Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

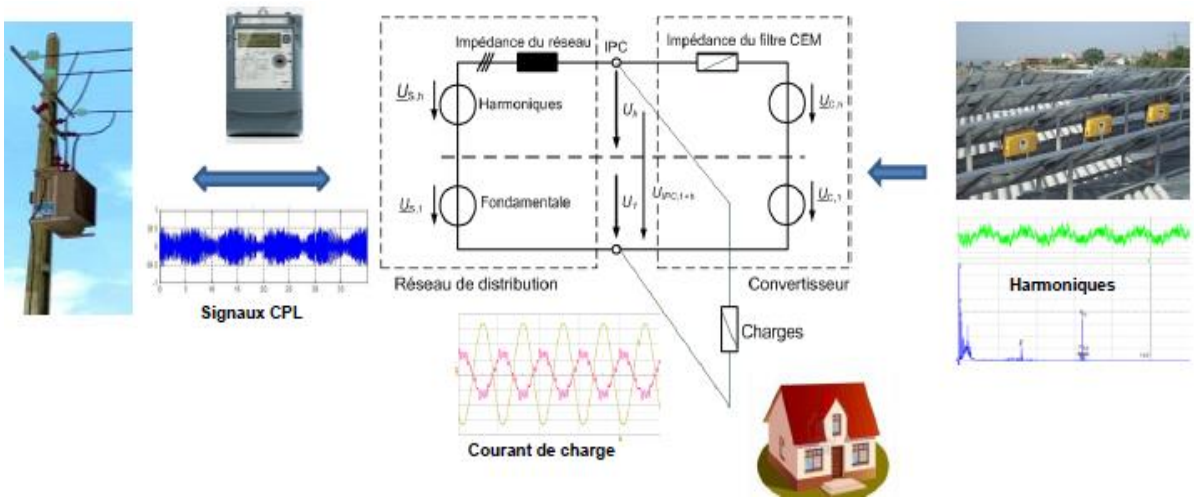
Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section P+D

Rapport final

REMIGATE

Reduction of electromagnetic interferences in smart grid applications: Site tests and assessment



Date : 31 mai 2018

Lieu : Sion

Prestataire de subventions :
Confédération suisse, représentée par
L'Office fédéral de l'énergie (OFEN)
Programme pilote, de démonstration et Programme-phare
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :
HES-SO Valais-Wallis
Route du Rawil 47
CH-1950 Sion
www.hevs.ch

Auteurs :
Dominique Roggo, HES-SO Valais-Wallis, dominique.roggo@hevs.ch
Lino Capponi, HES-SO Valais-Wallis, lino.capponi@hevs.ch
Fabrice Decorvet, SIG, fabrice.decorvet@sig-ge.ch
Cédric Pellodi, SIG, cedric.pellodi@sig-ge.ch

Direction du programme de l'OFEN :	Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch
Suivi du projet pour l'OFEN :	Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch
Numéro du contrat de l'OFEN :	SI/500xxx-yy

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Office fédéral de l'énergie OFEN
Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen, Adresse postale : 3003 Berne
Tél. +41 58 462 56 11 · fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.ofen.admin.ch

1. Sommaire

1. Sommaire ... 3

2. Introduction ... 5

3. Objectifs du projet ... 8

4. Travaux réalisés et résultats obtenus ... 9

5. Principe et considérations théoriques de la communication par CPL ... 10

5.1. Technologies CPL actuellement utilisées pour les smart meters ... 10
5.2. Modèle simplifié d'un canal de transmission pour CPL ... 12

6. Mesures sur sites ... 13

6.1. Site pilote des SIG à Avusy (GE) ... 13
6.2. Mesure de la qualité de la transmission CPL avec technologie 'PLAN' ... 16
6.3. Facteurs d'influence de la communication CPL sur le site d'Avusy ... 17
6.3.1. Mesure des émissions conduites ... 18
6.3.2. Mesure de l'atténuation le long des lignes ... 20
6.3.3. Mesure de l'impédance harmonique aux points de connexion ... 21
6.3.4. Mesure de la qualité de la transmission CPL avec technologie G3-PLC ... 24
6.3.5. Analyse des résultats ... 25

7. Modèle du site réel au laboratoire GridLab ... 26

7.1. Mesure de l'atténuation des signaux et performance PLC au GridLab ... 27

8. Mesures de l'impédance du réseau de distribution ... 30

9. Banc d'essais d'immunité des signaux PLC ... 35

10. Modélisation des composants du réseau pour simulation dans le domaine des fréquences ... 38

10.1. Simulation de l'atténuation des signaux ... 40

11. Simulation de réseau dans Digsilent Power Factory ... 41

12. Utilisation et développement d'instruments de mesure spécifiques ... 44

13. Valorisation du projet ... 46

13.1. Collaborations au niveau national et international ... 47
13.2. Normalisation ... 48
13.3. Formations, transmission d'information et conférences ... 51
13.4. Publications ... 52

14. Conclusions et perspectives ... 53

14.1. Perspectives selon le partenaire fabricant de compteurs intelligents 55

15. Remerciements 56

16. Références 57

17. Liste des abréviations 58

18. Annexes 58

2. Introduction

L'office fédéral de l'énergie (OFEN) a publié en mars 2015 une feuille de route suisse pour un réseau intelligent [1]. Ce document prévoit un large portefeuille de technologies applicables pour les différents domaines des réseaux intelligents. Si la plupart des technologies citées pourront être testées en laboratoire, il sera difficile d'évaluer leur robustesse dans leur environnement d'application final. Certaines incompatibilités vont inévitablement apparaître entre divers équipements connectés au réseau de distribution. L'objectif du projet REMIGATE est d'éliminer certaines barrières technologiques pouvant retarder le déploiement des compteurs intelligents et leur utilisation à des fins de gestion de l'énergie ainsi que l'a prévu l'OFEN d'ici aux années 2020.

Une gestion efficiente de la production répartie d'énergies de sources renouvelables et de la consommation par les réseaux intelligents repose sur des systèmes de mesure et de communication fiables. Le contrôle à distance des charges ou la surveillance du réseau de distribution sont réalisés à l'aide de compteurs intelligents ou Smart Meters. La transmission de signaux courant porteur de ligne (CPL), de manière similaire aux commandes centralisées, représente une solution économique pour le transport des valeurs mesurées ou utilisées par ces équipements (Figure 1). La CENELEC a défini la bande de fréquence entre 3 et 95 kHz pour la communication de CPL destinés aux applications liées à la gestion de l'énergie et des réseaux de distribution.

