



HAL
open science

Intégration hétérogène pour la mise en œuvre de capteurs imprimés sur support souple connectés

Rémy Vauche, Evangéline Benevent, Soilihi Moindje, Jean-Pierre Walder, Yacine Blalta, Katrinada Bouchnak, Hajar Khelladi, Sochanshakhéna Nuon

► To cite this version:

Rémy Vauche, Evangéline Benevent, Soilihi Moindje, Jean-Pierre Walder, Yacine Blalta, et al.. Intégration hétérogène pour la mise en œuvre de capteurs imprimés sur support souple connectés. Colloque sur les Objets et systèmes Connectés - COC'2021, IUT d'Aix-Marseille, Mar 2021, MARSEILLE, France. hal-03593067

HAL Id: hal-03593067

<https://hal.science/hal-03593067>

Submitted on 1 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Intégration hétérogène pour la mise en œuvre de capteurs imprimés sur support souple connecté

Encadrants : Rémy Vauché¹, Evangéline Benevent^{1,2}, Soilihi Moindje¹, Jean-Pierre Walder¹
Etudiants : Yacine Blalta², Katrinada Bouchnak², Hajar Khelladi², Sochanshakhéna Nuon²

remy.vauche@univ-amu.fr

¹Aix Marseille Univ, Univ Toulon, CNRS, IM2NP, Marseille, France

²Aix Marseille Univ, Polytech Marseille, Département MT, Marseille, France

RESUME : Cet article présente les résultats obtenus lors de la première édition d'un projet étudiant réalisé par des étudiants en 3^{ième} année du cycle ingénieur du département Micro-électronique et Télécommunications de Polytech' Marseille au cours du premier semestre de l'année scolaire 2020-2021. Ce projet a été proposé dans le cadre l'action transverse Intégration Hétérogène du laboratoire IM2NP qui vise à développer à terme avec le support de la plate-forme IO LAB de l'IM2NP, une plate-forme de démonstration connectée et alimentée sur batterie de capteurs imprimés sur support souple, l'objectif final étant de mettre en avant le savoir-faire qui a été acquis par la plate-forme SPRINT de l'IM2NP en matière de conception et de fabrication de capteurs sur support souple. Le standard de communications sans-fil retenu pour ce démonstrateur est le Bluetooth Low Energy (BLE) afin de permettre l'affichage des données issues d'un capteur sur un dispositif mobile compatible telles qu'une tablette ou un smartphone. Il sera ici mis en œuvre à l'aide du module BlueNRG-M2SP de chez STMicroelectronics qui, en plus d'avoir un faible encombrement, dispose d'un Cortex M0, d'une mémoire Flash programmable ainsi qu'un Convertisseur Analogique-Numérique (CAN), lui permettant ainsi d'être utilisé seul, sans qu'aucun composant additionnel ne soit nécessaire. Néanmoins, devant les difficultés rencontrées par les étudiants pour développer en autonomie une application personnalisée dédiée à ce module, il a été programmé avec un microcode fourni par STMicroelectronics et contrôlé en SPI par un autre microcontrôleur possédant un CAN pour arriver au résultat attendu.

Mots clés : Bluetooth Low Energy, capteur connecté, capteur imprimé, capteur sur support souple, intégration hétérogène.

1 INTRODUCTION

Cet article présente les résultats obtenus lors de la première édition d'un projet étudiant réalisé par des étudiants en 3^{ième} année du cycle ingénieur du département Micro-électronique et Télécommunications de Polytech' Marseille au cours du premier semestre de l'année scolaire 2020-2021. Ce projet a été proposé dans le cadre l'action transverse Intégration Hétérogène du laboratoire IM2NP qui vise à développer à terme avec le support de la plate-forme IO LAB de l'IM2NP, une plate-forme de démonstration connectée et alimentée sur batterie de capteurs imprimés sur support souple, l'objectif final étant de mettre en avant le savoir-faire qui a été acquis par la plate-forme SPRINT de l'IM2NP en matière de conception et de fabrication de capteurs sur support

