



Ampère

Unité Mixte de Recherche du CNRS - UMR 5005

Génie Electrique, Automatique, Bio-ingénierie

Thématique de la thèse : Électronique, systèmes embarqués communicants

Titre de la thèse

Développement de nœuds de réseau de capteurs sans fil autonomes pour la mesure et le calcul distribué en environnement contraint

Domaine et contexte scientifiques

Le constat qu'on peut faire actuellement sur les réseaux de capteurs sans fil est une maturité technologique qui conduit de nombreux industriels à proposer des solutions clés en main. Néanmoins, malgré cette offre plutôt large, les réseaux de capteurs sans fil restent encore assez peu déployés au regard de leur potentiel.

En effet, si les solutions technologiques actuelles répondent à une demande visant à transformer le capteur en capteur communicant, il reste encore des travaux à faire pour basculer complètement dans le paradigme du calcul distribué. En conséquence dès lors qu'il s'agit d'applications nécessitant une actualisation rapide des données ou un volume important d'échanges, les solutions actuelles montrent leurs limites par la limitation de la bande passante et/ou l'impact que peuvent avoir les solutions logicielles sur la consommation et donc la durée de vie du réseau.

Enfin, le déploiement de tels capteurs en environnement industriel, usuellement agressif vis-à-vis des systèmes électroniques sur des points de vue thermique et CEM, a minima est actuellement assez peu étudié, donc de fait répandu, et nécessite une approche spécifique dans la conception à la fois du nœud et du réseau.

Mots-clefs

Réseaux de capteurs sans fil, récupération d'énergie opportuniste, calcul distribué, FPGA, environnement sévère, conception RF

Objectifs de la thèse

Dans la continuité du travail fait dans la thèse de Mateusz Zielinski (Zielinski et al., 2017), l'objectif est ici de basculer sur un paradigme de calcul distribué ; à savoir, privilégier les solutions de calcul dans le réseau faites au travers de la connaissance locale d'un problème et sa résolution in-situ par collaboration des nœuds en proche voisinage, afin d'augmenter la réactivité du système en réduisant la latence et également de prolonger la durée de vie du réseau.

Une telle approche nécessite de développer des nœuds de réseau de capteurs présentant une faible consommation mais néanmoins une réelle capacité de calcul pérenne. Par ailleurs, en allégeant les contraintes sur le débit de communication, il peut être envisagé de travailler sur les transceivers RF (porteuse, modulation, architecture) afin de réduire la consommation de ce dispositif, gros « poste de dépense énergétique » dans la consommation globale d'un nœud.

Quatre types d'applications seront visés par la thèse :

- les applications pour lesquelles une mesure directe peut être réalisée mais dans laquelle la connaissance de l'environnement et de ses variations peut être d'une grande valeur ajoutée ;
- les applications où la mesure indirecte est impossible mais où une mesure répartie de proximité permet

- la reconstruction globale d'un espace physique donné par collaboration entre les points de mesure ;
- la mesure physique avec intégration de la signature physique du capteur (FFT ou autre) permettant à la fois de sécuriser les communications en s'en servant comme clé de cryptage mais également de diagnostiquer in-situ la bonne santé du capteur ou du dispositif qu'il mesure ;
- on pourra enfin profiter des compétences récentes du laboratoire dans le domaine de la plastronique pour développer des capteurs intégrés dont la forme (et donc la mesure optimale mais également la capacité de récupération d'énergie) peut s'adapter à différentes configurations, y compris dans une approche de capteurs intelligents répartis.

Dans cette optique, les éléments suivants sont à étudier :

