



# Projet Prototypage Rapport de Conception

Conception et fabrication d'un circuit conditionneur capacitif

Nina PERRET & Laure RIVIER

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Circuit conditionneur</b>	<b>2</b>
2.1	Fonctionnement . . . . .	2
2.2	Schematic . . . . .	2
2.3	Routage . . . . .	3
2.4	Soudure et Tests . . . . .	4
2.5	Simulation Partquest . . . . .	4
2.6	Simulation Comsol . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Caractérisation du capteur capacitif</b>	<b>6</b>
3.1	Lien entre capacité du circuit et période du signal . . . . .	6
3.2	La capacité parasite $C_p$ du circuit . . . . .	6
3.3	Capacité en fonction de la distance . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Codage de la récupération de la fréquence</b>	<b>8</b>
4.1	Configuration de l'environnement STM32 . . . . .	8
4.2	Implémentation de la lecture de la fréquence . . . . .	9
4.3	Implémentation du Calcul de la capacité en fonction de la fréquence . . . . .	9
4.4	Export des données vers un terminal série . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Fonctionnement du servomoteur</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Impression 3D de la structure</b>	<b>10</b>
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>12</b>
7.1	Résultat final . . . . .	12
7.2	Limites et difficultés rencontrées . . . . .	12
7.3	Application concrète . . . . .	13
<b>8</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>13</b>

# 1 Introduction



FIGURE 1 – Forest

Actuellement, l'être humain passe en moyenne 4 h 37 par jour sur son téléphone [1]. Le problème, c'est que ce temps est largement accaparé par les applications les plus chronophages, comme TikTok, Instagram ou YouTube. Ces dernières nuisent fortement à la concentration.

Forest est l'application n°1 catégorie "productivité" dans 136 pays. Forest, c'est 25 000 000 utilisateurs réguliers. Elle encourage à rester éloigné de son téléphone en "plantant" un arbre virtuel qui pousse tant qu'on reste concentré. Si on quitte l'application pour ouvrir un jeu vidéo, regarder une vidéo ou scroller sur les réseaux sociaux, l'arbre meurt. En visualisant le temps passé à se concentrer sous forme d'une forêt, les utilisateurs développent une routine plus efficace et gagnent un vrai sentiment d'accomplissement [2]. C'est donc un outil à la fois ludique, et motivant pour mieux se concentrer, dans un monde où les distractions sont omniprésentes.

Le but de Forest, ce n'est pas d'interdire l'accès au téléphone, mais plutôt de dissuader l'utilisateur de se laisser déconcentrer. L'application repose sur des principes de psychologie comportementale, en favorisant la responsabilisation de l'utilisateur plutôt que l'interdiction. La popularité de l'application prouve que les utilisateurs trouvent que l'application est efficace.

Notre projet : FOREST VERSION 3D.

Il s'agit d'une boîte à portée dissuasive. L'utilisateur y range son téléphone pour se concentrer sans distractions pendant une certaine durée. S'il cherche à prendre son téléphone avant la fin de la session de travail, un personnage lève son bras pour signaler à l'utilisateur qu'il s'apprête à interrompre sa période de concentration. Notre projet utilise l'effet capacitif. En effet, le bras du personnage se lève plus ou moins haut en fonction de la proximité de la main de l'utilisateur de la boîte.

Le projet se divise en 4 parties :

- Circuit conditionneur et plaque de cuivre
- Caractérisation du capteur capacitif
- Servomoteur
- Boîte imprimée en 3D

## 2 Circuit conditionneur

### 2.1 Fonctionnement

Le circuit conditionneur a pour objectif de convertir une capacité variable en un signal carré, dont la fréquence (ou période) dépend directement de la valeur de cette capacité.

### 2.2 Schematic

On a choisi un AOP rail-to-rail. On utilise donc une alimentation non symétrique(0-5V). Ainsi, il faut une tension de référence fixée à 2,5V, afin d'avoir un signal centré autour de 2,5V, et non pas autour de 0V.

Plus la capacité est grande, plus la fréquence en sortie sera faible. Il faut charger la capacité avec un courant constant (c'est le but de ce montage). Sinon on observe la charge de la capacité, on aura alors une charge constante. Il faudra aussi décharger le condensateur. Le triangle en sortie de l'AOP est caractéristique de la charge ou la décharge de la capacité. Si la capacité augmente, alors la période du signal augmente également.

On utilise un comparateur à hysteresis (trigger de Schmitt) dans notre montage. On fixe le seuil à tension haute et à tension basse avec les résistances. En basculant, le trigger de Schmitt pilote la décharge de la capacité. Une fois qu'on atteint le seuil bas, on repasse sur un état de charge de la capacité. Le trigger de Schmitt est alors un pilote du générateur de courant. C'est de ce signal dont on se sert pour signal de sortie (le carré) car c'est plus simple d'étudier un signal carré sur un microcontrôleur.

