



Les courants porteurs en ligne (CPL) au service des réseaux électriques intelligents

Mise en œuvre d'une solution industrielle : défis et opportunités

En plus de l'installation d'un nouveau compteur électrique, le déploiement de Linky conduit à la mise en place d'un véritable réseau de communication sur le réseau basse tension fondé sur les CPL...

Introduction

Les réseaux électriques intelligents (REI), ou encore smart grids, constituent l'une des orientations technologiques de la modernisation des réseaux pour faire face aux mutations en cours du système électrique : bidirectionnalité des flux d'énergie liée au développement de la production décentralisée, impact de l'économie collaborative, mobilité électrique, etc. En pratique, l'évolution des réseaux existants vers les REI consiste à les doter de fonctions permettant de mieux les commander et les observer pour un pilotage de plus en plus temps réel, avec une unité de temps de référence de l'ordre de la dizaine de millise-

condes à plusieurs dizaines de minutes selon les applications.

Le déploiement massif des compteurs communicants Linky par Enedis est la première brique des REI sur le réseau électrique en France : il a démarré en 2015 sur l'ensemble du territoire français métropolitain pour atteindre un nombre total de 35 millions d'unités à l'horizon 2021. Il s'appuie sur une infrastructure de communication CPL, qui perdurera sur une durée au moins égale à 20 ans et devient ainsi un élément central des REI sur la basse tension (BT), ouvrant des perspectives à des services innovants. De manière plus générale, les CPL sont et resteront une réalité industrielle pour

les prochaines décennies en France et à l'international dans un contexte où l'IoT (Internet of Things) et les réseaux contraints (LoRaWAN, SigFox, technologies basées sur la norme IEEE 802.15.4) se développent fortement. Plus particulièrement, le CPL G3 et autres technologies CPL bande étroite remportent de plus en plus de marchés à l'international, principalement en Europe (Enedis, Iberdrola, Enel, etc.), en Asie (SGCC en Chine), en Afrique ou encore au Proche et Moyen Orient avec comme vecteur de croissance principal le comptage communicant.

Dans la suite de cet article, après une présentation de l'architecture retenue pour

Linky, les défis du déploiement à grande échelle des CPL bande étroite seront abordés à travers le développement de quelques points emblématiques vus par l'utilisateur final. En seconde partie, une ouverture sur les perspectives permises par les CPL au service des REI de demain est proposée.

Architecture de l'infrastructure Linky

Le système de comptage communicant Linky suit les concepts de l'architecture générique des systèmes dits « AMM ¹ » illustrée en **figure 1**.

Les compteurs communicants Linky, raccordés au réseau de distribution BT, communiquent via le réseau local CPL avec les concentrateurs ins-

les opérateurs de télécommunication publics, connecte les concentrateurs au système central, qui est lui, raccordé aux autres systèmes d'information du distributeur Enedis. Enedis fait ensuite le lien avec les fournisseurs d'électricité qui peuvent notamment proposer différentes offres de marché en s'appuyant sur l'infrastructure Linky.

Les concentrateurs ont pour rôle la collecte quotidienne des index de consommation et leur stockage temporaire avant l'envoi de ces données au SI central. Ils servent aussi de passerelle de communication pour permettre, par exemple, le changement de la grille tarifaire spécifique au contrat souscrit avec le fournisseur d'électricité, ou encore à remonter des anomalies telles qu'une surtension.

Les défis techniques d'une solution déployée à grande échelle

L'interopérabilité Fondements et mise en place

L'interopérabilité est la police d'assurance d'un projet industriel pérenne déployé à grande échelle. Elle est nécessaire sur la durée de vie du projet pour assurer la continuité de fourniture des éléments du système, et pour son maintien en conditions opérationnelles. Pour le projet Linky, et plus particulièrement pour la technologie CPL G3, l'interopérabilité résulte d'un long processus rappelé en **figure 2**. La première spécification, publiée en 2009, a été établie selon les exigences techniques exprimées par Enedis. Elle a été le point de départ des travaux de validation sur

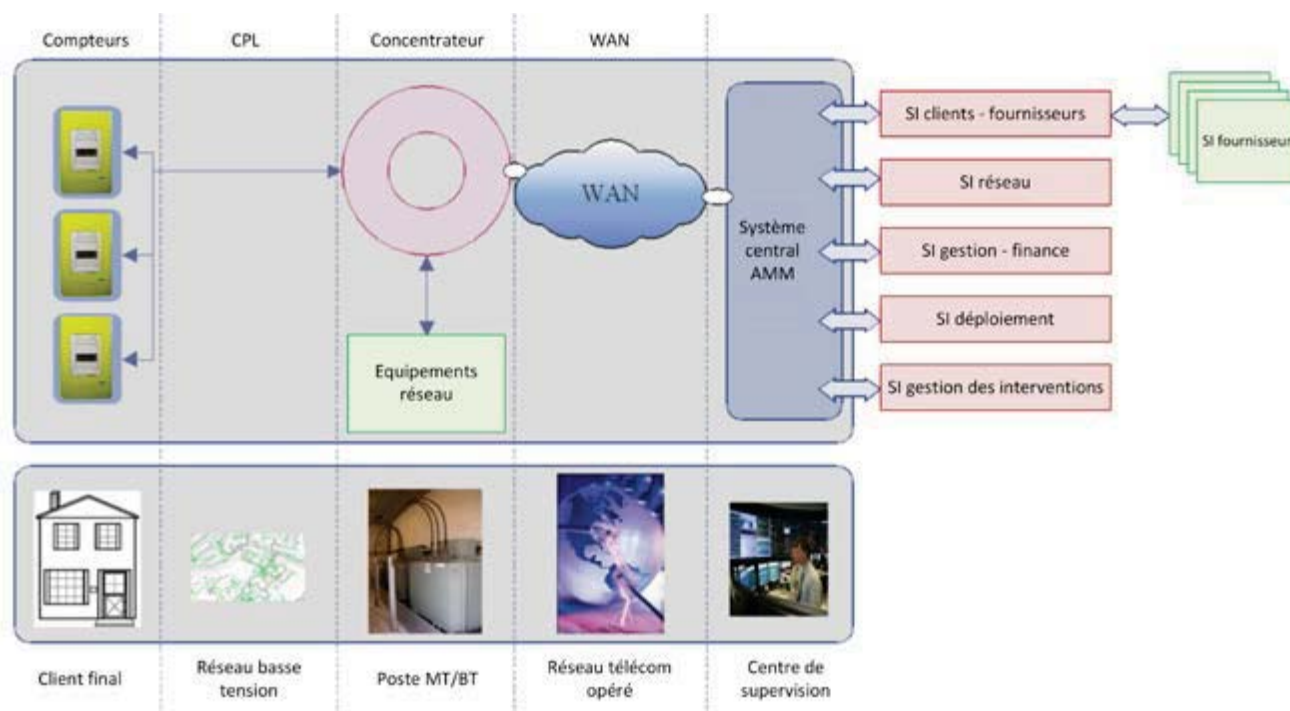


Figure 1 : Architecture générique d'une infrastructure de comptage dite « AMM » avec réseau local en CPL.

tallés dans les postes de transformation moyenne tension/basse tension. Le réseau WAN² cellulaire, fourni par

Pour le réseau local CPL utilisé pour ces interactions entre compteurs et concentrateurs, Enedis a retenu la technologie CPL G3 qui couvrira la majorité du parc Linky avec 32 millions d'unités.

le terrain et des cycles de discussion en normalisation pour atteindre la maturité nécessaire à son déploiement industriel. Ce processus a mobilisé de nombreuses parties prenantes (utilisateurs, fondeurs, équipementiers) qui se sont réunies au

¹ AMM : Advanced Meter Management.

