M2 SECIL - 2026-2027 - PROJET *SYNTHÈSE SONORE*

Proposé par Emmanuel Rio (emmanuel.rio@utoulouse.fr)



Sommaire

Présentation du projet **1**
- Objectif général . . . 1
- Compétences mobilisées . . . 2
- Contraintes techniques minimales . . . 2

Choix d'un scénario **2**

Extensions possibles **3**
- Génération et modulation numérique de la commande . . . 3
- Gestion de configurations . . . 3
- Contrôle enrichi . . . 3
- Ajout de paramètres de synthèse . . . 3
- Synthèse polyphonique (plus difficile) . . . 4
- Habillage du prototype . . . 4

Critères d'évaluation **4**
- Mesure des performances . . . 4
- Documentation . . . 4

Présentation du projet

Objectif général

Ce projet propose de concevoir un dispositif de **synthèse sonore analogique commandée numériquement** (instrument de musique ou autre scénario d'utilisation), sous la forme d'un **système embarqué**. L'objectif est à la fois technique (interface de commande, génération et filtrage de signaux PWM, électronique analogique, ...) et créatif (choix d'un scénario d'utilisation, enrichissement progressif de l'interface et du rendu sonore).

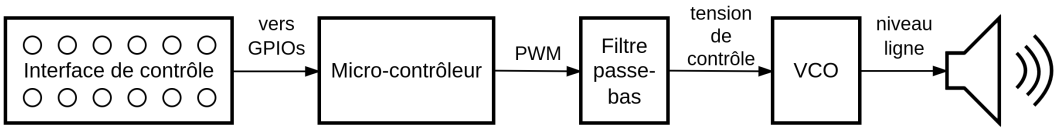
Compétences mobilisées

- programmation micro-contrôleur,
- gestion d'interfaces matérielles (GPIO, sorties PWM, ...),
- conception d'une interface utilisateur *(électronique numérique)*,
- filtrage et réalisation d'un circuit audio simple *(électronique analogique)*,
- calibration et mesures,
- travail collaboratif et structuration d'un projet technique avec documentation.

L'encadrant accompagnera les étudiants pour les aspects liés à l'électronique analogique.

Contraintes techniques minimales

Le **résultat minimal** à obtenir est le suivant :



La synthèse sonore est réalisée par un synthétiseur analogique rudimentaire commandé en tension : **Voltage Controlled Oscillator (VCO)**. Ce synthétiseur produit un son monophonique de forme d'onde simple, caractérisé par sa fréquence.

Le micro-contrôleur génère une tension de commande "analogique" par PWM, suivie d'un **filtre passe-bas**, permettant de piloter la fréquence du VCO. Le micro-contrôleur pourra être un **STM32** (ou équivalent), disposant d'un nombre d'entrées/sorties suffisant pour les besoins du projet.

Une partie du projet consistera à :

- choisir un **montage électronique** permettant de réaliser le VCO,
- dimensionner la **fréquence du signal PWM** et la **fréquence de coupure** du filtre passe-bas,
- mesurer l'ondulation résiduelle du signal PWM après filtrage,
- observer et mesurer l'impact de cette ondulation sur le VCO,
- observer et mesurer le temps de stabilisation de la tension après changement de la commande.

Il faudra justifier le choix du filtre passe-bas en considérant simultanément l'atténuation de l'ondulation PWM et le temps de stabilisation de la tension de commande.

Au final le système s'efforcera de respecter les **contraintes** suivantes :

- **calibration** de la fréquence du son généré,
- temps de **latence** imperceptible *(ex. $<$ 10 ms)* entre une action sur l'interface et le résultat sonore obtenu,
- **absence de bruits** indésirables *(clics indésirables en début/fin de son, pollution du son par la fréquence des signaux PWM)*.

Choix d'un scénario

Un exemple de scénario d'utilisation est celui d'un **clavier de piano** :

- chaque bouton de l'interface correspond à une touche de clavier et déclenche un son d'une hauteur spécifique,
- le son s'arrête lorsque le bouton est relâché.