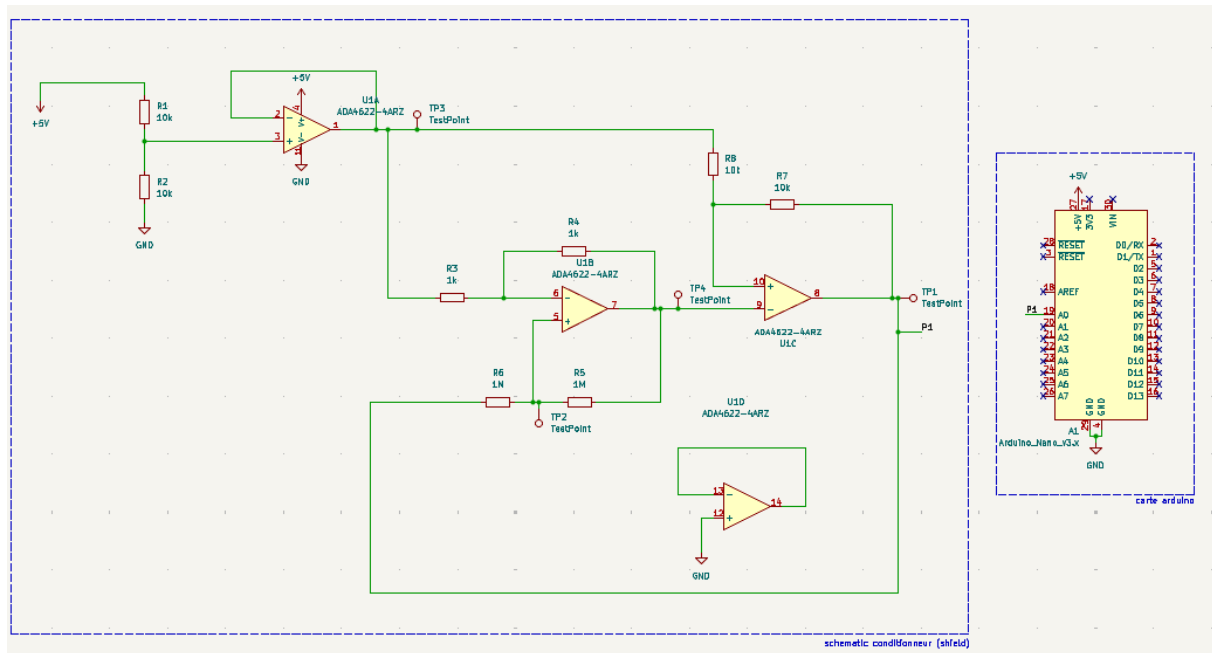


FIGURE 2 – Schematic réalisé sur Kicad

## 2.3 Routage

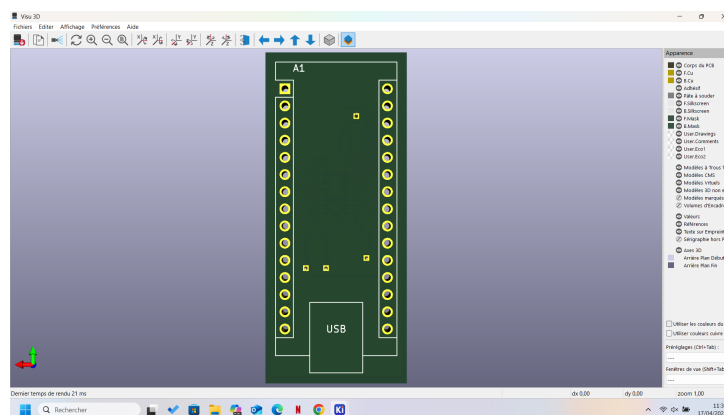


FIGURE 3 – Vue de dessus du PCB réalisé avec Kicad

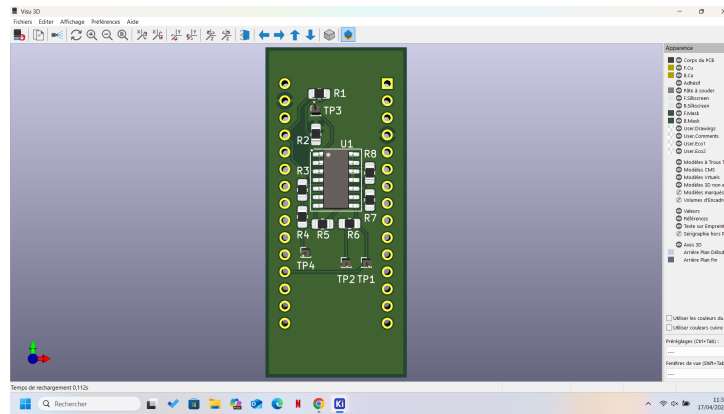


FIGURE 4 – Vue de dessous du PCB réalisé avec Kicad

## 2.4 Soudure et Tests

Nous avons soudé les composants sur le circuit conditionneur.

Passons maintenant à la phase de tests. Avec un multimètre, on procède aux tests suivants :

- contrôle des alimentations de l'amplificateur opérationnel

Le multimètre est placé en mode Diode, car tous les circuits en silicium ont une diode de protection en reverse. Pour voir si l'amplificateur opérationnel est bien connecté, on place le + sur la masse (pin 11 et 12) et le - sur la pin à tester. On doit obtenir une valeur d'environ 0,8 V, sinon, il y a un court-circuit. C'est bel et bien autour de 0,8V qu'on observe les valeurs des tensions, donc les pins de l'amplificateur opérationnel sont bien connectées.

- contrôle de la référence de demi alimentation

Avec le logiciel WaveForms utilisé en mode Scope et l'Analog Discovery 2, on vérifie que la valeur de la tension au testpoint P3 est de 2,5V, soit bien la moitié de la tension d'alimentation.

