

Systemes intelligents pour l'internet des objets

J. Grisolia^{a,b}, S. Lachaize^{a,b}, J-L. Noullet^c, A. Biganzoli^d, C. Rouabhi^e, R. Tan^e,
F. Guérin^e, C. Capello^e, P. Bourdeu d'Aguerre^e, F. Gessinn^e, M. Respaud^{a,b,e}

^a Département de Physique, INSA, Toulouse, France

^b Université de Toulouse - Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets,
INSA.CNRS.UPS, Toulouse, France

^c Département de Génie Electrique, INSA, Toulouse, France

^d Laboratoire PLASmas Conversion Energie - LAPLACE UMR5213 - UPS.CNRS.INP,
Toulouse, France

^e Atelier Interuniversitaire de Micro et Nano Electronique, pôle CNFM de Toulouse,
INSA, Toulouse, France.

Contacts email : grisolia@insa-toulouse.fr, respaud@insa-toulouse.fr

L'INSA de TOULOUSE propose plusieurs parcours transverses pluridisciplinaires en année terminale de formation d'ingénieur. L'un d'eux porte sur l'innovation dans le domaine des technologies de l'internet des objets - Innovative Smart Systems. Les étudiants sont formés à l'innovation, au travers de cours et d'un projet semestriel sur les différentes phases de la démarche : la conception, la mise en œuvre, la propriété intellectuelle et à la commercialisation d'un « système intelligent ». Ainsi, une large part de l'enseignement est dédiée à un projet avec une partie pratique visant à construire un capteur chimique communiquant à base de nanoparticules élaborées par voie chimique. L'ensemble de la démarche d'innovation et le capteur sont présentés devant un jury composé d'industriels du secteur.

I. Introduction

Les objets connectés constituent un des enjeux importants pour de nombreux secteurs d'activités clés tels que la santé, l'énergie, la sécurité... Leur nombre croit de manière exponentielle entre 20 et 30 % par an. L'innovation dans cette thématique est au cœur des plans de la nouvelle France industrielle (*smart factory*, *smart grid*, *smart wearable*, *smart object*, *e-health*, etc.). Les acteurs et ingénieurs qui développeront ces technologies doivent acquérir non seulement des compétences techniques dans de nombreuses disciplines mais aussi un sens aigu pour l'innovation et une sensibilité au progrès sociétal. Nous avons mis en place à l'INSA de Toulouse un Parcours Transversal Pluridisciplinaire (PTP), intégrant des groupes d'élèves issus de plusieurs spécialités. Le PTP « *Innovative Smart System* » (ISS) de l'INSA Toulouse vise la mise en place d'une formation en dernière année d'école pour former des ingénieurs capables d'innover, c'est-à-dire capable de proposer, concevoir, réaliser, travailler au sein d'une équipe pluridisciplinaire, diffuser et commercialiser un « smart system » en partant du composant jusqu'à l'application métier en tenant compte des aspects sociétaux.

Un « *smart system* » intègre des fonctions de détection, d'actionnement et de contrôle afin de décrire et d'analyser une situation et prendre des décisions fondées sur les données disponibles de manière prédictive ou adaptative. Dans la plupart des cas, le « *smart system* » peut être attribué à un fonctionnement autonome basé sur le contrôle en boucle

fermée, l'efficacité énergétique, et les capacités de mise en réseau.

Les nanotechnologies et nanosciences permettent de répondre à ces problématiques à travers la fabrication de dispositifs à faible coût, à haute performance et économes en énergie. Un moyen alternatif de contrôler les propriétés de ces systèmes est de les construire grâce à des approches *bottom-up* en utilisant des nanoparticules (NPs) colloïdales synthétisées chimiquement, qui sont accessibles dans différentes tailles, formes, compositions et états de surface. La construction de ces dispositifs permet alors d'exploiter leurs propriétés optiques, plasmoniques, électroniques et magnétiques. Les techniques d'assemblage permettent d'intégrer ces NPs, et cela, à très bas coût. Par nature, la conduction électrique dans les réseaux de NPs granulaires se fait par effet tunnel. Il en résulte des résistances, de l'ordre du $M\Omega$ au $G\Omega$, propices aux systèmes à basse consommation. Les capteurs sont alors sensibles aux faibles excitations faites aux jonctions tunnels (distance, environnement électrostatique ...). Diverses applications sont alors possibles comme par exemple, des jauges de contraintes et des capteurs de gaz beaucoup plus sensibles que les capteurs usuels.

