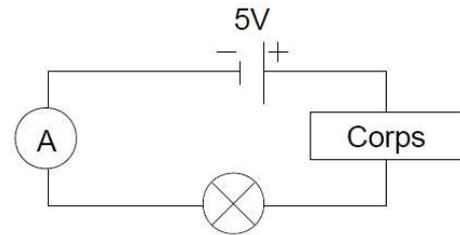
Résultats : avec une incertitude relative satisfaisante (< 10%) nous avons pu mesurer une résistance moyenne de l'ordre du **MΩ** pour **Violette** et **Paul** et de l'ordre de **100 kΩ** pour **Hugo** « main sèches » et en faisant des mesures de main à main. Les résultats dépendent beaucoup de la personne puisqu'il y a un facteur 10 entre la résistance d'Hugo et celle de Violette ou Paul.

Retour à l'expérience initiale : peut-on allumer la lampe de 3,5 V en remplaçant la résistance du circuit par le corps humain ?

	R violette (Mohm)	R Paul (Mohm)	R Hugo (Mohm)
	1,2	2,7	0,17
	1,6	2,7	0,13
	1,7	2,6	0,11
	1,6	2	0,116
	1,6	2,1	0,129
	1,7	2,5	0,134
	1,9	2,9	0,136
	1,7	2,7	0,153
	1,8	2,3	0,165
	2	2,4	0,165
	1,4	2,4	0,142
	1,7	2,3	0,149
	1,7	2,3	0,148
	1,2	2,7	0,176
	1,6	2,8	0,134
	1	2,8	0,155
	1,4	2,4	0,158
	1,3	2,7	0,173
	1,6	2,8	0,155
	1,4	2,6	0,123
Moyenne	1,6	2,5	0,146
Ecart type	0,3	0,2	0,019
Incertitude type	0,1	0,1	0,004
Incertitude type élargie (95%)	0,1	0,1	0,009
Incertitude relative	7%	4%	6%

- La résistance du corps humain est très élevée, environ **2000 à 20000 fois plus grande** que la résistance du circuit initial ($100 \text{ k}\Omega / 50 \text{ }\Omega = 2000$) alors en remplaçant la résistance variable du circuit par le corps humain le courant sera très faible (environ $5\text{V} / 100 \text{ k}\Omega = 50 \text{ }\mu\text{A}$) donc sans risque, même inférieur au seuil de perception. Cependant il sera insuffisant pour allumer la lampe. Nous avons quand même testé.

Résultats : avec Hugo l'intensité mesurée est de **17 μA** , ce qui est inférieur d'un **facteur 4600** à l'intensité minimale pour allumer cette lampe ($78,2 \text{ mA} / 17\mu\text{A} = 4600$). Comme attendu la lampe ne s'allume pas.



Quelle tension faudrait-il utiliser pour allumer cette lampe ?

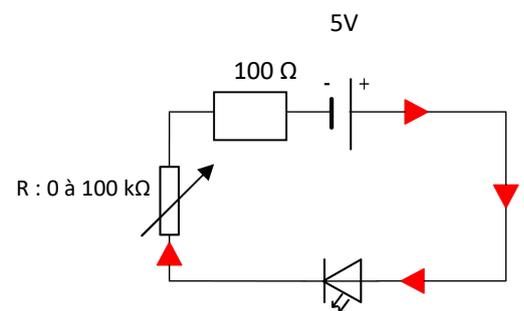
- D'après la loi d'ohm $U = R.I = 100000 \times 78,2 \cdot 10^{-3} = 7,82 \cdot 10^3 \text{ V}$ soit près de **8000 V**. Ce qui est impossible à réaliser puisque comme déjà dit nous serions au dessus du seuil de paralysie respiratoire, et par ailleurs nous n'avons pas de générateur de 8000 V.

Bilan : échec, allumer une ampoule de 3,5 V en utilisant le corps humain comme conducteur n'est pas possible.

b. Tentative n°2 : allumer une DEL



Puisque l'ampoule nécessite une intensité trop importante pour s'allumer nous avons changé l'ampoule par une diode électroluminescente (DEL) puis nous avons de nouveau déterminé l'intensité nécessaire pour atteindre le seuil de visibilité de la DEL allumée en faisant varier la résistance variable. La résistance de 100Ω sert de protection.

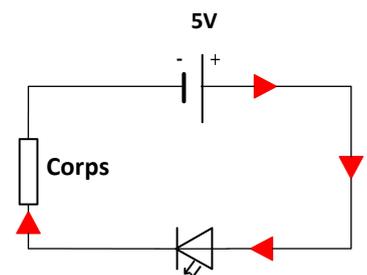


Résultats : la valeur de l'intensité minimale pour voir la lumière de la DEL dans la pénombre est de **67 μA** obtenue avec une résistance **$R = 35 \text{ k}\Omega$** .

Peut-on réaliser cette expérience en remplaçant la résistance du circuit ci-dessus par le corps humain ?

- La résistance du corps humain étant **3 à 30 fois plus importante** que les $35 \text{ k}\Omega$ précédents, l'intensité sera plus faible et la DEL ne s'allumera pas. Nous avons quand même testé.

Résultats : la DEL ne s'allume pas, avec Hugo comme corps l'intensité mesurée est de **14 μA** , ce qui est inférieur d'un **facteur 5** à l'intensité minimale pour allumer la DEL ($67 \mu\text{A} / 14 \mu\text{A} = 4,8$). C'est encore un échec mais nous ne sommes pas loin !



- Pour résoudre ce problème nous avons augmenté la tension du générateur d'un facteur 5 : **25 à 30 V** au lieu de **5 V**.

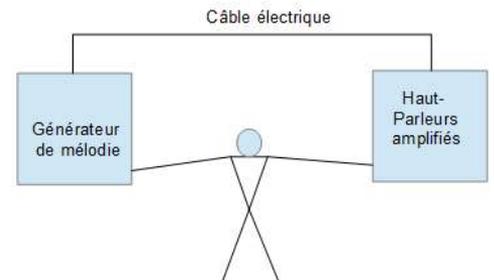
Bilan : victoire, la DEL s'est allumée avec le corps ! Nous y voyons ici une première façon sommaire de transmettre des données numériques à travers le corps humain : une diode allumée pourrait correspondre à un « 1 » (générateur allumé : 5 V) et une diode éteinte à un « 0 » (générateur éteint : 0 V).

c. Tentative n°3 : transmettre de la musique (une mélodie)



Nous avons réalisé par la suite un dispositif en utilisant cette fois comme témoin de la transmission du message électrique par le corps humain, non pas l'allumage d'une LED mais la génération d'un **son**. Pour cela nous avons utilisé un générateur de mélodie qui délivre une **tension carrée de 0 à 5V**. Chaque note correspond à un signal électrique de fréquence particulière du domaine audible (20Hz-20kHz). L'avantage de ce générateur de mélodie est qu'il nous permet de simuler la transmission de données binaires : 5 V correspond au « 1 » et 0 V correspond au « 0 », comme avec la DEL.

Problème et solution : le générateur ne délivrant qu'une tension de 5V le courant passant dans le corps humain sera trop faible (comme avec la LED) pour entendre le son sur des hauts parleurs. Comme nous ne pouvons pas augmenter la tension délivrée par le générateur de mélodie la solution sera d'utiliser des haut-parleurs amplifiés. Le schéma du dispositif est alors le suivant :

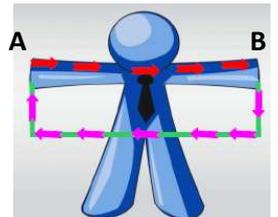


Résultats : victoire, le son est parfaitement audible ! Même avec plusieurs élèves qui se tiennent la main.

d. Problèmes et solutions soulevés par ces expériences

Ces premières expériences ont été une réussite pour montrer qu'un courant assez faible pour ne pas être dangereux mais suffisamment important pour transmettre une information pouvait passer à travers le corps humain, mais elles ont aussi fait apparaître des **limites** :

- Toutes les expériences précédentes ont été réalisées par contact direct entre les fils électriques et les mains, or si on intercale un isolant (pour simuler un vêtement) alors le courant continu ne passe plus et le courant variable de basse fréquence passe très mal.
- Un autre problème est que tous les circuits électriques réalisés utilisent une boucle de courant (circuit série refermé par un câble électrique) : nous ne pouvons donc pas envoyer une information en passant exclusivement par le corps humain, nous avons besoin d'un fil supplémentaire, or nous souhaitons qu'il n'y ait que le corps humain pour transmettre l'information d'un point A à un point B.



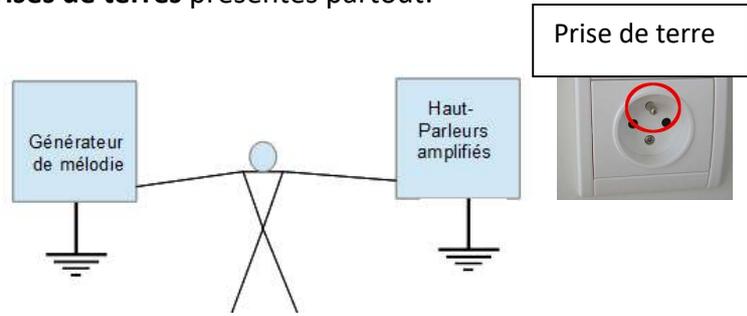
➤ L'ingénieur d'Orange nous a guidés vers deux solutions complémentaires :

- D'abord l'utilisation **d'ondes électromagnétiques** par l'intermédiaire d'une **porteuse de fréquence élevée** (bien plus que 20Hz-20kHz) qui passera facilement à travers la matière, ceci nécessitant de **moduler en amplitude** le signal que l'on voudra transmettre. En effet les ondes peuvent se propager entre deux points sans qu'il n'y ait de boucle de courant (comme par exemple d'une antenne vers un téléphone portable). Avec une **contrainte** cependant : l'onde doit se propager suffisamment bien dans le corps humain mais très peu dans l'air (sur une très courte distance) pour que la transmission se fasse uniquement si le corps humain est présent.



- D'autre part même sans ondes nous avons compris que nous pouvions faire nos expériences en bouclant grâce aux **prises de terres** présentes partout.