## 2.5 Simulation Partquest

Nous avons effectué une simulation sur le logiciel Partquest.

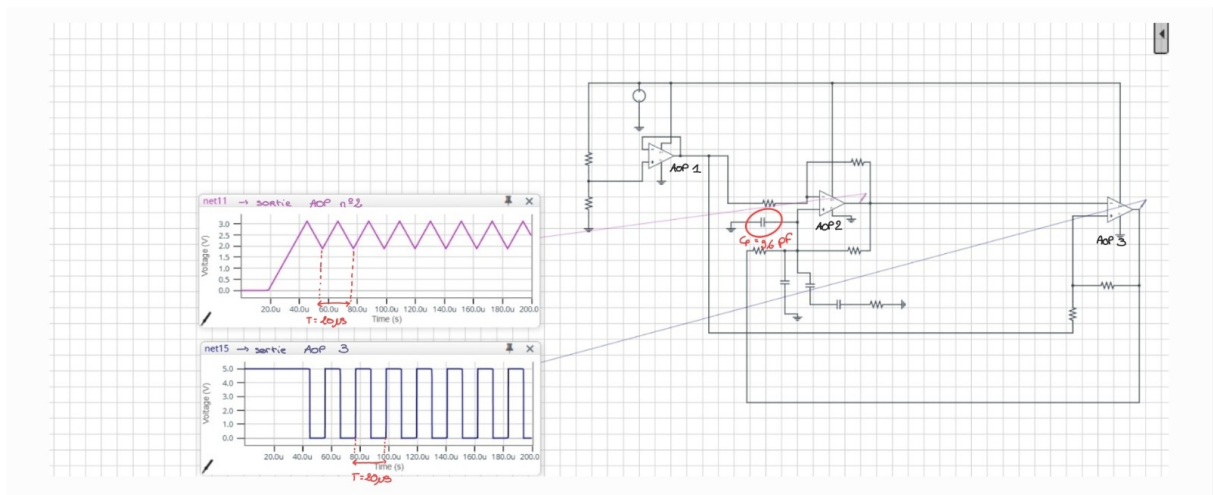


FIGURE 5 – Résultat de la simulation Partquest

Sur la simulation Partquest, on affiche deux signaux pertinents :

- Un signal triangulaire en sortie de l'AOP 2 (intégrateur)
- Un signal carré en sortie de l'AOP 3 (comparateur)

Leur période est de  $20\mu s$ , ce qui correspond à une fréquence de  $50kHz$ .

### Explication théorique :

Par le calcul, la fréquence du signal carré est donnée par la formule suivante :

$$f = \frac{2}{2\pi R(C_a + C_p)} \quad (2.4)$$

Le facteur 2 provient du fait que la période complète du signal triangulaire correspond à deux phases de charge et décharge du condensateur. La formule sans le facteur 2 au numérateur donne le temps nécessaire pour atteindre une extrémité (la montée ou la descente). Il faut donc multiplier par 2 pour obtenir la période totale du signal.

Le signal carré en sortie de l'AOP 3 (signal 3) et le signal triangle en sortie de l'AOP 2 (signal 2) sont synchrones (même fréquence). D'où la formule (2.4) pour la fréquence du signal carré.

Application numérique :

$$f = \frac{2}{2\pi \times 1.10^3 \times (6.5.10^{-9} + 9.6.10^{-12})} = 49kHz \quad (2.4)$$

Ainsi, la simulation Partquest est cohérente avec la théorie.

### En pratique :

Sur le montage réel, on mesure à l'oscilloscope une période de  $21\mu s$  pour le signal carré de sortie réel, soit une fréquence de  $48kHz$ .

Cette vérification expérimentale est cohérente avec le calcul théorique avec le résultat de la simulation Partquest.

## 2.6 Simulation Comsol

Nous avons utilisé le logiciel Comsol pour simuler l'allure de la courbe représentative de la capacité en fonction de la distance entre l'électrode et la main.

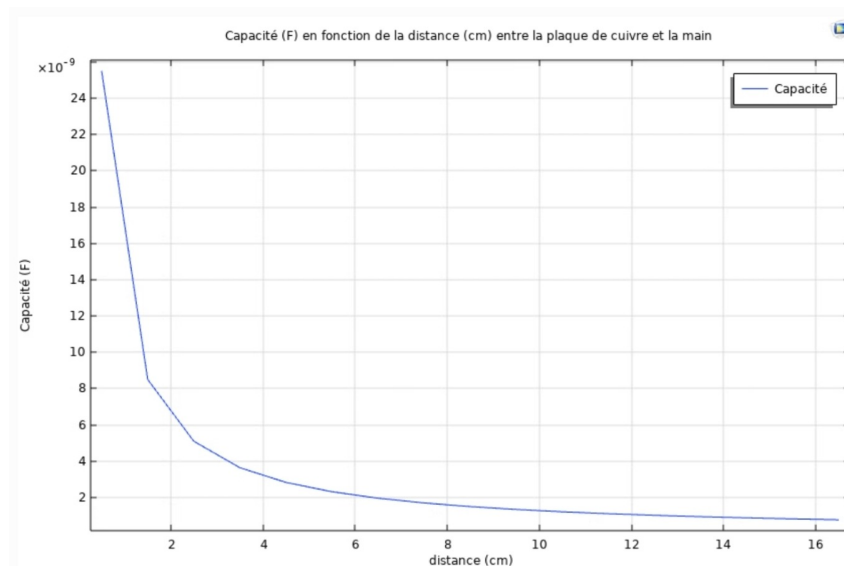


FIGURE 6

La Figure 6 montre la courbe obtenue. On y observe une décroissance rapide de la capacité lorsque la main s'éloigne de la plaque, notamment dans les premiers centimètres. Cette relation est cohérente avec le comportement théorique d'un condensateur plan dont l'une des "électrodes" (ici la main) s'éloigne de l'autre.