- plateforme de nœud à capacité de calcul distribué : on privilégiera comme cible le FPGA au microcontrôleur de par sa capacité à proposer du parallélisme, des hautes performances couplées à de la reconfigurabilité permettant des calculs dans le réseau lui-même. De plus, dans une optique de développement industriel, le recours au FPGA peut permettre d'envisager facilement la réalisation d'un circuit intégré (ASIC) spécifique à l'application. Enfin le FPGA présente de bonnes prédispositions vis-à-vis des environnements contraints (en température et tension).
- transceiver RF : les solutions actuelles basées sur le standard IEEE 802.15.4 montrent leurs limites dès lors que la contrainte en énergie est élevée ou que l'application globale nécessite de forts débits d'échange (Du et al 2010). On cherchera à développer un transceiver permettant des communications à plus faible débit mais proposant à la fois une consommation réduite, une capacité à s'appuyer sur le FPGA pour des solutions éventuelles de radio logicielle, et enfin une aptitude à la récupération d'énergie. Enfin développer un tel transceiver dans une optique d'environnement contraint (température et tension) présente à la fois des verrous et des enjeux à potentiel.
- récupération d'énergie : les systèmes actuels de réseaux de capteurs sans fil visent la plus grande durée de vie voire l'indépendance énergétique au travers de solutions de récupération d'énergie. Dans certains cas, il est possible même de récupérer l'énergie du signal mesuré lui-même. La solution développée s'attachera à travailler sur cette dimension avec l'intégration d'algorithmes permettant d'évaluer la pertinence de prélever de l'énergie sur le signal mesuré et éventuellement de basculer sur un autre mode de récupération d'énergie de "secours". Par défaut les solutions de "secours" étudiées seront dans un premier temps la récupération d'énergie RF (rectenna) (Marian et al., 2012), RFID (Duroc et al., 2014) et thermique, c'est-à-dire des énergies disponibles par définition dans des environnements considérés comme sévères (milieu industriel).
- enfin les éléments précédents doivent être développés dans un contexte d'environnement sévère en termes de CEM et de température : il s'agira d'évaluer les limites de déploiement du système conçu et d'envisager des scénarios de fonctionnement en mode dégradé.

L'objectif de la thèse sera d'aboutir à l'obtention d'un nœud de réseau de capteurs sans fil pouvant apporter des réponses aux quatre points énoncés et démontrer, par un début de déploiement d'un réseau de capteurs sans fil (3 à 4 nœuds) en environnement industriel contraint en température et/ou pollution électromagnétique, la capacité à traiter des opérations complexes au sein même du réseau en autonomie énergétique.

Verrous scientifiques

Les verrous scientifiques, du fait de la transversalité de ce sujet sont nombreux :

- la récupération d'énergie sur le signal à mesurer sans altérer son intégrité allié à une capacité en dynamique à commuter sur une autre source de récupération d'énergie ;
- l'implémentation d'une capacité de calcul distribuée au sein d'un réseau de capteurs sans fil en conservant l'autonomie énergétique du réseau sur la dimension matérielle (réalisation physique du nœud) mais également logicielle sur l'ensemble du réseau (calcul distribué adaptatif sur des circuits électroniques à capacité calculatoire variable du fait de l'énergie tirée dans le réseau) ;
- le développement de transceivers très basse consommation présentant des capacités de récupération d'énergie dans un contexte de température et/ou CEM élevé ;
- le contexte global d'environnement contraint choisi (température élevée) qui met toutes les solutions actuelles en défaut.

Contributions originales attendues

Au-delà de la plateforme de nœud réalisée et du réseau minimal constitué de 3 à 4 nœuds présentant une première application de calcul distribué, cette proposition de sujet de thèse est avant tout exploratoire :

- 1) les éléments technologiques permettant de réaliser la mesure ne sont pas encore assemblés voire développés (transceiver RF, système de récupération d'énergie actif/passif, capteur de mesure de courant sans contact) : le sujet permettrait de démontrer une preuve du concept (proof-of-concept) niveau système des savoir-faire du laboratoire en systèmes intelligents communicants à récupération d'énergie.
- 2) permettre l'accès des réseaux de capteurs sans fil à de nouveaux débouchés dans les environnements contraints et intégrer la capacité de pouvoir faire plus que de la collecte de données sur des sites en environnement sévères
- 3) récupération d'énergie opportuniste : adaptable et multi-source.

Programme de recherche et démarche scientifique proposée

Cette thèse s'inscrit dans la construction d'une thématique de recherche qui relève à la fois :
de **l'émergence** d'une activité puisqu'elle propose de développer un savoir-faire autour du traitement in-situ et distribué de la mesure physique en autonomie énergétique et en réseau ;
et de la **fédération** puisqu'elle pourra aller s'appuyer sur les travaux déjà réalisés au sein du laboratoire, en particulier sur la récupération d'énergie où la thématique de mesure distribuée autonome pourrait permettre de fédérer quelques initiatives : il existe un certain nombre de « pièces élémentaires » développées au sein du laboratoire qui peuvent être assemblées dans une approche système afin d'en dégager des potentiels d'applications.

