

M2 SECIL - 2025-2026 - PROJET SYNTHÈSE SONORE

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

Sommaire

Présentation du projet	1
Objectif général	1
Compétences mobilisées	1
Contraintes techniques minimales	2
Caractéristiques fonctionnelles et matérielles	2
Scénario d'utilisation	2
Plateforme matérielle	2
Sortie audio analogique	3
Extensions possibles	3
Interface enrichie	3
Synthèse plus complexe	3
Enregistrement et relecture des interactions	3
Interface de configuration, MIDI et OSC	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 numérique** (instrument de musique ou autre scénario d'utilisation), fonctionnant sur un **système embarqué**. L'objectif est à la fois technique (interface physique, programmation *baremetal*, protocole I²S, contraintes de latence) et créatif (choix d'un scénario d'utilisation, enrichissement progressif de l'interface et du rendu sonore).

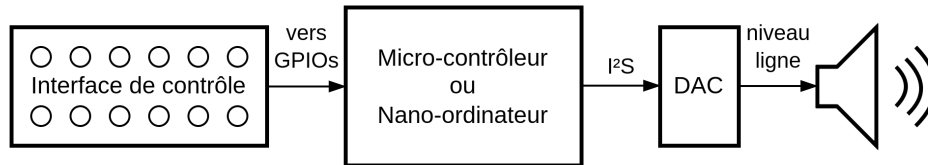
Compétences mobilisées

- Conception d'une interface utilisateur matérielle (*électronique*).
- Gestion d'interfaces matérielles (GPIO, I²S, ...).
- Programmation *baremetal* sur système embarqué (Raspberry Pi sans OS).
- Algorithmes de synthèse sonore (*traitement du signal*).
- Travail collaboratif et structuration d'un projet technique avec documentation.

L'encadrant accompagnera les étudiants pour les aspects liés à l'électronique et au traitement du signal.

Contraintes techniques minimales

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



Cela pourra par exemple être, pour cette version minimale :

- Une forme d'onde simple (sinusoïde, carré, ...)
- Un son monophonique

Le système devra respecter les **contraintes** suivantes :

- Programmation en ***baremetal***.
- Sortie son par **protocole I²S**.
- Synthèse du son **réactive** en fonction des actions sur l'interface.
- Temps de **latence** imperceptible (ex. $< 10\text{ ms}$) entre une action sur l'interface et le résultat sonore obtenu.
- Pas d'artefacts audibles (*clics indésirables en début/fin de son, ...*).

Caractéristiques fonctionnelles et matérielles

Scénario d'utilisation

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.

L'interface matérielle (boutons, potentiomètres, ...) devra dans un premier temps correspondre aux entrées GPIO ou entrées ADC internes disponibles sur le système embarqué utilisé.

Plateforme matérielle

Configuration envisagée :

- **Raspberry Pi 3** (ou plus récent si disponible).
- Utilisation de la **librairie Circle** : <https://github.com/rsta2/circle>. Circle fournit un environnement C++ pour accéder directement aux périphériques matériels du Raspberry Pi sans OS, ce qui simplifie le développement *baremetal*.
- Sortie audio numérique en **protocole I²S** : <https://en.wikipedia.org/wiki/I²S>

Sortie audio analogique

Des **convertisseurs numérique-analogique (DAC)** compatibles avec le protocole I²S sont facilement disponibles chez divers fournisseurs. La plupart d'entre eux intègrent comme composant central le **PCM5102** ou sa variante **PCM5102A** de Texas Instruments :

- PCM5102 : <https://www.ti.com/product/PCM5102>
- PCM5102A : <https://www.ti.com/product/PCM5102A>

Ces circuits sont généralement proposés directement sous forme de petites cartes prêtes à l'emploi, ce qui permet de les utiliser sans avoir à manipuler le composant nu. Ils sont indispensables pour convertir la sortie I²S du Raspberry Pi en signal analogique exploitable par un haut-parleur ou un amplificateur.

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.

Interface enrichie

L'interface doit dans un premier temps correspondre au scénario d'utilisation le plus simple et compatible avec les entrées disponibles sur le système embarqué. On pourra ensuite enrichir l'interface en ajoutant des capteurs.

Éventuellement, un système de multiplexage des entrées est envisageable si le nombre de GPIOs est insuffisant.

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

Synthèse plus complexe

Le système doit être capable au minimum d'une synthèse monophonique de sons simples (sinusoïde, carré, ...). Si le projet le permet, il pourra être envisagé :

- De la synthèse polyphonique,
- Un principe de synthèse plus complexe : tables d'ondes, synthèse FM, ...
- Des effets : filtrage, distortion, délai, réverbération, ...

L'encadrant accompagnera les étudiants pour les algorithmes spécifiques au traitement du signal.

Enregistrement et relecture des interactions

Les étudiants pourront inclure un **mécanisme d'enregistrement des interactions**, permettant de conserver la trace des actions de l'utilisateur (appui sur boutons, déplacements de potentiomètres, etc.) et de les rejouer ultérieurement. Chaque événement devra être associé à un **horodatage** (*timestamping*), afin de respecter la chronologie et le rythme des actions lors de la relecture.

Cette fonctionnalité peut permettre, par exemple, de **capturer une séquence de notes ou d'actions puis de la rejouer en boucle**, mais elle peut également s'appliquer à tout type de commandes non musicales, offrant ainsi une base pour des fonctionnalités avancées comme des séquences programmables, des patterns interactifs ou un suivi des gestes de l'utilisateur.

L'accent serait alors mis ici sur le traitement des **événements et commandes**, plutôt que sur la synthèse ou le traitement du signal sonore.

Interface de configuration, MIDI et OSC

Le projet pourra inclure une **interface de configuration externe**, permettant d'ajuster certains paramètres du système sans avoir à recompiler le code. Cette interface peut passer par un **port série, USB ou connexion réseau** (Wi-Fi/Ethernet en fonction du matériel disponible), et permettre de modifier par exemple : les valeurs de potentiomètres virtuels, les réglages de synthèse (formules, fréquences, effets), ou les comportements de l'interface utilisateur.

Une autre possibilité est d'inclure une **interface MIDI** (*Musical Instrument Digital Interface*), permettant au système embarqué :

- de **recevoir** des commandes depuis un clavier ou un contrôleur externe.
- d'**envoyer** des commandes vers d'autres synthétiseurs ou logiciels.

En alternative ou en complément, il est possible d'utiliser le **protocole OSC** (*Open Sound Control*), qui permet de transmettre des messages de contrôle sur UDP/IP.

- Protocole MIDI : <https://en.wikipedia.org/wiki/MIDI>
- Protocole OSC : https://en.wikipedia.org/wiki/Open_Sound_Control

L'encadrant accompagnera les étudiants pour les aspects liés à l'électronique du protocole MIDI (connexion, optocoupleur).

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

Les étudiants seront évalués sur la capacité du projet à satisfaire les **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 **latence** entre l'action sur l'interface et la sortie sonore,
- L'**utilisation du CPU et de la mémoire**,
- La **qualité sonore** (absence d'artefacts, continuité des formes d'onde),

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.