souple. Le standard de communications sans-fil retenu pour ce démonstrateur est le Bluetooth Low Energy (BLE) afin de permettre l'affichage des données issues d'un capteur sur un dispositif mobile compatible telles qu'une tablette ou un smartphone. Il sera mis en œuvre ici à l'aide du module BlueNRG-M2SP de chez STMicroelectronics qui, en plus d'avoir un faible encombrement, dispose d'un Convertisseur Analogique-Numérique (CAN), permettant potentiellement la numérisation de l'information analogique issue d'un capteur sans qu'un CAN externe ne soit nécessaire. Le schéma de principe du démonstrateur recherché est indiqué sur la figure 1.

Ainsi, dans la section II, il est tout d'abord question de la cointégration d'un capteur imprimé sur support souple et d'un circuit imprimé conventionnel. Ensuite, la mise

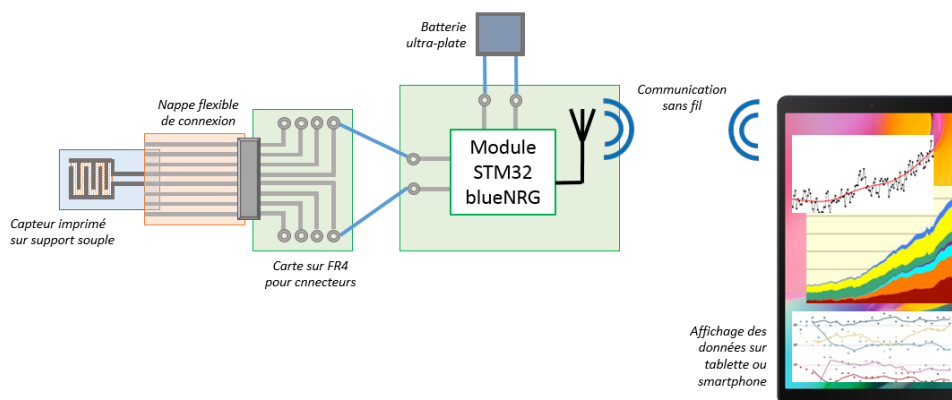


Fig. 1 : Schéma de principe du démonstrateur.

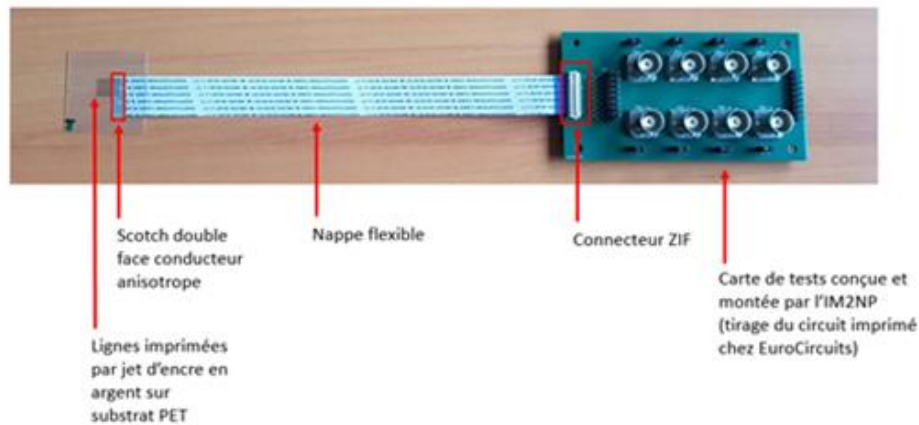


Fig. 2 : Photographie du capteur imprimé sur souple relié à une carte de test à l'aide d'une nappe FFC.

en œuvre par les étudiants du lien BLE à l'aide du module BlueNRG-M2SP est présentée dans la section III. Puis, l'application Android développée par les étudiants qui permet de recevoir et d'afficher les données est présentée dans la section IV. Enfin, les tests validant la transmission en BLE des tensions vues par le CAN que les étudiants ont effectués sont présentés dans la section V. Les perspectives sont quant à elles données dans la section VI.