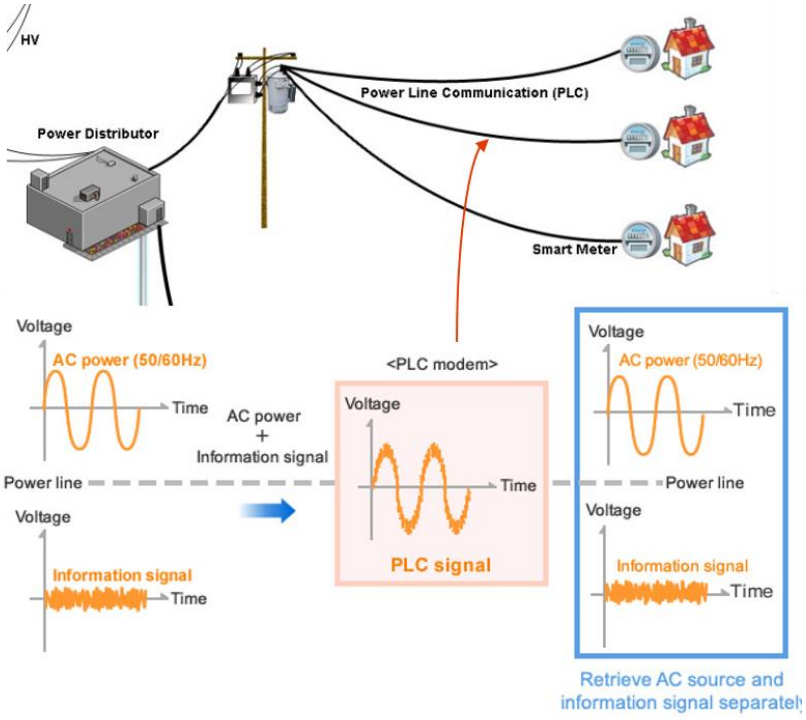


Figure 1: principe de la transmission des signaux par courants porteurs de lignes pour smart meters.

L'intégration au réseau de distribution électrique des énergies de sources renouvelables et réparties requiert l'utilisation d'onduleurs d'injection. De par leur principe de fonctionnement, les onduleurs génèrent des harmoniques de courant et de tension. Les fréquences de ces harmoniques se

répartissent sur le domaine de fréquence de 150 Hz à 150 kHz et correspondent souvent aux fréquences utilisées par les systèmes de communication par courants porteurs de ligne, comme l'illustre la Figure 2. Des interférences apparaissent alors entre onduleurs et systèmes de communication [1] [2].

Les perturbations limitent l'exploitation des installations de production d'énergie décentralisée (IPD) ou le déploiement des technologies 'réseaux intelligents' sur des artères de distribution basse tension. Une analyse des phénomènes d'interférences et le développement de méthodes visant à les supprimer ont été l'objet d'activités de recherche depuis 2014 dans le cadre du projet CEM-Smart Grids issu de la collaboration entre EOS Holding, la HES-SO et le SCCER FURIES.

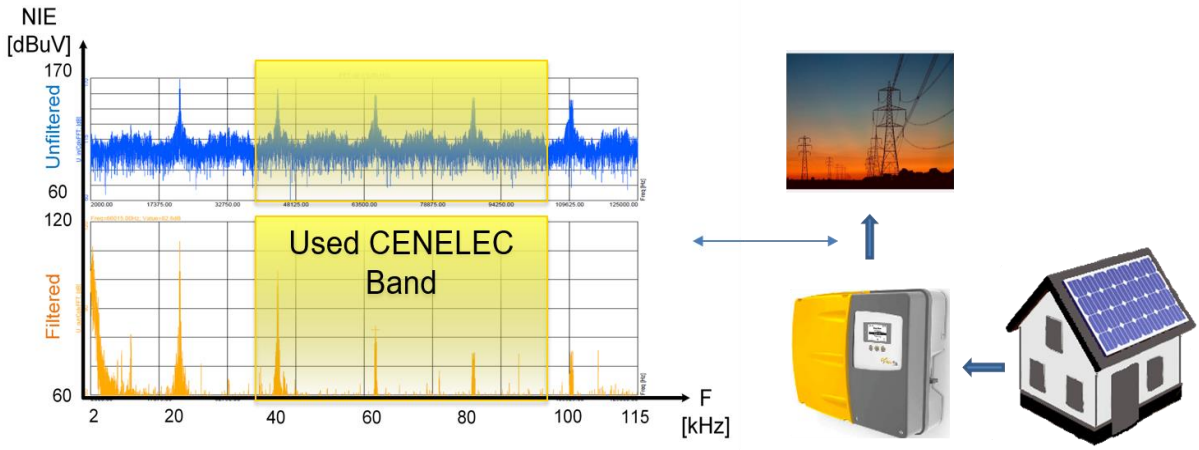


Figure 2 : interférences électromagnétiques générées par les onduleurs dans la bande CENELEC A.

Pendant longtemps seuls les aspects thermiques liés aux harmoniques de courant et le bon fonctionnement du réseau ont justifié des normes dans le domaine des basses fréquences, imposées en pratique en dessous des 2 kHz. Les perturbations engendrées par les systèmes électroniques avec les communications radio exigeaient des limites d'émission conduites à partir de 150 kHz uniquement. Les interférences entre signaux CPL et harmoniques générées par les convertisseurs requièrent de nouvelles normes de compatibilité électromagnétique (CEM) dans la bande de fréquence 2 à 150 kHz. Un filtrage plus restrictif du courant de sortie des onduleurs risque cependant d'empirer la situation plutôt que de l'améliorer : les solutions de filtrage CEM les plus économiques et efficientes ont un comportement capacitif et génèrent des résonances justement dans la bande de fréquence utilisée par les compteurs intelligents pour la transmission de leurs données [3] (annexe A2). Les méthodes normatives CEM classiques doivent être remises en question. Une approche systémique tenant compte de l'efficience énergétique et le coût des onduleurs, de l'impédance spectrale du réseau et des systèmes de communication pour réseaux intelligents doit être considérée. Des phénomènes issus de domaines technologiques traditionnellement séparés sont mis en relation. Les fournisseurs de composants pour les réseaux intelligents ne comprennent pas nécessairement les besoins et contraintes de l'industrie des convertisseurs, et vice versa. Des conflits d'intérêts viennent donc s'ajouter à une situation déjà techniquement complexe.

Grâce à leur approche pragmatique des sciences de l'ingénieur, les hautes écoles de Suisse romande sont proches de l'industrie et des gestionnaires du réseau de distribution. Des compétences dans les différents domaines techniques y sont représentées. La HES-SO a donc une place privilégiée pour participer à l'ébauche et à la mise en place de nouvelles normes et codes du réseau. Elle peut également jouer un rôle formateur auprès des entreprises et leur transmettre des recommandations pour l'application des nouvelles normes CEM.

Une opportunité de développer de nouveaux équipements dédiés à l'intégration des énergies renouvelable aux réseaux intelligents se profile également. Les instruments de mesure nécessaires à l'analyse des interférences dans le domaine de fréquence entre 2 et 150 kHz sont encore rares, imprécis, difficilement transportables ou coûteux. Cela est en particulier le cas pour la mesure de l'impédance en fonction de la fréquence. La HES-SO Valais-Wallis a entrepris le développement d'un équipement dédié à la mesure en ligne de l'impédance du réseau entre 2 et 200 kHz en 2011 déjà [4].

Finalement, les techniciens des entreprises gestionnaires des réseaux de distribution (GRD) se trouvent parfois démunis lorsqu'il s'agit de planifier le déploiement d'une nouvelle infrastructure de mesure avancée pour la facturation et la conduite du réseau. Il est difficile d'évaluer le nombre des répétiteurs nécessaires à une communication par courants porteurs de ligne fiable et la distance optimale entre ceux-ci. La complexité de la tâche augmente en fonction de la topologie du réseau et des charges et sources d'énergie réparties qui y sont installées. Parfois les performances du système conçu et installé ne répondent tout simplement pas au besoins. Des méthodes et outils d'aide au déploiement rapide seraient bienvenus.

