par Jean-Charles Le Buntel et Yves Raingeaud

Le contexte de recherche, de partenariat industriel et de développement d'activités pédagogiques présenté ici est celui des **courants porteurs en ligne, une technologie de communication permettant de transmettre des informations entre deux prises de courant électrique**, *en prenant comme médium de transmission, le réseau électrique des habitations.*

Convergence numérique dans l'habitat

Caractérisation du réseau électrique domestique vis à vis de la transmission par courants porteurs en ligne

Le contexte sociétal actuel nécessite de plus en plus d'infrastructures de télécommunication à l'échelle de l'habitat. Le flux des informations arrivant à la porte de nos maisons ne cesse de s'accroître grâce au développement et au déploiement des infrastructures de télécommunications : le Réseau Téléphonique Commuté, les liaisons ADSL, le téléphone mobile, et maintenant la fibre optique. A l'incitation à communiquer pour le divertissement (jeux en ligne, vidéo à la demande, internet) s'ajoutent des raisons de sécurité dans tous les sens du terme (dispositifs de maintien à domicile ou d'aide à la personne, alarme anti intrusion ou incendie, visiophone…) ou des logiques de confort ou de développement durable (domotique, confortique, gestion énergétique de la maison…). Toutes ces finalités imposent la circulation d'informations entre les différents dispositifs ou appareils concernés. Ces informations peuvent être de tous types : voix, données, images, on parle alors de convergence numérique.

Trois solutions en lice

Cette nécessité de communication tous azimuts au sein de l'habitat accélère le développement de technologiques de communication complémentaires afin de satisfaire la demande de débits de données de plus en plus importants. Trois solutions sont le plus souvent en lice. Nous les classerons à partir des supports de transmission. Il y a tout d'abord la liaison Ethernet (câble filaire) reliant les deux dispositifs devant communiquer (prises RJ45). Cette solution offre des débits élevés mais devient coûteuse ou peu pratique lorsque des câbles doivent être déployés. Une deuxième solution présente l'avantage de se dispenser des câbles, c'est la liaison sans fil comme le Wifi. Le signal étant émis dans l'espace environnant, peut se poser le problème de confidentialité des données. Le débit reste moyen et surtout fonction de la portée de la liaison inhérente à la configuration des locaux (zones d'ombre). Une troisième alternative consiste à utiliser

par Jean-Charles Le Buntel
et Yves Raingeaud

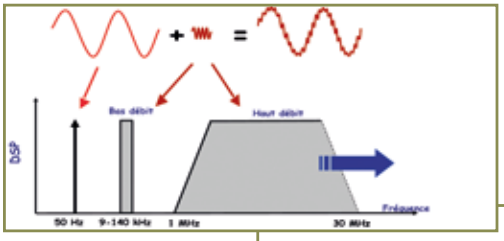


Figure 1 :
Signal électrique et signal CPL.

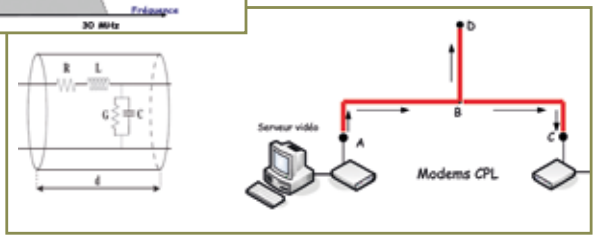


Figure 2 : Structure filaire pour mesurer et simuler le paramètre de transmission entre les points A et C. Décomposition des câbles en cellules élémentaires.