Nous avons développé un module complet intitulé « *smart devices* » dans lequel les étudiants travaillent en équipe afin de fabriquer un capteur de gaz intelligent à base de NPs.

Dans ce module, les étudiants abordent :

- les principes physiques de fonctionnement et de réalisation pratique (en salle blanche) de capteurs,
- la synthèse des nanoparticules par voie chimique douce,
- les procédures de mises en œuvre,
- la conception de conditionneurs,
- la conception du logiciel embarqué dans le microcontrôleur constitutif d'une plateforme open source hardware (Arduino),
- la conception d'une interface de communication (choix du protocole et logiciel embarqué).

II. Résultat

Capteur de gaz à base de nanofils de WO_3

Le capteur est réalisé en salle blanche à l'AIME. Durant un stage de 4 jours, les étudiants sont sensibilisés aux exigences et contraintes liées à la microélectronique, à la synthèse et à la manipulation de NPs préparées par voie chimique (solutions colloïdales), à leur intégration de manière contrôlée, et à une application concrète en tant que capteurs de gaz.

Une première étape consiste à réaliser la plateforme en Si comprenant une résistance chauffante en polysilicium au-dessus de laquelle sont déposées des peignes interdigités de Pt. Une deuxième étape consiste à élaborer des nano-fils de WO_3 . La synthèse se fait en milieu aqueux par une méthode classique de condensation. Ces nanofils qui constitueront la couche sensible sont déposés par diélectrophorèse. Ce procédé permet de localiser les nanofils au sein de peignes interdigités. Après montage en boîtier, ces dispositifs électriques sont testés en tant que capteurs de gaz (figure 1). Les mesures sont réalisées avec différents gaz. La température de l'échantillon est contrôlée par l'intensité du courant traversant la résistance chauffante. Les gaz choisis sont l'ammoniac et l'éthanol, à des concentrations de 1000 ppm dans l'air synthétique. L'ensemble des caractérisations I-V sans gaz et sous gaz permet aux étudiants de rédiger la *datasheet* du capteur.