Résultats : nous avons pu tester cette dernière solution pour la transmission de la mélodie et cela fonctionne très bien en utilisant le nouveau montage ci-contre. Cette solution peut aussi être utilisée avec la DEL, nous l'avons testée et cela fonctionne, ainsi plus besoin de câble supplémentaire pour boucler, on utilise la prise de terre, c'est ce qui est fait dans la vidéo du projet.



3. Modélisation du corps humain et critère n°1 de choix de la fréquence de la porteuse

- Modélisation par une résistance et utilisation de plaques de cuivre comme antennes

Pour la suite des expériences nous ne souhaitons plus tenir les fils électriques entre le pouce et l'index, nous avons donc utilisé des **plaques de cuivre** qui jouent le rôle d'**antennes émettrices et réceptrices à courte portée**. Les mains sont alors posées sur les plaques. Une série de 20 mesures est de nouveau effectuée avec Paul.

Résultats : la résistance de Paul est beaucoup plus faible : **64 ± 3 kΩ** avec les plaques alors qu'elle était de **2,5 ± 0,1 MΩ** auparavant. L'augmentation de la surface de contact entre le corps et les connexions électriques permet donc de diminuer la résistance utile. Nous allons toujours utiliser les plaques à partir de maintenant. Nous aurions peut être dû utiliser ce dispositif plus tôt, cela aurait permis de plus facilement allumer la DEL et transmettre la musique.

	R Paul avec les plaques (kohm)
	66
	55,8
	67
	69
	67
	65
	60
	56
	53
	50
	60
	70
	74
	75
	68
	73
	65
	58
	56
	64
Moyenne	64
Écart type	7
Incertitude type	2
Incertitude type élargie (95%)	3
Incertitude relative	5,1%

A ce stade nous pouvons assimiler **Paul** à une résistance de **64 kΩ**, mais nous avons besoin d'aller plus loin dans l'étude car pour le moment l'étude est faite en courant continu, or par la suite ce sont des signaux variables qui vont transiter par le corps.

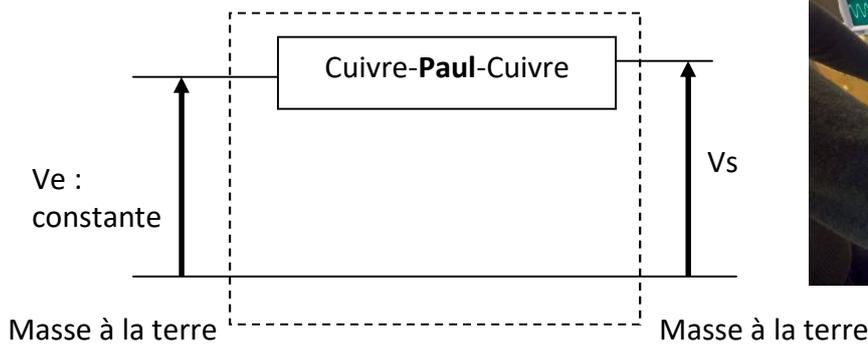
- Comparaison de la fonction de transfert de Paul avec celle de la résistance

Pour savoir si nous pouvons modéliser **Paul** par une simple résistance nous avons souhaité connaître la réponse du corps de Paul quand on lui envoie des signaux **sinusoïdaux** en faisant varier la fréquence de **100 à 10 MHz** (correspondant aux limites techniques de notre générateur initial).

Pour cela on va déterminer la **fonction de transfert de Paul**, qui est le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée tel que $H = V_s/V_e$. Cette grandeur va nous permettre de tracer le diagramme de Bode correspondant au gain en décibel en fonction de la



fréquence tel que $G_{dB} = 20 \times \log(H)$ puis on va tracer $G_{dB}(f)$ (gain en fonction de la fréquence, en échelle logarithmique).

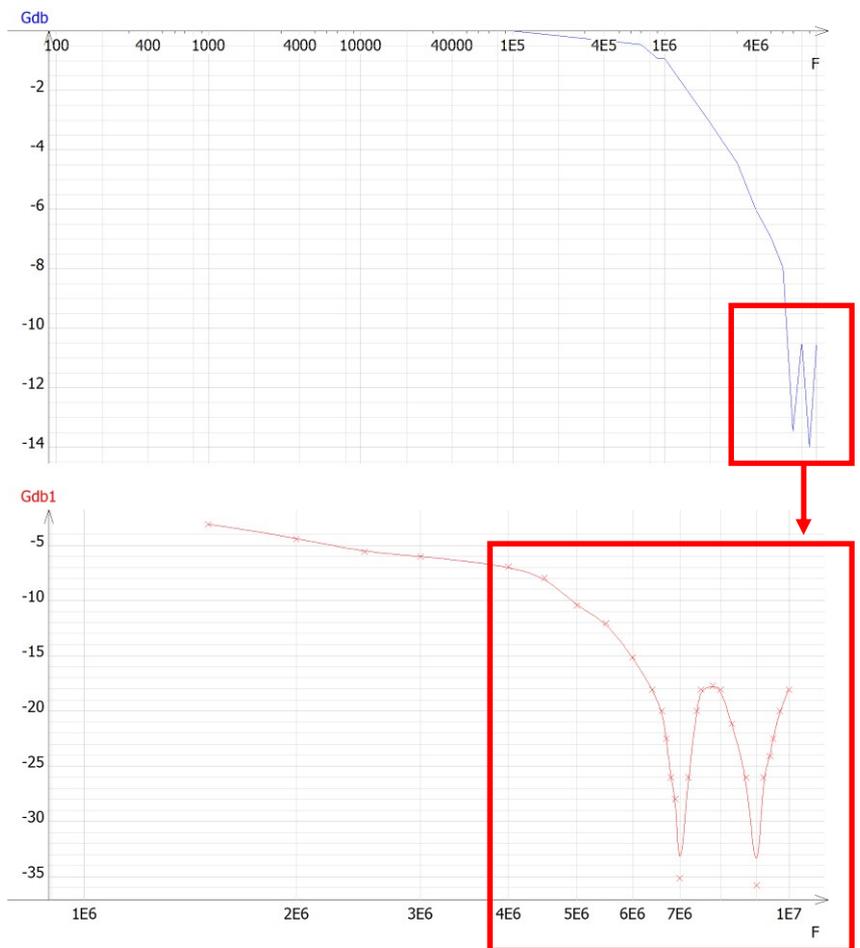


V_e est obtenue avec un GBF et les amplitudes sont mesurées avec des oscilloscopes pour différentes fréquences. Les plaques sont situées à **50 cm** l'une de l'autre.

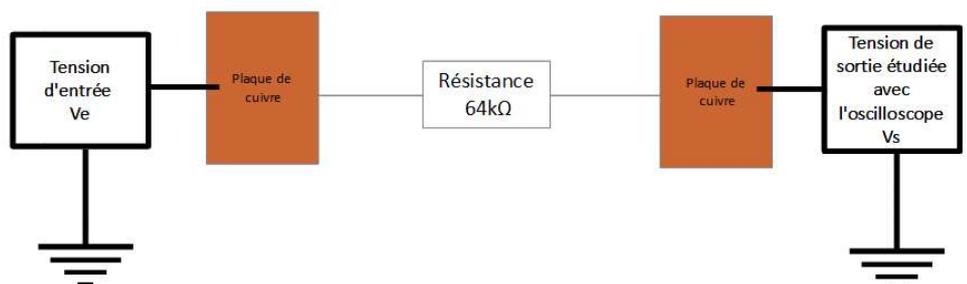
Résultats :

Lorsque $G_{db} = 0$ dB cela signifie que le signal passe bien (puisque $V_s/V_e = 1$). On remarque que le courant passe bien jusqu'à **1MHz** puis le gain en décibel **décroît brutalement**.

De plus on remarque une **particularité** vers **8 MHz**. Nous avons alors réalisé plus de mesures dans cette zone afin d'étudier celle-ci de plus près. Nous pensions qu'elle était peut-être caractéristique de **Paul** alors nous avons recommencé avec **Aymeric** mais la courbe avait la même allure. Nous ne savons pas à quoi est due cette particularité.



Nous avons ensuite déterminé la **fonction de transfert de la résistance de 64 kΩ** puis le gain en dB pour comparer le résultat aux courbes précédentes.



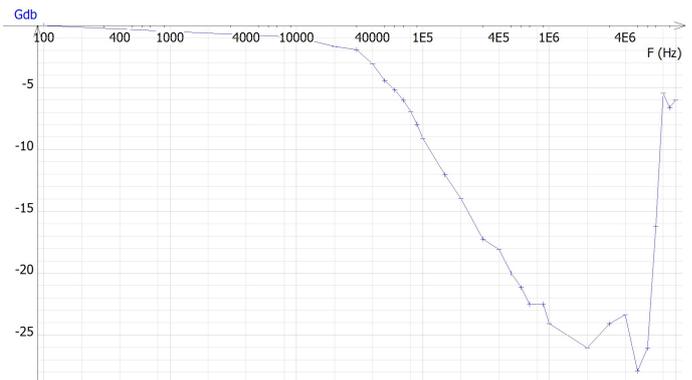
Dispositif :



Résultats :

La courbe est sensiblement différente par rapport à celle avec le corps humain : la **décroissance brutale** a lieu pour des fréquences plus basses : à partir de **40 kHz**.

On observe toujours une **particularité** mais vers **3 MHz**. La fin de la courbe est très différente avec une **brusque remontée** du gain de **8 à 10 MHz**.