Le projets REMIGATE tente d'apporter des réponses à ces questions et manquements. L'ensemble des activités CEM-Smart grids et du projet REMIGATE sont résumées sous la Figure 3 :

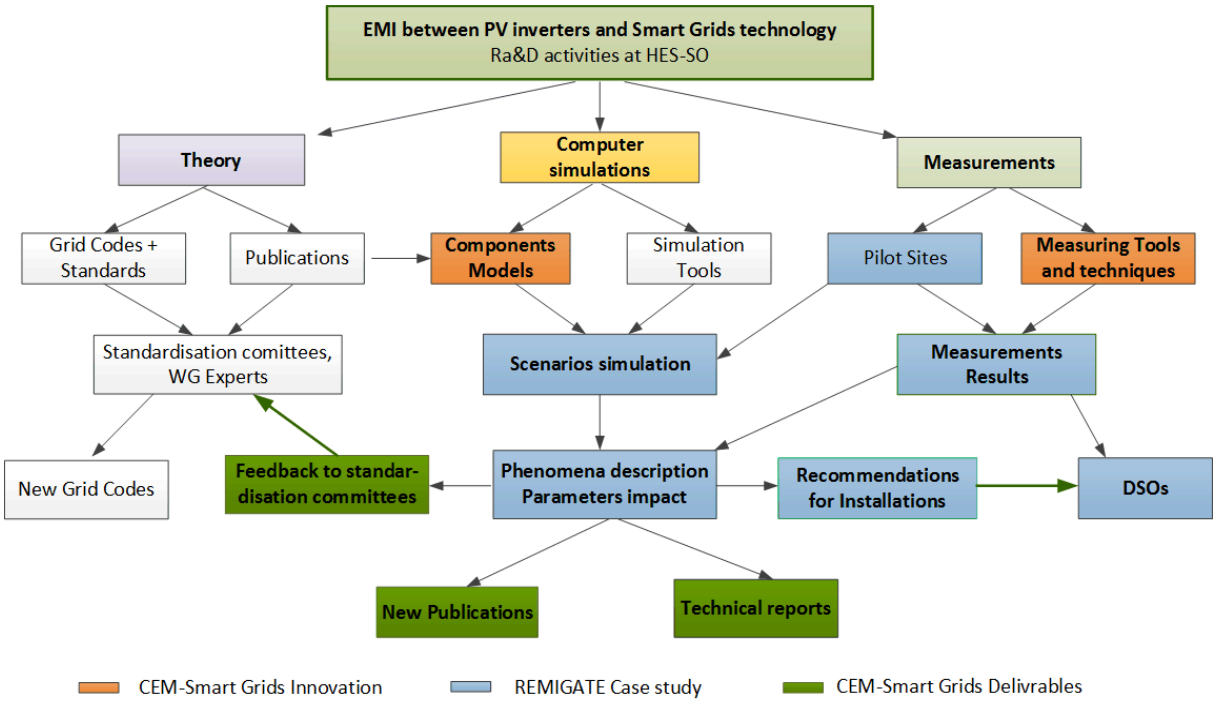


Figure 3: synthèse des activités CEM-Smart Grids et REMIGATE

3. Objectifs du projet

La compatibilité entre systèmes de comptage d'énergie et systèmes de production d'énergie renouvelable est au centre du projet.

L'analyse des perturbations électromagnétiques développée à la HES-SO Valais-Wallis repose sur une modélisation et des simulations du réseau de distribution électrique dans le domaine fréquentiel. Des outils pour la modélisation et pour la mesure des paramètres du réseau ont déjà été développés au cours des projets 'CEM-Smart Grids' et 'Cable' dans le cadre d'un partenariat entre HES-SO et EOS Holding. A condition d'adapter les outils de mesure et de modélisation déjà disponibles, il sera possible d'appliquer cette méthode à l'analyse de perturbations EM entre signaux par courants porteurs de lignes (CPL) transmis par les compteurs intelligents et les installations de production d'énergie distribuée (IPD). Il sera donc possible d'évaluer les risques de perturbations entre les signaux transmis par les compteurs intelligents et les harmoniques générées par les onduleurs d'injection d'énergie dans le réseau.

De manière plus précise, il s'agit de développer, de valider et de mettre en œuvre des méthodes permettant de comprendre, prévoir et d'éviter d'éventuelles interférences électromagnétiques entre smart meters et onduleurs PV. A l'issue du projet, les méthodes et les outils associés devront être plus facilement exploitables par les gestionnaires du réseau, les concepteurs d'installations de production d'énergie décentralisées et l'industrie des smart grids. Par la suite, la méthode pourra être étendue à d'autres applications et à d'autres sources de perturbations telles que, par exemple, les lampes à économie d'énergie ou les chargeurs pour batteries de véhicules électriques.

De telles méthodes et outils ne saurait être mise entre les mains des utilisateurs et exploitants du réseau avant d'être validés et perfectionnés au cours d'essais sur des installations réelles. C'est pour cette phase de validation, d'amélioration et de dissémination que la demande de soutien pour le projet REMIGATE a été déposée auprès de l'OFEN dans le cadre du programme « Projets pilotes, de démonstration et projets phares». L'objectif du projet REMIGATE est de réalsier des mesures sur un site pilote équipé de compteurs intelligents et d'installations de production d'énergie photovoltaïque afin d'évaluer l'impact de la roduction distribuée sur les performance de communication par courants porteurs de ligne. Selon la méthode développée au cours du projet CEM-Smart, un modèle d'une section du site sera établi afin de pouvoir réaliser des simulations du comportement du réseau dans le domaine de fréquence. Une comparaison entre réultats de simulation et mesure de l'atténuation des signaux par courants porteurs de ligne permettra de valider ou d'améliorer la méthode CEM Smart Grids.

Des mesures similaires seront effectués en laboratoire sur un modèle physique de la section de réseau considérée. Le modèle en laboratoire offrira la possibilité de modifier aisément certains composants et paramètres du système, afin de mieux comprendre et évaluer leur influence sur la qualité de la communication entre compteurs intelligents et concentrateurs de donnée. Des recommandations peuvent ensuite être effectuées auprès des concepteurs des installations 'smart grids'.

Ces objectifs requièrent la participation de partenaires industriels. Les Services industriels de Genève (SIG) nous offent la possibilité de réalsier des mesures et essais sur un site pilote en campagne Genevoise. Landis+Gyr fournit des équipements, des recommandations nécessaires à leur utilisation et participera à l'analyse des résultats.

4. Travaux réalisés et résultats obtenus

Les activités déployées au cours du projet et les principales tâches sont résumées schématiquement à la Figure 3. Dans un premier temps, des mesures de performances de communication par courants porteurs de ligne (CPL). Le poste de transformation MT/BT des Quoates à Avusy (GE) et l'une des artères de distribution alimentée par ce poste ont été choisi par les SIG comme site pilote pour le projet. Ces mesures nous ont permis d'établir les liens entre la génération d'énergie photovoltaïque et la performance de communication avec différents types de convertisseurs et deux technologies CPL sur un site réel. Les caractéristiques du réseau pouvant influencer les canaux de transmission des signaux et la performance des systèmes de communication CPL ont également été mesurées sur le site d'Avusy : l'impédance du réseau au point de connexion des émetteurs et récepteurs, l'atténuation du signal le long des câbles et les niveaux de bruits générés par les divers équipements connectés au réseau.