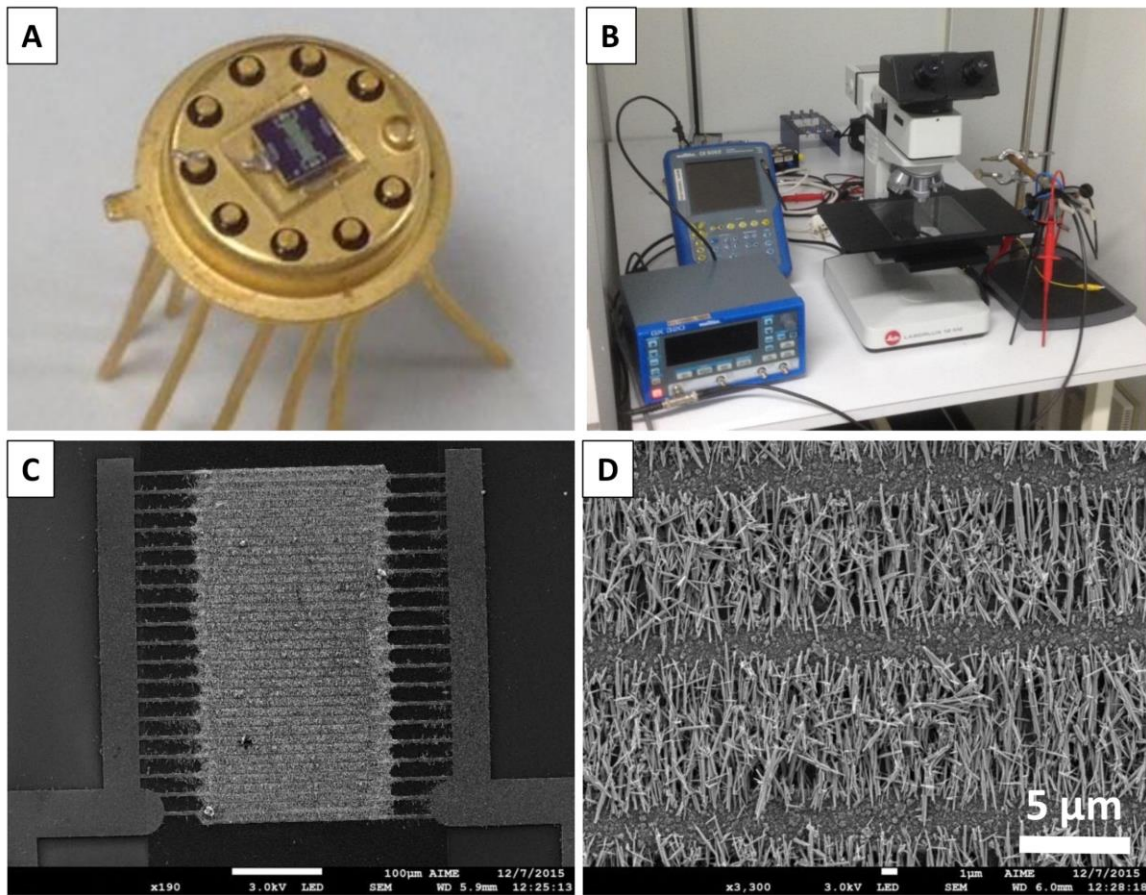


Fig.1. Capteurs chimiques : (A) montage des puces sur boîtier TO5. (B) Banc de dépôt des nanoparticules par diélectrophorèse. Microscopie électronique (SEM-FEG) des capteurs après intégration des nanofils de WO_3 à faible (C), et à fort grossissements (D).

Conditionnement du signal

Les propriétés électriques de ces capteurs montrent que leurs impédances varient de quelques $\text{k}\Omega$ à plusieurs centaines de $\text{M}\Omega$ selon les conditions d'élaboration. Ces fortes impédances imposent l'utilisation d'un étage d'adaptation d'impédance en vue d'une mesure sur une entrée analogique d'un Arduino UNO optimisée pour $\sim 10 \text{ k}\Omega$. Notre choix s'est porté sur un étage d'adaptation d'impédance à base d'un amplificateur opérationnel (AOP) très performant et bas coût (quelques euros). La figure 2 présente le montage comprenant l'AOP et ses différents filtres (alimentation, passe-bas actif, passe-bas passif), la mesure de courant à travers le capteur de gaz (R_{sensor}), avec une précision de l'ordre du nA. La résistance de calibration $R_{\text{cal}} = 5 \text{ k}\Omega$ (modifiable grâce aux plots sur la carte PCB et représentée sur la figure 2) permet de mesurer des impédances allant de $2 \text{ M}\Omega$ à $2 \text{ G}\Omega$. Mais la résistance mesurée n'est pas la donnée essentielle à la sortie de l'étage d'adaptation d'impédance. En effet, il est préférable d'étudier une différence relative de résistance entre une valeur témoin préalablement initialisée et la valeur mesurée. L'approche est validée par une simulation avec le simulateur LTSpice (dérivé de SPICE).

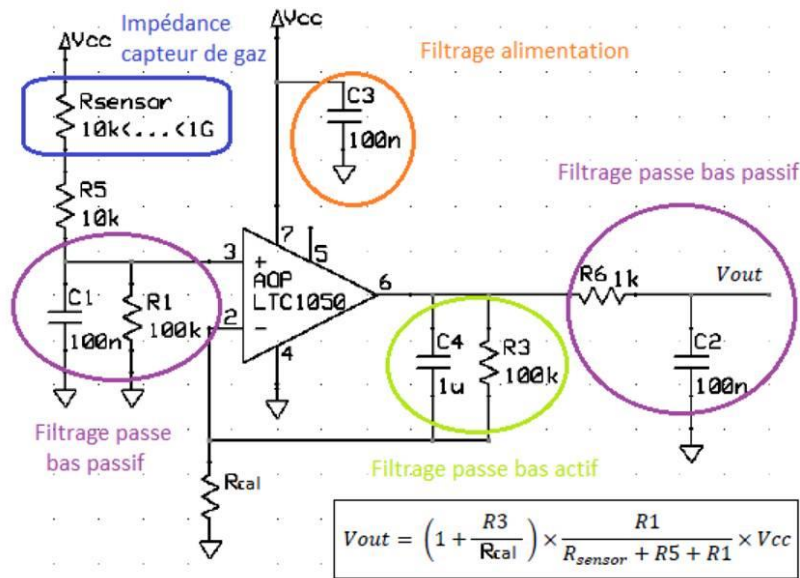


Fig.2. Circuit d'adaptation d'impédance du capteur de gaz.