2 CAPTEUR IMPRIME SUR SUPPORT SOUPLE ET INTERCONNEXION A UN CIRCUIT IMPRIME CONVENTIONNEL

Un exemple typique de capteur imprimé sur support souple qui pourrait être mis en avant grâce au démonstrateur est un capteur de température composé de lignes imprimées par jet d'encre en argent sur substrat PET de $125\mu\text{m}$ d'épaisseur. Malheureusement, la mise en œuvre d'un tel capteur et son interconnexion avec un circuit imprimé n'est pas évidente du fait notamment que les dispositifs imprimés sur support souple peuvent facilement être dégradés par les fortes températures nécessaires à la soudure. Quand bien même cela serait possible, la résistance mécanique issue de la soudure de simples fils sur un circuit sur support souple empêcherait toute manipulation. Cependant, cette intégration hétérogène peut être réalisée à l'aide d'un adhésif conducteur anisotrope qui conduit dans une seule direction de l'espace grâce à la présence de microbilles conductrices, la direction de conduction étant alors orthogonale aux deux surfaces collées.

Les adhésifs conducteurs anisotropes peuvent se retrouver sous la forme de colle ou de scotch double-face. Toutefois, la colle conductrice anisotrope nécessite un stockage réfrigéré pour qu'elle conserve ses propriétés avant application (exemple : -20°C). C'est pourquoi, une solution reposant sur un scotch double-face conducteur anisotrope a été retenue (il s'agit ici du Electrically Conductive Adhesive Transfer Tape 9703 de chez 3M).

Ainsi, pour permettre l'interconnexion entre un capteur sur support souple et un circuit imprimé, tout en offrant

la possibilité de changer facilement de capteur, il a été proposé de coller l'une des faces du scotch à une nappe de type « Flat Flexible Cable » (FFC) ayant un pas de 1 mm. Le capteur, collé sur la deuxième face du scotch, doit donc dès lors présenter des lignes d'accès espacées d'1 mm également. Enfin, l'autre extrémité de la nappe est quant à elle enfichée dans un connecteur appelé « Zero Insertion Force » (ZIF), lui-même monté sur le circuit imprimé visé. Un exemple est représenté sur la figure 2 pour un capteur de température résistif imprimé sur support souple et un circuit imprimé de test connectorisé, tous deux ayant été conçus au laboratoire IM2NP et fournis aux étudiants.

Dès lors, ils ont pu réaliser la mesure de la résistance du capteur R_T à température ambiante T_{amb} vue depuis cette carte de test connectorisée ($R_T@T_{\text{amb}} = 3,1467 \text{ k}\Omega$). Il est à noter que pour ce capteur, la sensibilité réduite est de $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, ce qui revient à une sensibilité $\Delta R_T/\Delta T$ de $6,92 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$.

Maintenant, pour obtenir une tension U_T image de la résistance R_T du capteur et donc de la température T , il a été proposé par les étudiants de simplement placer le capteur dans un pont diviseur de tension tel qu'indiqué sur la figure 3. Dès lors, il ne reste qu'à convertir la tension analogique U_T en un mot binaire pour permettre sa transmission via le lien BLE. Cependant, la résistance R_1 doit alors être choisie en considérant d'une part, la résolution minimale désirée sur toute la plage de température visée et d'autre part, en fonction des tensions disponibles et des caractéristiques du CAN utilisé (résolution, tension pleine échelle et quantum).

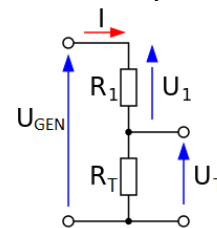


Fig. 3 : Pont diviseur de tension permettant d'obtenir une tension étant l'image de la résistance du capteur de température résistif.

3 MISE EN ŒUVRE DU LIEN BLE

Comme indiqué précédemment, le lien BLE est mis en œuvre ici à l'aide du module BlueNRG-M2SP de chez STMicroelectronics. Pour permettre sa mise en œuvre rapide, les étudiants ont utilisé la carte X-NUCLEO-BNRG2A1 l'implémentant ainsi que la carte STM32-NUCLEOL476RG.

