HAL
open science

Smart Anything - Comment alimenter des milliards d'objets connectés ?

Guillaume Villemaud, Bogdan Stefanescu

To cite this version:

Guillaume Villemaud, Bogdan Stefanescu. Smart Anything - Comment alimenter des milliards d'objets connectés ?. [Rapport Technique] INSA LYON; SPIE ICS. 2020. hal-03020278

HAL Id: hal-03020278

https://inria.hal.science/hal-03020278v1

Submitted on 3 Jan 2021

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.

SPIE

Chaire IoT
SPIE - INSA Lyon

SMART ANYTHING

COMMENT ALIMENTER DES MILLIARDS D'OBJETS CONNECTÉS ?

LPWAN
WURx
Scatter Radio
Energy Harvesting
NVRam

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

citi lab

SOMMAIRE

Édito de Guillaume Villemaud et Bogdan Stefanescu 03

CHAPITRE 1
Des liaisons sans fil moins gourmandes en énergie 04

CHAPITRE 2
Éviter la consommation des temps d'écoute ou de veille 06

CHAPITRE 3
Et si l'on pouvait se passer de batteries ? 08

CHAPITRE 4
Mais finalement, que choisir ? 10

Chaire IoT SPIE-INSA Lyon en chiffres 11

À propos 12

ÉDITO

Smart Anything : comment alimenter des milliards d'objets connectés ?

Il est devenu évident depuis des années, même pour le simple amateur de nouvelles technologies, que le nombre des systèmes utilisant une connexion sans fil ne fait qu'augmenter. Les usages liés au nomadisme ou même simplement à la disparition de câbles jugés encombrants ou inesthétiques poussent à développer encore et toujours de nouvelles interfaces radio adaptées aux contraintes amenées par lesdits usages. Mais au-delà même des usages classiques de la connexion de l'humain au monde numérique, l'explosion de l'internet des objets (plus souvent dénommé IoT, de l'anglais *Internet of Things*) voit une explosion du nombre d'équipements connectés, équipements ayant des caractéristiques de taille, coût, débit, cycle et autonomie extrêmement variées. Cette tendance se trouve d'ailleurs parfaitement illustrée au travers de l'initiative européenne *Smart Everything Anywhere* qui démontre cette volonté d'offrir une connectivité dans tous les domaines.

La multitude et la diversité des objets connectés remettent en cause les méthodes classiques d'échange d'informations entre les nœuds. Le réseau devra composer avec un environnement changeant qui n'est pas maîtrisé en profondeur. L'interconnexion des objets connectés entraine des changements technologiques radicaux qui métamorphosent le cadre existant. Que ce soit dans le domaine grand public, dans le domaine médical, pour l'industrie 4.0, les bâtiments intelligents ou même les villes intelligentes, tous ces équipements ont au moins en commun une chose essentielle : pour communiquer, ils ont besoin d'énergie.

Un enjeu majeur du *Smart Anything* sera donc de garantir l'alimentation énergétique de ces milliards d'objets connectés, tout en en minimisant l'impact économique et écologique. Il est dès lors indispensable de dimensionner au mieux le système global en fonction des besoins essentiels de l'application. Les métriques classiques de performance (débit, latence, portée, QoS...) doivent être pondérées par de nouveaux critères : coût énergétique de l'information, autonomie, type d'alimentation ou même possibilité de maintenance du système et analyse du cycle de vie.

GUILLAUME VILLEMAUD,
Maître de conférences HDR, INSA Lyon

BOGDAN STEFANESCU,
Responsable du centre de compétences infrastructures, direction d'activité Grand-Est, SPIE ICS

GUILLAUME VILLEMAUD,
Titulaire d'un doctorat en électronique hyperfréquences, il a intégré l'INSA Lyon en 2003 en tant qu'enseignant-chercheur au département de génie électrique et au laboratoire CITI. Ses thématiques de recherche sont les architectures RF hautes performances pour les communications sans fil et les approches de réduction de la consommation des interfaces radio pour les objets communicants, la récupération d'énergie et la téléalimentation. Il est actuellement maître de conférences hors-classe habilité à diriger des recherches, responsable des relations internationales du CITI, Senior Member IEEE et URSI et vice-président de la commission C de l'URSI-France.

BOGDAN STEFANESCU,
34 ans, est diplômé de l'INSA Lyon, département télécommunications, services et usages. Après une première expérience en développement d'applications, il intègre SPIE ICS en 2010 en tant qu'ingénieur réseaux puis architecte spécialisé réseaux et datacenter (2015). Il est à présent responsable du centre de compétences infrastructures de la direction d'activité Grand-Est.