Afin de faciliter nos mesures tout en pouvant modifier les caractéristiques du système sans nuire au bon fonctionnement du réseau, un modèle simplifié a été reconstitué au sein du laboratoire GridLab de la HES-SO Valais-Wallis. Les essais de communication en compteurs intelligents réalisés sur ce modèle ont montré des performances sensiblement différentes à celle mesurées sur le site d'Avusy. Ils nous ont cependant permis de mieux comprendre les processus d'interférences et d'établir quels équipements du réseau ou quels équipements connectés au réseau facilitaient ou au contraire nuisaient à la communication par CPL.

La méthode d'analyse des interférences électromagnétiques entre utilisateurs du réseau développée au cours du projet CEM-Smart Grids est basée sur la modélisation des composants du réseau et des équipements raccordés à la section du réseau de distribution sous forme de circuits électriques simplifiés. Chaque équipement peut être représenté sous forme d'un circuit électriques équivalent constitués uniquement de lignes et de sources idéales, de composants passifs et de commutateurs simples. L'analyse en fréquence du circuit simulé permet de déterminer les facteurs jouant un rôle prépondérant dans l'atténuation des signaux de communication (CPL). Des simulations réalisées en faisant varier les paramètres des composants du circuit nous permettent d'établir des solutions pour la réduction des interférences. Le modèle d'une section de réseau de distribution à étudier inclut des sous-groupes représentant les éléments clés tels que lignes, transformateurs, convertisseurs et les charges passives. Les paramètres des composants du modèle en circuit électrique sont obtenus soit sur la base des dimensions physiques des lignes et conducteurs, soit de mesures effectuées sur le site en question ou soit de calculs. La détermination des paramètres et la validation des modèles obtenus constituent des étapes importantes du projet REMIGATE. Une fois validés, les modèles des équipements seront intégrés au modèle d'une section de ligne de distribution. Ce modèle complet sera implémenté dans un logiciel de calcul de Load Flow capable de travailler à des fréquences couvrant toute la bande CENELEC A. L'atténuation des signaux CPL émis par les compteurs intelligents pourra ainsi être calculée.

Le modèle dans le domaine de fréquence des équipements impliqués ne peut être obtenu par des calculs et simulations seuls. Dans de nombreux cas, seule une mesure permet d'obtenir une information correcte. Un effort particulier a donc été attribué au cours du projet à l'amélioration de l'analyseur d'impédance de réseau développé à la HES-SO Valais-Wallis, afin de le rendre plus précis et plus mobile.

Les mesures sur site, les mesures en laboratoire ainsi que les simulations logicielles nous ont permis de comprendre les processus d'interférence et de mettre en avant le rôle de l'impédance harmonique

modifiée par les charges et convertisseurs connectés à proximité des compteurs intelligents. Ces résultats ont été transmis au groupe de travail du comité CEI en charge d'établir des normes sur les niveaux de bruits émis par les équipements connectés au réseau'émissions non intentionnelles admis. Nous collaborons également activement avec le comité CENELEC en charge de définir les méthodes de test d'immunité des systèmes de communication par courants porteurs de ligne.

Finalement notre expérience sera partagée avec les GRD et les acteurs de la compatibilité électromagnétique en Suisse à l'occasion de cours de formation spécialisée et de séminaires.

5. Principe et considérations théoriques de la communication par CPL

Ce chapitre décrit la technologie de communication par courants porteurs de ligne (CPL) utilisée en Suisse pour la transmission de données entre compteurs intelligents et concentrateur de donnée. Les paramètres pouvant influencer la qualité de la transmission des messages est également présentée.

5.1. Technologies CPL actuellement utilisées pour les smart meters

La première génération de compteurs intelligents installés sur le site d'AVUSY repose sur le protocole de communication de type PLAN+, basé sur des signaux de quelques volts modulés entre deux fréquences fixes (Frequency Shift Key ou FSK). Les fréquences utilisées ont 63 kHz et 74 kHz.

La nouvelle génération de compteurs installés à Avusy repose sur une méthode de modulation beaucoup plus sophistiquée : le Multiplexage par Division Orthogonale des Fréquences ou OFDM divise la plage de fréquence de la bande CENELEC A en plusieurs sous-canaux espacés par des zones libres de tailles fixes. Un algorithme réparti le signal par le biais des différents sous-canaux et recompose le message transmis chez le récepteur. La technologie OFDM permet d'éliminer les phénomènes de bruits ponctuels ou d'évanouissements temporaires du signal sans recourir à des algorithmes trop complexes. Cette méthode perd toutefois de son intérêt si le bruit ou les phénomènes d'atténuation se répartissent sur une large bande de fréquence.

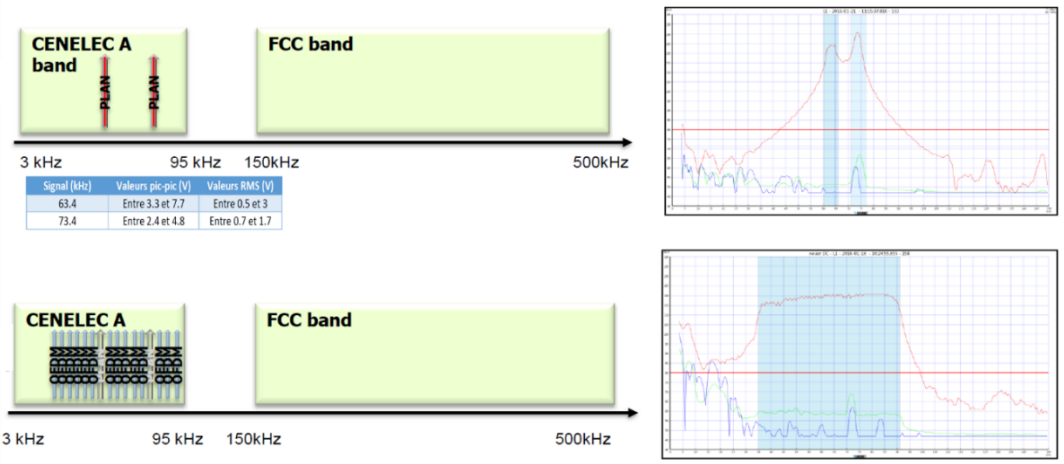


Figure 4 : modulations FSK (haut) et OFDM (bas) dans la bande CENELEC A (Source L+G). A droite, spectre des niveaux de tensions mesurés en cours de communication.

Une méthode relativement complexe a été développée et implémentée sur l'analyseur de réseau évolué DEWE 571 par le groupe mesures et qualité des SIG: cette méthode consiste à filtrer étroitement les signaux mesurés sur les lignes afin de n'afficher que les signaux aux fréquences utilisées par la modulation FSK. La valeur RMS de ces signaux peut ensuite être calculée et représentée sur une échelle de temps. La Figure 5 montre un exemple de mesure selon la méthode développé par SIG où l'on peut e rendre compte de des signaux CPL selon en modulation PLAN.