Il s'agit de construire une activité non-existante au laboratoire et pouvant irriguer d'autres activités existantes : un tel sujet de thèse permettrait de créer un "espace" dans lequel des actions visant à fédérer les activités de la récupération d'énergie pourraient être entreprise.

Cette proposition tend également à s'intégrer dans une pérennisation des compétences et savoir-faire du laboratoire dans les mesures en environnement contraint, en particulier dans le domaine des hautes températures.

Collaborations Ampère possibles du projet (discussions déjà initiées) : Christian Martin, Riccardo Scorretti, Charles Joubert, Jacques Verdier, Bruno Allard

Collaborations Ampère potentielles du projet (discussions à initier): équipe plastronique, Christian Vollaire, Arnaud Bréard, Julien Huillery (retournement temporel), acteurs de la haute température,...

Prévention et sécurité

1. Les moyens expérimentaux nécessaires à la thèse, en dehors des appareils d'instrumentation classiques disponibles sur le site UCBL sont relativement réduits en terme de budget : carte de développement, achat de composants intégrés, développement de PCB et les quelques circuits électroniques RF susceptibles d'être réalisés pourront faire l'objet d'un soutien du CIMERLY.
2. Pas d'habilitation particulière du fait des systèmes basse tension manipulés.

Encadrement scientifique :

Fabien Mieyeville : PU UCBL –laboratoire Ampère 34%

Jacques Verdier : MCF INSA Lyon – laboratoire Ampère 33%

Yvan Duroc : PU UCBL – laboratoire Ampère 33%

Financement de la thèse (origine, employeur, montant, durée du financement, etc.)

Contrat unique de 3 ans.

Potentialité de vacations d'enseignement ou contrat de monitorat.

Objectifs de valorisation des travaux de recherche :

1. Forme : publication et brevets
2. Volume de publications (conférence/revues, etc), brevets, autres : 3 conférences nationales, 1 conférence internationale, 1 revue internationale, brevet ?
3. Contraintes de confidentialité éventuelle : aucune
4. Calendrier prévisionnelle (même très prospectif) :

D'un point de vue planification, le doctorant se focalisera dans un premier temps sur la réalisation du nœud (FPGA + transceiver RF spécifique) puis sur la base de travaux existants s'intéressera au prélèvement de l'énergie d'alimentation à partir de la source de mesure ou de l'environnement ambiant (pour cela il s'appuiera sur l'existant du laboratoire), et enfin travaillera à une première application distribuée du réseau de capteurs sans fil conçu.

Profil du candidat recherché (prérequis)

Compétences en électronique analogique, numérique et conception de systèmes intégrés.

Il serait souhaitable que le candidat soit familier avec la programmation VHDL et les FPGA et qu'il ait une connaissance des bases du fonctionnement d'une chaîne radiofréquence.

Compétences qui seront développées au cours du doctorat

Développement de solutions à base de FPGA, conception de circuits intégrés, conception de transceivers radiofréquences, conception d'un réseau de capteurs sans fil, conception de systèmes à récupération d'énergie ; intégration de systèmes en environnement sévère, instrumentation et mesure.

Perspectives professionnelles après le doctorat

Industrie ou carrière de chercheur ou d'enseignant-chercheur dans le public.

Références bibliographiques sur le sujet de thèse

(Zielinski et al., 2017) Zielinski, M., Mieleville, F., Navarro, D., Bareille, O., 2017. A Distributed Active Vibration Control System Based on the Wireless Sensor Network for Automotive Applications, *Advances in Network Systems: Architectures, Security, and Applications*. Springer International Publishing, Cham, pp. 235–253.

(Du et al., 2010) W. Du, F. Mieleville, and D. Navarro, "Modeling energy consumption of wireless sensor networks by systemc," in *Proceedings - 5th International Conference on Systems and Networks Communications, ICSNC 2010*, pp. 94–98, August 2010.

(Marian et al., 2012) Marian, V., Allard, B., Vollaire, C., Verdier, J., 2012. Strategy for Microwave Energy Harvesting From Ambient Field or a Feeding Source. *IEEE Transactions on Power Electronics* 27, 4481– 4491. doi:10.1109/TPEL.2012.2185249

(Duroc et al., 2014) Duroc, Y., Vera, G.A., 2014. Towards Autonomous Wireless Sensors: RFID and Energy Harvesting Solutions, in: Mukhopadhyay, S.C. (Ed.), *Internet of Things: Challenges and Opportunities*. Springer International Publishing, Cham, pp. 233–255.