CHAPITRE 1

DES LIAISONS SANS FIL MOINS GOURMANDES EN ÉNERGIE

CHIFFRES CLÉS

2009
> Création de Sigfox

2010
> Standardisation du Bluetooth Low Energy (BLE)

105
> millions d'objets connectés actuellement en LoRa

30
> milliards d'objets connectés dans le monde en 2025 sur les réseaux mobiles 4G et 5G

L'internet des objets s'est imposé comme un vecteur majeur de développement économique et technologique, mais son énorme succès amène son lot de contraintes en matière de consommation et de batteries (pollution, maintenance, etc.). Les applications étant très diverses, différents standards se sont développés en fonction des applications spécifiques, notamment en termes de portée et de débit, avec le souci commun de réduire les besoins énergétiques. La consommation énergétique des objets connectés est l'un des principaux verrous technologiques. L'augmentation de l'autonomie à l'aide des batteries, même plus performantes, ne suffit pas pour répondre à cette problématique, l'objectif étant de rendre ces objets autonomes sur le plan énergétique.

Des liaisons à courte distance

Quand on parle de communication sans fil, on pense bien évidemment en premier lieu au lien radio et à sa capacité à transmettre de l'information, ce que l'on dénomme couche physique du protocole de communication. En parallèle des couches physiques hautes performances, des protocoles basse consommation sont apparus depuis plusieurs décennies déjà. Les précurseurs parmi les plus connus sont Bluetooth et ZigBee. Ces normes étaient destinées à établir des liaisons courte portée (de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres), avec peu d'information (faible débit) et une utilisation plutôt sporadique (faible *duty cycle*). Des évolutions comme le BLE (*Bluetooth Low Energy* ou *Bluetooth Smart*) ont permis de réduire la consommation de ces systèmes en visant clairement de scénarios de type internet des objets. Une puce radio ZigBee ou Bluetooth aura généralement besoin de 30 à 50 mA (en communication), là où une puce BLE peut descendre en-deça de 10 mA.

Vers les très grandes portées

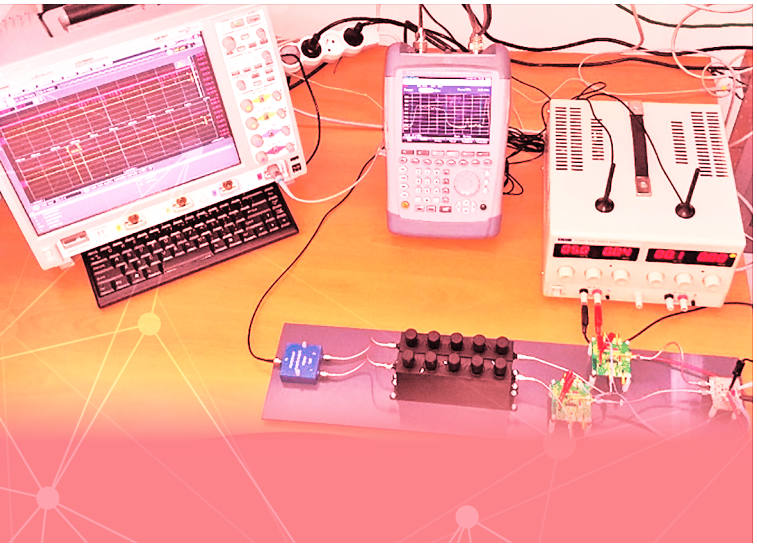
Plus récemment, des réseaux *Low Power Wide Area Network* (LPWAN ou réseau basse consommation longue portée), spécialement conçus pour l'internet des objets, ont émergé. La technologie Sigfox en est un exemple extrême, particulièrement asymétrique, où l'objet communicant est conçu pour être le plus simple possible, permettant une très faible consommation. Cette simplicité est contrebalancée par les performances de la station de base. Cette technologie permet de très grandes portées (plusieurs dizaines de kilomètres) avec une consommation de l'objet réduite et donc une grande autonomie. D'autres approches, comme LoRa, LTE-M ou NB-IoT, visent le même genre de scénarios, avec divers compromis entre portée, débit et consommation. Particulièrement, ces systèmes visent à collecter en un point (généralement nommé puits ou point d'accès ou encore station de base) les informations remontant d'un très grand nombre d'objets, pouvant se compter en milliers. Avec autant d'objets associés à chaque puits de collecte, le partage d'accès au medium (MAC), avec un fort impact sur la consommation globale du réseau, est également une grande problématique. En effet, si ce partage d'accès est mal géré (tous les objets cherchent à envoyer leurs informations en même temps à la même fréquence, par exemple) les collisions et interférences dégradent fortement le taux de remontée, conduisant à la nécessité de réémettre les informations, et donc à une importante surconsommation des nœuds. L'optimisation globale de ces systèmes nécessite dès lors une prise en compte complète partant du matériel (hardware analogique et numérique), de la couche physique (PHY, définie par le standard de communication utilisé) et de la couche MAC.