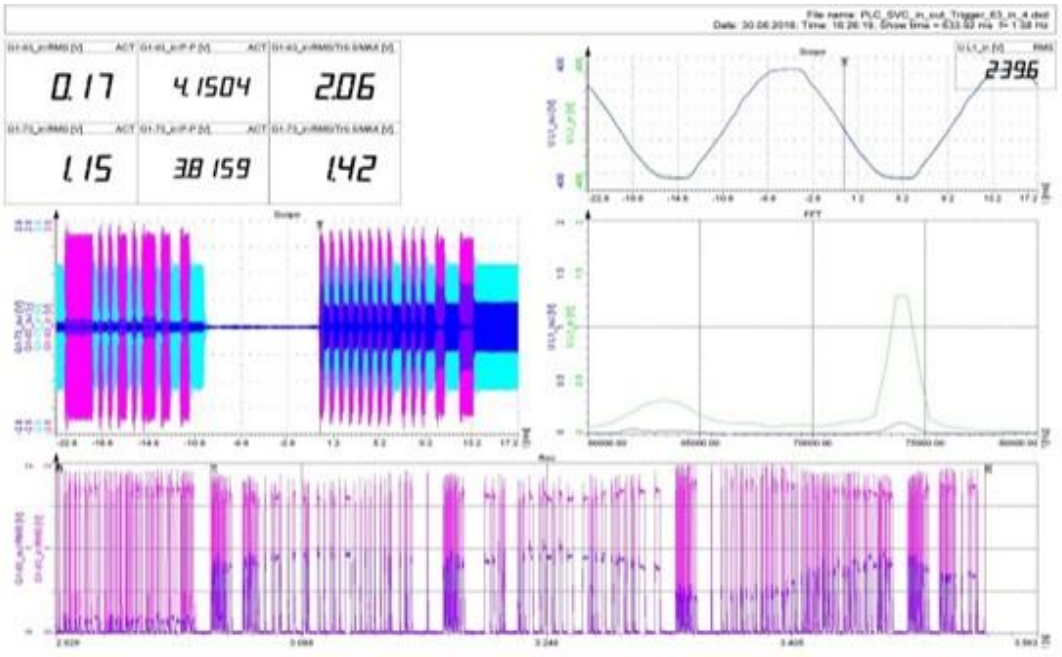


Figure 5 : signaux transmis CPL au format PLAN mesurés au point de connexion d'un compteur intelligent.

Malheureusement, la complexité des algorithmes appliqués aux différentes couches du processus de communication ne permet pas d'établir une corrélation exacte entre la qualité de la transmission et les niveaux d'atténuation des signaux mesurés à chaque extrémités d'une liaison Figure 6). Les protocoles de communication entre les couches PHY (couche physique) et MAC (Medium Access Communication) du gestionnaire de l'interface de mesures avancé (AMI Advanced Metering Interface) sont normalisés. Les fabricants bénéficient toutefois d'une certaine liberté d'action pour augmenter la robustesse de leur systèmes de communication. De plus il n'est quasiment pas possible de déterminer quel équipement émet les signaux mesurés sans observer les messages transmis dans le temps au niveau de la couche MAC de chaque nœud du réseau de communication. Il peut tout aussi bien s'agir d'un signal répété avec une puissance réduite ou augmentée, d'un signal émis par le concentrateur, le compteur considéré ou un autre compteur installé en aval sur la ligne.

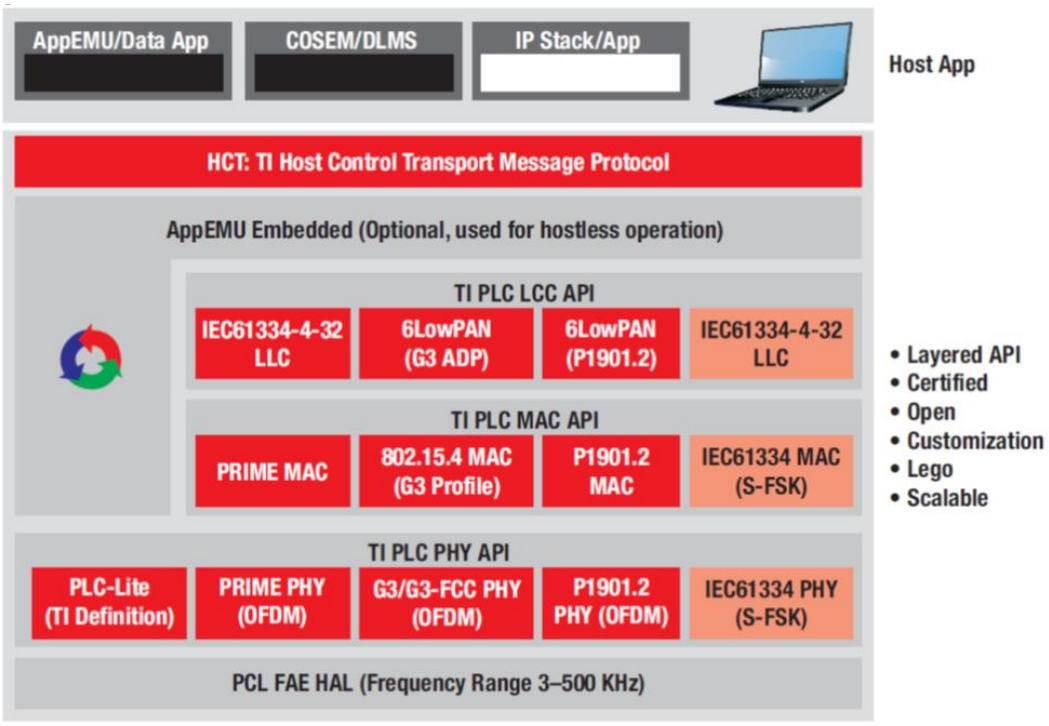


Figure 6 : normes applicables pour les différentes couches de l'API (Application Programming Interface) d'un système de communication CPL (source : plcSUITE software framework de Texas Instruments)

5.2. Modèle simplifié d'un canal de transmission pour CPL

Selon [5], le canal de transmission des signaux de communication par Courants Porteurs de Ligne peut être représenté de manière simplifiée selon la Figure 7.

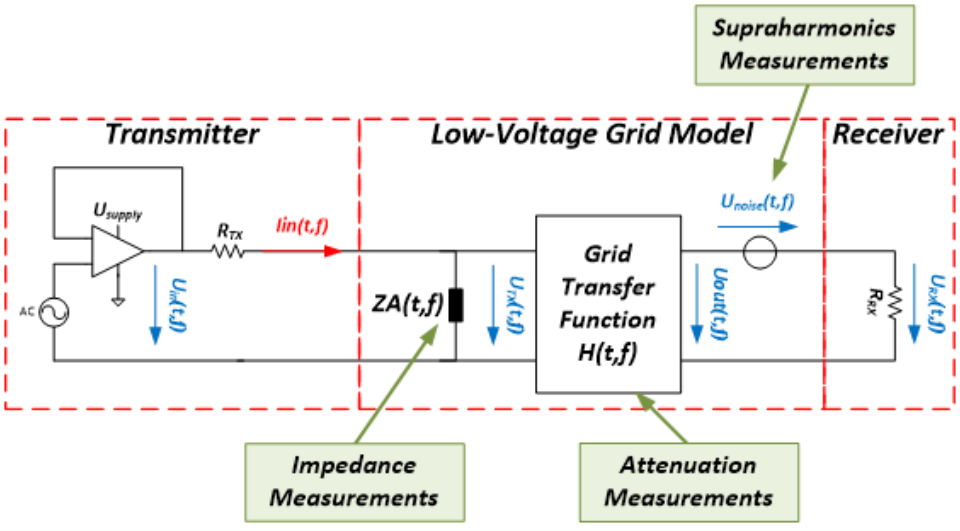


Figure 7: schéma simplifié d'un canal de transmission de communication par CPL.