Bilan : on peut donc déduire que la modélisation du corps par une simple résistance n'est pas satisfaisante du point de vue de la réponse en fréquence. Lors de nos expériences futures, pour des raisons pratiques on pourra remplacer le corps par une résistance de 64 kΩ mais il faudra toujours tester ensuite avec un vrai corps humain pour valider nos résultats car beaucoup de facteurs viennent certainement perturber le passage du signal dans le corps.

c. Etude approfondie : fonction de transfert de Paul avec présence d'un isolant

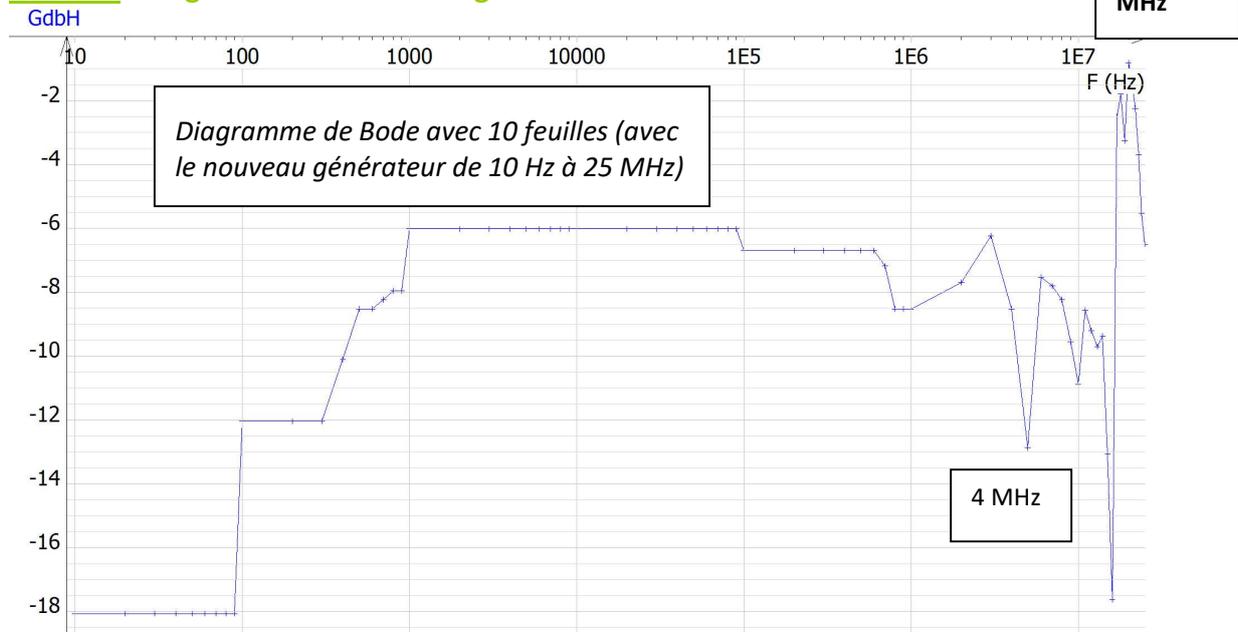


Nous connaissons la fonction de transfert de l'être humain qui nous a permis de confirmer que celui-ci peut être utilisé pour propager des signaux. Or le but final de notre projet est justement de transmettre un message via le corps mais il serait préférable que celui-ci passe malgré la **présence d'un isolant entre le corps et les plaques**. Ceci afin de simuler un pantalon ou un sac qui pourrait séparer le corps du téléphone par exemple. Ainsi nous avons réitéré les études mais cette fois-ci en plaçant des couches de feuilles (1, 5 puis 10 feuilles) entre les plaques et la main pour voir si le signal passait.

Nous avons eu l'occasion de changer notre configuration en mettant le matériel sur un chariot ; les plaques sont toujours espacées de **50 cm** et grâce au financement prodigué par la fondation **CGénial** nous avons pu nous procurer un nouveau générateur pouvant atteindre les **25 MHz**.



Résultat : diagrammes de Bode du gain



On note d'abord que les basses fréquences jusqu'à **1000 Hz** environ ne passent pas bien à travers les feuilles, contrairement à ce qu'il se passait sans les feuilles. Ce qui confirme l'intérêt d'utiliser une porteuse de fréquence élevée pour transmettre l'information. Cependant il y a des fréquences qu'il faudra éviter comme **4 MHz** puisqu'il y a une chute brutale du gain. En explorant les fréquences plus élevées avec le nouveau générateur on note un pic à **20 MHz** auquel on ne s'attendait pas dans les hautes fréquences. Aussi on remarque certains éléments stables de **1 kHz à 1 MHz environ**. Ainsi on pourra utiliser une de ces fréquences comme **porteuse** lors du passage du message final ou bien la fréquence de **20 MHz** (mais nous pensons en fait que cette fréquence se propage dans l'air et non dans le corps, nous devons le vérifier).

Bilan et pistes d'amélioration :

Notre critère n°1 sera d'utiliser une fréquence de **porteuse** comprise entre **1 kHz et 1 MHz**, cependant ces expériences nous ont permis de dévoiler des pistes d'amélioration :

- En effet nous avons constaté que même sans la présence du corps entre les plaques de cuivre une partie des signaux étaient transmis, en particulier la fréquence 20 MHz : il faudrait isoler les câbles (ou utiliser des câbles coaxiaux) ou éloigner plus les plaques de cuivre pour éviter tout ce qui peut parasiter le signal de sortie, et utiliser une table en bois.
- Une fois les câbles isolés nous pourrions déterminer la fonction de transfert sans corps, pour connaître uniquement ce qui passe d'une plaque à l'autre dans l'air sans corps humain.
- Pour une fréquence donnée nous pourrions étudier l'influence du nombre de feuilles sur le gain.
- Nous pourrions aussi revoir notre modélisation de la chaîne Cuivre-Isolant-Corps-Isolant-Cuivre pour l'assimiler non plus à une simple résistance mais à un condensateur car un condensateur ne laisse pas passer les basses fréquences.
- Nos antennes sont juste deux plaques de cuivre, nous pourrions mesurer leur rayonnement dans les laboratoires d'Orange et éventuellement mettre en place de nouvelles antennes plus adaptées.

Certaines de ces pistes seront explorées d'ici la fin de l'année.

4. Transmission par le câble série RS232

a. Description du câble

Pour répondre à notre objectif nous avons besoin d'un moyen pour envoyer des informations à partir d'un ordinateur. Nous avons utilisé le **port série RS232** car la **bibliothèque Python serial** existe pour le programmer. Mais comme les ordinateurs du lycée n'ont pas de port série il a fallu utiliser un **adaptateur USB-série** (ci-contre).



La première expérience fut d'utiliser un câble série pour **relier deux ordinateurs** entre eux. À l'aide de deux programmes en langage Python, nous avons transmis des caractères simples, un '1' ou un '0' ou n'importe quelle lettre pour vérifier que ça fonctionnait bien. Ci contre les programmes pour **envoyer** et **recevoir** le caractère '0' en continu. La variable **baud** permet de régler la vitesse de transmission (voir ci-contre).

```
import serial
port = "COM6"
baud = 300
ser = serial.Serial(port, baud, timeout=1)
if ser.isOpen():
    print(ser.name + ' is open...')

while True:
    car = '0'
    test = car.encode('ascii')
    ser.write(test)
```

```
import serial
port = "COM6"
baud = 300
ser = serial.Serial(port, baud, timeout=1)
if ser.isOpen():
    print(ser.name + ' is open...')

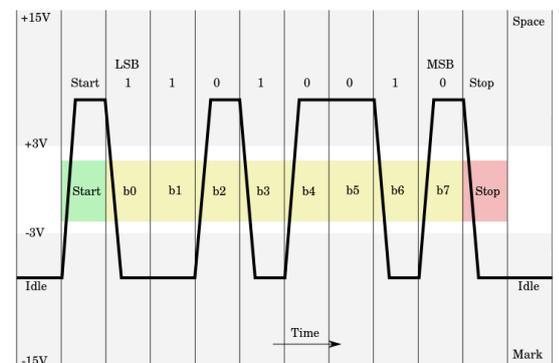
while True:
    out=ser.read()
    out=out.decode('ascii')
    if out != '':
        print(out)
```



Le câble série se compose de **10 broches**, néanmoins deux seulement sont utiles pour transmettre un signal dans un sens : **la broche de transmission (fil marron)** et **la masse**. Après les avoir repérés grâce à un oscilloscope, nous avons déterminé les caractéristiques des signaux qui transitent par ces câbles grâce à une carte d'acquisition GTS2.

b. Caractéristiques des signaux

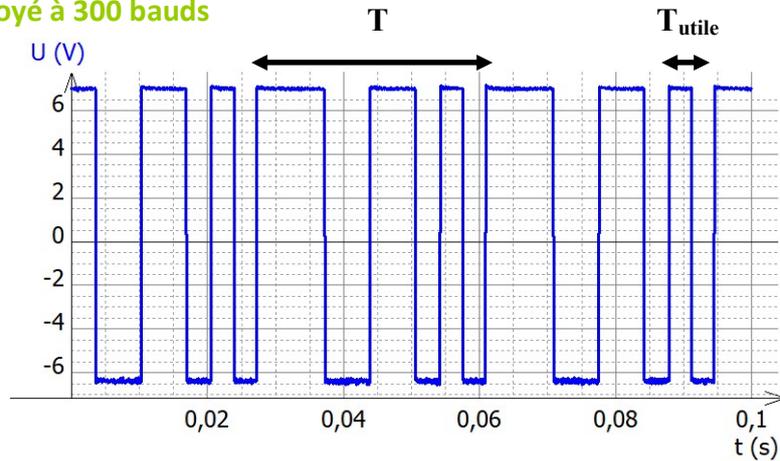
Les **bits sont envoyés en série**, c'est à dire les uns à la suite des autres contrairement aux câbles de dernières générations qui les envoient en parallèle. Ci-contre l'oscillogramme de la transmission du caractère 'K' (01001011), avec un bit de départ et un bit d'arrêt, donc **1 octet + 2 bits**, soit **10 bits** en tout. On note une **particularité** : les tensions hautes correspondent à des 0 et les basses à des 1.



Point important : nous avons compris que le port série permet **uniquement** d'envoyer des **caractères ASCII**, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible d'envoyer bit par bit un 0 (qui correspondrait à une tension haute) ou un 1 (qui correspondrait à une tension basse) mais qu'il est uniquement possible d'envoyer le caractère '0' (donc 10 bits) ou le caractère '1' ou n'importe quelle autre caractère ASCII ('a', 'A', '+', '-', etc.). Cela nous embêtait au départ car nous aurions aimé pouvoir contrôler exactement ce qui était envoyé par le port mais au final l'important était de **disposer de deux symboles pour simuler du codage binaire**. Donc nous avons choisi le **caractère '0'** pour représenter un 0 binaire et le **caractère '1'** pour représenter le 1 binaire.