« L'optimisation énergétique des capteurs est un axe d'amélioration indispensable vis-à-vis des futurs déploiements massifs d'objets connectés. Plusieurs facteurs poussent à la réduction de consommation des capteurs : l'augmentation de la durée de fonctionnement d'un équipement alimenté par batterie ; l'augmentation de la fréquence d'envoi, bidirectionnelle ; la réduction des déchets électroniques engendrés. L'ensemble de ces éléments permettra de rassurer les entreprises dont les projets digitaux nécessitent des déploiements massifs d'objets. »

VAHAN SARAFIAN,
Architecte IoT au sein de la BU Smart Data & IoT de SPIE ICS

CHAPITRE 2

ÉVITER LA CONSOMMATION DES TEMPS D'ÉCOUTE OU DE VEILLE



Une part très importante de la consommation des systèmes IoT est liée aux périodes de mise en veille ou d'écoute passive. En effet, pour pouvoir recevoir de l'information en provenance du réseau (requête, canal de contrôle, configuration, etc.), les objets communicants doivent avoir la capacité d'écouter le medium radio. Or, même si la consommation instantanée est plus importante à l'émission qu'à la réception, ces équipements passent généralement bien plus de temps à écouter qu'à transmettre.

De plus, quand une station de base transmet de l'information, les objets doivent usuellement décoder au moins partiellement le message pour savoir s'ils en sont destinataires ou non, ce qui conduit à un important gâchis (décodage de messages non utiles au nœud en question). La consommation énergétique des objets connectés étant l'un des principaux verrous technologiques, l'augmentation de l'autonomie à l'aide de batteries plus performantes ne suffit pas pour répondre à cette problématique, l'objectif étant de rendre ces objets autonomes sur le plan énergétique.

Permettre d'éteindre complètement l'interface radio principale

Pour réduire ce problème, le concept de *Wake-Up Radio* (ou WURx, parfois appelé également récepteur d'activation), est alors apparu. L'idée principale d'un mécanisme de *Wake-Up* est de pouvoir éteindre partiellement ou totalement l'interface radio principale d'un objet (même les modes de veille usuels ayant une consommation non négligeable sur le long terme) et de ne réveiller cette interface qu'en fonction des réels besoins d'échange d'information. Ce réveil peut alors être géré de deux façons :

- soit une fonction de haut niveau gérée par le protocole MAC effectue des réveils périodiques spécifiés à l'avance,
- soit il s'agit d'une partie matérielle ajoutée qui commande le réveil à partir de la détection d'un signal d'activation.

Dans le premier cas (MAC), cela suppose de maintenir toujours en activité une routine de *timer* permettant au système de savoir quand se réveiller (ce qui a donc un coût énergétique même s'il est très faible), mais cela impose aussi de faire un choix au préalable dans le compromis entre économie d'énergie et latence du système.
En effet, si les éveils sont très espacés, le gain en consommation sera conséquent, mais le système ne pourra réagir qu'après un temps potentiellement important.

Dans le second cas (PHY), une interface radio additionnelle très faible consommation est ajoutée à l'objet communicant. L'interface principale peut donc être totalement éteinte, son éveil étant commandé par l'interface auxiliaire. Bien évidemment, cette interface auxiliaire doit avoir une consommation très inférieure à l'interface principale pour que le gain énergétique soit significatif. De plus, ce gain dépendra du taux d'utilisation du système : plus les échanges sont sporadiques, plus le gain est intéressant. Il existe des WURx passives, actives ou quasipassives.
Logiquement, une interface passive serait idéale car elle n'entraînerait aucune consommation, mais ces architectures, basées sur la détection d'énergie, réveillent le système dès qu'un signal est capté dans la bande de fréquence. Cela entraîne donc de nombreux faux réveils, ce qui crée des consommations inutiles. De plus, ces WURx passives ont généralement une mauvaise sensibilité, ce qui se traduit par des portées relativement faibles (on ne peut en clair éveiller que des nœuds proches du puits). Les WURX actives ou quasipassives ont, quant à elles, une consommation non nulle, mais permettent d'augmenter la portée et/ou d'intégrer un mécanisme d'identification. Ainsi, le récepteur auxiliaire sera capable de déterminer si le signal capté est bien un ordre de réveil destiné à l'objet en question ou à un groupe d'objets auquel il appartient.