Le scénario choisi devra être clairement défini. Il pourra être **musical** (percussions, déclenchement de boucles, ...) ou **non musical** (interface pédagogique, jeu, générateur d'alertes, ...), du moment qu'il respecte les contraintes du projet.

Extensions possibles

Au-delà du système minimal, les étudiants devront **identifier et délimiter dans leur cahier des charges** les extensions qu'ils souhaitent implémenter. Les pistes présentées ici devront être considérées en fonction de leur cohérence avec le scénario d'utilisation choisi.

Génération et modulation numérique de la commande

Permettre un contrôle automatique par le micro-contrôleur de certaines évolutions de la commande du VCO par signal PWM :

- **modulation périodique** : *vibrato*,
- **variation temporelle** : *glissando*,
- **génération d'une enveloppe temporelle** : enveloppe *Attack Decay Sustain Release* (*ADSR*) synchronisée avec des événements clavier,
- **quantification et génération de notes** : transposition, génération de séquences mélodiques,
- **simulation de polyphonie par multiplexage temporel** : arpégiateur rapide.

Gestion de configurations

Permettre de mémoriser et de rappeler plusieurs configurations du synthétiseur afin de modifier rapidement ses caractéristiques ou son comportement.

Une configuration pourra notamment regrouper les paramètres des extensions choisies. Exemples : paramètres d'une enveloppe ADSR, paramètre d'un capteur de distance, etc.

Une étape consistera en la conception du format de stockage des configurations et la manière dont celles-ci sont sélectionnées, mémorisées et rappelées par le micro-contrôleur.

Contrôle enrichi

Utiliser un capteur analogique ou numérique complexe (microphone, potentiomètre, capteur de distance, capteur de pression, etc.) dont la mesure sera utilisée pour contrôler dynamiquement un paramètre de synthèse.

Ajout de paramètres de synthèse

Enrichir le circuit électronique analogique avec :

- le choix de différentes **formes d'onde**
- un contrôle de l'amplitude : **Voltage Controlled Amplifier (VCA)**
- un contrôle du filtrage du son : **Voltage Controlled Filter (VCF)**

Les éléments ajoutés devront être commandés par de nouveaux signaux PWM.

L'encadrant accompagnera les étudiants pour les aspects liés à l'électronique analogique.

Synthèse polyphonique (plus difficile)

Étendre le système afin de permettre la génération simultanée de plusieurs voix, en pilotant plusieurs synthétiseurs en parallèle. Les étudiants devront définir et justifier le nombre de voix retenu, ainsi que l'architecture matérielle et logicielle permettant leur gestion.

L'encadrant accompagnera les étudiants pour les aspects liés à l'électronique analogique.

Habillage du prototype

Les étudiants pourront travailler sur l'**habillage du prototype**, afin de rapprocher le système obtenu d'un produit fini. Cela peut passer par un **boîtier imprimé en 3D**, un montage sur **PCB**, avec une disposition soignée des composants et des interfaces utilisateur.

Critères d'évaluation

L'évaluation portera notamment sur le respect des **exigences techniques et documentaires** suivantes :

Mesure des performances

Le système devra faire l'objet d'une **observation et de mesures objectives**, incluant en particulier :

- la **calibration** entre la commande numérique et la fréquence obtenue,
- la **latence** entre l'action sur l'interface et la sortie sonore,
- la **qualité du son produit** (absence de bruit, ...),

Ces mesures permettront de vérifier la qualité du système.

Documentation

Le projet constitue une **première étape** qui pourra être **poursuivie les prochaines années**, éventuellement avec un **autre scénario d'utilisation** ou des extensions différentes.

Il doit donc être accompagné d'une **documentation complète** qui permettra aux futurs étudiants de **comprendre le fonctionnement du système existant** et de s'appuyer dessus pour **avancer plus rapidement**, en réutilisant ou en adaptant les éléments déjà développés.