² WAN : Wide Area Network



L'auteur

Cédric Lavenu est diplômé de l'ES-IEE (Ecole supérieure d'ingénieurs en électrotechnique et électronique). Il est ingénieur-chercheur à EDF R&D et contribue aux activités smart grid du groupe EDF sur les aspects télécom, dont le projet Linky mené par Enedis. Il s'est spécialisé dans les technologies CPL et les standards IoT, notamment en s'impliquant activement dans des organismes de normalisation et des alliances d'industriels tels que l'IEC, le CENELEC, l'IEEE ou encore l'Alliance CPL G3. Il est également détenteur de plusieurs brevets internationaux dans le domaine des CPL.

sein d'une association internationale : l'Alliance CPL G3.

L'Alliance CPL G3 a été créée en 2011 pour promouvoir la technologie CPL G3 qui se positionne sur le marché mondial au service d'applications multiples. Elle est garante d'une spécification CPL G3 partagée par ses membres et assure son évolution sur le long terme. Les amendements décidés sont ainsi injectés dans les organismes de normalisation. Historiquement, elle a essentiellement alimenté les travaux de l'IEEE et de l'UIT-T. A ce jour, l'UIT-T a publié les normes de référence G.9901 et G.9903 qui décrivent la technologie CPL G3.

Elle organise enfin le processus de certification qui s'appuie sur trois piliers fondamentaux pour assurer l'interopérabilité à grande échelle de nombreux produits :

- la conformité, c'est à dire la vérification de la bonne implémentation de chaque exigence exprimée dans la spécification CPL G3 ;
- l'interopérabilité, c'est-à-dire la vérification du bon fonctionnement des communications entre le produit testé et un groupe de produits de référence ;
- la performance, qui n'est pas à négliger pour que l'interopérabilité soit effective du point de vue système.

Aujourd'hui, l'Alliance CPL G3 a certifié près de 300 produits visant différentes applications dans le monde entier.

Présentation de la technologie CPL G3

Le CPL G3 fait l'objet d'une norme internationale de l'UIT-T avec les recommandations G.9903 [1], décrivant la pile protocolaire, et G.9901 [2], qui définit différents plans de fréquences dans la gamme des CPL bande étroite (entre 3 et 500 kHz) garantissant ainsi la compatibilité de la technologie avec les différentes réglementations mondiales, comme illustré en **figure 3** :

- en Europe, la réglementation fait référence à la norme harmonisée EN 50065-1 [7] prescrivant les conditions d'utilisation de la bande 3-148,5 kHz : la bande CENELEC A (3-95 kHz) est réservée aux « applications de surveillance et de pilotage du réseau de distribution à basse tension », alors que la bande supérieure ne fait pas l'objet de restrictions particulières. Il est également possible d'utiliser la bande 148,5-500 kHz en passant par un organisme notifié afin de justifier du respect des exigences essentielles de la directive CEM [10] qui couvre les CPL ;



Figure 2 : Frise chronologique de l'histoire de la technologie CPL G3 et de l'Alliance CPL G3.

- au Japon et aux Etats-Unis, les CPL peuvent être utilisés dans une bande de fréquence plus large ;

- dans le reste du monde, les réglementations s'inspirent des cas précédents.

La pile protocolaire CPL G3 s'appuie sur une couche physique OFDM spécifique intégrant des codes correcteurs d'erreurs Reed Solomon et convolutifs complétés par l'exploitation de la diversité temps-fréquence grâce à un entrelaceur à deux dimensions. L'information transmise sur chaque porteuse OFDM³ utilise les modulations différentielles ou cohérentes (D)8PSK, (D)QPSK ou (D)BPSK, complétées par un mode robuste qui ajoute de la redondance par répétition, permettant d'atteindre des débits physiques théoriques de l'ordre de 44 kbit/s en bande CENELEC A ou encore 180 kbit/s en bande FCC.

Au-dessus de la couche physique, la pile protocolaire, de conception modulaire, est construite sur la norme IEEE 802.15.4 [3], déjà largement utilisée dans le monde du sans fil, et sur la

couche d'adaptation 6LoWPAN⁴, définie dans une compilation de RFC publiées par l'IETF et assurant la compatibilité native avec le protocole IPv6. La recommandation G.9903 [1] fait référence au corpus de normes précité et l'amende (paramétrages, modifications ou extensions) selon les besoins techniques identifiés au sein de l'Alliance CPL G3.

La norme IEEE 802.15.4 [3] adaptée aux spécificités du CPL inclut notamment la méthode d'accès CSMA/CA⁵, et les politiques d'acquiescement et de retransmission des trames. Différents niveaux de qualité de service sont également proposés. Mais la couche MAC introduit surtout des extensions permettant à chaque nœud de communication CPL G3 de négocier avec l'ensemble des nœuds voisins les paramètres de communication : modulations proposées par la couche physique, définition des porteuses utilisées avec la fonction de *tone mapping*, etc. Le compromis débit/robustesse est donc sans cesse adapté aux conditions de communication du canal.



L'auteur

Cédric Chauvenet est diplômé de l'Ecole nationale supérieure en systèmes avancés et réseaux (ESISAR - groupe Grenoble INP). Il a réalisé une thèse sur la conception et le design d'une pile protocolaire IPv6 pour des réseaux de capteurs sur courant porteur en ligne (CPL) à l'université de Grenoble de 2010 à 2013. Il a ensuite travaillé pour la société NKE-Watteco sur des objets communicants utilisant des technologies basse consommation telles que LoRA (thèse CIFRE). Il a ensuite rejoint ERDF (désormais Enedis) en 2014 en tant qu'expert CPL pour le projet Linky. Depuis 2018, il est responsable de l'équipe CPL du projet Linky, et travaille au sein du « LinkyLab » sur des solutions innovantes permettant l'émergence des réseaux électriques intelligents, en particulier sur les sujets de l'intégration des véhicules électriques, l'intégration des énergies renouvelables, ou la gestion du stockage.

⁴ 6LoWPAN: IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks (réseaux personnels sans fil à faible consommation).

