

## Le thérémine numérique

*Ceci est une fiction, toute ressemblance avec des faits réels ne serait que pure et fortuite coïncidence.*

Dans une école très lointaine, connue pour sa capacité à innover et entreprendre dans un monde qui bouge, des élèves réalisent dans le cadre de leur projet FAP un Thérémine Numérique. Ce groupe d'élèves est encadré par un enseignant moyen pour ne pas dire incompetent dont on taira le nom. On le désignera par CJ dans la suite.

Le Thérémine porte le nom de son inventeur Léon Theremin. Cet instrument, qui date de 1919, est le premier instrument musical électronique. La version classique de l'instrument utilise un oscillateur analogique dont la fréquence de résonance est contrôlée par un effet capacitif amené par la main du musicien. Une autre "antenne" permet d'ajuster le volume sonore comme illustré dans la figure 1.

Dans le cadre de ce projet ThereDig, l'objectif est de réaliser une implantation numérique de l'instrument, notamment la partie oscillateur et contrôle du volume. Le schéma bloc du système est illustré dans la figure 2. Le cœur du système utilise une Raspberry Pi Pico (RP). Deux capteurs permettent respectivement de récupérer :

1. la distance avec la main droite afin de fixer la fréquence de la note
2. la distance avec la main gauche afin de fixer l'amplitude du son

Les deux capteurs sont connectés au convertisseur analogique-numérique (CAN) de la RP en entrelacement temporel. La première donnée permet de fixer la fréquence du signal ou la note générée sur la RP. Ce signal est appliquée à l'entrée d'un amplificateur audio. Le gain de cet amplificateur sera contrôlé par la donnée du deuxième capteur afin de contrôler le volume. Le système est ainsi composé des éléments suivants :

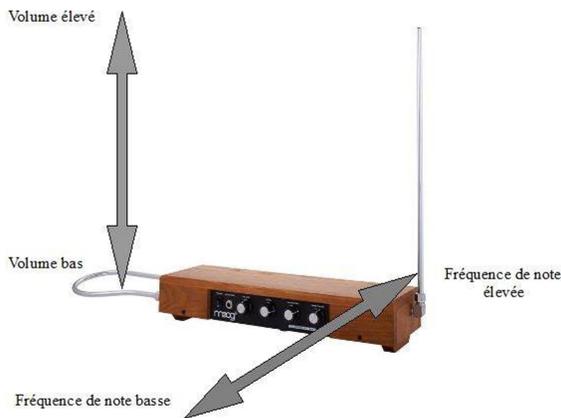


FIGURE 1 – Principe du Thérémine

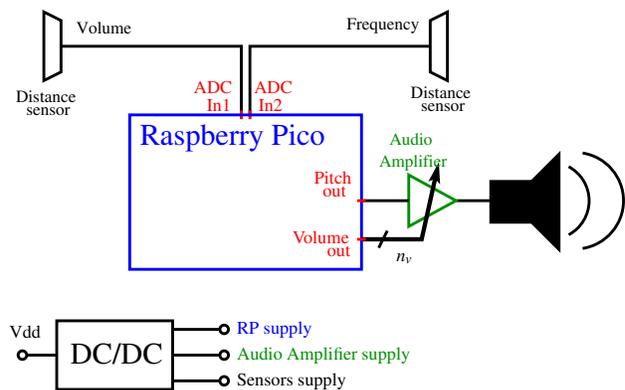


FIGURE 2 – Schéma bloc de ThereDig

- L'acquisition des signaux des capteurs et leur traitement sur la RP
- L'intégration et le contrôle de l'amplificateur audio

- La gestion de l'alimentation
- L'intégration sur un circuit imprimé

Afin de pallier les capacités limitées de leur encadrant, nous allons prêter main forte aux élèves de ThereDig.

## 1 Acquisition

La sortie du capteur de distance est une tension continue DC qui varie entre 0.3 V (distance maximale) et 2.7 V (distance minimale). Intéressons nous dans un premier temps à l'obtention de la note.

**Question 1.1** Sachant que le convertisseur analogique-numérique (CAN) ou *Analog to Digital converter (ADC)* de la RP a une résolution effective de 8 bits et une pleine échelle allant de 0 à 3.3V, combien de commandes de note (ou de fréquences) sont possibles ?<sup>1</sup>

Afin d'améliorer la précision des capteurs, CJ propose d'utiliser le filtre suivant à la sortie de l'ADC.

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1 - z^{-6}}{6(1 - z^{-1})}$$

**Question 1.2** Donner la réponse impulsionnelle du filtre pour  $n$  allant de 0 à 10.<sup>2</sup> Que remarque-t-on ?

**Question 1.3** Exprimer  $H(z)$  sous une forme non-récurrente.

**Question 1.4** Expliquer en quelques mots la fonction réalisée par le filtre ? Quel est l'intérêt d'implanter une telle fonction à la sortie de l'ADC ?

