

Travail de fin d'études : Master en ingénieur civil électromécanicien

Conception d'un capteur audio récupérateur d'énergie à ultra basse consommation pour la surveillance d'écosystèmes

J'ai travaillé sur un mémoire intitulé «**Conception d'un capteur audio récupérateur d'énergie à ultra basse consommation pour la surveillance d'écosystèmes**» sous la supervision du professeur David Bol à l'UCLouvain.

L'**Internet des objets** (IoT) va conduire au déploiement de milliards de capteurs intelligents connectés pour diverses applications. Un tel déploiement massif de capteurs intelligents n'est pas respectueux de l'environnement si ces capteurs sont remplacés tous les deux ans en raison de la pression qu'ils exercent sur les ressources naturelles et de l'écotoxicité des déchets électroniques qu'ils génèrent.

De plus, l'accentuation du changement climatique, entre autres due à la destruction des écosystèmes, nécessite la surveillance des forêts afin d'analyser et de préserver l'écosystème. Une telle surveillance est généralement réalisée manuellement par une personne qui mesure certaines données moins d'une fois par jour, ce qui ne fournit pas suffisamment d'informations et demande la présence humaine pendant l'acquisition des données.

Pour résoudre ces problèmes, l'objectif de ce mémoire est le développement d'un **capteur audio intelligent autonome et efficace analysant en continu l'écosystème forestier**. Ces capteurs peuvent typiquement être divisés en 5 modules :

- À l'intérieur de l'**élément de stockage d'énergie** (batterie, supercondensateur,...) se trouve la partie la plus importante des ressources matérielles du capteur. Pour la durabilité du capteur, ces ressources doivent être composées d'éléments chimiques qui ne s'usent pas. Les batteries souffrent aujourd'hui d'une courte durée de vie (10 ans) et contiennent des composants toxiques tels que le plomb ou le lithium. Les supercondensateurs sont particulièrement bien adaptés aux applications à faible puissance et à longue durée de vie avec peu de ressources critiques (par exemple, les condensateurs électrostatiques à double couche).
- La **gestion de l'énergie** implique la distribution de l'énergie à travers l'ensemble du circuit, c'est un élément essentiel pour la minimisation de la consommation électrique totale. Une puce de gestion de l'énergie d'e-peas (une société belge spécialisée dans les puces à faible consommation) assure le transfert d'énergie entre l'élément de stockage, les cellules solaires et autres systèmes du circuit. Cette puce possède un suivi du point de puissance maximale pour optimiser l'efficacité des panneaux solaires. Ce module nécessite une optimisation à plusieurs paramètres car il est situé au cœur de la conception du capteur, pour lequel la valeur de la tension d'alimentation globale doit être soigneusement sélectionnée pour optimiser le fonctionnement des différentes modules.
- La **détection** est l'étape de conversion du son en un signal électrique, qui est ensuite filtré et amplifié via une interface analogique (AFE). Dans ce travail, après une comparaison approfondie des microphones de pointe pour les applications IoT, un microphone à condensateur à électret est utilisé en raison de sa petite taille, son faible bruit et sa basse

consommation d'énergie. L'amplification réalisée dans l'AFE met en évidence un compromis entre la consommation électrique et le bruit total (intrinsèque au microphone, aux résistances et à l'amplificateur opérationnel de l'AFE). Ce compromis conduit à une sélection minutieuse de l'amplificateur opérationnel en fonction de ses caractéristiques de bruit et de puissance.

- Le **traitement des données** se fait numériquement dans un microcontrôleur à basse consommation (STM32). Des algorithmes d'apprentissage automatique sont mis en œuvre pour classer les données. Ils intègrent des modèles de base pour les non-idéalités des capteurs afin de faire reculer la précision d'inférence diminuée par l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique entraînés dans des conditions idéales (hors-ligne avec des ressources de puissance/mémoire presque illimitées).
- La **communication sans fil** permet d'abord la transmission du son d'entrée traité localement vers les passerelles périphériques. D'un autre côté, le capteur obtient des capacités de reconfiguration pour suivre les mises à jour des protocoles d'application, de sécurité et de communication (LPWAN: LoRa).

Ce développement est la première étape du déploiement d'un réseau de capteurs audio sans fil capable d'optimiser leur consommation d'énergie. La consommation d'énergie de tels capteurs conduit à un compromis entre la densité de déploiement des capteurs (limitée par la fréquence de remplacement de la batterie par un opérateur) et la complexité des paramètres de l'écosystème à surveiller. Aujourd'hui, les processeurs à ultra-basse consommation pour les communications IoT, l'intelligence artificielle et l'exploration de données ouvrent de nouvelles possibilités. De tels processeurs préservent les informations collectées et calculent des vecteurs de fonctionnalités sur chaque capteur pour permettre une transmission sans fil à faible puissance vers une passerelle informatique (les serveurs traitent les données du capteur et renvoient les données pertinentes via le cloud, réduisant les besoins en bande passante).

Pour répondre aux contraintes énergétiques nécessaires à son autonomie totale, ce capteur récupère l'énergie de l'environnement à travers des cellules photovoltaïques miniaturisées dimensionnées en fonction de la luminosité solaire au fil des jours et des saisons, à l'aide d'un supercondensateur écologique et non toxique pour stocker l'énergie. Avec une durée de vie excédant 15 ans, cet appareil entièrement autonome fonctionne à une tension d'alimentation de 2.5 V atteignant 22,1 mW de consommation d'énergie moyenne. Un microphone à condensateur à électret collecte un signal aussi faible que 16 dBSPL (par rapport à un bruit de 14,22 dBSPL en entrée), qui est ensuite amplifié dans toute la gamme de fréquences d'émission des oiseaux (20 Hz – 20 kHz) par une interface analogique à faible bruit et consommation. Ce signal est ensuite traité dans un microcontrôleur à ultra-basse consommation, alternant entre les modes d'exécution et de veille avec un rapport cyclique d'un tiers, et un émetteur-récepteur optimisé pour les applications IoT avec les réseaux LoRaWAN.

Le microcontrôleur détecte les sons lorsque les oiseaux sont actifs (généralement pendant la journée) et assure la communication radiofréquence durant la nuit en fonction de la tension du supercondensateur qui est attentivement surveillée en temps réel. Il **envoie des informations sur les espèces d'oiseaux rencontrées au cours de la journée**, ainsi que leur fréquence d'apparition.

En cas de mise à jour du firmware, cet appareil reçoit les fragments associés lorsque son énergie est suffisante et il change automatiquement le firmware avec un logiciel optimisé énergétiquement ne nécessitant que 10.6 J pour toute la mise à jour.

En calculant la fréquence moyenne pondérée des sons reçus, le capteur intelligent est capable de faire la **distinction entre quatre oiseaux communs en Belgique**: le pigeon, le merle, la mésange charbonnière et la mésange bleue. Pour chaque espèce, plusieurs chansons ont été analysées et utilisées pour former un **classificateur des k plus proches voisins (KNN)** travaillant en temps réel dans le système embarqué. Sa précision, définie comme la probabilité de trouver la bonne espèce, atteint 94% pour les chansons provenant de la base de données précédemment apprise. Pour les sons nouvellement analysés, l'algorithme de détection performe de la même manière. Des algorithmes d'apprentissage automatique plus complexes pourraient finalement être implémentés pour faire la distinction entre un plus grand nombre d'espèces.