Résultat : acquisition du '1' envoyé à 300 bauds

Les '1' sont envoyés en continu, le signal est donc périodique. On obtient $T = 34$ ms donc $F = 1/T = 29$ Hz, $U_{\max} = 7$ V et $U_{\min} = -6,4$ V.



Point important : pour la suite de notre projet et en particulier pour la partie **modulation**, si on souhaite pouvoir **moduler correctement ce signal**, ce qu'il est important de connaître n'est pas la période T du signal dans sa globalité mais le temps minimal d'alternance des 0 et 1 binaires, ce que nous appellerons la « période utile pour la modulation : T_{utile} » (voir acquisition précédente) à partir de laquelle on peut calculer la fréquence utile pour la modulation : $F_{\text{utile}} = 1/T_{\text{utile}}$. La période T correspond quant à elle au temps de transmission d'un caractère.

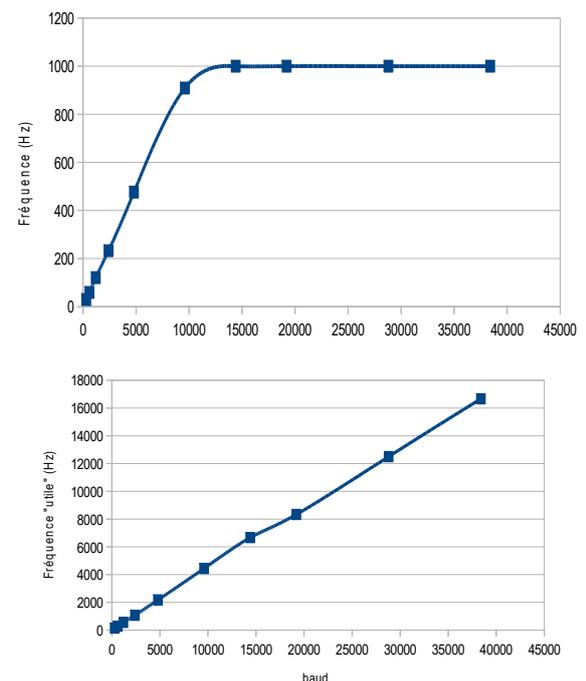
Expériences : pour connaître le **lien entre baud et fréquence** nous avons renouvelé les acquisitions en faisant varier le baud avec toutes les valeurs possibles et mesuré à chaque fois T et T_{utile} . Les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-dessous et sous forme graphique :

Baud	T (ms)	F=1/T (Hz)	Temps « utile » (ms)	Fréquence « utile » (Hz)
300	34	29	7,0	143
600	17	59	3,6	278
1200	8,3	120	1,8	556
2400	4,3	233	0,94	1066
4800	2,1	476	0,46	2174
9600	1,1	909	0,23	4444
14400	1,0	1000	0,15	6667
19200	1,0	1000	0,12	8333
28800	1,0	1000	0,08	12500
38400	1,0	1000	0,06	16667

Résultats :

On constate qu'à partir de **14400 bauds** la fréquence reste fixe à **1000 Hz**, cela nous a surpris car cela signifie qu'il est inutile d'aller au dessus de ce débit, les caractères ne seront pas transmis plus rapidement. **Pourquoi d'autres débits sont-ils alors proposés ? Nous n'avons pas de réponse.** D'autant plus que la fréquence utile, elle, continue bien d'augmenter, de façon linéaire avec le débit.

Bilan : d'après ces résultats notre objectif sera de transférer un caractère avec un débit compris entre **300** et **14400 bauds**, ce qui nécessitera dans un premier temps d'arriver à **moduler** et **démoduler** une tension **carrée** de **7 V** d'amplitude environ avec une fréquence comprise entre **140** et **6700 Hz** environ.



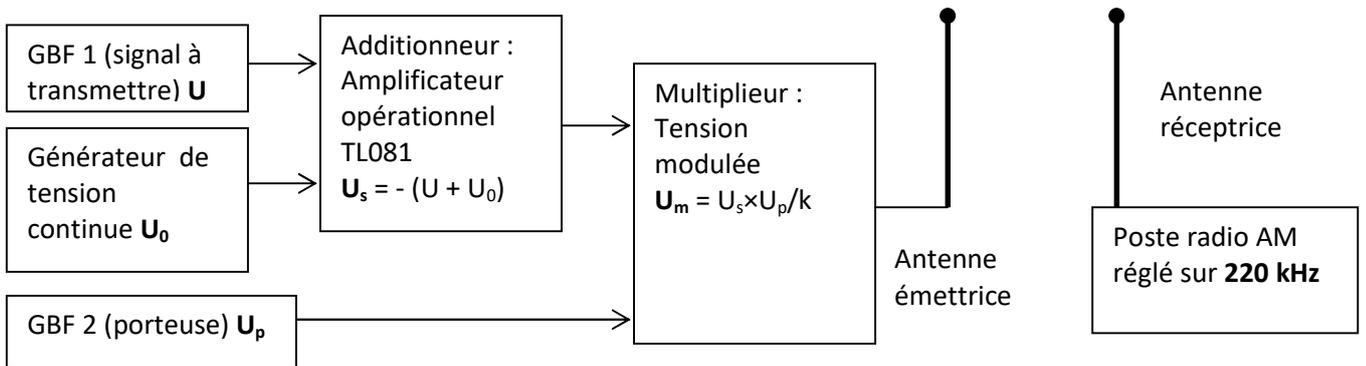
III. La chaîne de transmission réalisée et les problèmes rencontrés

1. Première expérience de modulation et critère n°2 de choix de la fréquence de la porteuse

a. Circuit de modulation d'amplitude

Pour découvrir la modulation d'amplitude nous avons réalisé une expérience de transmission d'un son (signal **analogique**) vers un poste radio.

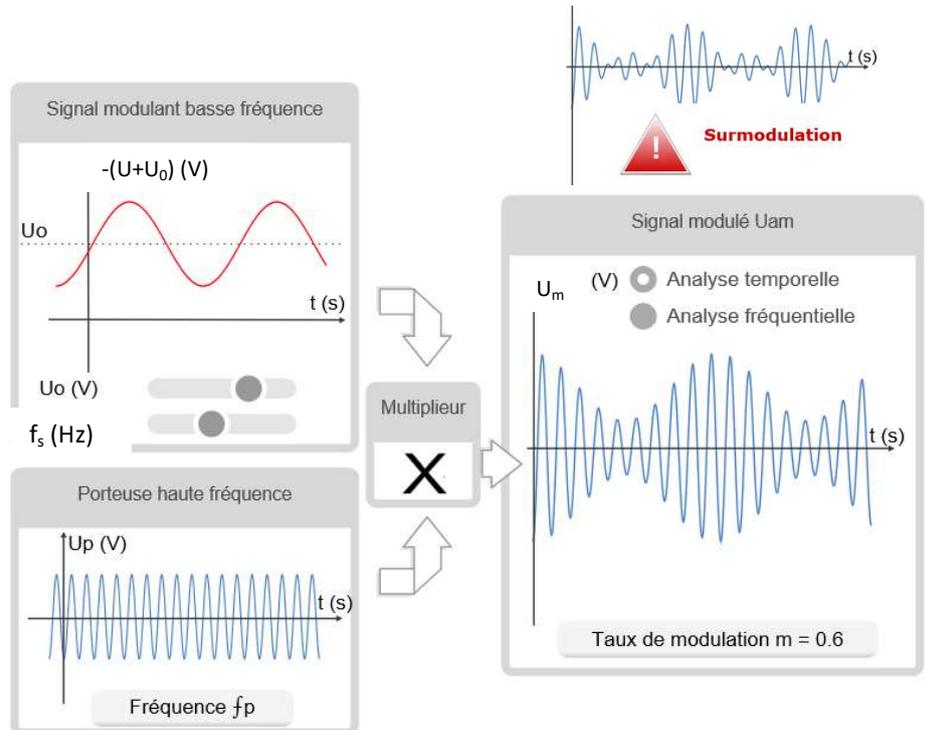
Le schéma est le suivant :



- GBF 1 : tension modulante sinusoïdale U (signal à transmettre) : basse fréquence $f_s = 440 \text{ Hz}$ (La_3), amplitude 2 V
- Générateur de tension continue : tension de décalage $U_0 = 4 \text{ V}$
- GBF 2 : tension porteuse sinusoïdale U_p , fréquence $f_p = 220 \text{ kHz}$, amplitude 10 V

La fréquence de **220 kHz** a été choisie car cela ne correspondait à aucune station radio. Nous avons constaté que le La_3 était bien transmis par les ondes et qu'en faisant varier la fréquence du signal à transmettre (sons audibles : 20 Hz - 20 kHz) la note changeait bien au niveau du poste radio.

Grâce à plusieurs animations nous avons compris le principe de la modulation d'amplitude : la tension de décalage qui est additionnée permet de ne pas avoir de surmodulation, pour cela on doit avoir $U_0 > \text{amplitude de } U$. Ainsi **l'enveloppe** du signal modulé U_m est l'image du signal modulant U , c'est donc elle qu'il faudra récupérer quand on démodulera U_m .



Bilan :

- Pour que l'enveloppe de la tension modulée soit la plus proche possible du signal à transmettre il faut que la fréquence de la porteuse f_p soit bien plus élevée que f_s . Malgré nos recherches nous n'avons pas trouvé de critère officiel pour choisir f_p en fonction de f_s , nous avons donc décidé de nous baser sur l'expérience précédente où la porteuse a une fréquence **au minimum 10 fois plus élevée (ce sera notre critère n°2)** que la fréquence maximale du signal modulant (en effet $220 \text{ kHz} / 20 \text{ kHz} = 11$ et $220 \text{ kHz} / 20 \text{ Hz} = 11000$).
- Ainsi dans un premier temps nous avons conservé 220 kHz comme porteuse pour nos tests ce qui nous permettait en théorie d'atteindre le **débit maximum de 14400** bauds (puisque $220 \text{ kHz} / 10 = 22 \text{ kHz}$, ce qui est supérieur à la fréquence « utile » de 6667 Hz) mais au cours de l'année l'ingénieur d'Orange nous a conseillé d'utiliser la fréquence **455 kHz** (raison : en cas de besoin il existe des filtres passe-bande tout faits à cette fréquence sous forme de composants qui pourraient être utiles dans le circuit de réception). Ceci nous convenait car cette fréquence était compatible avec le critère n°1, même si nous n'avons pas eu besoin de filtres passe-bande jusqu'à présent.