Capteur communiquant via une PLATEFORME OPEN SOURCE HARDWARE

Schéma de principe

La plateforme *open-source hardware* Arduino® permet de rendre ce capteur intelligent grâce à l'utilisation de son microcontrôleur AVR directement programmable par ordinateur et un logiciel associé (IDE) (1). Le système comprend des capteurs secondaires (e.g. température), un conditionneur de signal pour les différents capteurs. La sonde de température est utilisée pour la phase d'auto-calibration du *smart device*. Le capteur est autonome grâce à un système de gestion de l'énergie. Ce dernier puise son énergie d'un accumulateur Li-ion qui est rechargé par un panneau solaire. Le système comprend un système de communication sans fil. Le schéma global du capteur de gaz intelligent et autonome est présenté sur la figure 3.

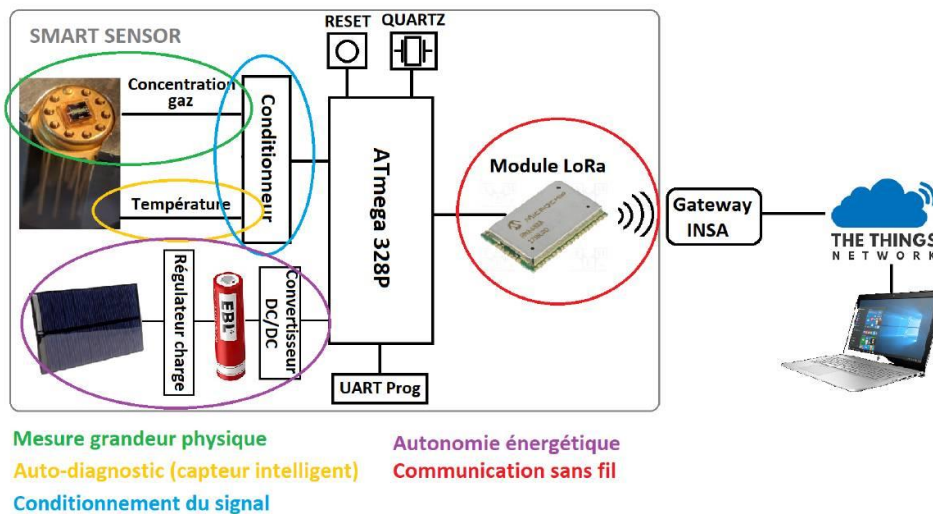


Fig.3. Schéma de principe du capteur autonome et communiquant.

La transmission Radio Fréquence (sans fil) du capteur se fait en utilisant la technologie LoRa (Low Range Wide Area) via un module Microchip RN2483A qui connecte le capteur

au réseau TTN (« The Things Network ») (<https://www.thethingsnetwork.org/>) (2-7). Pour rappel, la technologie LoRa utilise une architecture basée sur des dispositifs émettant vers une passerelle (*gateway*) qui fait le relai vers un *cloud* (dans notre cas vers le réseau TTN).

Communication LoRa

La connexion de la puce RN2483 à la carte Arduino Uno est réalisée grâce aux broches (Tx, Rx, RST, 3v3 et GND). Elles communiquent alors entre elles via le port série et se pilotent via des commandes de trois types : mac, radio et système. Pour une communication avec le réseau TTN, nous passons par la *gateway* de l'INSA de Toulouse et utilisons la librairie du TTN pour Arduino. Cette librairie masque la partie protocolaire du réseau LoRaWAN et permet de faire des envois vers TTN avec des commandes simple de type `sendBytes()`. Le choix de la méthode d'activation ABP sur TTN permet au serveur de générer un "devAddr", un "nwksKey" et un "appSKey" qui sont utilisés dans le code Arduino pour identifier la puce LoRa et communiquer avec notre instance du serveur TTN. La récupération des données du capteur se fait via l'utilisation de MQTT (Message Queue Telemetry Transport), une des APIs conseillées par TTN et qui est très utilisée dans le domaine de l'IoT. MQTT est un protocole M2M (Machine To Machine) très léger qui fonctionne à partir de publications et de souscriptions à des *topics*. Pour cela, TTN fournit un client qui implémente la librairie *paho mqtt*. Avec elle, on peut facilement se connecter à notre application TTN, à l'aide de notre « AppID » et de notre « Access Key ». Ainsi on peut initier une connexion à notre réseau TTN et définir les actions à mettre en place lors de la réception de messages sur nos *topics*, l'activation, la déconnection, etc. Les *payloads* reçus sont sous forme d'objets Json, facilement découpables à l'aide de la librairie de manipulation de Json pour java : Jackson. Ces formats de Json sont définis à partir du format de *payload* de TTN comme on peut le voir sur la figure 4.

```
1 function Decoder(bytes, port) {  
2  
3   var decoded = {};  
i 4   var length=bytes.Length  
5   var gas_sensor={};  
6   var temperature={};  
7  
8   /**** Frame format (4 Bytes):  
9   *      B0      |      B1      |      B2      |      B3  
10  * gas_sensor MSB | gas_sensor LSB | temperature MSB | temperature LSB  
11  */
```