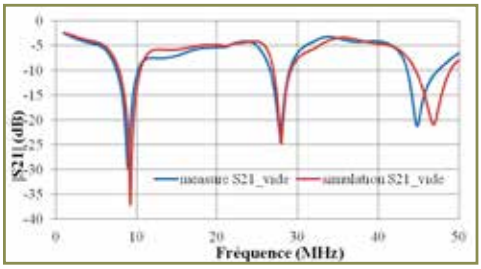


Figure 3 :
paramètre de transmission mesuré et simulé.

le réseau électrique qui présente l'avantage d'être déjà installé dans toutes les pièces d'une maison. Cette technique est appelée CPL (communication par Courant Porteur en Ligne). Le réseau électrique d'une maison est parcouru par une tension caractérisée par sa fréquence (50 Hertz, elle change de sens 50 fois par seconde) et son amplitude (230 Volts). La technologie CPL consiste à additionner à ce signal d'énergie une information de fréquence beaucoup plus haute et d'amplitude bien plus faible (de l'ordre de 0,5 Volt). (cf. Figure 1).

Suivant les applications visées, on distingue le CPL bas débit (entre 9 et 140 kHertz) et le CPL haut débit (entre 1 et 100 MHertz). Le premier est utilisé pour des applications peu gourmandes en débit, telles la domotique ou la commande des compteurs pour les tarifs jour-nuit par EDF. Le second est utilisé pour la transmission de données multimédia dans l'habitat. Le dispositif permettant d'injecter l'information sur le réseau électrique ou de la récupérer est appelé coupleur ou modem CPL. Il est par exemple associé à une « box » pour réinjecter sur le réseau électrique ce qui arrive depuis la prise téléphonique. L'inconvénient de cette solution est la performance variable selon le réseau électrique qui n'est pas conçu au départ pour cette utilisation.

Un vrai partenariat

Ce travail de recherche est mené au sein du GREMAN et pour partie en collaboration avec le L.A.N. au travers de thèses CIFRE, de projets et de stages d'étudiants.
Le GREMAN (Groupe de Recherche En Matériaux, Microélectronique, Acoustique et Nanotechnologies) est un laboratoire de l'Université François Rabelais de Tours regroupant une quarantaine d'enseignants-chercheurs et chercheurs et une cinquantaine de doctorants et post-doctorants.

Le département Génie Electrique et Informatique Industrielle de l'I.U.T. de Tours est l'entité pédagogique où interviennent les personnes universitaires travaillant sur le projet. Le programme de D.U.T. balaie les domaines du génie électrique (traitement du signal et télécommunications, distribution et conversion de l'énergie électrique) et de l'informatique industrielle (programmation pour l'électronique embarquée, automatismes industriels et réseaux).

A cela s'ajoute une formation scientifique et humaine (culture et communication, anglais, mathématiques et sciences physiques). La formation est finalisée par un stage de 12 semaines en entreprise (au quatrième semestre de la formation). Le département délivre aussi une licence professionnelle, Electronique Analogique et Microélectronique. Y sont abordés les technologies des circuits, des CMS aux circuits microélectroniques, les fonctions de l'électronique, l'instrumentation pour l'électronique et l'instrumentation programmable. Cette formation intègre un projet tutoré de 150 heures et se finalise par un stage de 16 semaines en entreprise.
L'opportunité de travaux avec les étudiants peut être aussi bien les projets tutorés que les stages.
Le Laboratoire des Applications Numériques (L.A.N., 37 310 TAUGINY) est une PME d'une dizaine de personnes appartenant au groupe HF Company. Son cœur de métier est le test d'interopérabilité de modems ADSL, le test de conformité de produits CPL devant satisfaire à la norme HomePlug AV de même que l'élaboration de tests pour les futurs dispositifs pour les réseaux de fibres optiques.

Le LAN dispose par ailleurs d'une plateforme technologique : la maison numérique. C'est un appartement de type T3 entièrement équipé, avec un réseau électrique maitrisé, reproduit dans des laboratoires juxtaposés. Cette infrastructure permet de faire des tests grandeur nature sur une habitation.