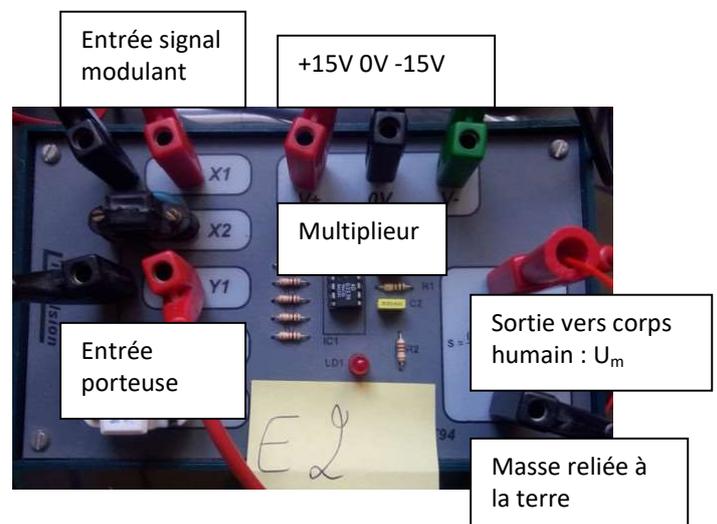
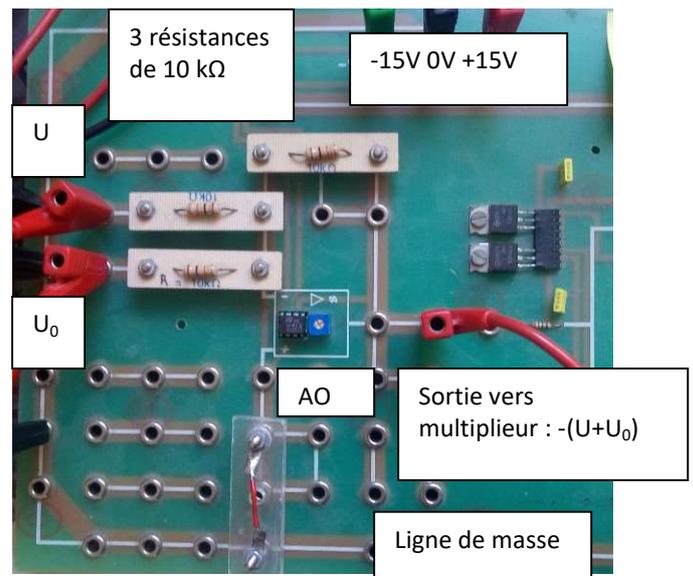


b. Application à la modulation d'un signal carré

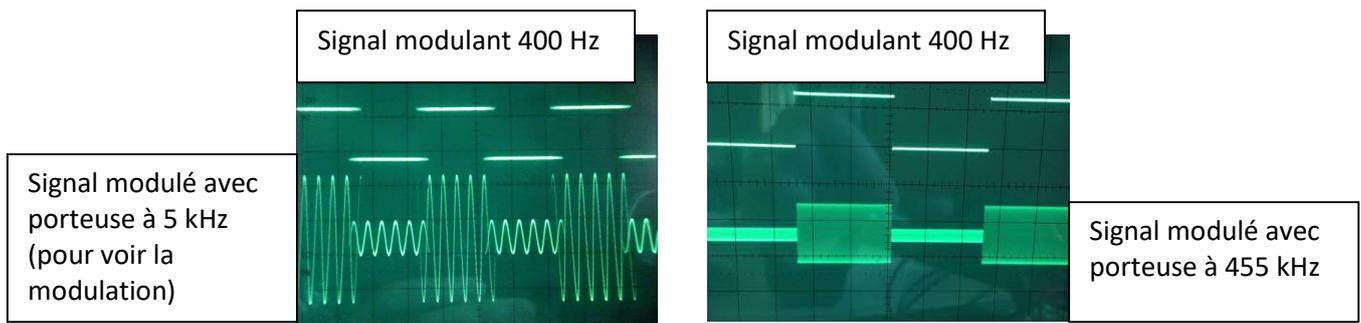
Pour commencer nos tests nous avons choisi un signal modulant carré de fréquence **400 Hz**, nous ne voulions pas partir sur une fréquence trop élevée dès le départ.

Ce signal est envoyé dans un montage additionneur. C'est un montage composé d'un amplificateur opérationnel appelé **AO TL081** qui permet d'ajouter une tension constante pour éviter toute surmodulation qui ferait que lors de la démodulation on aurait une distorsion du signal.

Ensuite le signal entre dans le montage **multiplieur AD633** où il sera multiplié avec la tension porteuse.



Résultats : visualisation à l'oscilloscope de U_m



En sortie du multiplieur, le signal modulé est envoyé dans le corps au travers de deux plaques de cuivre. Après le passage dans le corps le signal est renvoyé dans la suite du montage (démodulation).

2. Démodulation

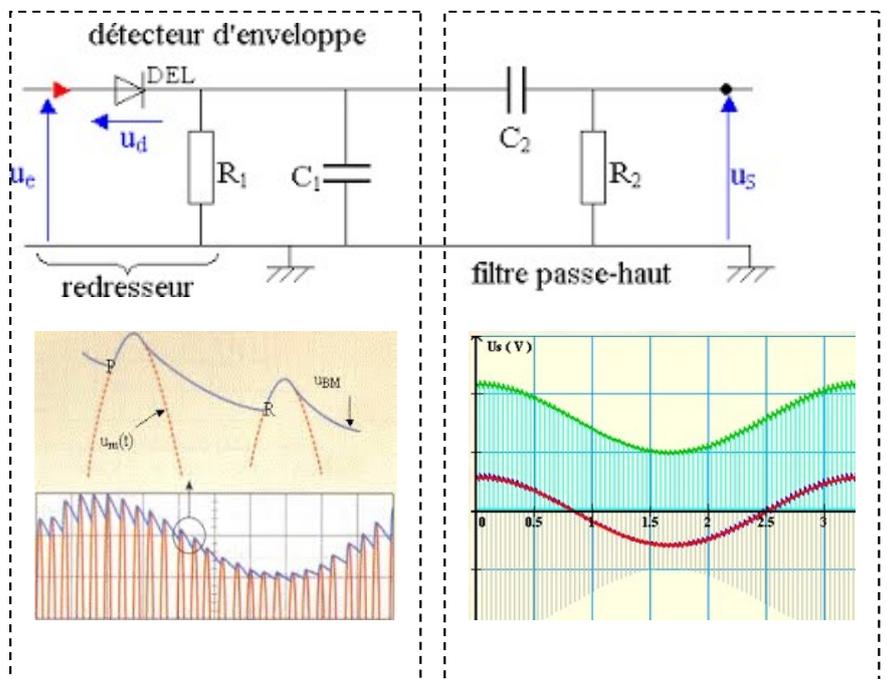
a. Circuit de démodulation d'amplitude et aspects mathématiques

Tout d'abord pour un **signal modulant sinusoïdal** nous avons trouvé qu'on pouvait démoduler en utilisant un montage **détecteur d'enveloppe** suivi d'un **filtre passe-haut**. Ci-contre U_e représente la tension modulée et U_s la tension démodulée.

Lorsque la diode est passante, le condensateur C_1 se charge et quand la diode est bloquée C_1 se décharge dans la résistance R_1 .

Les charges et décharges successives du condensateur C_1 du détecteur d'enveloppe

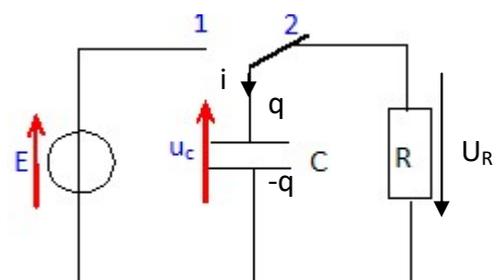
permettent de ne conserver que **l'enveloppe positive** de la tension modulée. Puis le filtre passe-haut **élimine la composante continue** pour centrer le signal sur l'axe des abscisses et ainsi retrouver le signal modulant d'origine.



Aspects mathématiques de la décharge d'un condensateur dans une résistance

Le condensateur se charge lorsque la diode est passante (équivalent à la position 1 de l'interrupteur) et se décharge dans la résistance lorsque la diode se bloque (équivalent à la position 2 de l'interrupteur).

Avec la loi d'additivité des tensions en position 2, on obtient $U_C + U_R = 0$



Avec $U_R = R.i$; $q = C.U_c$; $i = \frac{dq}{dt}$ donc $i = C. \frac{dU_c}{dt}$

Ainsi $U_c + RC. \frac{dU_c}{dt} = 0$
 Soit $U_c(t) + RC.U_c'(t) = 0$

On obtient une **équation différentielle** de la forme : $f(x) + K_1 \times f'(x) = 0$ avec $K_1 = RC$

Résolution de l'équation différentielle :

$$f(x) + K_1 \times f'(x) = 0 \Leftrightarrow f(x) = -K_1 \times f'(x)$$

$$\Leftrightarrow \frac{f'(x)}{f(x)} = -1 / K_1 = K_2$$

$\Leftrightarrow \ln'(f(x)) = K_2$: la dérivée de $\ln(f(x))$ est K_2 donc $\ln(f(x))$ est une primitive de K_2

$$\Leftrightarrow \ln(f(x)) = K_2 \times x + K_3$$

$$\Leftrightarrow f(x) = \exp(K_2 \times x + K_3) = \exp(K_2 \times x) \times \exp(K_3) = K \times \exp(K_2 \times x) \text{ avec } K = \exp(K_3)$$

On obtient une fonction de la forme $f(x) = K \times \exp(-x / K_1)$: exponentielle décroissante

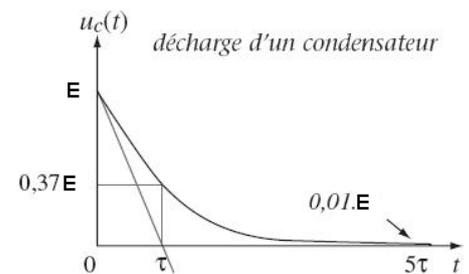
D'un point de vue **physique** on a donc $U_c(t) = K \times \exp(-t / RC) = K \times e^{(-t/RC)}$

Pour trouver K il faut utiliser la condition initiale : le condensateur est chargé à $t = 0$ donc

$$U_c(0) = E \Leftrightarrow U_c(0) = K \times e^{(-0/RC)} = K = E$$

Ainsi $U_c(t) = E \times e^{(-t/RC)} = E \times e^{(-t/\tau)}$ avec $\tau = RC$ appelée **constante de temps** du circuit.