On rappelle que le délai ou le retard de groupe d'un filtre est donné par :

$$t_g = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega},$$

avec  $\phi(\omega)$  la phase de  $H(j\omega)$

**Question 1.5** Donner l'expression du délai du filtre  $H(j\omega)$ .

## 2 Amplificateur Audio

Afin de contrôler l'amplitude du son, les élèves de ThereDig décident de compter sur eux-mêmes et grâce à des recherches sur internet, décident d'utiliser le montage de la figure 3. Nous considérerons que les commutateurs sont idéaux, résistance nulle en fermé (On) et infinie en ouvert (Off). Les bits  $a_i$  contrôlent les commutateurs, quand  $a_i = 1$  le commutateur correspondant est fermé et vice-versa. Les bits  $\bar{a}_i$  sont les complémentaires de  $a_i$  (Quand  $a_i = 1$   $\bar{a}_i = 0$  et vice-versa)

**Question 2.1** Montrer que la fonction de transfert de ce montage s'écrit :

$$T(p) = -\frac{V_{out}(p)}{V_{in}(p)} = -\frac{R_B + \sum_1^4 R_i \bar{a}_i}{R_A}$$

**Question 2.2** Expliquer en quelques lignes les étapes de traitement à réaliser afin d'implanter le contrôle de volume, depuis le capteur jusqu'au montage de la figure 3.

**Question 2.3** En prenant  $R_A = 16R_B$ , déterminer les valeurs de  $R_i$  en fonction de  $R_B$  qui permettraient d'avoir un contrôle binaire sur l'amplitude du signal sonore avec un gain maximal de 1<sup>3</sup>.

---

1. On rappelle qu'à une distance donnée, on associe une note  
 2. Nous considérons bien évidemment le système dans un cadre causal  
 3. On fera abstraction du signe moins qui n'a pas d'impact sur le rendu du son.

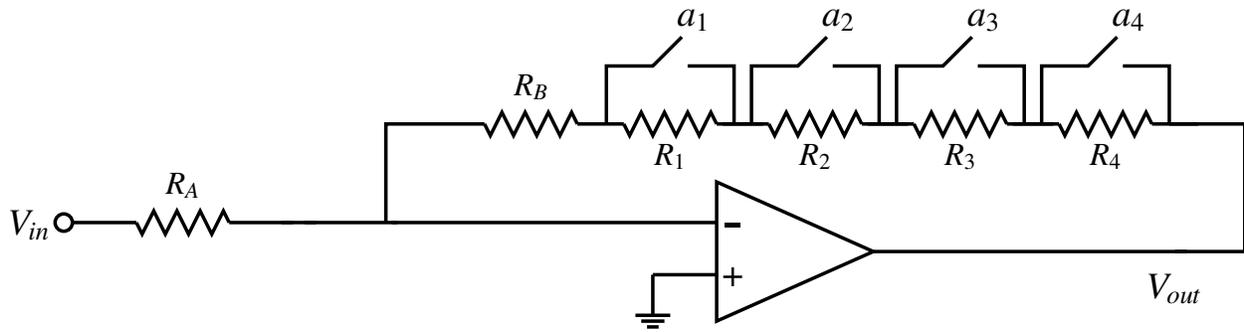
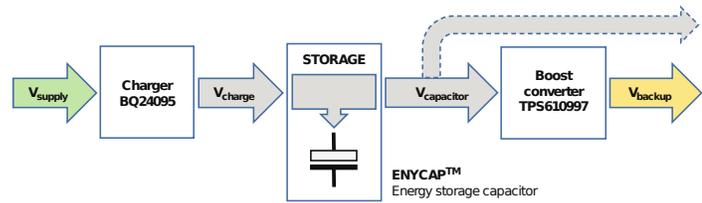


FIGURE 3 – Architecture pour le contrôle de volume



FIGURE 4 – Super-condensateur 90 F



Typical block diagram for a backup application and fixed output supply. The storage element is charged through a USB socket  $V_{supply}$ . The constant output voltage  $V_{backup}$  is provided independently from  $V_{supply}$  by the boost converter. Alternatively, the path  $V_{capacitor}$  can be used

FIGURE 5 – Schéma global du système de gestion de l'alimentation

### 3 Gestion de l'alimentation

Pour l'alimentation du système, on utilise un super-condensateur (196 HV ENYCAP) avec une tension nominale de 5.6 V et une capacité de 90 F. Le thermostat numérique consomme 150 mW sous 5 V. Une image du super-condensateur est donnée à la figure 4 à titre illustratif.

Pour charger ce super-condensateur on dispose d'un régulateur intégré LDO (TI BQ24095). Ce régulateur se branche en USB<sup>4</sup> sur un ordinateur ou un chargeur USB et supporte jusqu'à 1.25 A. La figure 5 représente le cadre d'usage standard du système de gestion de l'alimentation.

**Question 3.1** En combien de temps le super-condensateur peut-il être chargé (via le TI BQ24095) si l'on considère l'utilisation d'un bloc d'alimentation délivrant un courant maximum de 1 A ?<sup>5</sup>

Le super-condensateur est dit complètement déchargé si la tension est inférieure à 4.6 V. Notez que le cœur du système (Raspberry, les capteurs et les amplis) peut fonctionner à une tension de 4.6 V.