Trois éléments vont principalement influencer la qualité de la transmission des messages entre compteurs intelligents et concentrateurs de donnée :

- **Access Impedance** : ce composant représente l'impédance du réseau mesuré au point de connexion de l'émetteur. L'impédance d'accès ZA(t,f) varie en fonction de la fréquence et du temps.

- **Grid Transfer Function** : Ce bloc représente la fonction de transfert du circuit électrique entre le point de connexion de l'émetteur et le point de connexion du récepteur. Cette fonction de transfert dépend principalement des lignes et de la configuration du réseau de distribution entre les deux points considérés.

- **Noise Source** : Les systèmes non-linéaire et surtout de systèmes électroniques commutés génèrent des harmoniques et des émissions non intentionnelles dans la bande de fréquence CENELEC A prévue pour la communication par CPL

L'amplitude de la tension $U_{in}(t,f)$ et du courant $I_{in}(t,f)$ émis par le chip de communication intégré aux concentrateur de donnée et smart meters sont limités selon la norme EN 50065-1. Une partie du courant émis sera dévié et absorbé par l'impédance d'accès ZA(t,f). Il s'en suit une réduction de la tension $U_{RX}(t,f)$ reçue par le coupleur de signaux R_{RX} intégré au compteur intelligent. Une source de bruit $U_{noise}(t,f)$ connectée à proximité du récepteur R_{RX} pourra interférer avec la communication en fonction de l'amplitude du signal $U_{RX}(t,f)$. Ce schéma joue un rôle primordial dans la compréhension des interférences entre signaux de communication par CPL et émissions non intentionnelles générées par les onduleurs d'injection.

L'impédance d'accès (Access Impedance) peut être mesurée sur site à l'aide de l'impédance-mètre 'IGOR-meter' développé à la HES-SO Valais-Wallis et décrit plus bas. Le fonctionnement de l'appareil ainsi que les développements apportés au cours du projet sont détaillés dans l'annexe A3. La fonction de transfert du réseau (Grid Transfer Function) est mesurée à l'aide de deux analyseur de réseau de précision (iSirius de DEWESOFT et DEWE 571 de Dewetron). Les émissions conduites peuvent être mesurées avec les mêmes équipements que la fonction de transfert, avec un oscilloscope (12 bits de résolution) ou le MFA 400 de Swemet.

6. Mesures sur sites

6.1. Site pilote des SIG à Avusy (GE)

Afin d'améliorer le fonctionnement du réseau, de réduire les temps de coupure ou d'accéder à la facturation dynamique, les services du comptage des Services Industriels de Genève (SIG) et de la qualité de la tension développent et évaluent des technologies d'automatisation du réseau de distribution depuis plusieurs années. La mesure à distance des valeurs de courant, tension et puissances sur le réseau est une composante essentielle de ce processus. Une technologie de communication par courant porteur de lignes de distribution a même été déjà testée avec succès dans l'environnement urbain de la ville et le canton de Genève au cours des années 1990 [6]. Plus récemment, les SIG ont lancé un programme d'évaluation des compteurs intelligents utilisant les CPL pour transmettre les informations mesurées chez les consommateurs et les producteurs répartis. Une section du réseau de distribution basse tension avec plusieurs centrales photovoltaïques a été sélectionnée pour ces essais dans la zone rurale d'Avusy (GE) afin d'y étudier la cohabitation des

technologies smart et les installations de production distribuées (IPD). Le poste des Quaotes à Avusy est d'équipé d'un transformateur MT/BT de type Dyn11 d'une puissance nominale de 630 kVA. Cette infrastructure, typique en Suisse, a été mis en place en 1992. Le transformateur dessert 6 lignes de distribution basse tension ainsi qu'une antenne Télécom reliées au seul jeux de barres commun de la station (PCC).

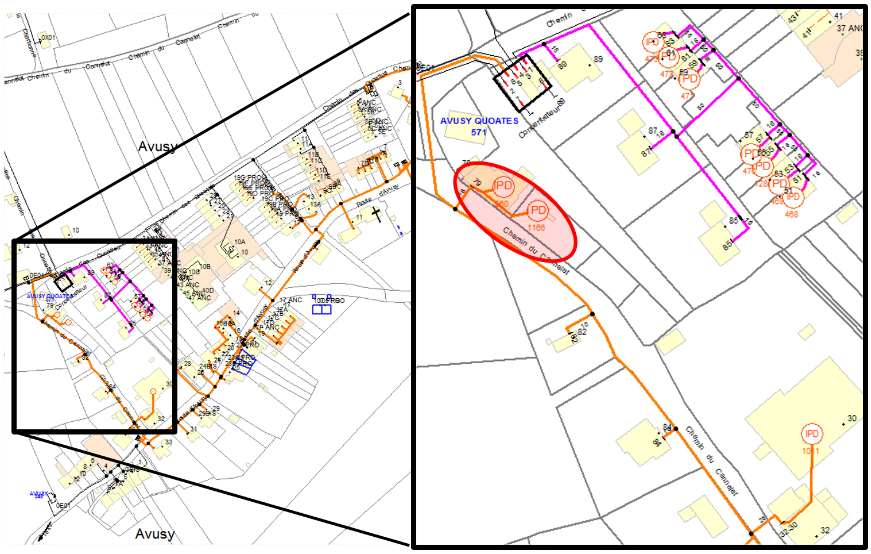


Figure 8 : topologie du site pilote SIG à AVUSY. Disposition cartographique et répartition des IPD et Smart meters.

Quelques 60 compteurs intelligents provenant de trois fournisseurs différents ont été installés dans les bâtiments alimentés par deux des lignes BT au départ de la station de transformation MT/BT des Quoates. Un concentrateur de donnée de type DC 450 y a été installé en juin 2016 au fin du 'Projet Pilote Smart Meters, Tests Perturbations IPD' Le concentrateur est relié directement au jeux de barres de distribution par une ligne propre de 2,5mm2 d'une longueur d'environ 6m.

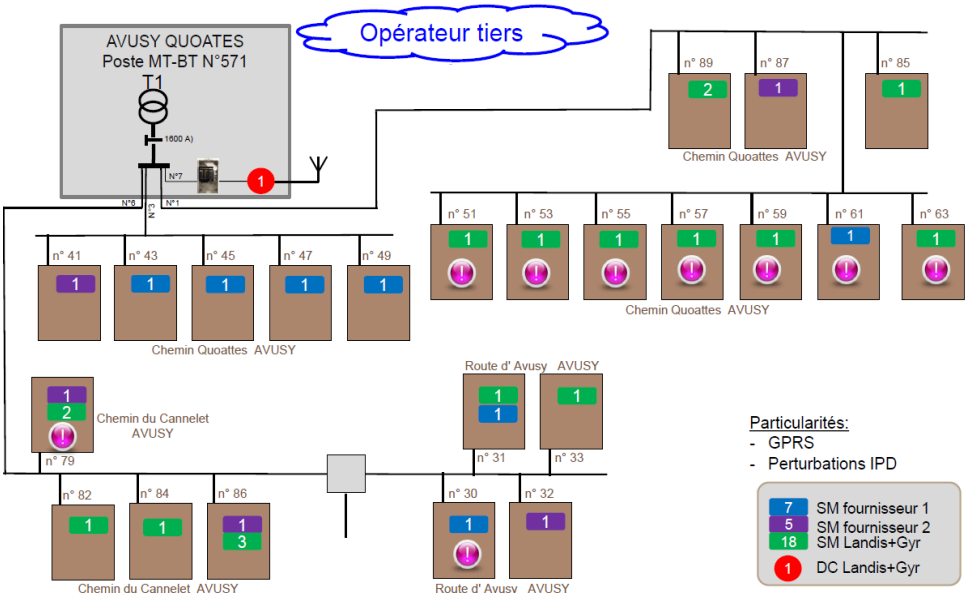


Figure 9 : répartition schématique des installations de production décentralisée et compteurs intelligents à Avusy.