Fig. 4 Format d'un *payload* défini sur TTN.

Carte électronique

Après le test de la chaîne complète réalisée sur plaque d'expérimentation, les étudiants réalisent la carte électronique sous KiCad en intégrant tous les éléments rendant l'application autonome (cf. figure 5) (6).

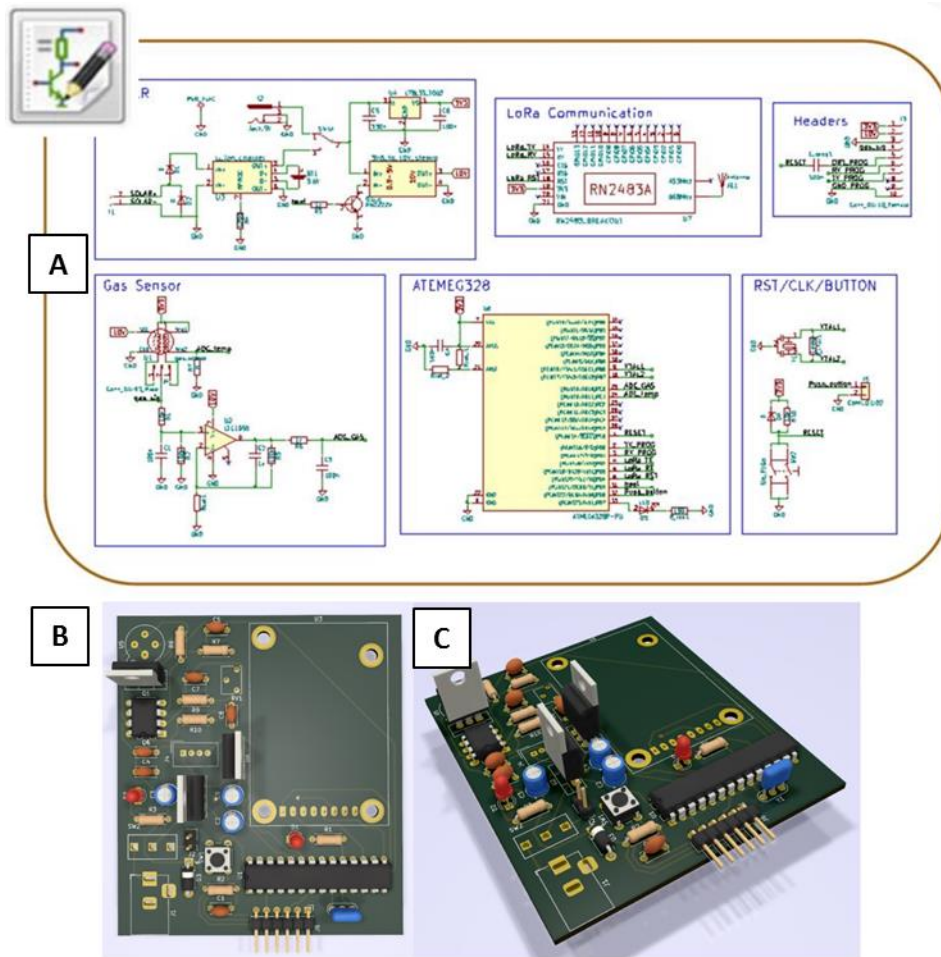


Fig. 5 (A) Schématique de la carte électronique réalisée sous KiCad, (B) et (C) vue 2D et 3D respectivement de la carte PCB qui sera réalisée et testée.