⁵ CSMA/CA : Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance

³ OFDM : Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

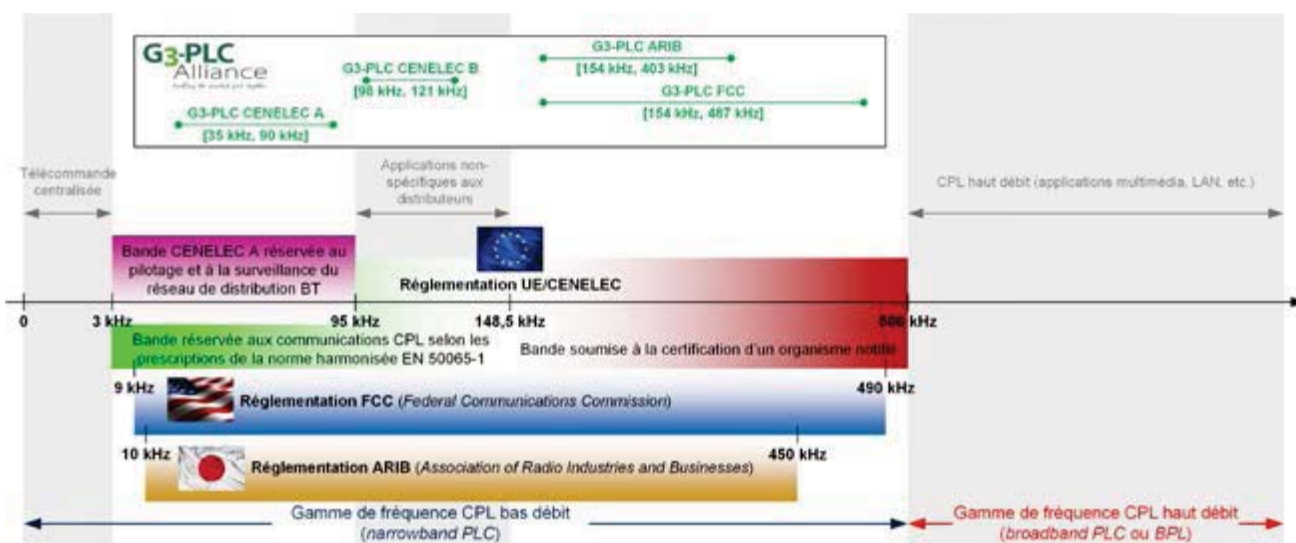
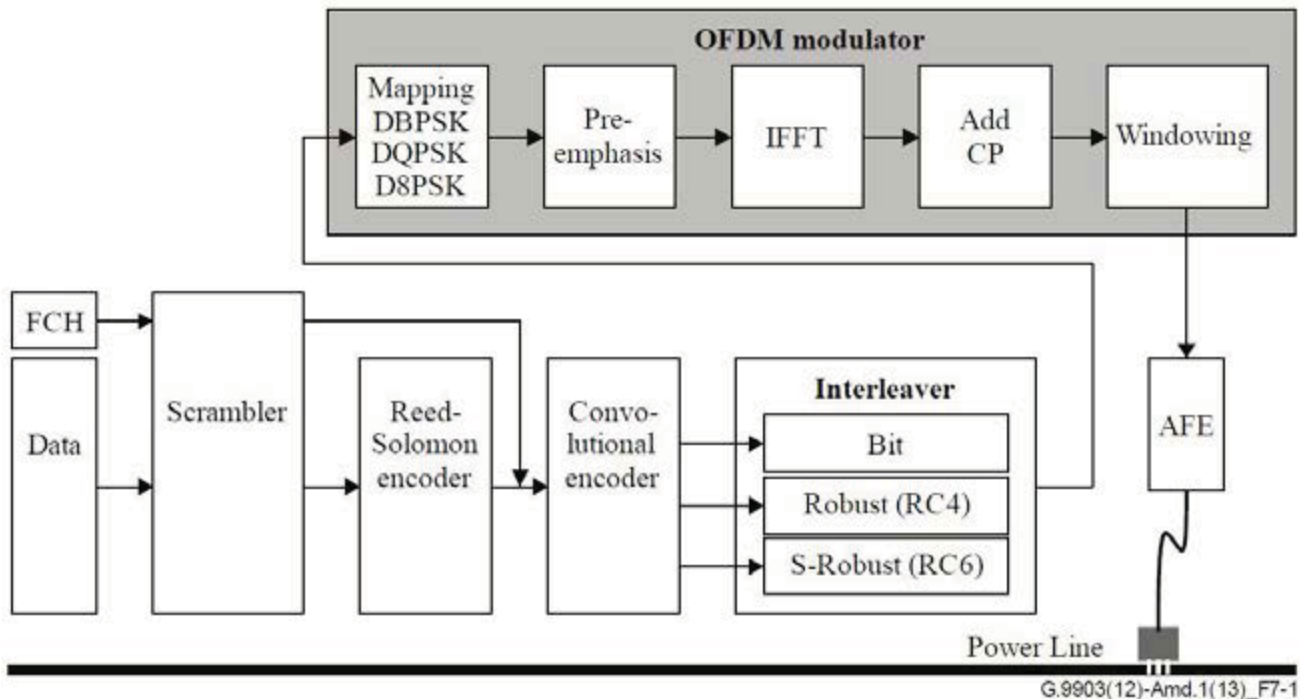


Figure 3 : Plans de fréquences CPL G3 relatifs aux différentes réglementations mondiales.



G.9903(12)-Amd.1(13)_F7-1

Figure 4 : Schéma bloc du transceiver OFDM CPL G3

- La couche d'adaptation 6LoWPAN introduit le protocole de routage réactif LOADng⁶ qui permet d'établir des chemins entre des paires de nœuds CPL G3 au sein d'un même réseau. Le protocole LOADng utilisé en *mesh under* – le routage est effectué pour chaque trame MAC – est le protocole de routage par défaut ; mais il est aussi possible de le désactiver pour laisser place à des alternatives, notamment un routage au niveau IP.

La pile protocolaire (figure 5) intègre également le chiffrement des données échangées au niveau MAC et un mécanisme d'authentification EAP-PSK permettant l'association sécurisée des nœuds rejoignant un réseau existant.

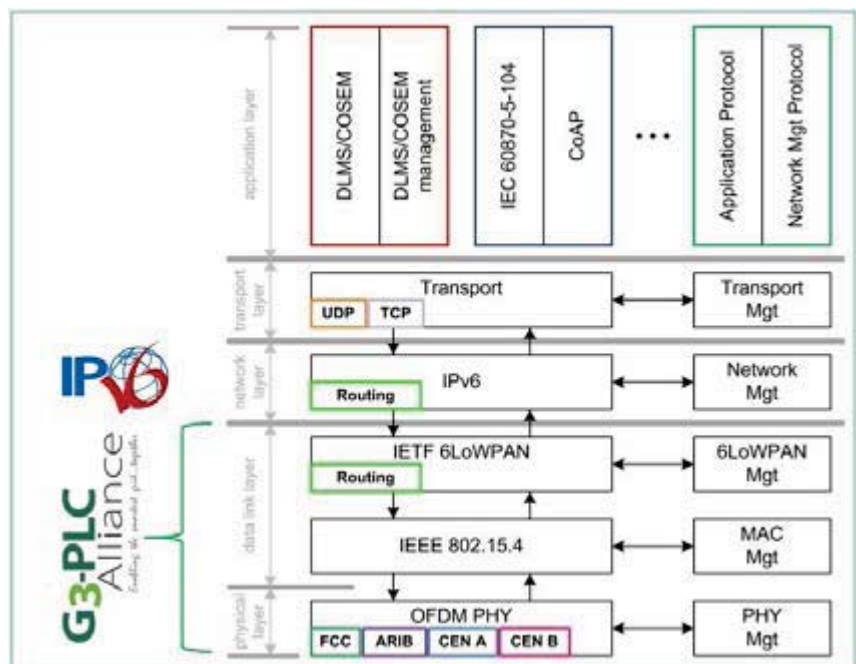


Figure 5 : Modularité de la pile protocolaire CPL G3

Enfin, le support du protocole IPv6 garantit pérennité et flexibilité à la pile CPL G3, qui s'interface à de nombreuses couches applicatives. Au-delà des déploiements de compteurs communicants, le CPL G3 est aussi déployé

industriellement en Italie dans le domaine du ferroviaire et demeure compatible avec de nombreux autres cas d'usage, notamment relatifs aux REI : chargement des véhicules électriques, gestion de l'énergie consommée dans l'habitation, contrôle de l'éclairage, etc.

Problématique de la CEM entre 2 et 150 kHz

Les risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques émis par le compteur Linky ont été très abondamment évoqués par les media et les réseaux sociaux. Les mesures effectuées par

⁶ LOADng : Lightweight On-demand Ad hoc Distance-vector Routing-Next Generation

l'ANFR sur Linky dont les résultats ont été publiés dans les rapports de celle-ci [4][5][6] montrent que la transmission des signaux CPL « ne conduit pas à une augmentation significative du niveau de champ électromagnétique ambiant ». En revanche, la question de l'absence de normes limitant les émissions conduites sur le réseau pour la plupart des équipements électriques dans la bande de fréquences 2-150 kHz et pouvant ponctuellement dégrader la communication CPL a eu un retentissement bien moindre. Un état des lieux est dressé ici, sans omettre d'évoquer les dernières avancées dans le monde de la normalisation.

Contexte général

Par nature, les CPL opèrent sur le support non-dédié que constitue le réseau électrique : les équipements CPL sont soumis à des variations incontrôlées des impédances d'accès (vue par le modem CPL) et du niveau de bruit dans les bandes de fréquences utilisées. Ainsi, l'industrie CPL s'est continuellement attachée à concevoir des technologies robustes capables de fonctionner dans l'environnement électromagnétique hostile propre au réseau électrique.

La croissance rapide de compteurs communicants intégrant des technologies CPL opérant essentiellement en bande CENELEC A, a attiré l'attention sur le quasi-vide normatif existant entre 2 et 150 kHz. Si le niveau d'émission des CPL est strictement limité par la norme européenne EN 50065-1 [7], ce n'est pas le cas de la grande majorité des appareils raccordés au secteur, à l'exception des éclairages à LED ou encore des plaques à induction. Malgré d'excellents résultats pour la collecte des compteurs, des cas d'interférence ont été relevés, notamment, par des experts actifs au CENELEC⁷ dont les travaux ont été publiés dans deux rapports techniques [8][9]. Ces interfé-

rences proviennent de la connexion au réseau de plus en plus de produits intégrant de l'électronique de puissance comme des variateurs de vitesse, des onduleurs pour la production décentralisée ou des alimentations à découpage.