Deux installations de production d'énergie photovoltaïque sont connectées au premier raccordement le long du chemin du Cannelet, desservi par la ligne basse tension No 6. L'une des installations de production est équipée d'un onduleur 'de chaîne' de 10kW, l'autre avec 24 micro-onduleurs pour une puissance totale de 5,4 kW. L'accès aux installations de production ainsi qu'au tableau électrique raccordés à l'IPD a été facilité pour les mesures dans le cadre du projet REMIGATE. L'un des types de compteurs intelligent est fourni pas le partenaire industriel du projet, Landis+Gyr à Zug.



Figure 10 : poste MT/BT des Quoates à Avusy.



Figure 11: site de production PV et compteurs intelligents installés à Avusy (GE).

L'installation des équipements de mesures au poste de transformation ainsi que sur le tableau électrique du site de production photovoltaïque est schématisée sur la Figure 12 :

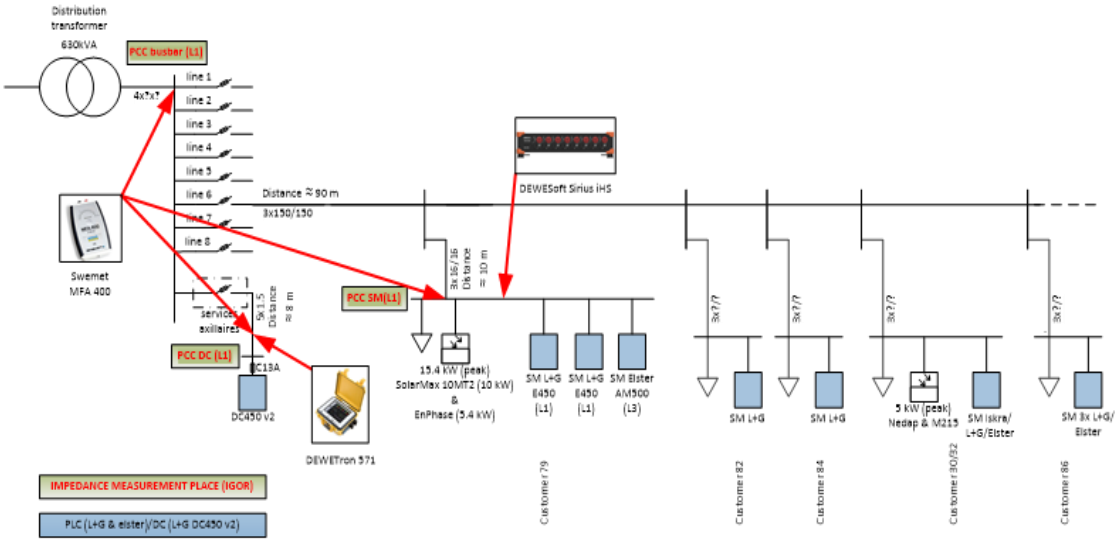


Figure 12 : schéma simplifié de la section de réseau considérée et emplacement des points de mesures

6.2. Mesure de la qualité de la transmission CPL avec technologie ‘PLAN’

Les campagnes de mesures effectués sur le site d’AVUSY ont eu pour objectif de mesurer les performances de communication des compteurs intelligents pour différents scénarios, avec ou sans production d’énergie décentralisée.

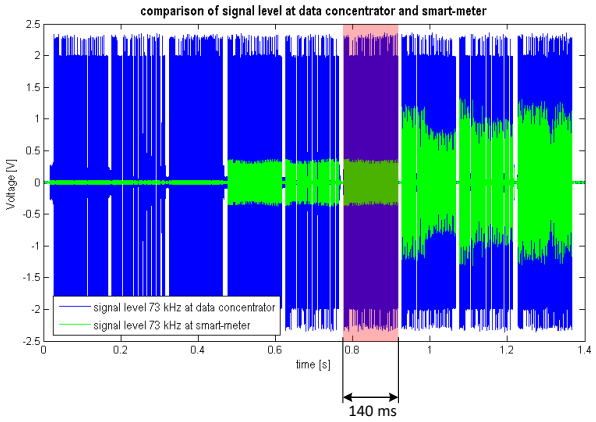


Figure 13 : signaux CPL PLAN+ mesurés au niveau de l’émetteur (Bleu) et au niveau du récepteur (vert).

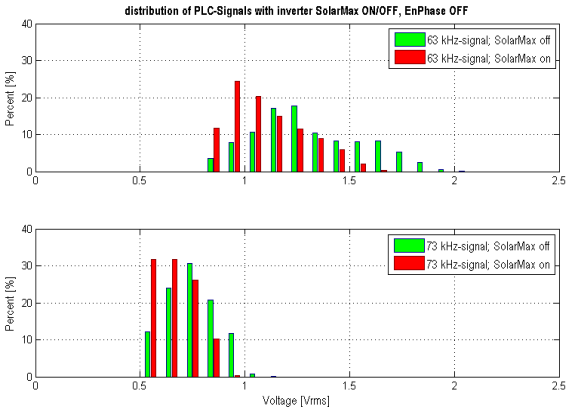


Figure 14 : distribution of PLC signal amplitude in function of PV inverter working mode.

La première action sur le site d’Avusy a été de mesurer l’amplitude des signaux de communication par courant porteur de ligne (CPL) au niveau de l’émetteur, le DC par exemple, ou du récepteur le SM par exemple. (Voir la Figure 13). La distribution statistique des amplitudes des signaux de communication avec différents scénarios d’enclenchement des installations de production d’énergie distribuée (IPDs) a également pu être mesurée grâce à la méthode développée par l’équipe des SIG. La Figure 14 illustre bien la diminution de l’amplitude en cas d’enclenchement du convertisseur de chaîne.