« Le laboratoire CITI mène une partie de sa recherche afin de comprendre les mécanismes responsables de l'empreinte carbone des communications radio et proposer des solutions pour la diminuer au maximum. Un exemple parlant est l'étude des récepteurs radio ultra faible consommation « wake-up radio ». Ces récepteurs, qui ont une consommation de quelques ordres de grandeur plus faible que les solutions classiques, scrutent le canal de communication et activent l'interface radio principale uniquement en cas de besoin, évitant les modes de veille. L'IoT est une des cibles pour ces systèmes et, vu le nombre attendu d'objets communicants qui seront déployés, la réduction de l'énergie consommée devient énorme. »

FLORIN HUTU,
Maître de conférences au laboratoire CITI

CHAPITRE 3

ET SI L'ON POUVAIT SE PASSER DE BATTERIES ?

CHIFFRES CLÉS

75
> milliards d'objets connectés prévus en 2025

44 %
> du coût d'un système IoT est dans la maintenance

20 %
> de la consommation électrique mondiale en 2025 due au numérique

1 100
> TWh en 2025, c'est la consommation annuelle en électricité de l'ensemble des appareils connectables selon l'Agence Internationale de l'Énergie

Des milliards d'objets connectés, cela veut aussi dire des milliards de piles ou de batteries. En plus de l'empreinte globale sur la consommation énergétique mondiale, cela induit également des questions sur le coût de la maintenance de ces équipements ainsi que sur l'empreinte écologique de ces batteries. En prenant en compte la croissance exponentielle du nombre d'objets connectés, les batteries et les objets pourraient être une source considérable de déchets électroniques. Permettre à certains de ces équipements de fonctionner sans batterie apparaît donc comme un enjeu primordial, autant sur le plan économique qu'écologique.

Réseaux sans fil, alimentation sans fil ?

Une première manière d'appréhender la conception d'un système ayant une connexion de données sans fil et sans batterie est de faire en sorte que l'équipement soit également alimenté sans fil. Cela ne résout pas la question de la facture énergétique globale du système mais permet de supprimer le besoin de stockage au niveau des objets connectés et de ne les alimenter qu'au juste besoin. Les principes de téléalimentation des systèmes ne sont pas nouveaux, mais de grands progrès dans les rendements, combinés à la baisse de l'énergie nécessaire au fonctionnement des interfaces, rendent désormais ces technologies envisageables dans un nombre croissant de scénarios.

Divers moyens existent d'effectuer cette télé-alimentation : optique, radio ou même mécanique.

- Les systèmes optiques (infrarouge ou laser) permettent de transférer quelques watts sur des dizaines de mètres avec des rendements entre 10 et 20 % mais nécessitent une visibilité directe, un pointage précis et une surface de réception conséquente.

- Les techniques radio basées sur les ondes électromagnétiques sont principalement de deux types : en champ proche et en champ lointain. En champ proche (couplage inductif ou résonance magnétique), comme le standard de recharge sans fil Qi, les rendements sont intéressants, mais sur de très courtes portées. Par contre, les techniques de champ lointain (par exemple à 2,4 ou 5,8 GHz) peuvent permettre des portées plus importantes (jusqu'à la centaine de mètres dans certains cas), mais au prix d'un rendement global qui chute fortement en fonction de la distance. Cependant, ces techniques radio n'ont pas nécessairement besoin de vue directe. Elles peuvent réutiliser les antennes déjà existantes pour l'interface de communication. De récents travaux ont permis d'optimiser les formes d'ondes employées au niveau des sources pour améliorer encore les portées.

- Quant aux techniques mécaniques, ce sont encore essentiellement des pistes de recherche qui consistent à guider des oscillations le long de pièces métalliques pour en récupérer l'énergie vibratoire. Quels que soient les rendements futurs de ces approches, celles-ci resteront a priori limitées à des scénarios d'usage très spécifiques et sur de courtes distances.