Suite à ce constat, les travaux effectués au sein du comité technique IEC

niveaux d'émission dérivés des niveaux de compatibilité précités.

Vers de premières limites d'émission génériques entre 9 et 150 kHz

Les experts du groupe de travail JWG6 commun à l'IEC SC77A et au CISPR se dirigent vers un compromis visant d'abord à limiter la tension mesurée par bandes

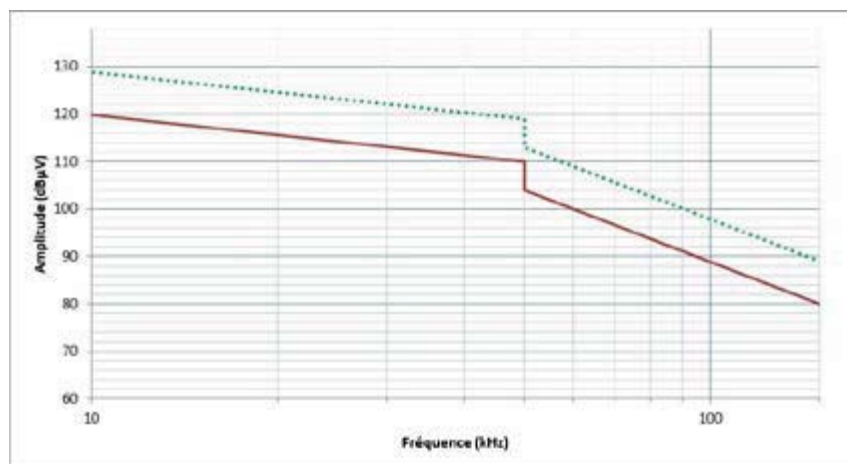


Figure 6 : Niveaux de compatibilité (en pointillés) et niveaux d'émission quasi-crête discutés au JWG6.

SC77A, responsable de la publication de plusieurs normes CEM harmonisées au niveau européen et donc rendues d'application obligatoire dans le cadre de la directive 2014/30/UE [10] pour tout produit ayant vocation à être commercialisé sur le marché unique, ont abouti à la publication des niveaux de référence entre 2 et 150 kHz dans la norme IEC 61000-2-2 [11]. Ces niveaux, dits « de compatibilité », visent à quantifier les niveaux de tension qui ne seront pas dépassés en 95 % des points du réseau BT, 95 % du temps (figure 6). Ils permettent par ailleurs de coordonner les niveaux d'émission et les niveaux d'immunité de tout produit raccordé au réseau.

Depuis, le CISPR⁸ œuvre conjointement avec l'IEC SC77A pour l'établissement d'une série de normes définissant des

de 200 Hz des émissions non intentionnelles de l'Équipement Sous Test (EST) au sens CISPR 16 [12] par translation des niveaux de compatibilité de l'IEC 61000-2-2 [11].

En second lieu, un accord sur les niveaux d'émission représentés en figure 6 est conditionné par l'introduction d'une seconde condition visant à limiter la densité spectrale des émissions non intentionnelles de l'EST par l'introduction du nouveau concept de « valeur intégrale », qui consiste à calculer la moyenne quadratique, sur une plage de fréquences prédéfinie, des différentes composantes en tension propres à chaque bande de 200 Hz. Le JWG6 travaille sur la validation de ce concept à travers une approche empirique pour établir la corrélation entre valeurs intégrales et performances de communication par CPL.

Ces travaux doivent ainsi aboutir aux premières limites d'émission génériques dans la bande 9-150 kHz applicables à

⁷ CENELEC : Comité européen de normalisation en électronique et en électrotechnique.

⁸ Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques.

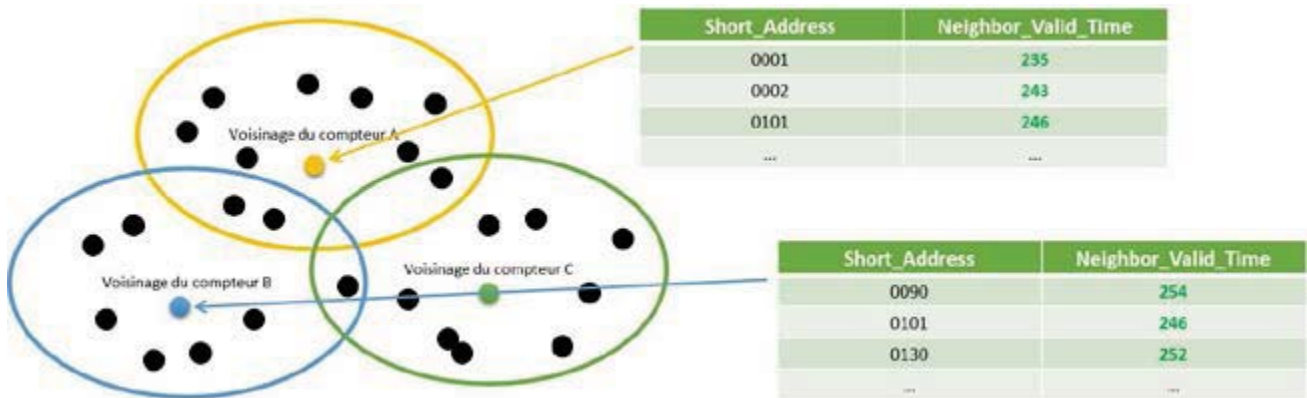


Figure 7 : Les tables des voisins ne révèlent aucune anomalie

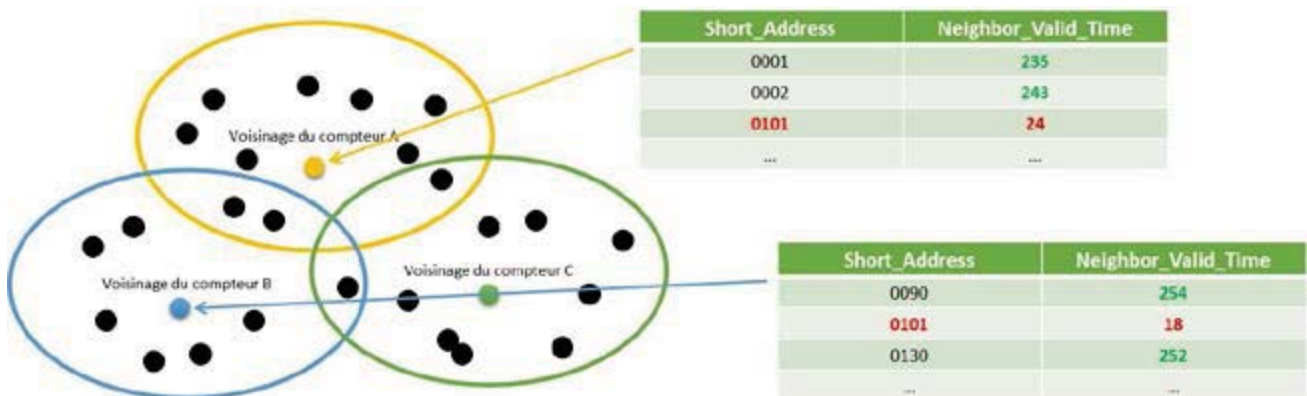


Figure 8 : Détection croisée d'expiration des paramètres de communication pour un même compteur

●●● tous les appareils raccordés au réseau BT, permettant une forte limitation des cas d'interférence avec les CPL, et plus largement la limitation des cas d'interférence entre tous types d'appareils électriques dans cette bande de fréquences.

Vers le smart grid de demain

Le CPL, un vecteur de nouveaux services

Au-delà des cas d'usage spécifiques aux compteurs communicants, la technologie CPL est un vecteur de nouveaux services du fait de la présence d'une connexion réseau, éventuellement IPv6, en tout point du réseau électrique.