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \text{ avec :}$$

- C : Capacité en F
- $\epsilon$  : Constante diélectrique absolue en F / m
- S : Surface de l'électrode en m<sup>2</sup>
- d : Distance entre les armatures (ici main et plaque de cuivre) en m

On remarque également que la capacité tend vers une valeur très faible pour des distances supérieures à 10 cm, ce qui confirme la sensibilité du capteur principalement à courte portée.

Pour paramétrer la simulation, nous avons choisi une tension aux bornes de l'électrode comme la moyenne des signaux en sortie des AOP sur la simulation Partquest, soit 2,5 V.

### 3 Caractérisation du capteur capacitif

On appelle capteur capacitif l'ensemble circuit conditionneur + carte nucleo + électrode de cuivre.

#### 3.1 Lien entre capacité du circuit et période du signal

Nous mesurons maintenant la fréquence d'oscillation avec WaveForms en mode Spectrum. Sans électrode (uniquement avec la capacité parasite), la fréquence d'oscillation est de 104kHz. Avec électrode, la fréquence passe à 75 kHz, ce qui semble cohérent car on rajoute une capacité à celle du circuit, donc la fréquence diminue. 29kHz de différence, à relier à la capacité apportée par l'électrode dans la suite.

En touchant directement la plaque, nous changeons encore la fréquence observée sur WaveForms (elle passe à 8,8 kHz au lieu de 84 kHz) : cela confirme le fait que le capteur est sensible à la variation de distance.

Pour relier la valeur de la fréquence à celle de la capacité du capteur, nous branchons une capacité de 100 pF, à laquelle nous montons successivement en série une puis deux autres capacités de 100 pF. Le tableau suivant recense les fréquences trouvées :

Capacité équivalente (pF)	Fréquence (Hz)	Période (ms)
100	9,0	111
200	4,8	208
300	3,3	301

Nous pouvons donc considérer que la capacité en pF est proportionnelle à la période du signal en  $\mu$ s. Nous utiliserons cette approximation par la suite.

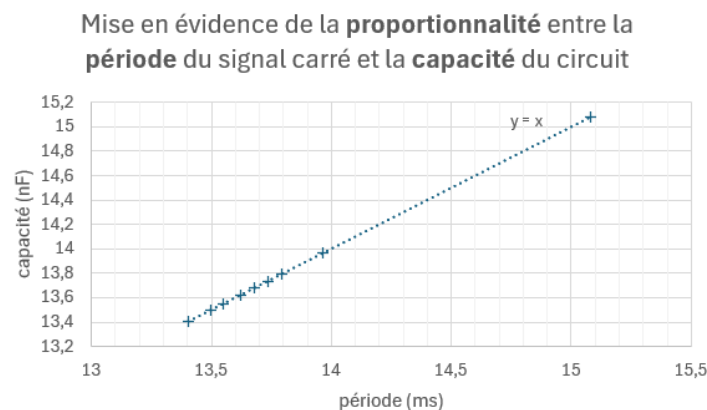


FIGURE 7

#### 3.2 La capacité parasite $C_p$ du circuit

Maintenant que nous pouvons relier capacité et fréquence, déterminons la capacité parasite intrinsèque au circuit. En débranchant l'électrode, P2 a effectivement une capacité avec le reste du circuit. Elle

est faible, puisque lorsqu'on mesure la période associée au circuit, on trouve  $T = 9,6 \mu\text{s}$ , donc la capacité parasite  $C_p$  est de  $9,6 \text{ pF}$ . On négligera cette capacité parasite  $C_p$  dans la suite.

Nous pouvons nous poser la question de quelle serait une bonne capacité pour notre circuit. Il faut dans tous les cas qu'elle soit 10 fois supérieure à  $C_p$ , donc au minimum d'une centaine de pF.

### 3.3 Capacité en fonction de la distance

Le but de cette sous-partie est de tracer la caractéristique de la capacité du circuit en fonction de la distance.

Pour ce faire, nous allons brancher une électrode (plaque de cuivre) de capacité  $C$  sur le testpoint P2 du circuit.

Ensuite, il faut placer cette plaque à l'origine d'un mètre. En plaçant une main à une certaine distance de la plaque, la fréquence du signal carré (testpoint P1) est modifiée. Ainsi, on effectue une série de mesures de la fréquence du signal carré en fonction de la distance main/plaque (cf schéma ci-dessous).