- $U_c(\tau) = E \times e^{(-\tau/\tau)} = E \times e^{-1} \approx 0,37 E$ donc en $t = \tau$ le condensateur est déchargé à **63%**
- $U_c(5\tau) = E \times e^{(-5\tau/\tau)} = E \times e^{-5} \approx 0,01 E$ donc en $t = 5\tau$ le condensateur est déchargé à **99%**



b. Comment choisir les composants ?

Pour choisir correctement les composants du détecteur d'enveloppe la décharge de C_1 caractérisée par sa constante de temps $\tau = R_1 C_1$ ne doit être ni trop rapide ni trop lente comme illustré ci-contre. Le critère est ainsi : $T_s > \tau \gg T_p$ soit $T_s > R_1 C_1 \gg T_p$

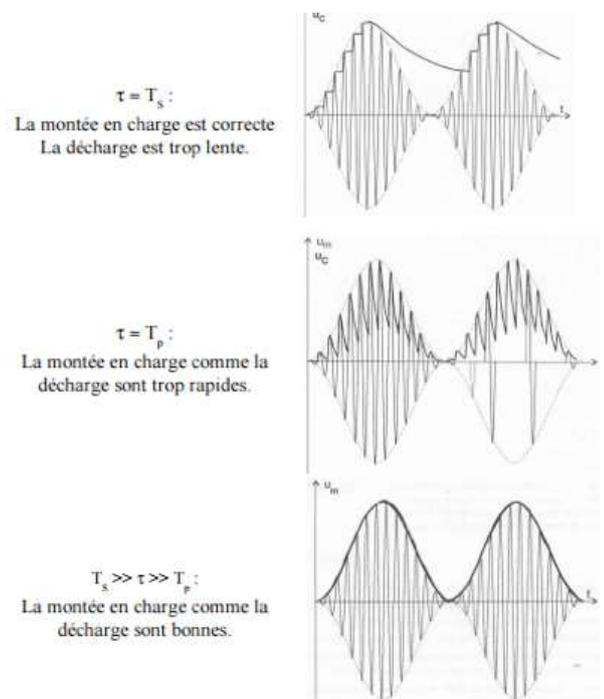
Ou encore en parlant en fréquence : $f_s < 1/R_1 C_1 \ll f_p$

f_s est la fréquence « utile » à 14400 bauds soit 6667 Hz et $f_p = 455$ kHz, donc on a : **6,7 kHz < 1/R₁C₁ << 455 kHz**

On voit ici qu'il y a une énorme marge de manœuvre, d'autant qu'il y a deux valeurs de composants à choisir (R_1 et C_1). Différents tests, calculs et tâtonnements nous ont permis de nous fixer sur **$R_1 = 1$ kΩ** et **$C_1 = 0,1$ μF** soit $1/R_1 C_1 = 1/(1000 \times 0,1 \cdot 10^{-6}) = 10$ kHz.

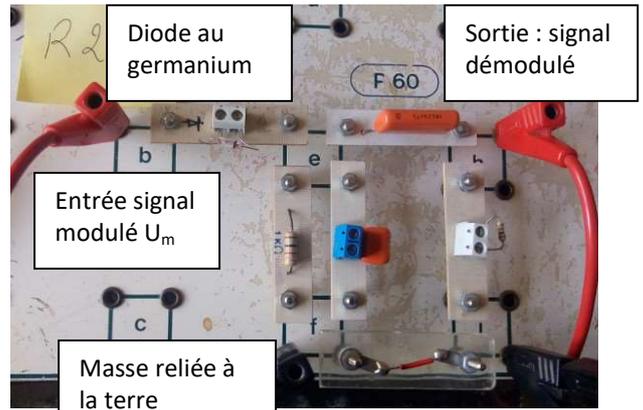
Pour le **filtre passe-haut** nous avons choisi **$R_2 = 1$ MΩ**

et **$C_2 = 1$ μF** ce qui donne une fréquence de coupure à -3 dB $f_c = 1 / (2\pi R_2 C_2) = 1 / (2\pi \times 1 \cdot 10^6 \times 1 \cdot 10^{-6}) = 0,16$ Hz : toutes les fréquences supérieures à cette valeur passeront avec peu d'atténuation alors que la composante continue à 0 Hz sera coupée.



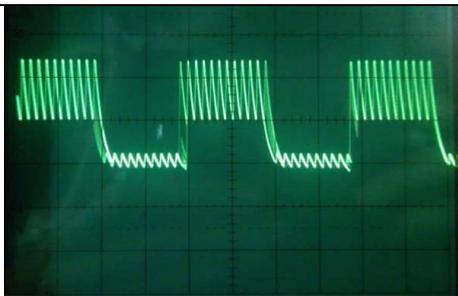
c. Application à la démodulation d'un signal carré et problèmes rencontrés

Dans un premier temps nous ne faisons pas passer le signal modulé dans le corps humain. En entrée, le signal modulé passe par une diode (au début nous avons utilisé une diode classique mais les résultats n'étaient pas bons donc nous avons changé pour une diode au germanium avec un seuil de 0,3 V au lieu de 0,6 V pour la précédente).

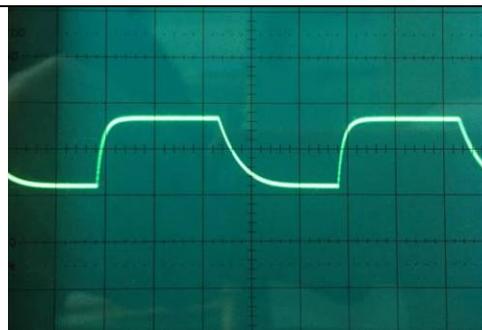


Résultats : visualisation à l'oscilloscope de la tension démodulée

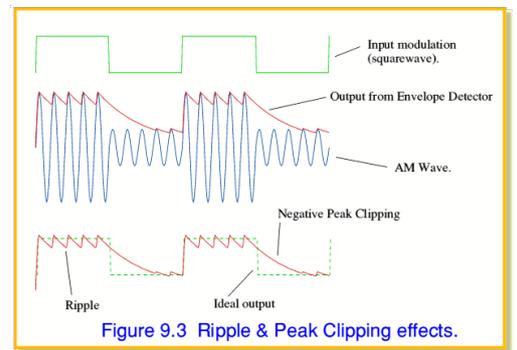
Signal démodulé avec porteuse à 5 kHz (pour voir la démodulation)



Signal démodulé avec porteuse à 455 kHz



Problème : le signal démodulé n'est pas assez carré pour ressembler au signal de départ. La démodulation d'un signal carré est plus compliquée que celle d'un signal sinusoïdal car la tension modulante décroît très brutalement. Il faudrait que le condensateur se décharge plus rapidement pour suivre l'évolution mais dans ce cas les zones de tensions constantes seraient mal démodulées.



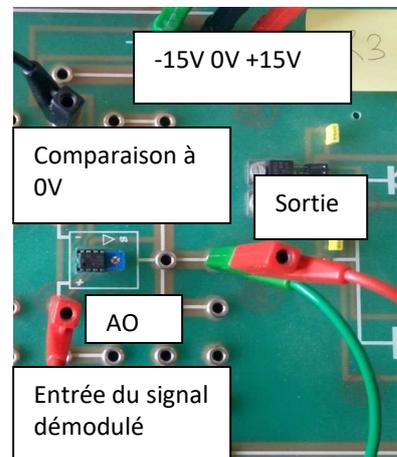
d. Solution mise en place : utilisation d'un montage comparateur



Le comparateur à AO TL081 permet de sortir un signal carré, le principe du montage est le suivant : on choisit une tension de comparaison (bascule) qui est ici la masse soit 0 V et dans l'entrée + de l'amplificateur on fait arriver le signal démodulé.

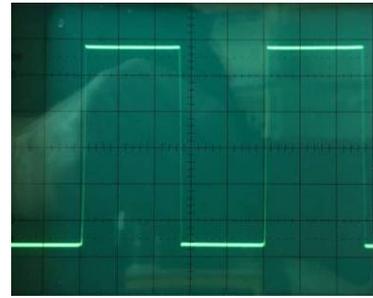


Lorsque la tension d'entrée est inférieure à la tension de bascule 0 V, la sortie renvoie -15 V et quand elle est au dessus de la tension de bascule, la sortie renvoie +15 V, ce qui donne en sortie un signal très propre qui varie entre -15 V et +15 V.



Résultats :

On obtient une tension carrée de **fréquence égale** à la fréquence du signal modulant initial. Calibre 5V/div et 0,5 ms/div donc $T = 5 \times 0,5 = 2,5$ ms soit $F = 400$ Hz mais nous notons une **dissymétrie** : la durée du front bas (-15V) est légèrement plus petite que la durée du front haut (+15V), cela peut être gênant pour reconnaître les bits.