Utilisons l'énergie ambiante

Enfin, la solution idéale serait bel et bien de pouvoir faire fonctionner les systèmes communicants uniquement avec l'énergie qu'ils sont capables de puiser dans leur environnement direct (principe de grappillage ou *harvesting*). Ici encore, les modes de récupération d'énergie sont nombreux : mini panneau photovoltaïque, micro-éolienne, piezoélectrique (vibratoire), gradient de température ou ondes électromagnétiques. Les ordres de grandeur varient énormément : en solaire, on peut atteindre plusieurs mW/cm² en extérieur, en vibratoire ou éolien quelques centaines de µW/cm², et en thermique ou radio, de l'ordre de quelques µW/cm². Mais cette ressource énergétique n'est pas aussi disponible et constante suivant les situations. Il peut alors être intéressant de combiner différents types de *harvesting* pour garantir une alimentation régulière du système. **De plus, ces apports énergétiques étant très fluctuants, il sera généralement nécessaire d'utiliser un stockage** (supercondensateur, par exemple). En outre, ces alimentations très intermittentes entraînent également des contraintes sur le déroulement des logiciels embarqués. L'utilisation de mémoires non volatiles (type NVRam) et de systèmes d'exploitation spécifiques sera alors nécessaire. Pour compléter ces variations, il peut aussi être pertinent de combiner ces récupérations énergétiques avec les approches vues précédemment : téléalimenter le système quand l'apport du *harvesting* est trop faible ou associer un WURx pour n'utiliser cette ressource qu'à bon escient.
Le concept de Scatter Radio est apparu plus récemment. Ces systèmes n'émettent pas d'ondes radio mais se contentent de modifier les ondes ambiantes de manière à ce que l'équipement destinataire soit capable de percevoir ces modifications. L'information est ainsi transmise par décodage de ces perturbations. L'approche est encore à l'étude. Elle pourrait être capable de faire communiquer deux tags RFID entre eux.

CHAPITRE 4

MAIS FINALEMENT, QUE CHOISIR ?

Quelle techno dois-je choisir ? La question est vaste car les paramètres sont nombreux et chaque approche a ses avantages et inconvénients, mais aussi son niveau de maturité propre.
Ce choix sera donc très dépendant de l'application : son *duty cycle*, la quantité des informations à transmettre, le fonctionnement simplex ou duplex, la symétrie des transferts, la portée nécessaire, la mobilité ou non des éléments, le potentiel de *harvesting* ou encore le besoin de sécurisation de la communication. Voyons trois exemples aux caractéristiques bien différentes.

Maison intelligente

Dans le développement de maisons intelligentes, il y a déjà deux approches, selon que l'on se place en construction ou en rénovation. En construction, il sera plus facile de prévoir des câblages dédiés aux systèmes IoT, alors qu'en rénovation les systèmes sans fil seront préférés. Dans ce domaine, les portées sont globalement faibles, les débits ainsi que les taux de remontée d'information, variables. Une grande hétérogénéité des services fait que l'on aura un mélange de systèmes fixes et mobiles. Des connexions type BLE ou ZigBee seront donc appropriées si le système est centralisé via une passerelle (box, par exemple, ou relai via un réseau LPWAN). Beaucoup d'équipements sollicités sporadiquement pourront grandement bénéficier de WURx ou même téléalimenter à partir de la passerelle.

Industrie 4.0 : maintenance prédictive

Dans un environnement de production où l'on veut équiper de nombreuses machines pour de la maintenance prédictive ainsi que des capteurs pour monitorer l'environnement de travail, les distances peuvent être plus importantes, le taux de remontée d'information élevé et les débits dépendants du nombre de grandeurs mesurées. Cet environnement est très propice à la récupération d'énergie (thermique ou vibratoire par exemple) ou même à la téléalimentation radio. Pour une gestion en interne, on pourra privilégier des normes courte portée avec plusieurs passerelles, mais des standards LPWAN seront plus appropriés à une gestion externalisée.

Smart Metering

Quant au relevé à distance de grandeurs ou de métriques sur un très large périmètre (relevé de compteurs, gestion de parcs, etc.), où les portées seront en kilomètres mais avec très peu d'informations à des cadences très lentes (intervalles en dizaines de minutes ou en heures), les LPWAN seront naturellement privilégiés. La durée de vie et la maintenance constitueront un enjeu important, mais la distance rendra la téléalimentation impossible.
La cadence lente laisse le temps d'accumuler de l'énergie récupérée avant l'envoi de données. Si les sources de récupération sont suffisantes, une approche de *Wake-Up* niveau MAC pourra permettre de n'envoyer des données que quand cela est requis.