3.1 Carte X-NUCLEO-BNRG2A1

La carte X-NUCLEO-BNRG2A1 présentée sur la figure 4 offre une connectivité Bluetooth Low Energy par l'intermédiaire du module BlueNRG-M2SP (conforme au Bluetooth® v5.0 et certifié FCC) qu'elle intègre et présentée sur la figure 5. Ce module est construit autour du System on Chip (SoC) BlueNRG-2 qui gère les différents protocoles et couches du standard Bluetooth Low Energy grâce à un cœur Cortex-M0 et sa mémoire Flash programmable. Ce SoC peut donc accueillir des applications personnalisées développées à l'aide du SDK STSW-BLUENRG1-DK fourni par ST-Microelectronics et téléversées à l'aide d'un programmeur ST-LINK. Toutefois, elle peut également être branchée sur une carte de développement STM32 NUCLEO via ses connecteurs Arduino UNO R3.

Ainsi, le module BlueNRG-M2SP (et donc la carte X-NUCLEO-BNRG2A1) peut être utilisé de deux manières différentes, soit de manière autonome en téléversant dans sa mémoire Flash un programme personnalisé qui sera exécuté par son Cortex-M0, soit en la contrôlant par un lien Serial Peripheral Interface (SPI). Dans ce cas, un microcode spécifique fourni par ST doit être téléversé dans le module BlueNRG-M2SP.

Par ailleurs, il est à noter que le SoC intègre un CAN 10 bits en plus des autres périphériques habituels. Il ne nécessite donc potentiellement pas de CAN externe pour la mise en œuvre de capteurs connectés à partir du moment où une tension image de la grandeur physique visée est obtenue à l'aide de l'électronique adéquate.

Néanmoins, bien qu'à terme le module BlueNRG-M2SP, qui occupe une surface de 10 mm par 13,5 mm sera utilisé seul pour obtenir une plate-forme de démonstration compacte, il a été décidé pour cette première édition, devant les difficultés qu'on connut les étudiants à développer en autonomie une application personnalisée, qu'il sera piloté en SPI par un autre microcontrôleur disposant également d'un CAN. La tension aux bornes du capteur sera donc ici numérisée par ce dernier.



Fig. 4 : Photographie de la carte X-NUCLEO-BNRG2A1.

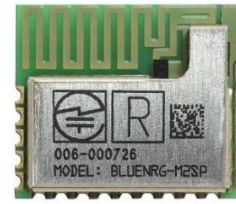


Fig. 5 : Photographie du module BlueNRG-M2SP (10 mm x 13,5 mm).

3.2 Carte STM32-NUCLEOL476RG

Pour contrôler via SPI le module BlueNRG-M2SP, la carte NUCLEO STM32-NUCLEO L476RG (ne disposant pas nativement de module BLE) a été utilisée. Elle est représentée sur la figure 6. C'est une carte de développement fabriquée par ST-Microelectronics construite autour du microcontrôleur STM32L476RG du même fabricant et qui dispose d'un CAN 12 bits. De plus, elle possède son propre programmeur ST-LINK embarqué et ne requière donc pas de programmeur externe pour modifier le programme que le STM32L476RG exécute.

3.3 Travail réalisé par les étudiants

Pour cette partie, après avoir rencontré des difficultés à développer en autonomie une application personnalisée pour le BlueNRG-M2SP, le travail des étudiants a donc consisté à mettre en œuvre le CAN du STM32L476RG, puis à transmettre le résultat de la conversion analogique-numérique en SPI au BlueNRG-M2SP de façon à ce qu'il la retransmette en BLE lorsqu'un dispositif compatible y est connecté. Pour cela, la carte X-NUCLEO-BNRG2A1 a été connectée à la carte STM32-NUCLEOL476RG comme indiqué sur la figure 7. Puis, les étudiants ont programmé le module BlueNRG-M2SP avec un microcode spécifique fourni par ST-Microelectronics à l'aide du logiciel BlueNRG GUI. Enfin, à l'aide des exemples fournis par ST-Microelectronics dans la librairie X-CUBE-BLE2 notamment, les étudiants ont développé le microcode mettant en œuvre le CAN et le module SPI du microcontrôleur STM32L476RG de façon à ce que les données issues du CAN soient transmises en BLE par le BlueNRG-M2SP à intervalle constant ou à la demande du dispositif Android distant.