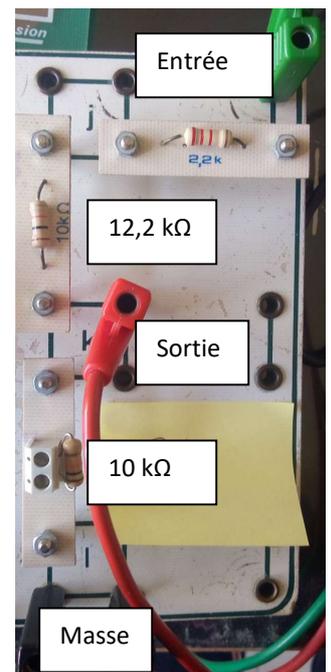
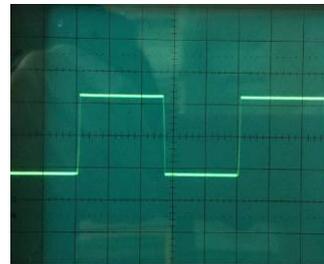


Cependant la tension est **trop élevée**, en effet nous avons mesuré que la tension délivrée par un câble RS232 a environ une **amplitude de 7 V** et non de 15 V, nous allons donc utiliser un **diviseur de tension**.

Le pont diviseur de tension consiste en deux résistances connectées entre elles, l'une est reliée à la masse et l'autre à la tension d'entrée. La sortie se trouve entre les deux résistances et dans notre cas il divise la tension par **2,2** ($R_1 / (R_1 + R_2) = 10 / 22,2 = 1/2,2$).

Résultat :

$15 \text{ V} / 2,2 = 6,8 \text{ V}$
Calibre 5V/div.



3. Montée en fréquence du signal modulé

Pour atteindre le débit maximal de **14400 bauds** il faut parvenir à moduler et démoduler un signal carré de fréquence **6,7 kHz**. Pour tester le comportement de notre chaîne nous avons progressivement augmenté la fréquence du GBF 1 tout en gardant la porteuse à 455 kHz.

Résultats : Ce n'est que vers **10 kHz** que nous avons constaté des distorsions notables comme le montrent les captures ci-contre. Le signal final n'est plus vraiment carré et la dissymétrie entre la durée du front haut et du front bas s'est accentuée.



Bilan :

- A 10 kHz la lecture des bits ne serait sûrement pas satisfaisante mais on peut espérer qu'elle le soit à 6,7 KHz.
- Il faudra peut être quand même revoir la valeur des composants R_1 et C_1 pour que le condensateur se décharge plus vite.

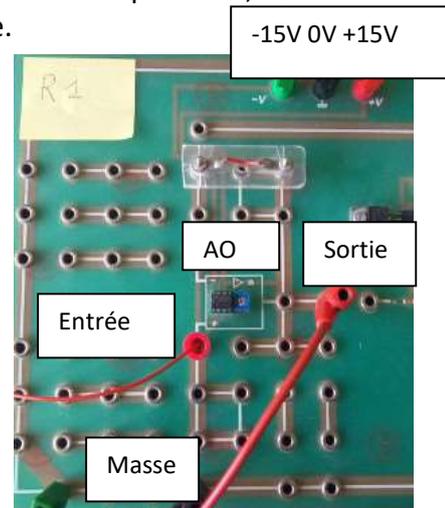
4. Chutes de tensions observées et solutions trouvées



Après avoir réussi la démodulation du signal carré délivré par un GBF nous avons voulu tester avec les caractères '0' et '1' envoyés par **Python** via le **port série RS232**. Des problèmes inattendus sont alors survenus :

- Le fait de brancher **l'ordinateur émetteur** à **l'entrée du circuit additionneur** via le port série (pour remplacer le GBF 1) fait chuter la tension délivrée par le port série, le signal qu'émet l'ordinateur n'a plus l'amplitude de 7 V que nous avons mesurée par l'interface d'acquisition. Bizarrement ce problème survient avec un ordinateur portable mais nous ne le constatons pas avec un ordinateur de bureau, le port série semble donc se comporter de façon différente suivant l'ordinateur utilisé.
- De la même façon le fait de brancher la **sortie du pont diviseur** de tension à **l'ordinateur récepteur** via le port série cause une chute de tension importante, le signal que reçoit l'ordinateur n'a plus l'amplitude de 7 V désirée.
- De même le « **branchement** » du **corps humain** entre les deux plaques de cuivre (avec ou sans les feuilles de papier isolantes) provoque une chute de la tension à l'entrée du circuit de démodulation (au niveau de la diode au germanium) rendant ainsi la démodulation impossible.

Pour résoudre ces problèmes il nous a été conseillé d'utiliser des **montages suiveurs** à base d'AO TL081. Dans ce montage l'entrée est reliée à l'entrée + de l'AO et l'entrée - est reliée à la sortie. Ainsi on a $U_s = U_e$: la tension n'est pas modifiée mais l'impédance d'entrée très importante de l'AO fait que les chutes de tensions disparaissent.



5. Bande passante des composants électroniques utilisés

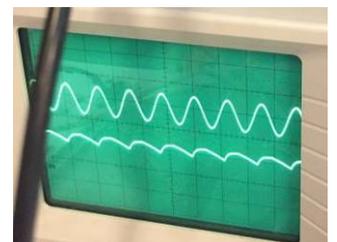
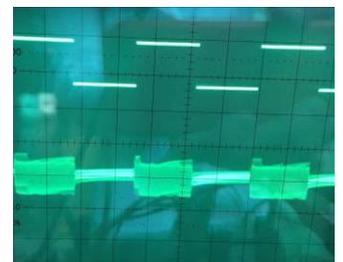


Au cours de nos expériences nous avons été sensibilisés à la notion de **bande passante** d'un composant électronique, autrement dit à la gamme de fréquence dans laquelle il peut travailler. En effet au départ le préparateur de physique nous avait donné des **AO LM741** au lieu des **TL081** sans faire attention. Les signaux que nous obtenions étaient **distordus** et nous ne comprenions pas pourquoi jusqu'à ce que nous nous rendions compte que ce n'était pas les bons composants.

Le TL081 a un produit gain-bande de **2,5 MHz** donc par exemple avec un gain de 1 on peut utiliser des fréquences allant jusqu'à 2,5 MHz sans perte notable (-3 dB), ce qui convient bien puisque la porteuse utilisée a une fréquence de **455 kHz**. Par contre le **LM741** a une bande passante de **0,4 MHz** soit 400 kHz ce qui est en dessous de la porteuse utilisée et c'est ce qui causait des distorsions. Nous avons perdu beaucoup de temps à cause de cela.

De même le multiplieur **AD633** a une bande passante de **1 MHz**, ce qui convient parfaitement à nos expériences actuelles, cependant si par la suite nous avons besoin d'augmenter la fréquence de la porteuse au dessus de 1 MHz nous serons obligés de changer de composants.

Ci-contre des **exemples de distorsions** causées par le LM741 en modulation et en démodulation.

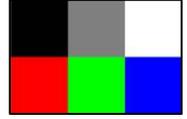




IV. Codage et transmission d'une image numérique

1. Codage RVB et durée de transmission

Le codage **RVB** est un des codages les plus simples pour coder les images, il consiste à décrire chaque pixel de l'image par les valeurs de ses trois **intensités lumineuses** Rouge Verte et Bleue avec une valeur entre **0 et 255**, par exemple un pixel totalement vert s'écrira 0 255 0, l'intensité verte étant au maximum.



Pour envoyer les images nous avons besoin de récupérer les informations qui composent l'image. Nous avons trouvé la **bibliothèque Python imageio** qui permet de récupérer les informations d'une image. Ne sachant pas comment elle fonctionnait nous avons fait des tests avec des images simples que nous avons créées avec **Gimp**. Voici l'image utilisée, c'est une image de 2 pixels de hauteur et de 3 pixels de largeur. Imageio nous donne la liste suivante :

```
[[[ 0 0 0]
 [127 127 127]
 [255 255 255]]
 [[254 0 0]
 [ 0 255 1]
 [ 0 0 254]]]
```

On constate qu'imageio donne une liste composée de 2 listes : donc une liste par ligne de l'image et dans ces listes : une liste par pixel de la ligne. Ces listes contiennent les valeurs RVB du pixel. Voici quelques exemples de valeurs RVB (en décimal et en binaire sur 8 bits) et les couleurs qui correspondent :

Couleur	R	V	B
Blanc	255 11111111	255 11111111	255 11111111
Gris clair	200 11001000	200 11001000	200 11001000
Gris foncé	90 01011010	90 01011010	90 01011010
Noir	0 00000000	0 00000000	0 00000000
Rouge	255 11111111	0 00000000	0 00000000
Vert	0 00000000	255 11111111	0 00000000
Bleu	0 00000000	0 00000000	255 11111111
Jaune	255 11111111	255 11111111	0 00000000
Cyan	0 00000000	255 11111111	255 11111111
Magenta	255 11111111	0 00000000	255 11111111

Ainsi transmettre une image consiste à **transmettre chaque nombre** correspondant à la luminosité de chaque composante RVB de chaque pixel constituant l'image. Nous avons décidé de transmettre chaque nombre en **binaire** car les informations stockées dans les appareils numériques le sont en 0 et 1, et nous avons voulu travailler identiquement. Donc par exemple pour transmettre '90' il faudra transmettre l'octet '01011010' grâce aux transmissions successives des deux symboles '0' et '1'.

On peut ainsi établir un lien entre la **taille** de l'image et la **durée** théorique nécessaire pour la transmission en fonction du débit utilisé.

En effet les '0' ou '1' sont transmis en une durée égale à la période T et chaque pixel nécessite de

transmettre $8 \times 3 = 24$ caractères '0' ou '1', ce qui fait une durée de $24 \times T$. Pour une image de n pixels la durée est donc $24 \times T \times n$.

Baud	T (ms)	Durée 100x100 pixels		Durée 50x50 pixels		Durée 20x20 pixels	
		s	mn	s	mn	s	mn
300	34	8160	136	2040	34	326,4	5,4
600	17	4080	68	1020	17	163,2	2,7
1200	8,3	1992	33	498	8,3	79,7	1,3
2400	4,3	1032	17	258	4,3	41,3	0,7
4800	2,1	504	8,4	126	2,1	20,2	0,3
9600	1,1	264	4,4	66	1,1	10,6	0,18
14400	1,0	240	4	60	1	9,6	0,16
19200	1,0	240	4	60	1	9,6	0,16
28800	1,0	240	4	60	1	9,6	0,16
38400	1,0	240	4	60	1	9,6	0,16

Résultats :

Les **durées** sont récapitulées dans le tableau ci-dessus pour 3 tailles d'images, par exemple il faut 4 mn pour une 100x100 pixels. Nous constatons qu'elles sont **très importantes** et nous devons donc nous contenter d'images de **petites tailles**. Le port série n'est pas assez rapide pour les hautes résolutions actuelles.