Problématique scientifique

La technologie CPL met le réseau électrique à contribution. Elle l'utilise comme support physique pour la transmission des signaux. Cependant, d'une habitation à l'autre, l'architecture du réseau est changeante. Des normes régissent la structure de l'installation électrique à sa conception, et ensuite, bien souvent celle-ci évolue au gré des envies des habitants. Pour rendre ce squelette de fils de cuivre cachés mieux communicant, il faut en maitriser les constituants que sont les câbles et la façon dont ils sont reliés entre eux, la disposition des prises qui y sont fixées, les appareils électriques qui y sont connectés… de même que les coupleurs CPL, dispositifs d'interface entre le réseau et l'appareil communicant (cf. figure 2).
L'étude des câbles et de l'effet de leur agencement permet de caractériser le support de communication en cuivre, la couche physique. Les propriétés des câbles aux fréquences CPL doivent être estimées. En effet, le fabricant de câble conçoit un fil pour la distribution de l'électricité et non pour la communication par CPL. Le procédé consiste à utiliser un analyseur de réseau, appareil d'instrumentation électronique injectant un signal, dont les fréquences correspondent à celles de la bande CPL, à une extrémité d'un tronçon de conducteur. Il recueille le signal à l'autre extrémité.
Pour valider notre modèle d'un petit morceau de câble, assimilable à une cellule élémentaire, nous avons construit un réseau filaire constitué de plusieurs câbles et relevé le paramètre de transmission entre les extrémités de deux de câbles du réseau. Parallèlement, nous avons reproduit la configuration expérimentale à l'aide d'un logiciel de CAO électronique en décomposant chaque câble comme une suite de cellules élémentaires (cf. figure 2) et en simulant le comportement électrique du réseau imité.

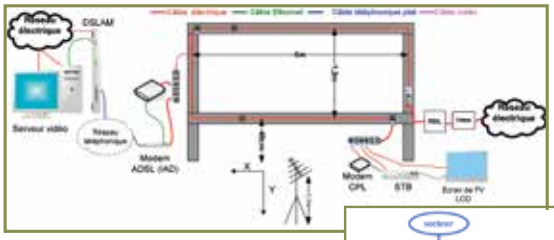
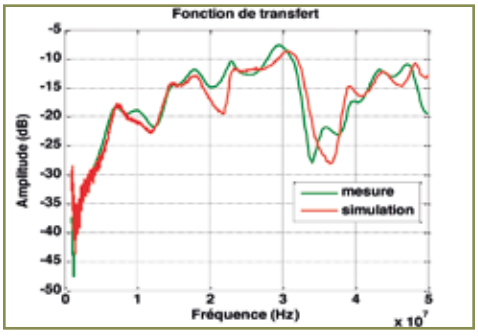


Figure 4 :
Représentation de système de transmission de flux vidéo par CPL.

Figure 5 :
Schéma simulé du système de transmission de flux vidéo par CPL.

Figure 6 :
Comparaison du paramètre de transmission entre les points A et B.



Les résultats comparés du paramètre de transmission sont visualisés figure 3.
Le modèle de cellule élémentaire développé est utilisé dans un logiciel de CAO électronique gratuit (LTSpice). Cet outil logiciel permet d'élaborer des réseaux filaires plus complexes et constitués de câbles différents, à condition de disposer du modèle de chaque type de câble, et d'analyser l'effet de différentes architectures sur le paramètre de transmission.

Effet des appareils domestiques « branchés »

Chaque prise de courant non utilisée est responsable d'un écho. Les appareils domestiques branchés vont modifier, voire atténué ce phénomène d'écho. En contre partie, ils amènent du bruit tout aussi néfaste à la qualité de la liaison par CPL. Leur étude est tout aussi importante que celle des câbles. Toujours dans la perspective de reproduire par modélisation les phénomènes mis en jeu, il est nécessaire de caractériser les appareils électriques pour en obtenir un modèle. La difficulté réside dans la variété des appareils existants, dans les multiples modes de fonctionnement de certains (lavage, rinçage, essorage pour une machine à laver…), de la nécessité de les analyser alors qu'ils sont branchés, sous une tension dangereuse pour l'homme et aussi préjudiciable pour les appareils de mesure électroniques nécessaires. Pour cela, une technique de mesure en deux temps, à l'aide de coupleurs, a été mise au point.