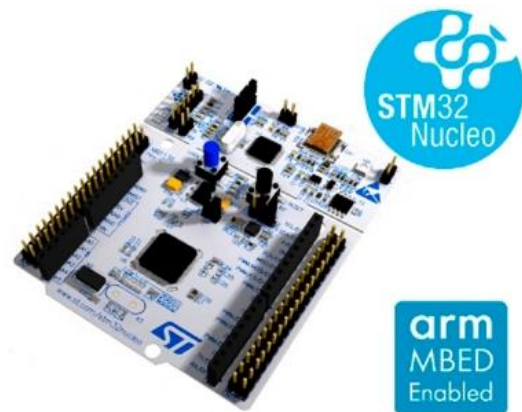


Fig. 6 : Photographie de la carte STM32-NUCLEOL476RG.



Fig. 7 : Photographie de la X-NUCLEO-BNRG2A1 connectée à la NUCLEO-L476RG.

4 DEVELOPEMENT DE L'APPLICATION ANDROID PERMETTANT LA RECEPTION ET L'AFFICHAGE DES DONNEES

En parallèle de la programmation du STM32L476RG, les étudiants ont également développé une application permettant d'afficher la tension aux bornes du capteur qui a été reçue en BLE par le dispositif Android distant. Pour cela, ils se sont servis de divers exemples disponibles en ligne. L'application obtenue à la fin du projet contient deux fenêtres (appelées également activités) et sont indiquées sur la figure 8. La première activité développée indique les périphériques BLE disponibles aux alentours. Elle permet également d'en sélectionner un et de s'y connecter. La seconde activité permet notamment quant à elle l'affichage des tensions échantillonnées sous la forme d'un graphique. Toutefois, sur cette dernière, il est également possible de configurer une réception périodique ou à la demande des tensions échantillonnées. Dans le premier cas, la période de réception des tensions échantillonnées est réglable via l'interface, et dans le second cas, le bouton « read char » permet de déclencher l'échantillonnage et la transmission de la valeur de la tension lue par le CAN.

5 RESULTATS DES TESTS

Pour vérifier la fonctionnalité de l'ensemble, les étudiants ont tout d'abord appliqué une tension sinusoïdale à l'entrée du CAN du STM32L476RG comme indiqué sur la figure 9. Puis, comme indiqué sur la figure 10, ils ont vérifié qu'ils retrouvaient bien cette tension sur l'application Android. Dans un deuxième temps, ils ont câblé le pont diviseur de tension formé par la résistance R_1 et le capteur de température résistif indiqué sur la figure 3, de sorte que son point milieu soit connecté à l'entrée du CAN. Le montage obtenu est indiqué sur la figure 11 et la tension affichée par l'application Android est quant à elle indiquée sur la figure 12. Il est à noter que sur cette dernière, le passage à 0V correspond à un changement de la résistances R_1 . Enfin, les étudiants ont comparé la

tension obtenue avec celle aux bornes du capteur mesurée au voltmètre et celle prévue par la théorie et ce, pour différentes valeurs de R_1 . Un tableau de synthèse est donné sur la figure 13.

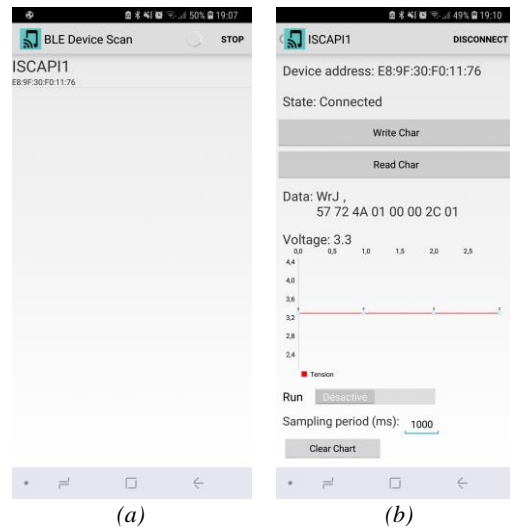


Fig. 8 : Capture d'écran des deux activités créées : (a) détection des périphériques BLE à portée, (b) interface de configuration de la réception des données et de leur affichage.