2. Programme Python d'émission de l'image

Voici les actions et des extraits du programme de lecture et d'envoi de l'image :

- Extraire la **liste de nombres** qui définit une image en saisissant son nom de fichier :

```
34 #CHOIX DE L'IMAGE
35 nom = input("Quel est le nom de votre image ?\n")+ ".jpg"
36 ima = imageio.imread(nom)
```

- Extraire la **largeur** et la **hauteur** de l'image (**len** permet d'obtenir le nombre d'éléments d'une liste) :

```
40 largeur, hauteur, largeur_pygame, hauteur_pygame = len(ima[0]), len(ima), 600, 600
```

- Récupérer **une des valeurs RVB**, pixel par pixel et ligne par ligne (les variables boucle_hauteur/largeur permettent d'obtenir la liste de valeurs RVB de coordonnées dans l'image (boucle_largeur, boucle_hauteur), R0_V1_B2 récupère la valeur R, V ou B si l'argument de la fonction est respectivement 0, 1 ou 2) :

```
def rvb(R0_V1_B2):
    valeur_rvb = str(ima[boucle_hauteur][boucle_largeur][R0_V1_B2])
    print("valeur rvb =", valeur_rvb)
    while len(valeur_rvb)<3:
        valeur_rvb = "0"+str(valeur_rvb)
    return int(valeur_rvb)
```

- **Convertir en binaire** :

```
def decimal_vers_binaire(variable):
    variable = (bin(int(variable)))[2:]
    print(variable)
    while len(variable)<8:
        variable = '0'+variable
    print("en binaire=", variable)
    return variable
```

- **Envoyer** l'octet sous forme d'une chaîne de 8 caractères.

Par **exemple**, prenons une image dont le premier pixel a pour valeur RVB [11 , 45 , 132] , le programme va d'abord prendre le 11, le **convertir en binaire** : 1011, **ajouter des '0'** devant pour qu'il y ait **8 caractères** : '00001011', et **l'envoyer** ; puis prendre le 45, le convertir en binaire : 101101, rajouter des '0' devant pour qu'il y ait 8 caractères : '00101101', puis l'envoyer ; puis prendre le 132, le convertir en binaire : '10000100', rajouter des 0 devant pour qu'il y ait 8 caractères : ici ça ne change rien : '10000100', puis l'envoyer. Puis il va répéter ce processus pour le pixel suivant, et tous les autres.

- Programme python complet de l'émission :
<http://spc.re/emissionCG18>



3. Programme Python de réception de l'image

Voici les actions et des extraits du programme de réception et d'affichage de l'image :

- Recevoir **chaque caractère** l'un après l'autre et les grouper par 8 pour former l'octet d'origine sous forme d'une chaîne de 8 caractères.
- **Décoder l'ASCII** pour obtenir un nombre en binaire.
- **Décoder le binaire** pour retrouver les valeurs décimales de chaque composante RVB :

```
25 def binaire_vers_decimal(variable):
26     for boucle in range(7):
27         print('variable debut =', variable)
28         if str(variable)[0] == '0':
29             variable = variable[1:]
30             print('variable apres', variable)
31
32     print(int(str(variable), 2))
33     return int(str(variable), 2)
```

- **Affichage de chaque pixel** : nous utilisons la **bibliothèque pygame**, qui a pour but d'afficher des pixels dont on connaît les valeurs RVB à un endroit précis de l'écran. Avant tout, on définit la fenêtre d'affichage en 600x600. On va ensuite afficher un pixel en gros (sinon on ne le verrait pas) : on définit la taille d'un pixel comme étant la division euclidienne de 600 par le nombre de pixels dans la dimension la plus grande de l'image. Une fois un pixel affiché, on augmente l'abscisse d'affichage de une taille de pixel, et on affiche le suivant. Quand la ligne est complétée, on augmente de 1 l'ordonnée et on recommence à une taille de pixel en abscisse. Ce processus est effectué par une boucle imbriquée :

```
for boucle_hauteur in range(hauteur):
    for boucle_largeur in range(largeur):
        rouge = recoit_chaine_caractere()
        vert = recoit_chaine_caractere()
        bleu = recoit_chaine_caractere()
        screen.fill((rouge,vert,bleu), (boucle_largeur*taille_pixel,boucle_hauteur*taille_pixel,taille_pixel,taille_pixel))
        pygame.display.update()
```

On procède donc à l'affichage successif des pixels au fur et à mesure de la réception de leurs valeurs. Ce procédé permet un affichage dynamique des pixels, **l'image se construit** petit à petit, pixel par pixel sous nos yeux ébahis 😊

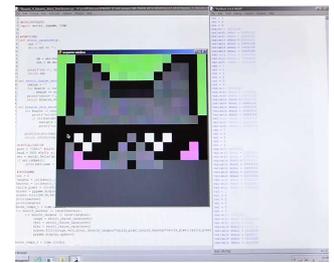
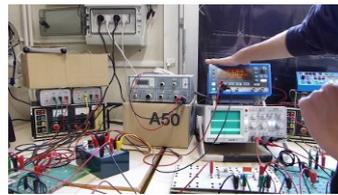
- Mesure de la **durée de transmission** et du **débit binaire** : nous avons utilisé la **bibliothèque time** pour mesurer le temps de réception d'une image et les temps de réception pour chaque pixel. Nous avons aussi mesuré le nombre de bits par seconde reçus en multipliant le nombre de pixels par 24 (3 composantes de 8 bits) et en divisant par le temps de réception de l'image.

- Programme python complet de la réception :
<http://spc.re/receptionCG18>



4. Nos résultats expérimentaux et les problèmes rencontrés

Pour nos tests nous avons choisi de transmettre une image 20x20 (un chat).



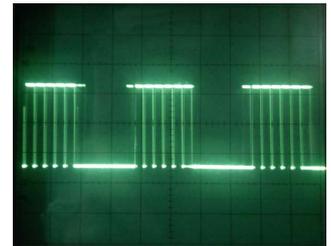
Résultats :

Nous pouvons affirmer que notre expérience est un succès ! Le chat a été transmis en passant par les bras d'Hugo avec la présence d'un isolant (une feuille de papier sur chaque plaque).

Bilan et pistes d'amélioration :

Le succès est au rendez-vous et nous en sommes très heureux, néanmoins nous avons rencontré différents problèmes :

- Nous avons été obligés d'utiliser une **vitesse de transfert faible** : à 300, 600 et 1200 bauds cela fonctionne mais à partir de 2400 parfois cela fonctionne mais pas toujours, et à partir de 4800 bauds ça ne marche pas du tout, le programme de réception ne reconnaît pas les signaux. Il faut peut-être revoir la valeur des composants R_1 et C_1 comme déjà évoqué.
- La présence de **plusieurs feuilles isolantes** sur les plaques de cuivre entraîne une **instabilité** au niveau du circuit de réception. En effet nous avons constaté qu'une petite fluctuation de la tension à l'entrée du circuit de démodulation pouvait entraîner **une grande instabilité au niveau du comparateur**, ce dernier passant de +15 V à -15 V de façon incontrôlée comme illustré ci-contre. Le programme de réception croit alors recevoir des signaux mais ne les reconnaît pas, ce qui entraîne un bug qui fait planter le programme Python. La solution évoquée par Orange consisterait à changer le comparateur par un **trigger de Schmitt** avec un seuil de déclenchement différent de zéro.



Nous pensons faire des recherches sur le trigger et tester différentes améliorations dans les semaines à venir pour améliorer la stabilité, la vitesse de transmission, et l'interface des programmes d'émission et de réception.

CONCLUSION

Le projet CGénial fut une expérience très enrichissante pour chacun d'entre nous puisque c'est l'alliance des compétences de tous les participants qui a permis de trouver une réponse globale à la problématique. Les programmeurs ont pu apprendre à coder tout en perfectionnant leur capacité à résoudre des problèmes. Les expérimentateurs ont pu améliorer leur rigueur scientifique tout en développant leur travail en équipe. Les théoriciens ont appris de nouvelles notions très utiles pour un cursus scientifique. Les plus littéraires ont développé leur esprit critique en étudiant les données recueillies lors du sondage. Enfin ce défi a apporté la satisfaction d'avoir abouti un projet qui semblait hors de notre portée à l'origine.

SOURCES

Sitographie

<http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/modem/modulation/modulation.htm>

<http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/modem/demodulation/demodulation.htm>

http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/modem/theorie_modem.pdf

<https://www.edumedia-sciences.com/fr/media/311-modulation-damplitude>

<http://slideplayer.fr/slide/494790/>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Communication_en_champ_proche

<http://www.centrenational-rfid.com/introduction-au-nfc-article-132-fr-ruid-17.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Specific_absorption_rate

<http://www.elektronique.fr/>

<http://radio.pagesperso-orange.fr/RS232.htm>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/RS-232>

<https://fr.rs-online.com/web/>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_d%27amplitude

https://fr.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9quence_de_coupure

<http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23I/RM23i06.html>

https://fr.wikiversity.org/wiki/Diagramme_de_Bode/Fonction_de_transfert

http://www4.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmf-epinal/Cours_TD_SII/Elec/cours_bode.pdf

<https://www.circuitlab.com/>

<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/D37754FFA24F7C3F86256706005B9BE7>

<https://tungweilin.wordpress.com/2015/01/04/python-serial-port-communication/>

<https://www.pygame.org/docs/>

https://www.youtube.com/watch?v=Y_P6Cgk1ts0&index=6&list=PLipRkYLZQ6AwaLne91cwCnuBKN5VaiDB

<https://imageio.readthedocs.io/en/latest/>

<https://docs.python.org/2/library/time.html>

<http://www.france-ioi.org/>

<https://www.youtube.com/watch?v=nr0JkXuBVmU>

<https://www.youtube.com/watch?v=kQyblDmpJaY>

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quation_diff%C3%A9rentielle_lin%C3%A9aire_d%27ordre_un

Livre : Hatier Microméga TS spé 2002