Ainsi, le CPL constitue un formidable contributeur au développement des REI. Dans ce chapitre, on se propose

d'illustrer ce propos à travers les services réseau dérivés de l'infrastructure CPL Linky : la détection des coupures de courant, la détection de phase et la consolidation des données cartographiques.

La détection des coupures électriques

Aujourd'hui, la technologie CPL permet de détecter les coupures de courant en temps quasi-réel et donc de déclencher plus rapidement les interventions des équipes d'Enedis pour rétablir l'alimentation.

Comme exposé précédemment, l'une des forces du CPL G3 réside dans la connaissance du voisinage par chaque compteur. Chaque compteur Linky doit négocier périodiquement ses para-

mètres de communication CPL G3 en renseignant une base de données locale appelée « table des voisins ». Un usage secondaire, consistant à relever ces tables pour un nombre limité de compteurs ciblés, permet d'établir un diagnostic de l'état d'alimentation de tout un réseau BT en quelques secondes. Dans l'exemple suivant, le relevé des tables des voisins de trois compteurs permet de connaître l'état d'un réseau alimentant 28 clients.

Par rapport à une situation normale qui ne révèle aucune anomalie, illustrée en **figure 7** (les paramètres de communication ont été mis à jour récemment, comme l'indique le temps avant expiration « Neighbor_Valid_Time », proche de la valeur maximum de 255 minutes), la proche expiration des paramètres

“Chaque compteur Linky doit négocier périodiquement ses paramètres de communication CPL G3 en renseignant une base de données locale appelée « table des voisins ».”

de communication pour le compteur d'adresse courte 0x0101 dans les deux tables des voisins exposées en **figure 8** (le Neighbor_Valid_Time du compteur 0x0101 est faible et très inférieur au Neighbor_Valid_Time des autres compteurs), permet de suspecter une coupure de courant, car ces paramètres n'ont pas été mis à jour récemment.

Cette suspicion est d'autant plus vraisemblable que ce type de corrélation existe pour plusieurs tables des voisins et pour plusieurs compteurs : une zone entière du réseau serait alors non alimentée.

Le principe général exposé dans l'exemple est assez simple, mais l'efficacité du mécanisme de détection des coupures de courant requiert un choix judicieux des compteurs ciblés pour le relevé des tables de voisins et un choix adéquat des critères par lesquels une anomalie est effectivement suspectée.

La détection de phase

La détection des phases de rattachement des clients représente un réel levier pour l'exploitant du réseau. Le déséquilibre de phase est lié à l'évolution du réseau dans le temps avec l'arrivée de nouveaux raccordements, le changement des puissances des installations ou encore la modification de la topologie du réseau de distribution. Il est par ailleurs limité à 2 % par la norme EN 50160 [13], qui prescrit les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution. Au-delà du risque de violation de ces prescriptions obligatoires, puisqu'elles engagent contractuellement le distributeur, le déséquilibre de phase peut mener à la dégradation de fourniture avec l'augmentation des niveaux harmoniques, des variations de la tension, le vieillissement

prématuré de certains composants du réseau, et la défaillance d'équipements voire de tout un processus industriel.

Il est déjà possible de remédier à de possibles déséquilibres par le changement de phase d'installations existantes mais ces actions sont généralement ponctuelles en cas de problème avéré. Elles nécessitent de plus l'installation d'outils dédiés permettant aux techniciens d'effectuer le diagnostic et d'être guidés dans la résolution du problème. Désormais, les CPL des compteurs Linky changent la donne.

différemment raccordés entre le conducteur de neutre et l'une des trois phases. En CPL G3, la détection de phase se fait par la détection du passage par zéro sur les fronts montants de l'onde de tension 50 Hz sur lesquels un compteur de 8 bits est synchronisé comme le montre la **figure 9**.

Pour chaque modem CPL G3, la valeur de ce compteur 8 bits est une information disponible en permanence localement et est insérée dans l'entête de toute trame CPL G3 transmise. Ainsi, lorsqu'un modem (TX) transmet une trame à un modem (RX), ce dernier récupère la valeur du compteur du transmetteur (cTX) issue de la trame reçue et la valeur de son propre compteur (cRX) au même instant. La différence ($cRX - cTX = 170$ en figure 9) permet de retrouver le déphasage entre les deux modems (en figure 9, TX est déphasé de 240° ou -120° par rapport à RX).

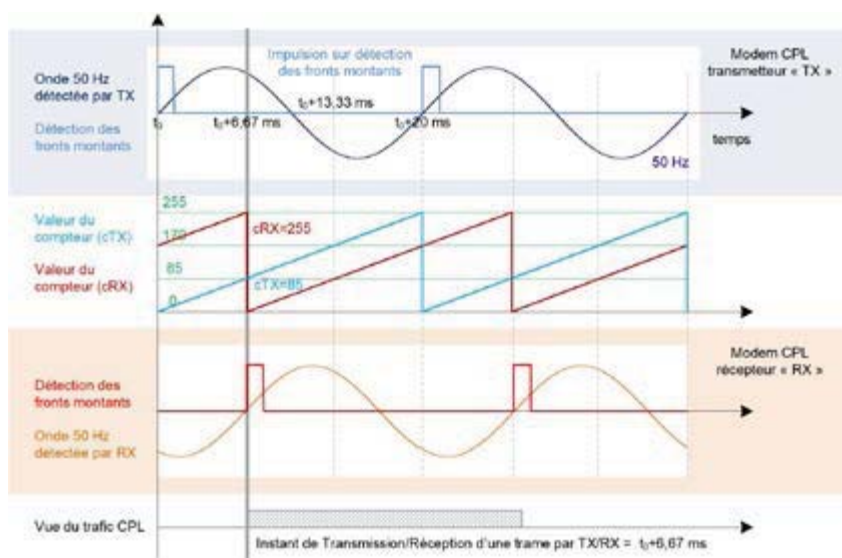


Figure 9 : Représentation en fonction du temps des valeurs des compteurs 8 bits (cTx et cRx) et des ondes de tension 50 Hz détectées par deux modems CPL G3 (TX et RX) déphasés de 120°

Lors de sa propagation sur le réseau triphasé, le signal CPL peut aisément passer d'une phase à une autre du fait de la proximité des conducteurs au sein d'un même câble. Le réseau triphasé est ainsi vu comme un canal de propagation unique partagé par les compteurs communicants, majoritairement monophasés, in-

Dans sa table des voisins, un compteur CPL G3 maintient alors en permanence la valeur de son déphasage relatif avec ses voisins. La collecte des tables des voisins de tous les compteurs d'un réseau BT permet, via la résolution d'un système d'équations, de retrouver les phases de raccordement des différents