Fig. 9 : Application d'une tension sinusoïdale à l'entrée du CAN du STM32L476RG.

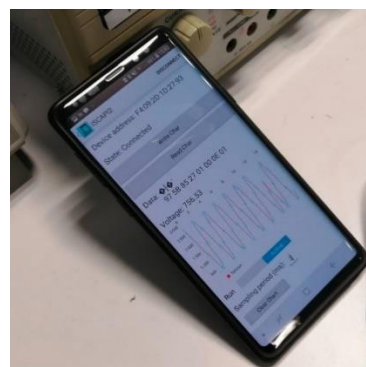


Fig. 10 : Affichage des échantillons de la tension sinusoïdale reçus en BLE.

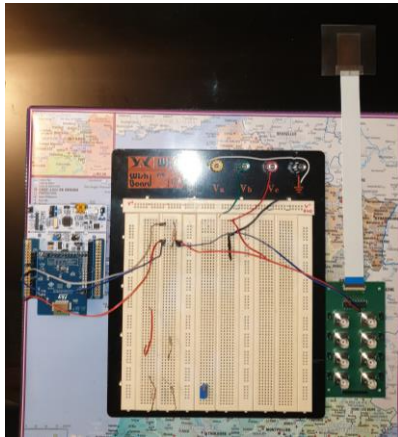


Fig. 11 : Mise en œuvre du pont diviseur de tension dans lequel est placé le capteur de température résistif.



Fig. 12 : Affichage des tensions reçues avec une résistance R_1 de 5,6 k Ω puis de 10 k Ω .

Valeur de résistance R_1	10 k Ω	5,6 k Ω	4,8 k Ω
Valeur théorique de U_T (à $T = 20^\circ\text{C}$)	0,789 V	1,187 V	1,306 V
Valeur relevée sur l'application (moyenne sur 10 points)	0,81 V	1,23 V	1,39 V
Valeur mesurée aux bornes du capteur avec un voltmètre	0,865 V	1,26 V	1,426 V
Ecart relatif entre la valeur relevée sur l'application et le voltmètre	6,4 %	2,4 %	2,5 %

Fig. 13 : Tableau résumant pour différentes valeurs de R_1 la valeur de tension reçue en BLE, celle mesurée au voltmètre aux bornes du capteurs et celle prévue par la théorie.

6 CONCLUSION

Ce projet a permis aux étudiants de se familiariser avec l'électronique sur support souple et les contraintes associées, de même que la transmission de données en BLE. De plus, ils ont pu mettre en application leurs compétences en programmation de microcontrôleur et en programmation Android, domaines qu'ils avaient déjà abordés dans leur cursus. Malgré les difficultés rencontrées, ils ont su trouver une solution permettant de mener à bien le projet et ainsi démontrer la faisabilité d'un démonstrateur de capteur sur support souple connecté utilisant le module BLE et la méthode d'interconnexion au capteur choisis. Toutefois, dans les éditions futures de ce projet, seul le BlueNRG-M2SP et son CAN seront utilisés comme initialement prévu. Dès lors, un premier travail sera que les étudiants réalisent un circuit imprimé sur lequel sera soudé le module BlueNRG-M2SP et la résistance R_1 , de même qu'un connecteur permettant l'alimentation par une batterie et un autre permettant de se connecter au capteur. Un deuxième travail consistera alors, à l'aide d'une étude à réaliser en amont par les encadrants, à développer une application personnalisée qui sera exécuté par le BlueNRG-M2SP et qui mettra en œuvre son CAN et son module BLE de façon à avoir un fonctionnement similaire à ce qui a été présenté ici.