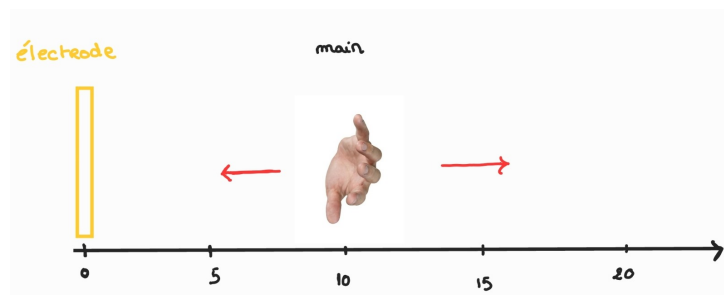


FIGURE 8

Ce protocole expérimental permet de tracer le graphe suivant (Figure 9), reliant distance main/électrode et période du signal carré.

Distance (cm)	Fréquence (Hz)	Période (ms)
20	74.6	13,40
15	74.1	13,49
12	73.8	13,55
10	73.4	13,62
8	73.1	13,67
7	72.8	13,74
6	72.5	13,79
5	71.6	13,97
2	66.3	15,08

TABLE 1 – Tableau de distance et fréquence

Or, d'après la partie 6.1, la période du signal carré est proportionnelle à la capacité.

On en déduit la relation entre la distance à laquelle on place la main de l'électrode et la capacité du circuit (cf graphe ci-contre).



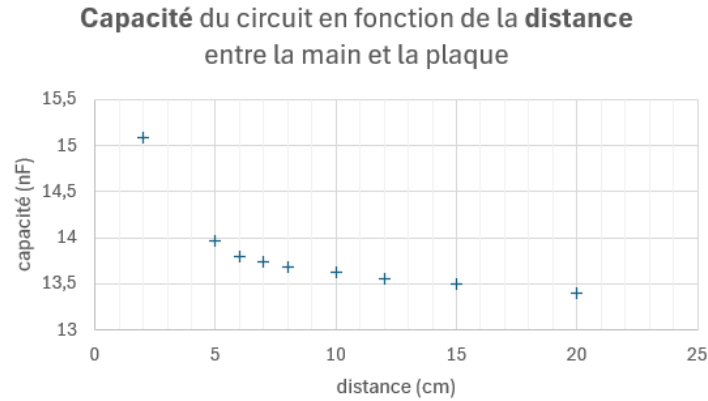


FIGURE 9

Ainsi, on a déterminé la relation distance/capacité.

Remarque :

Contrairement à la simulation effectuée sur Comsol, la valeur de capacité en fonction de la distance entre la main et la plaque ne tend pas vers 0, mais vers  $6,5 \cdot 10^{-9}$  nF. Cette différence est due à la présence de la capacité parasite dans le montage réel.

## 4 Codage de la récupération de la fréquence

On utilise un microcontrôleur STM32F301K8T6 dans la suite du projet.

### 4.1 Configuration de l'environnement STM32

On active et on configure un Timer sur le Pin de lecture du signal à acquérir, le Pin A0. Ensuite, dans le fichier .ioc, dans l'onglet « Clock Configuration », on définit l'horloge interne sur HSI et PLLCLK et la valeur de HCLK à 32 MHz.

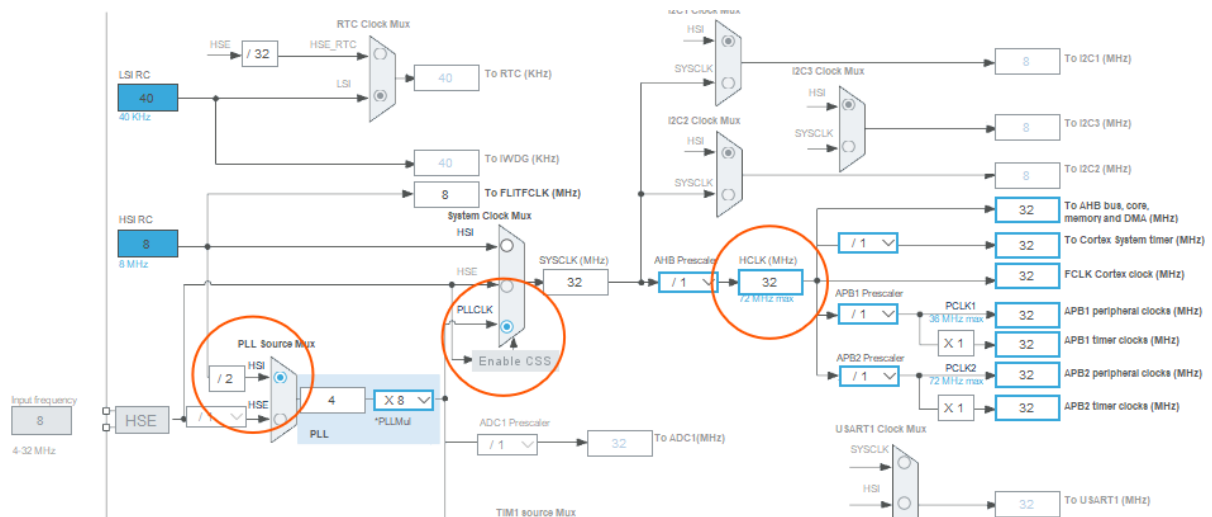


FIGURE 10 – Configuration de l'horloge interne

On active la configuration du port Serie du STLink de la carte Nucleo 32, on met USART2 en mode asynchrone.