**Question 3.2** Expliquer pourquoi il faut utiliser un régulateur (pour générer  $V_{backup}$ ) entre le super-condensateur et le système ?

**Question 3.3** Compléter la table 1 de spécifications pour le régulateur.

TABLE 1 – Spécifications du régulateur

Tension d'entrée minimale (V)	Dropout voltage (V)	Courant de sortie minimal (A)	Tension de sortie (V)

4. Pour rappel, la tension standard délivrée par l'USB est 5 V

5. En unité SI :  $F = \frac{A \cdot s}{V}$

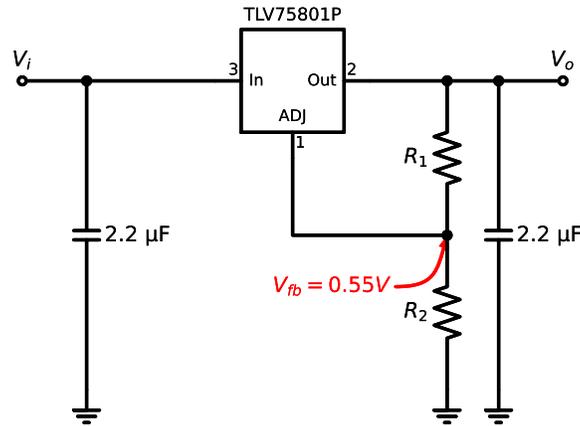


FIGURE 6 – Schéma du régulateur

Pour l'implémentation de cette régulation de tension on choisit le régulateur TLV758P (utilisé dans le projet du capteur cardiaque) qui permet de satisfaire les spécifications. La tension de sortie régulée est donnée par l'équation :  $V_o = V_{fb}(1 + \frac{R_1}{R_2})$

**Question 3.4** Pour  $R_2 = 1\text{ k}\Omega$ , calculer la valeur de  $R_1$  pour avoir une tension de sortie de 4.6 V ?

**Question 3.5** L'erreur relative des résistances étant de 1%, calculer l'erreur relative et la plage de variation de la tension de sortie.

## 4 Intégration sur PCB

Le système est à présent prêt pour être intégré sur un circuit imprimé (PCB). Les élèves de ThereDig vont voir le responsable du laboratoire des fers à souder pour réaliser leur carte. Ayant aucune confiance en CJ, il décide d'évaluer les connaissances des élèves dans la matière.

*Dans ce questionnaire à choix multiple, pour chaque question, des réponses sont proposées. Il peut y avoir plusieurs propositions exactes.*

**Attention : 1 point pour une bonne réponse, -1 point pour une mauvaise réponse et 0 point pour une absence de réponse**

**Question 4.1** sur un PCB mixte (analogique, numérique et alimentation), pourquoi est-il nécessaire d'avoir une bonne séparation des différentes zones les unes des autres (zone alimentation, zone numérique et zone analogique) ?

1. La séparation des différentes zones fonctionnelles permet d'éviter toute interférence néfaste
2. Pour s'assurer d'un espacement suffisant pour les pistes
3. Pour utiliser un substrat avec le minimum de couches
4. Pour pouvoir utiliser les composants montés en surface

**Question 4.2** Qu'est-ce qu'il y a de commun entre la vue *schéma* et la vue *routage* dans la conception d'un PCB ?

1. La liste des empreintes
2. L'emplacement exacte des composants

3. La liste des composants
4. Rien

**Question 4.3** À quoi sert un **via enterré** ?

1. Éviter le rayonnement d'une partie du PCB
2. Réaliser des trous de fixation
3. Relier des pistes qui sont sur les couches internes du PCB
4. Relier tous les plans de masse entre eux

**Question 4.4** Pour une piste transportant un signal hautes fréquences, les dimensions (largeur et longueur) de la piste sont calculées en fonction de :

1. L'impédance caractéristique de la ligne
2. La chute de tension sur la piste
3. Le courant qui circule dans la piste
4. La longueur d'onde du signal

Sur un PCB 2-couches avec une épaisseur de cuivre de 35  $\mu\text{m}$ , le courant maximal qui peut traverser une piste de section  $S$  est donné par :

$$i = 9.868 \cdot \Delta T^{0.44} \cdot S^{0.725} \quad (1)$$

où :

- $i$  est en Ampère
- $\Delta T$  est l'augmentation de la température en degrés
- $S$  est la section de la piste en  $\text{mm}^2$

**Question 4.5** On dispose sur un PCB 2-couches d'un bloc d'alimentation qui génère un courant de 4.5 A. Pour alimenter le reste du circuit qui doit être fonctionnel entre 25 °C et 85 °C, on utilise une piste de largeur :

1. 1.05 mm
2. 0.806 mm
3. 10.5 mm
4. Peu importe sa largeur