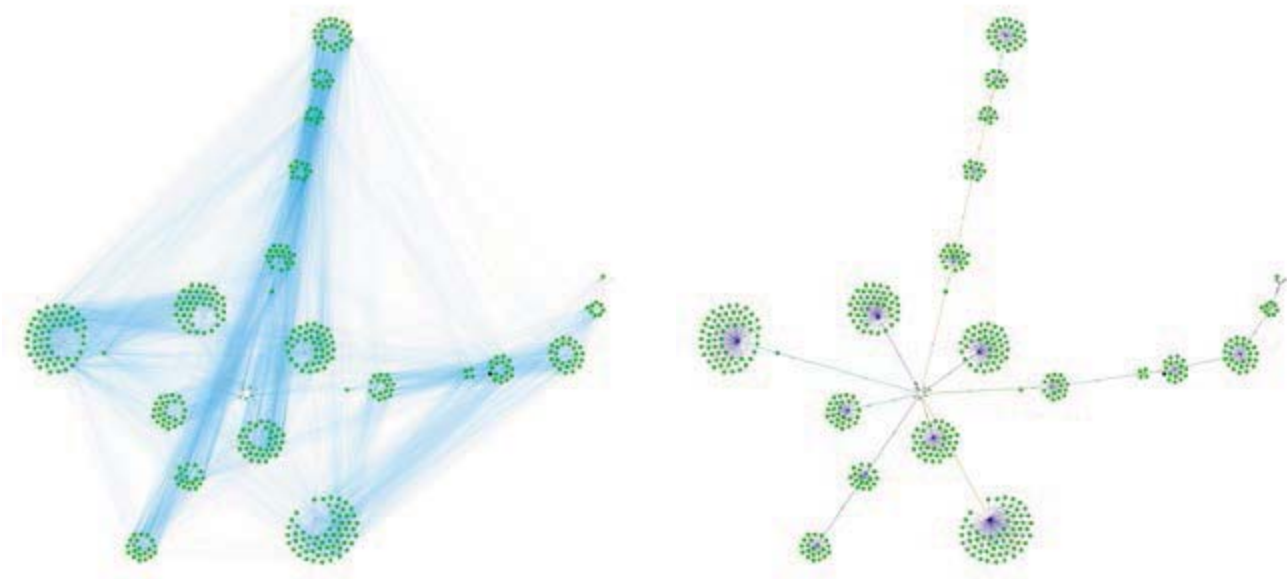


Figure 10 : Ensemble des liens existants entre nœuds CPL G3 (gauche) et chemins sélectionnés par le protocole de routage (droite) au sein d'un même réseau

- compteurs par rapport à la référence que constitue le concentrateur.

Avec l'arrivée des 35 millions de compteurs Linky, Enedis est maintenant en mesure de prévenir le déséquilibre de phase par la détection automatisée des phases de raccordement des clients. Des interventions correctives peuvent ainsi être planifiées et cibler les réseaux les plus sensibles, suivies de la mise à jour et correction des bases de données patrimoniales.

La consolidation des données cartographiques

Un troisième service à valeur ajoutée permis par le CPL G3 réside dans la consolidation des données cartographiques d'Enedis. L'évolution du réseau électrique dans le temps est un réel défi pour maintenir à jour les données cartographiques.

Les tables de voisins CPL G3 apportent également de nouvelles possibilités en ce domaine : le **figure 10** (gauche) correspond à une représentation graphique des liens existant (en bleu) entre les différents nœuds CPL G3 (compteurs en vert, concentrateur en blanc). Si cette figure représente une superposition des liens CPL viables relevés à des instants

“Avec l'arrivée des 35 millions de compteurs Linky, Enedis est maintenant en mesure de prévenir le déséquilibre de phase par la détection automatisée des phases de raccordement des clients.”

distincts, elle témoigne de la diversité des liens en tout instant, et de la variabilité des conditions de propagation.

La figure 10 (gauche) représente aussi l'étendue des possibles du point de vue des échanges de données entre nœuds CPL G3. C'est ensuite le protocole de routage LOADng qui vient sélectionner les liens les plus avantageux selon la métrique utilisée, qui prend ici en compte la qualité des liens ou encore le nombre de nœuds intermédiaires nécessaires entre l'émetteur et le destinataire. La topologie résultant de l'action du protocole de routage est représentée en figure 10 (droite). Les nœuds intermédiaires sont représentés par des points bleus.

Il est à noter que cette topologie évolue au cours de la vie du réseau CPL G3, notamment avec la variation des qualités de lien. L'étude de ses évolutions sur

plusieurs dizaines de jours révèle que certains chemins et donc certains liens sont plus utilisés que d'autres. Lorsque la confrontation des chemins fréquemment utilisés et des données cartographiques existantes révèle des disparités, alors une erreur de cartographie est suspectée.

Les vérifications réalisées in situ ont depuis permis de valider la présence d'erreurs de cartographie en détectant les rattachements électriques à la maille du départ BT, voire le rattachement des clients en configuration résidentielle collective (alors qu'Enedis s'apprête à récupérer la concession des colonnes montantes dans le cadre de la loi ELAN). Ici encore, l'analyse de données relatives aux paramètres de communication du CPL, permettra d'enrichir le spectre des outils au service des cartographes des exploitants de réseau utilisant la technologie CPL G3.

Exemple du CPL sur la moyenne tension

Le CPL a été mis en œuvre sur la moyenne tension (MT) dans le cadre du démonstrateur SOGRID. Ce projet innovant a mobilisé une dizaine de partenaires industriels et académiques entre 2013 et 2015 pour expérimenter la mise en œuvre d'une chaîne de communication IPv6, exclusivement portée par CPL G3, couvrant l'ensemble du réseau public de distribution BT et MT au service d'une sélection de cas d'usages REI :

- mesures de courant et de tension en différents points du réseau MT et BT ;
- contrôle de la topologie du réseau MT ;
- localisation de défauts sur le réseau MT ;
- comptage communicant sur le réseau BT et backhauling des données collectées sur la MT ;
- communication IPv6 de bout-en-bout entre le système d'information et les nœuds CPL G3 installés en MT ou BT ;

- supervision des fonctions télécom des objets communicants CPL G3.

Sur le segment BT, SOGRID emploie une infrastructure de comptage inspirée par Linky mais distincte des nouveaux compteurs d'Enedis.

Architecture de l'infrastructure télécom CPL G3 du projet SOGRID

Pour assurer la couverture des réseaux MT et BT par la technologie CPL G3, des routeurs sont installés en différents points du réseau comme illustré en **figure 11**.

Sur la MT, un routeur d'accès (border router) installé en poste source (primary substation) en aval de chaque transformateur assure la connectivité sur une dorsale (Medium Voltage – MV – backbone) du FAN (Field Area Network). Le routeur d'accès FAN fait donc l'interface entre le CPL G3 MT et un lien télécom tiers dédié aux échanges d'information entre les systèmes d'information (SI) et le poste source. Sur la BT, des routeurs d'accès assurent la connectivité CPL G3 entre le poste de distribution (secondary substation) et les compteurs du projet SOGRID :

les NAN (Neighbourhood Area Network). Le routeur d'accès NAN fait l'interface entre le CPL G3 BT et le CPL G3 MT.

Les routeurs d'accès (FAN ou NAN) permettent une connectivité IPv6 entre les SI : le MDMS (Meter Data Management System) utilisé pour la collecte et le traitement des données de comptage et le SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) pour les cas d'usage liés à l'automatisation du réseau.

En ce qui concerne les objets communicants déployés, les NAN sont constitués exclusivement de compteurs et le FAN regroupe les routeurs d'accès NAN ainsi que des capteurs et actionneurs tels que les organes manœuvrables télécommandés (OMT ou MV switch gear). Les OMT ont la fonction de changer la topologie du réseau MT, par exemple en cas de défaut ou de travaux planifiés.

Réalisations et difficultés

Pour réaliser les cas d'usage expérimentés dans le projet SOGRID, trois profils applicatifs rappelés en **figure 12** partagent une même pile protocolaire CPL G3 sur le réseau MT.