Pour utiliser les LEDs, on configure les Pins PA4, PA5, PA6, PA7, PB0 sur GPIO Output, en pensant à activer les interruptions sur le NVIC.

Pour utiliser le servomoteur, on configure la PWM sur la Pin PA1 (avec le Timer 2, channel 2) car le Timer 3 channel 2 est déjà utilisé sur PA7.

## 4.2 Implémentation de la lecture de la fréquence

Dans la partie `/*USER CODE BEGIN 4*/`, on utilise la fonction `HAL_TIM_IC_CaptureCallback`, qui ne se déclenchera que si le timer est démarré en mode Input Capture Interrupt. On démarre d'ailleurs le timer en mode Input Capture Interrupt mode grâce à la fonction `HAL_TIM_IC_Start_IT(&htim2, TIM_CHANNEL_1)` dans la partie `/*USER CODE BEGIN 2*/`.

## 4.3 Implémentation du Calcul de la capacité en fonction de la fréquence

Dans `HAL_TIM_IC_CaptureCallback` il faut faire la différence de temps entre deux interruptions pour connaître la période. Pour récupérer le nombre de coups d'horloge écoulés, il nous faut utiliser la fonction `HAL_TIM_ReadCapturedValue()`. Et de là, nous allons suivre les étapes suivantes pour calculer la période, puis la fréquence et la capacité :

- Quand un front montant est détecté, la fonction Callback est appelée.
- Cette fonction Callback stocke le nombre de coups d'horloge de cet instant.
- Quand on détecte un second front montant, on capture à nouveau le `TIMESTAMP`.
- On calcule alors la fréquence en faisant la différence entre les deux valeurs de nombre de coups d'horloge, et en divisant la clock du timer par cette différence.
- On a alors accès à la valeur de la période, qui est simplement l'inverse de la fréquence.
- Et enfin, on utilise la relation de proportionnalité entre la capacité du circuit et la période du signal pour connaître la capacité.

## 4.4 Export des données vers un terminal série

On fait cette fois appel à la fonction `HAL_UART_Transmit`, après avoir formaté nos données à l'aide de la fonction `sprintf()`, le tout dans la fonction de Callback.

```
sprintf(uart_buf, "Capacite : %.6f F\r\n", capacite);  
HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)uart_buf, strlen(uart_buf), HAL_MAX_DELAY);
```

FIGURE 11 – Code d'envoi des données au terminal série

# 5 Fonctionnement du servomoteur

Le FiTec FS90 est un servomoteur à rotation limitée, permettant de contrôler des angles précis (ex : 0 à 90° ou 0 à 180°). Il se commande via un signal PWM (Pulse Width Modulation) envoyé sur sa broche de signal (broche orange).

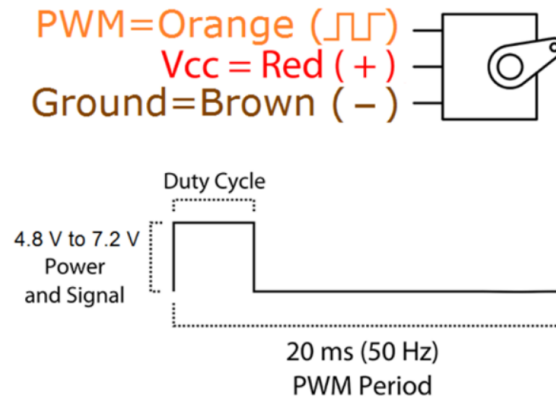


FIGURE 12 – Fonctionnement du servomoteur FS90

Le servomoteur attend un signal PWM de 20 ms de période (soit une fréquence de 50 Hz). La position de l'axe est déterminée par la largeur de l'impulsion haute dans cette période.

Largeur de l'impulsion	Position du servomoteur
0,9 ms (900 $\mu$ s)	0 (angle minimum)
1,5 ms (1500 $\mu$ s)	90 (angle moyen)
2,1 ms (2100 $\mu$ s)	180 (angle maximum)

TABLE 2 – Correspondance entre largeur d'impulsion PWM et position angulaire du servomoteur

Ainsi, en faisant varier la durée du signal haut, on contrôle la position du bras du servomoteur.

On configure la broche PB5 (D11) sur TIM17\_CH1, et on configure le TIM17 avec les paramètres suivants :

$$PSC \geq \frac{\text{base\_tps\_tim17}}{2^{16} \times \text{période\_clk}} = \frac{20 \times 10^{-3}}{2^{16} \times \frac{1}{80 \times 10^6}} = 24,41 \Rightarrow \text{on prend } PSC_{opti} = 25$$

$$ARR = \frac{\text{base\_tps\_tim17}}{PSC_{opti} \times \text{période\_clk}} = \frac{20 \times 10^{-3}}{25 \times \frac{1}{80 \times 10^6}} = 64000$$

On pense à mettre en marche la PWM sur PB5 avec `HAL_TIM_PWM_Start(&htim17, TIM_CHANNEL_1)` dans le `MX_GPIO_Init`. Dans le code, on fait aussi varier le rapport cyclique du signal PWM en fonction de la capacité.

Il n'y a plus qu'à brancher l'entrée PWM du servomoteur à la Pin D11 du NUCLEO-F301K8 (qui correspond à la broche PB5 sur STM32, d'après la datasheet) et le servomoteur est fonctionnel.