Présentation des données envoyées sur le cloud TTN : interfaçage avec Node-RED :

Une redirection des valeurs reçues sur le cloud TTN vers un serveur Node-RED permet ensuite de créer des interfaces graphiques de présentation des données (5). Il suffit pour cela d'installer la librairie "TheThingsNetwork" dans NodeRed, puis de configurer la partie "device" avec les identifiants de l'application TTN dédiée. Si la connexion est réussie, un voyant vert s'affiche sous l'élément « message » et indique "connected". On rajoute alors une fonction "get payload" à la suite du "device" afin de récupérer le message utile : `msg = { value: msg.payload['payload'] }; return msg`. Puis on connecte un afficheur "graphique en fonction du temps" pour tracer les données au cours du temps et une "jauge" pour tracer les valeurs instantanées (figure 6 (B), (C), (D)). En cliquant sur "Deploy", NodeRed nous fournit une URL, accessible depuis n'importe quel navigateur relié au réseau, qui donne accès au "dashboard" qui présente les données sous format graphique (cf. figure 6 (B, C, D)). Cette figure 6 (B), (C) et (D) présente la réponse du capteur de gaz à du monoxyde de carbone: "verte" (seuil normal sans exposition au gaz), puis "rouge" à cause d'une exposition à une concentration importante du gaz, et enfin "jaune" après un retour progressif à la normale après avoir stoppé l'exposition au gaz.

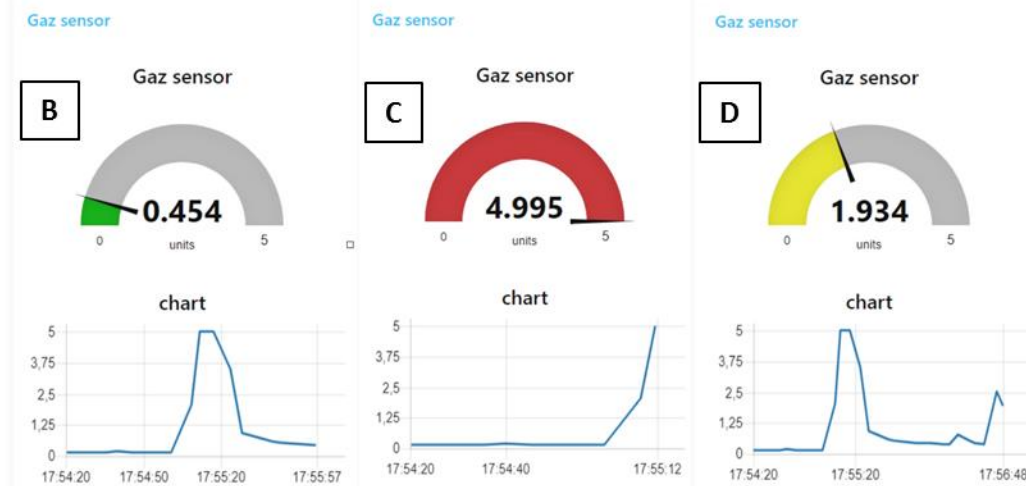
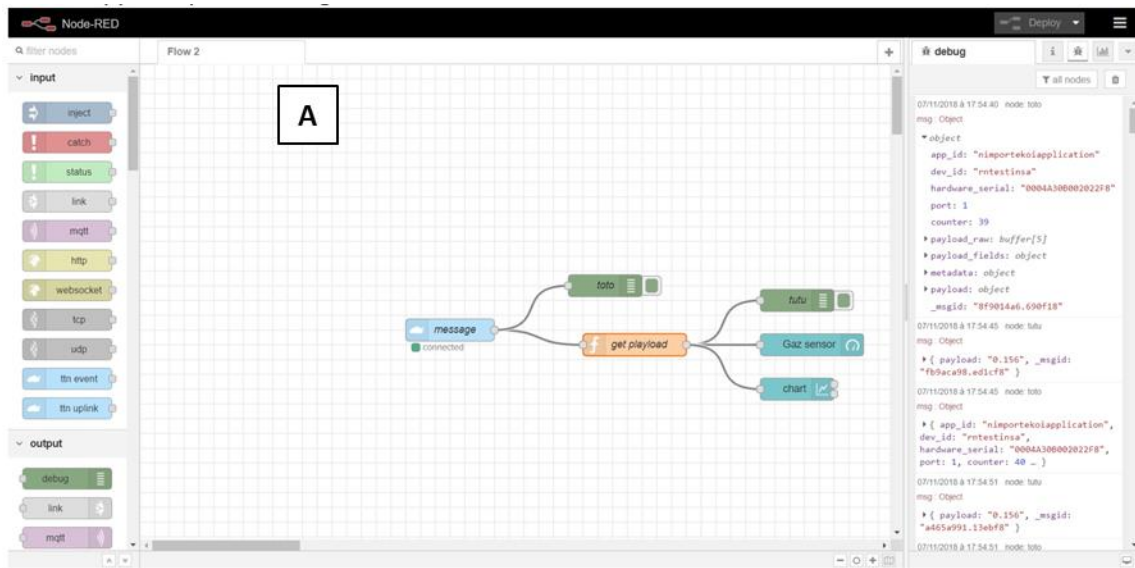