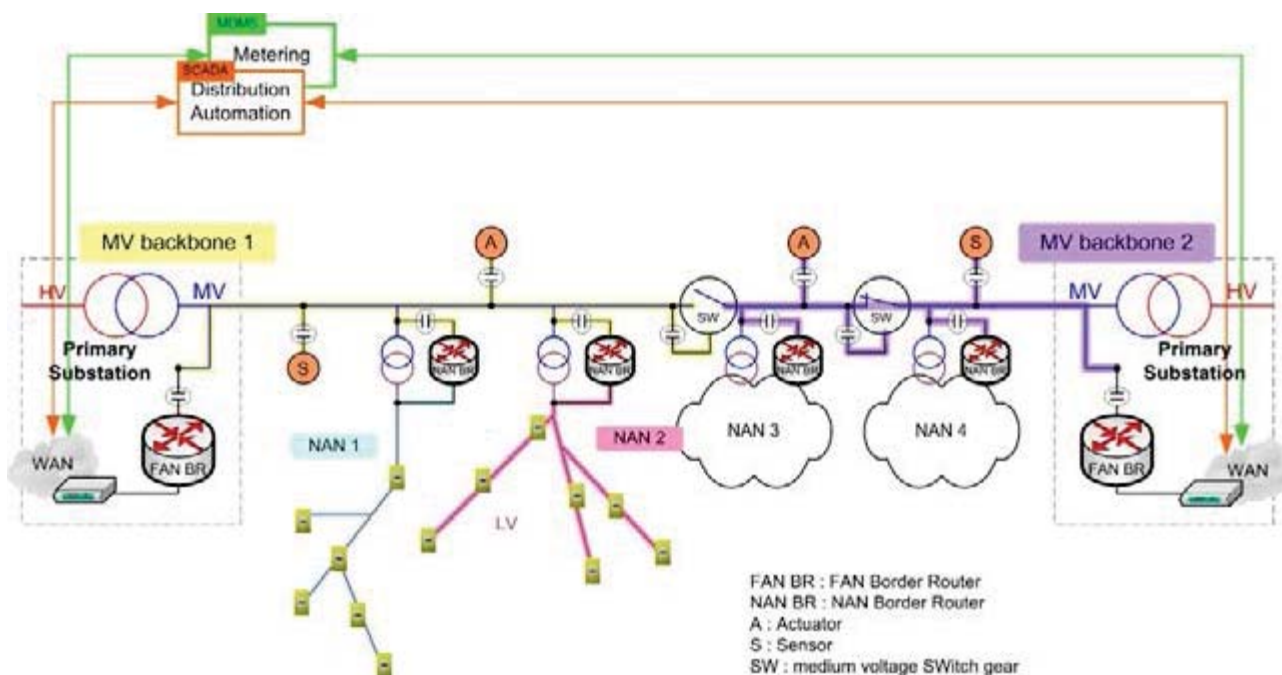


Figure 11 : Architecture de l'infrastructure télécom CPL G3 du projet SOGRID.

“Les spécificités du réseau MT représentent autant de défis à relever pour la mise en œuvre d’une infrastructure CPL G3 fiable et performante.”

●●● Le protocole IEC 61870-5-104 (TCP) est relatif à l’automatisation du réseau, DLMS/COSEM (UDP) au comptage et CoAP (UDP) est utilisé pour la supervision télécom des matériels déployés. Les couches basses sont identiques, avec un routage LOADng qui s’effectue en route over (soit au niveau IP) et le choix de la bande de fréquence 154-487 kHz pour la transmission des données sur la MT. En revanche, en BT, seul le protocole applicatif DLMS/COSEM est utilisé, en s’appuyant sur le routage par défaut (LOADng en mesh under) et une transmission en bande CENELEC A, en tous points identiques à la pile protocolaire Linky.

Les spécificités du réseau MT représentent autant de défis à relever pour la mise en œuvre d’une infrastructure CPL G3 fiable et performante.

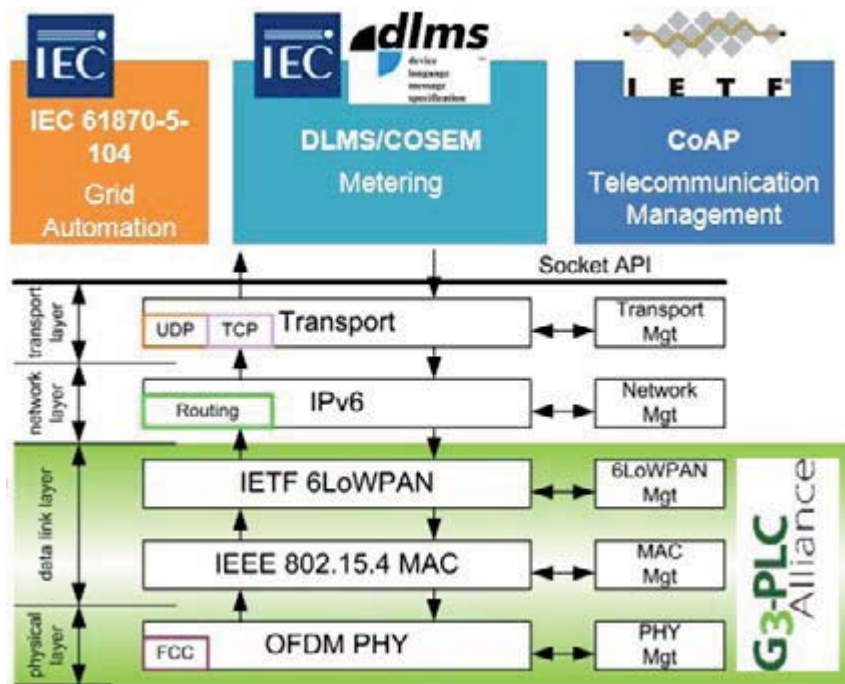


Figure 12 : Profils de communication CPL G3 MT utilisés dans le projet SOGRID

Le caractère dynamique de la topologie du réseau MT a été le premier obstacle à franchir pour garantir une connectivité CPL G3 robuste aux changements des schémas d’exploitation du réseau MT. Le scénario décrit en **figure 13** montre l’évolution souhaitée de la couverture CPL G3 dans le temps en cas de manœuvres successives sur les OMT SW2 et SW3 qui ont pour effet l’interruption temporaire de l’alimentation électrique de portions de réseau MT, et donc l’interruption physique de la continuité du canal de propagation du signal CPL.

Du fait de « l’étanchéité » des deux réseaux CPL G3 MV backbone 1 et MV backbone 2 (les nœuds des deux réseaux ne peuvent pas se voir simultanément) superposés chacun avec une ligne MT distincte, il a fallu concevoir un mécanisme de bascule rapide des nœuds vers l’un ou l’autre des deux réseaux (cf. [14]).

En deuxième lieu, sur le plan de la propagation physique, des matériels de couplage performants ont dû être conçus pour assurer la couverture sur des distances de quelques kilomètres sans répéteurs intermédiaires. Les modes de propagation et de couplage du signal CPL doivent également faire l’objet de choix judicieux afin de couvrir les trois phases sur des réseaux souterrains (majoritairement urbains) et des réseaux aériens (essentiellement ruraux). La mise en œuvre de circuits d’adaptation d’impédance (Line Matching Units) est essentielle pour pouvoir maximiser la puissance transmise sur le canal.

Ainsi, pour la première fois le CPL G3 a été utilisé avec succès pour le transport de données issues d’applications métiers hétérogènes, à l’image d’un réseau informatique classique utilisé à la fois pour le courrier

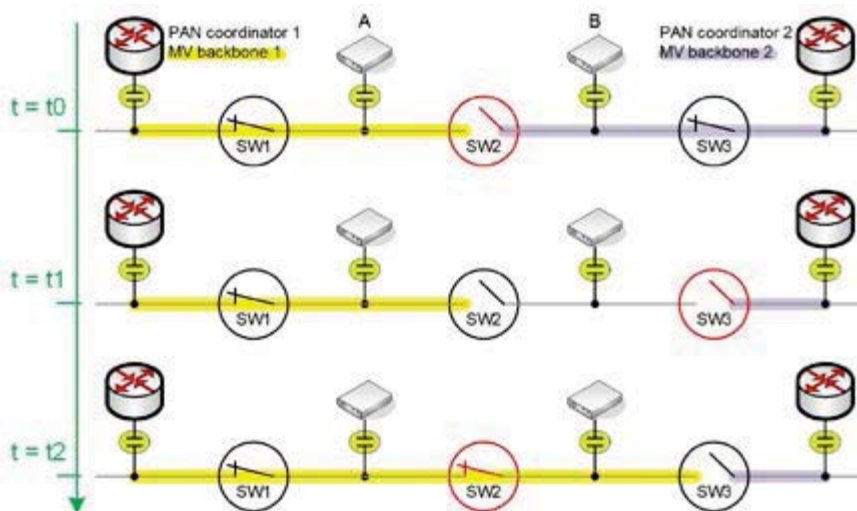


Figure 13 : Illustration du caractère dynamique du réseau MT

électronique, le streaming vidéo ou encore la navigation sur Internet. Le projet SOGRID n'a pas été suivi d'un déploiement à échelle industrielle, mais il a créé un précédent pouvant nourrir de futurs projets mettant à profit la modularité de la pile protocolaire CPL G3 mais aussi sa polyvalence.