## 6 Impression 3D de la structure

Dans cette partie, on relie les différents composants entre eux. Pour ce faire, nous avons voulu imprimer en 3D une boîte de forme rectangulaire. Cependant, notre demande n'a pas été acceptée car la boîte excédait les dimensions maximales traitables par les imprimantes 3D de l'école.

Nous avons donc réalisé la boîte nous-mêmes.

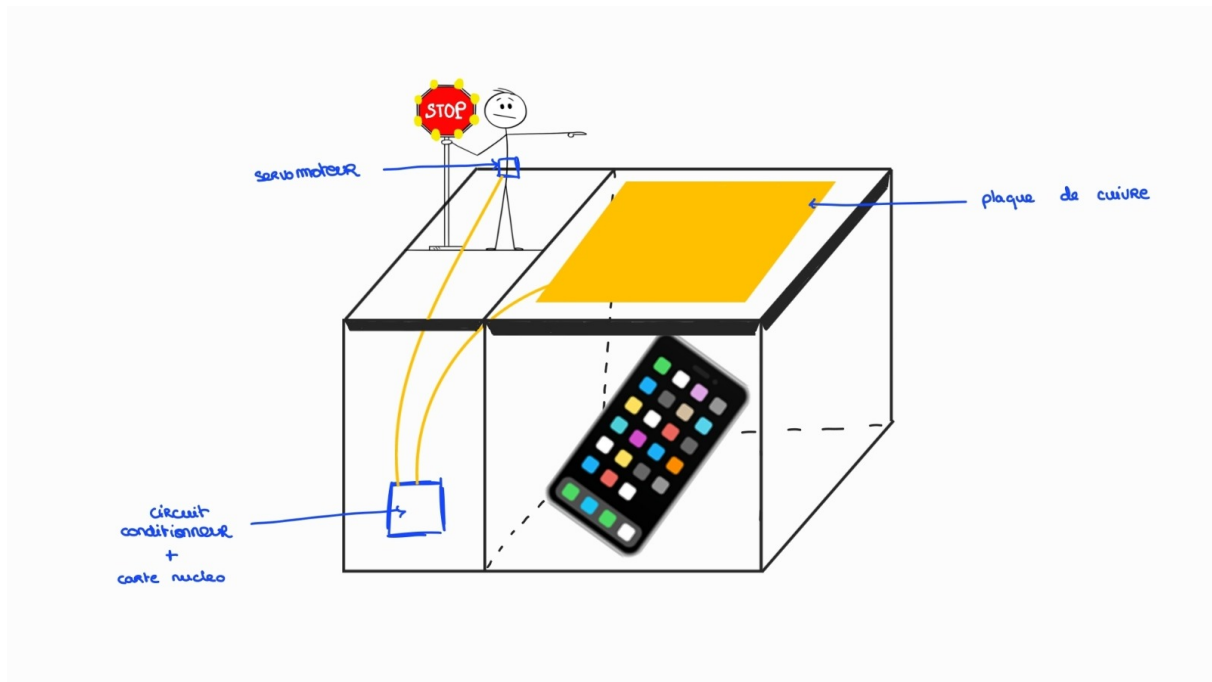


FIGURE 13 – Schéma global du projet

La boîte est divisée en deux compartiments, un pour le téléphone et l'autre pour le circuit et les branchements. Cette division vise à rendre le tout ergonomique : on pose le téléphone dans le compartiment dédié et c'est tout.

Chaque compartiment est équipé d'un couvercle.