Une Chaire IoT pour IMAGINER LES USAGES DE DEMAIN

4 axes de recherche

- Déploiement de masse et logiciels embarqués pour l'IoT
- Sécurisation et respect de la vie privée
- Architecture de réseaux cognitifs
- Objets connectés : low energy, zero battery

01 juillet 2016 : signature officielle de la Chaire IoT

1 partenariat

SPIE et INSA Lyon, porté par la Fondation INSA Lyon

1 écosystème de partenaires

ADIRA, BOSCH, CA3B, EGIS, FFSTAR, IRT SystemX, Métropole Grand Lyon, MINALOGIC, RTONE, SIDD, SITIV, Visioglobe

3 ans de production et de transmission

20 publications
(18 conférences, 1 journal, 1 thèse)

38 missions,
dont 1 mobilité longue à Princeton

3 plateformes
- LoRa (2 antennes gateways)
- YOUPI (20 nœuds gateway/Edge IoT, 1 cloud)
- UrPolSens (12 capteurs de qualité de l'air)

1 plateforme exploratoire : SCENE
(prévision 5 capteurs parking, 20 capteurs QVT, 2 clouds)

1 école d'hiver européenne IoT
avec 30 participants

9 recrutements au sein de la Chaire
(7 doctorants, 1 ingénieur, 1 stagiaire)

28 diplômés INSA Lyon recrutés chez SPIE,
10 apprentis et 21 stagiaires depuis 2016

À PROPOS...

... de SPIE ICS

Filiale de services numériques de SPIE France, SPIE ICS est spécialisée dans les services liés aux infrastructures ICT, depuis l'environnement utilisateurs jusqu'au data center. Sa vocation est de « co-construire » avec ses clients ETI et grands comptes des services innovants adaptés à leurs métiers, pour accompagner la transformation digitale et simplifier l'expérience du numérique.

... de SPIE France

SPIE France, filiale du groupe SPIE, est un acteur majeur de la transition énergétique et numérique. Ses cinq filiales interviennent sur quatre marchés stratégiques : e-fficient Buildings, Smart City, Energies et Smart Industry.

... de SPIE

SPIE est le leader européen indépendant des services multitechniques dans les domaines de l'énergie et des communications.

www.spie.com
@spieicsfrance
@spiegroup

... de l'INSA Lyon

L'INSA Lyon est l'une des plus Grandes Écoles d'ingénieurs françaises. Pluridisciplinaire, internationale, elle forme en cinq ans des ingénieurs pluricompétents, humanistes, innovants et dotés d'un esprit entrepreneurial. Premier des INSA, créé en 1957 avec une ambition d'ouverture sociale, l'INSA Lyon diplôme plus de 1000 ingénieurs par an dans 9 spécialités, et délivre environ 150 doctorats par an et une centaine de mastères. L'INSA Lyon est, avec 770 enseignants, enseignants-chercheurs et chercheurs et 23 laboratoires, un pôle de recherche internationalement reconnu.

www.insa-lyon.fr
@insadelyon

... du laboratoire CITI

Le CITI, Centre of Innovation in Telecommunications and Integration of Service, est un laboratoire académique associé à l'INSA Lyon et à l'INRIA. Ses domaines de recherche relèvent des sciences du traitement de l'information, des réseaux et des communications pour adresser les problèmes liés au développement de l'internet des objets.
Ces réseaux planétaires d'objets fournissent un continuum numérique pour lequel le laboratoire CITI propose des architectures hétérogènes de communication sans fil incluant la mobilité, différents protocoles d'accès, des systèmes embarqués autonomes, des services distribués ubiquitaires et adaptables.

www.citi-lab.fr
@citi_lab

SPIE ICS

148, avenue Pierre Brossolette
92247 MALAKOFF Cedex
Tél. : +33 (0)1 41 46 41 46
Fax : +33 (0)1 41 46 41 47

www.spie-ics.com

INSA Lyon

20, avenue Albert-Einstein
69100 VILLEURBANNE
Tél. : + 33 (0)4 72 43 83 83
Fax : + 33 (0)4 72 43 85 00

Conception-Réalisation : MotàMeaux

SPIE

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

citi lab