Nouvelles tendances technologiques pour l'évolution des CPL bande étroite

Optimisation de l'existant

Comme pour tout composant, le déploiement à grande échelle d'une première version arrivée à maturité industrielle est suivi d'une phase d'optimisation, renforçant ainsi les possibilités d'évolution du système existant. En d'autres termes, l'augmentation des performances du CPL pour les cas d'usage existants permettra de libérer davantage de bande passante pour de nouveaux services à valeur ajoutée dans le domaine du comptage, mais aussi partagée avec d'autres applications comme démontré dans le projet SOGRID.

L'Alliance CPL G3 s'attèle à cette tâche qui, de son point de vue, passe essentiellement par la minimisation du trafic dit « de contrôle ». Ces travaux passent, entre autres, par la réalisation d'études paramétriques permettant de déterminer avec quelle configuration la pile protocolaire CPL G3 sera la plus performante. Le comportement des mécanismes d'accès au médium pour de nombreux accès concurrents, ou le compor-

l'une des priorités pour garantir de nouvelles perspectives de développement aux technologies CPL bande étroite.

Hybridation entre technologies CPL et radio

Au sein des REI, les technologies de télécommunications occupent une place prépondérante : de multiples solutions concurrentes sont promues par des industriels pour répondre aux différents cas d'usage. L'utilisateur final est ainsi confronté au choix d'une ou plusieurs solutions de télécommunication pour trouver l'optimum technico-économique sur la base de nombreux critères d'analyse. Dans ce contexte, les réseaux dits contraints, de par leur faible coût et leur faible consommation d'énergie, constituent souvent le choix final des utilisateurs gérant un parc important d'objets connectés. Pour répondre à cette demande, les fournisseurs de solutions opposent très souvent les technologies radio bas débit (série IEEE 802.15.4, WiSUN, LoRaWAN, etc.) et les technologies CPL bas débit (CPL G3, CPL G1, Meters & More, PRIME, etc.).

Au-delà de l'opposition frontale entre technologies concurrentes, il existe cependant un intérêt intuitif à combiner les avantages des media de communication radio et CPL. Ceci a été identifié précocement par certains industriels mais le marché des technologies hybrides était encore peu mature. Cependant, un autre paysage industriel se dessine courant 2019. L'essor naissant des solutions hybrides CPL/radio basées sur le

été présentée lors de la conférence par la société Andrea Informatique, Enedis et EDF R&D.

L'industrialisation d'une solution hybride doit désormais passer par la publication d'une norme pour permettre la mise sur le marché d'une solution compatible avec le CPL G3 dont le déploiement pourrait, entre autres, être envisagé sur les nouveaux marchés de comptage communicant en Asie.

Conclusion

Les CPL bande étroite sont une technologie ancienne, mais, paradoxalement, ils connaissent leur premier véritable essor avec l'avènement récent des REI et de l'une de leurs briques fondamentales : les systèmes de comptage communicant.

C'est bien dans l'ère de l'IoT, un concept dont les technologies CPL se nourrissent, qu'ils deviennent une réalité industrielle déployée à grande échelle pour les prochaines décennies. Les 35 millions de compteurs Linky en cours de déploiement par Enedis l'illustrent parfaitement. Il convient également de citer d'autres projets européens pilotés par les distributeurs Iberdrola ou Enel, et les choix technologiques effectués sur d'autres continents à l'instar de la promotion de la technologie Hi-PLC (qui se rapproche plutôt du CPL haut débit) par le géant chinois SGCC.

Si de nombreux défis ont dû être surmontés pour que les CPL bande étroite arrivent à maturité industrielle, leur avenir se construira sur leur capacité à prendre en compte des besoins futurs et à s'intégrer dans le mix télécom des réseaux électriques intelligents. Les parties prenantes ont conscience de ces enjeux et préparent déjà les prochaines grandes évolutions technologiques pour tirer parti au maximum des infrastructures existantes, fournissant un accès télécom en tout point du réseau électrique ! ■

Cédric Lavenu

Ingénieur chercheur, EDF R&D, France

Cédric Chauvenet

Manager de l'équipe CPL, Enedis, France

“Au sein des REI, les technologies de télécommunications occupent une place prépondérante.”

tement du protocole de routage et la stabilité des routes qu'il engendre, font également partie des éléments à étudier pour améliorer les performances du CPL G3.

Le traitement de la problématique de passage à l'échelle, liée à l'accroissement du nombre de nœuds communicants au sein d'un même réseau CPL, apparaît comme

CPL G3 s'est confirmé lors de la conférence European Utility Week en novembre 2019 avec l'arrivée de solutions industrielles : les compteurs ADDAX de ADD Grup (expérimentations en cours) ou encore les puces des fondeurs ST Microelectronics et Vertexcom (Chine). Une maquette démontrant la mise en œuvre d'une technologie hybride CPL G3/radio IEEE 802.15.4 [15] a aussi

Résumé

Les courants porteurs en ligne bande étroite sont une technologie ancienne, mais, paradoxalement, ils connaissent leur premier véritable essor avec l'avènement des REI. C'est bien dans l'ère de l'IoT dont se nourrissent les CPL, qu'ils deviennent une réalité industrielle. Comme le traite cet article pour la technologie CPL G3, déployée en France par Enedis dans 32 millions de compteurs Linky, de nombreux défis ont été surmontés pour atteindre une maturité technologique à l'épreuve du temps. ■

Abstract

Narrowband powerline communication is an ancient technology, but, paradoxically, PLC technologies started to blossom with the advent of the smart grid. Fed by the concepts of the IoT era, PLC became an industrial reality. This paper handles the challenges having been addressed to reach maturity and durability through the example of the G3-PLC technology, rolled out in 32 million Linky smart meters by French utility Enedis. ■



Bibliographie

- [1] Recommendation ITU-T G.9903 (08/2017): Narrowband Orthogonal Frequency Division Multiplexing Power Line Communication Transceivers for G3-PLC Networks – disponible à l'adresse : <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9903/en>
- [2] Recommendation ITU-T G.9901 (04/2017): Narrowband Orthogonal Frequency Division Multiplexing Power Line Communication Transceivers – Power Spectral Density Specification – disponible à l'adresse : <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9901/en>
- [3] IEEE 802.15.4 : IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) – 2006
- [4] Rapport technique sur les niveaux de champs électromagnétiques créés par les compteurs Linky, VOLET 1 : mesures en laboratoire, ANFR, mai 2016
- [5] Rapport technique sur les niveaux de champs électromagnétiques créés par les compteurs Linky, VOLET 2 : mesures complémentaires en laboratoire, ANFR, septembre 2016
- [6] Rapport technique sur les niveaux de champs électromagnétiques créés par les compteurs Linky, VOLET 3 : mesures sur le terrain, ANFR, septembre 2016
- [7] EN 50065-1 : Transmission de signaux sur les réseaux électriques basse tension dans la bande de fréquences de 3 kHz à 148,5 kHz – Partie 1 : règles générales, bandes de fréquences et perturbations électromagnétiques
- [8] CLC/TR 50627:2015 : Study Report on Electromagnetic Interference between Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range Below 150 kHz
- [9] CLC/TR 50669:2017 : Investigation Results on Electromagnetic Interference in the Frequency Range below 150 kHz
- [10] Directive 2014/30/UE : DIRECTIVE 2014/30/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 26 février 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la compatibilité électromagnétique (refonte) – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0030&from=EN>
- [11] IEC 61000-2-2 : Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 2-2 : environnement - Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites à basse fréquence et la transmission des signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension
- [12] CISPR 16 : Spécification des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques
- [13] EN 50160 : Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution
- [14] Innovative solution sustaining supervisory control and data acquisition to remote terminal unit G3-PLC connectivity over dynamic grid topologies, Cédric Lavenu, Damien Dufresne, Xavier Montuelle, 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), Juin 2017
- [15] IEEE 802.15.4g : IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks – 2012