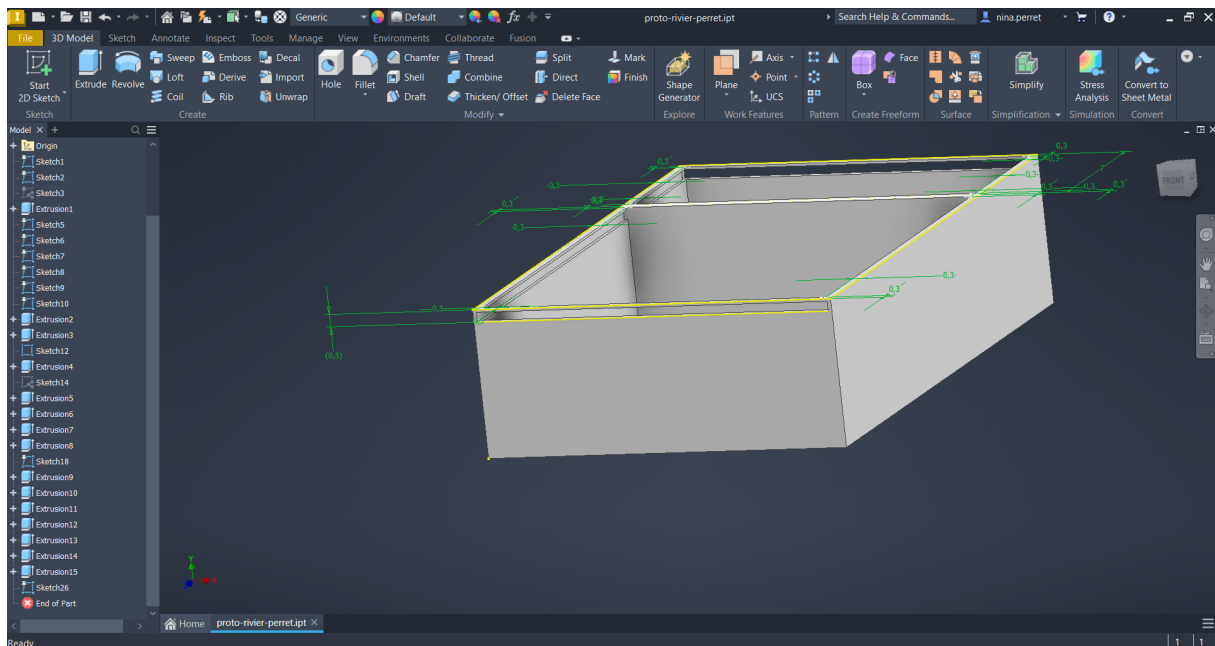


FIGURE 14 – Vue d'ensemble du design

La boîte que nous avons conçue n'a pas tout à fait la même structure que celle imaginée pour l'impression 3D. Il s'agit d'une ancienne boîte de mouchoirs aesthetics.

## 7 Conclusion

### 7.1 Résultat final

Notre projet fonctionne comme prévu. Lorsqu'on approche la main de la plaque en cuivre pour saisir le téléphone avant la fin de la période de concentration, Ectoplamsa lève son bras équipé du panneau stop. Plus la main est près de la plaque, plus le bras se lève haut.



FIGURE 15 – Photo du résultat final

### 7.2 Limites et difficultés rencontrées

Nous avons d'abord rencontré une difficulté concernant l'UART.

En effet, nous avons constaté d'étranges transmissions de l'UART, avec des retours à la ligne sans explication, comme montré sur le schéma ci-dessous, alors que nous avons bien formaté le message et que nous avons mis les caractères retour à la ligne et retour chariot.

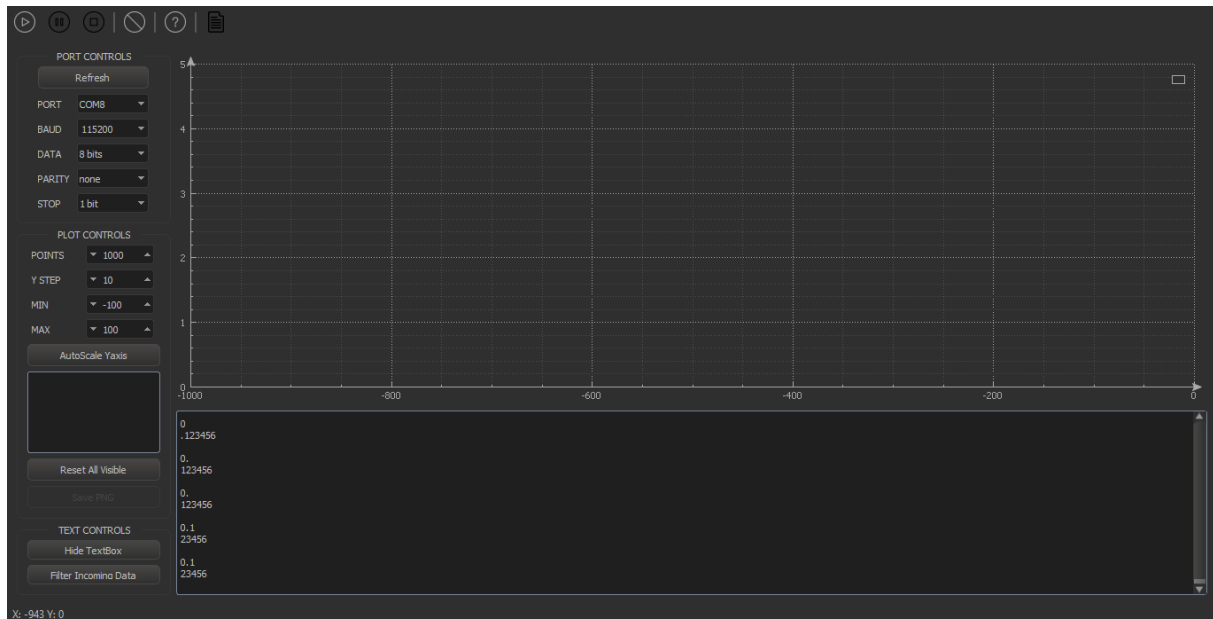


FIGURE 16

Nous avons réussi à visualiser le graphe en temps réel, mais sur une autre application que Serial Port Plotter.

La principale limite du montage se trouve cependant dans la très courte distance de détection de la main par le capteur capacitif. En effet, c'est autour d'une distance de 0 à 3cm que s'effectue la détection : c'est une courte portée.

### 7.3 Application concrète

Nous avons conçu un dispositif qui vise à encourager à la concentration profonde. Les distractions causées par les applications chronophages sont évitées, le tout de manière ludique grâce au petit personnage.

Le résultat est très satisfaisant, et nous pensons qu'un tel produit peut permettre d'inciter à adopter de meilleures habitudes, durablement.

## 8 Bibliographie

[1] : article à propos du temps moyen passé par un utilisateur sur son téléphone quotidiennement, Fabio Duarte, <https://explodingtopics.com/blog/smartphone-usage-stats>, 05/06/25

[2] : site web de l'application Forest, <https://www.forestapp.cc/>, visité le 02/06/2025