Il est ainsi possible de relever le comportement électrique des appareils domestiques. Ces relevés sont soit directement intégrés dans l'outil de simulation développé, soit exploités pour en extraire un schéma électrique lui-même exploitable avec l'outil de simulation. Le coupleur CPL réalise l'interface entre le réseau électrique et le dispositif d'émission réception de signaux (données multimédias, contrôle commande à distance…).

Simulation d'un réseau complexe

Un réseau électrique a été construit, avec un disjoncteur en tête de ligne, plusieurs prises de courant pour brancher différents appareils (télévision, modem ADSL, STBox…) et permettre ainsi la transmission de flux vidéo du modem ADSL vers la télévision en utilisant le réseau électrique (cf. figure 4). L'objectif de cette expérimentation était double : valider l'outil de modélisation du réseau avec les charges branchées sur une structure plus complexe et évaluer le rayonnement électromagnétique que peuvent induire les transmissions par CPL. La structure simulée est schématisée sur la figure 5. La comparaison des grandeurs mesurées et de celles simulées (cf. figure 6) montre une bonne concordance des résultats et valide l'outil développé sur une structure plus complexe.

Des activités pédagogiques

Cette thématique de recherche liée à un partenariat industriel a fait l'objet de nombreux sujets d'étude pour les étudiants de DUT comme de licence professionnelle. Des sujets ont été développés aussi bien dans le laboratoire GREMAN que dans l'entreprise LAN. Ces recherches se prêtent bien à la réalisation de projets ou de stage. En effet, elle nécessite de nombreuses expérimentations qui restent à la portée des étudiants (mesure de champs électromagnétiques avec des antennes et un analyseur de spectre, mesure de paramètres S avec un analyseur de réseau vectoriel, mesure d'impédances avec un analyseur d'impédance…). Les techniques de mesures, même si elles nécessitent parfois l'utilisation d'appareils complexes, permettent aux étudiants d'approfondir leurs connaissances dans des domaines porteurs. La réalisation des coupleurs fait appel à de conception de circuits électronique, domaine important dans la formation académique dispensée. Par ailleurs, l'outil de simulation a été choisi pour sa simplicité, afin qu'il soit utilisable par n'importe quel technicien. Il est aussi utilisé dans la formation à l'IUT.
Pour les étudiants de licence professionnelle, la formule projet tutoré de 20 jours répartis sur les semaines d'enseignements, suivi d'un stage de 16 semaines permet de s'imprégner d'un sujet pendant la période du projet tout en travaillant au sien de l'entreprise. Lorsqu'arrive le temps du stage, l'intégration dans l'entreprise est plus rapide, l'étudiant y ayant déjà ses repères. Ces travaux menés dans le cadre d'une thèse CIFRE avec le LAN ont mobilisés une dizaine d'étudiants de deuxième année de DUT ou de licence professionnelle sur quatre années. Ils leur ont permis de travailler sur une thématique d'actualité et qui tend à se développer avec l'arrivée des réseaux électriques intelligents (smart grids), d'acquérir une expertise sur du matériel d'instrumentation performant, et pour certains de se faire une expérience dans une entreprise tout en collaborant avec le monde de la recherche universitaire.

Cette expérience de partenariat initiée dans le cadre d'une thèse CIFRE se poursuit aujourd'hui car elle apporte aux deux structures comme aux étudiants qui ont été impliqués. Le LAN a pu initier ou développer de petits projets. Le laboratoire y a trouvé un accompagnement pour les doctorants. Pour l'IUT, c'est offrir un prolongement aux thématiques abordées en enseignement et l'occasion d'aborder des compétences spécifiques étudiées en modules complémentaires. La clef de la réussite de cette expérience reste cependant la motivation et l'autonomie de l'étudiant.