Fig. 6 (A) Interface NodeRed, (B), (C) et (D) "dashboard" NodeRed présentant les données du capteur au cours du temps lors de la soumission à une exposition au monoxyde de carbone, (B) sans exposition, (C) exposition d'une seconde environ, (D) exposition stoppée et retour à la normale.

Gestion de la consommation d'énergie

Enfin, un module « charger doctor » est inséré dans le circuit afin de mesurer la consommation électrique du *smart device* en fonctionnement (7). Le code du microcontrôleur est alors modifié pour optimiser la consommation électrique du *smart device*. A noter que dans ce cadre, l'utilisation d'un capteur de gaz à nanoparticules revêt toute son importance car son utilisation est possible à une température inférieure à celle des capteurs de gaz « industriels ».

III. Conclusion

Dans le cadre de la formation à l'INSA TOULOUSE portant sur l'internet des objets PTP ISS, nous avons développé un enseignement complet permettant de réaliser un capteur chimique communicant. Ce travail pratique se termine par la présentation et l'évaluation devant un jury composé d'industriels du secteur. Ce projet permet de mettre en pratique les différentes étapes de mise au point d'un nouveau produit innovant, cela tout au long de la dernière année d'école d'ingénieurs.

Remerciements

Les auteurs remercient Thierry Monteil et Daniela Dragomirescu (DGEI/LAAS) enseignants-chercheurs à l'INSA de Toulouse, co-créateurs du parcours complet PTP Innovative Smart System à l'INSA Toulouse. Ce travail é été réalisé avec le soutien financier du GIP-CNFM (Coordination Nationale de Formation en Micro-électronique et Nanotechnologies), du programme IDEFI-FINMINA ANR-11-IDFI-0017 (8,9), du LABEX NEXT, ainsi que de Toulouse-Ingenierie.

Références

1. ARDUINO : <https://www.arduino.cc>
2. ATMEGA328 datasheet : <http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328-datasheet.pdf>.
3. The thing network: <https://www.thethingsnetwork.org/>.
4. RN2483: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN2483>.
5. NodeRed : <https://nodered.org/>.
6. KiCad : <http://kicad-pcb.org/>.
7. Charger doctor: https://www.digikey.fr/product-detail/fr/adafruit-industries-llc/1852/1528-1497-ND/5774223?utm_adgroup=Test+and+Measurement&mkwid=s6qHUnrDn&pclid=278425132062&pkw=&pmt=&pdv=c&productid=5774223&slid=&gclid=CjwKCAiAkrTjBRAoEiwAXpf9Ccp8tvIIVp0iiOYnhwzeykDMO_CQfxnKQkUbUaDFugX2oOh0KRx56RoCjScQAvD_BwE
8. GIP-CNFM: Groupement d'Intérêt Public - Coordination Nationale pour la formation en Microélectronique et en nanotechnologies.
9. *Website*: <http://www.cnfm.fr/IDEFI-FINMINA> : Initiative d'Excellence - Formation Innovante en Microélectronique et Nanotechnologies, ANR-11-IDFI-0017. *Website*: <http://www.cnfm.fr/VersionFrancaise/actualites/FINMINA.html>