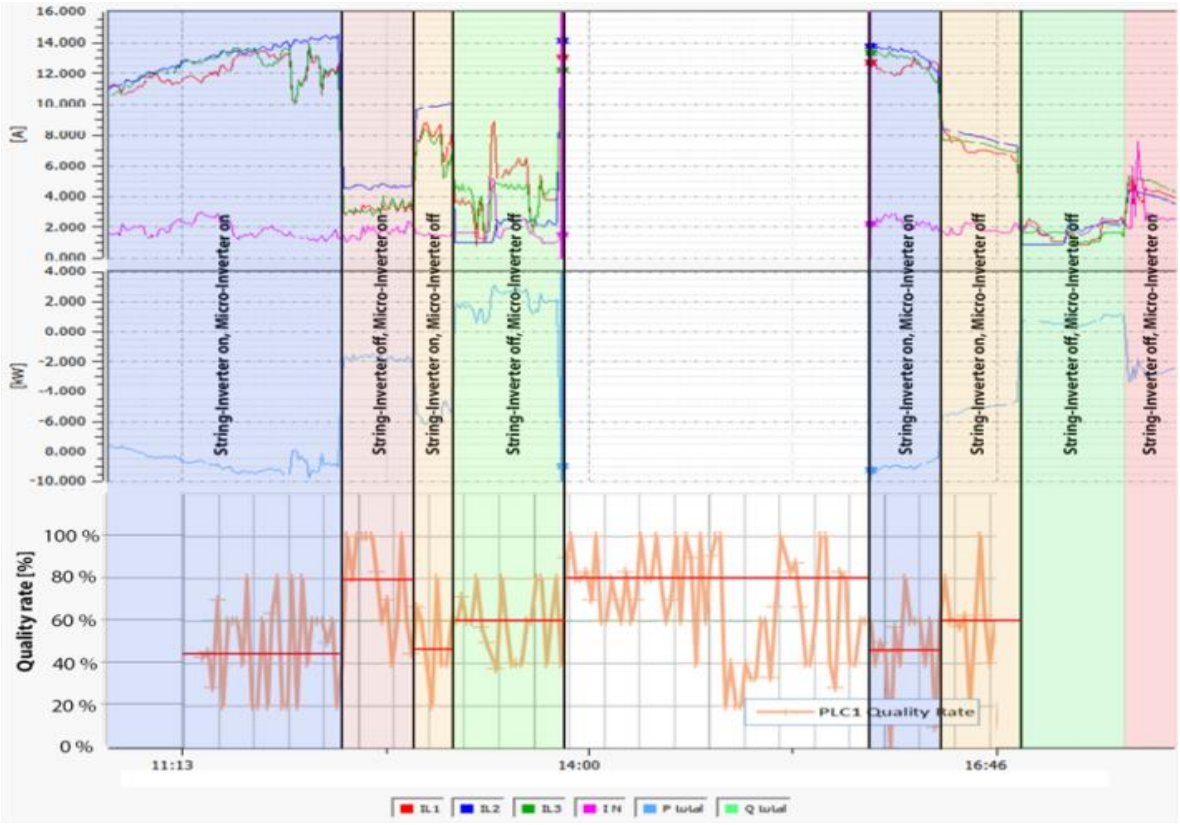


Figure 15 : évolution du taux de succès de communication PLAN à Avusy en fonction de la production PV.

Le fournisseur partenaire de compteurs intelligents nous a aidé à définir et implémenter une méthode plus simple et fiable pour l'analyse dans le temps de la qualité de la transmission des données entre compteurs intelligents et le concentrateur de donnée installé au poste MT/BT. Une routine simplifiée génère des interrogations cycliques du concentrateur de données aux compteurs intelligents. Si le canal de communication est efficient, une réponse sera obtenue du compteur intelligent interrogé. Il est possible de compter et de mémoriser le nombre de requêtes auxquelles le compteur a répondu pendant un laps de temps déterminé. Une statistique des requêtes réussies pendant la période considérée donne une image plus fiable de la performance de communication CPL pour une liaison donnée. Comme le montre la Figure 15, la communication de l'automate était plus lente et moins fiable pendant les périodes ensoleillées de la journée, lorsque les deux types d'onduleurs produisaient de l'énergie. La communication a fonctionné de manière plus efficace dès que l'onduleur de chaîne a été déconnecté du réseau de distribution.

6.3. Facteurs d'influence de la communication CPL sur le site d'Avusy

Ce chapitre décrit la mesure et l'analyse des paramètres pouvant influencer la qualité de la communication selon le schéma simplifié de la Figure 7, dans l'objectif d'expliquer les résultats obtenus selon la Figure 14 et la Figure 15. Les paramètres électriques qui pourraient influencer la transmission des signaux CPL ont été mesurés soit au point de couplage du concentrateur de données (PCC), dans la station de transformateur MT/BT et au point de couplage de l'installation (IPC) au niveau du compteur intelligent dans le premier bâtiment résidentiel le long de la route du Cannelet.

6.3.1. Mesure des émissions conduites

Les niveaux de signaux ainsi que les émissions non intentionnelles ont été mesurés pour chaque scénario où les onduleurs photovoltaïques étaient connectés ou déconnectés de la section du réseau basse tension. Pour chaque scénario l'impédance spectrale du réseau dans la gamme de fréquences 2 à 150 kHz a également été mesurée aux points PCC et IPC avec l'impédance-mètre en ligne développé à la HES—SO Valais-Wallis. [4]. Ces mesures permettent de corréler la qualité de la transmission avec les différent niveaux d'interférences électromagnétiques générés par les onduleurs PV ou avec les modification d'impédance du réseau aux fréquences utilisées par la communication. La Figure 16 représente l'évolution dans le temps des groupes d'émissions conduites dues aux commutation des onduleurs PV ainsi que les signaux PLC G+ (PLAN) des compteurs intelligents installés à l'immeuble sis Route du Cannelet 79. La différence entre les plages de fréquences émissions non-intentionnelles et celle des signaux CPL laisse conclure que les émissions des onduleurs PV ne peuvent à elles seules être la source des interférences réduisant le taux de succès de la communication CPL.

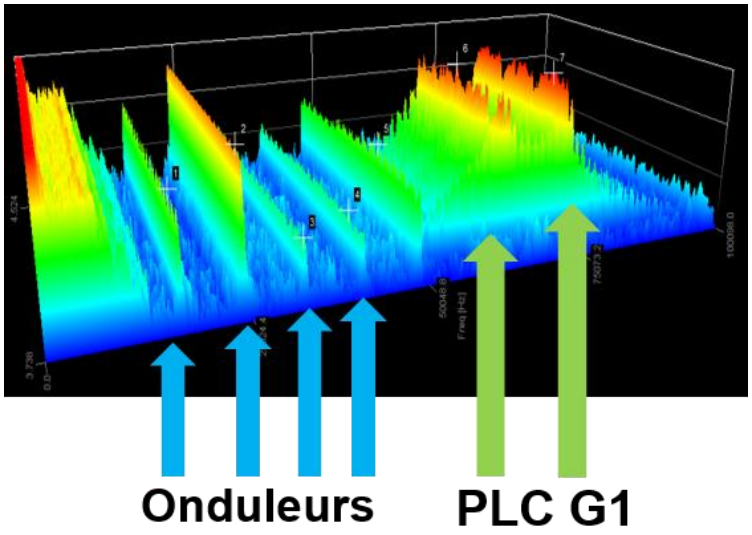


Figure 16 : variation dans le temps des niveaux d'émissions en fonction de la fréquence au point de couplage des onduleurs (Source : C. Pellodi, SIG).

Le Tableau 1 résume les amplitudes des émissions conduites mesurées à l'oscilloscope (FFT) au point de connexion du concentrateur de donnée sur le jeu de barres du poste MT/BT d'Avusy.

	Description	***NIE levels dBµVrms***		***PLC Quality %***		***Zh,min Ω***
		16kHz	***65kHz***			
DC	*PV1 OFF, PV2 OFF*	84.7	115.6	60		4.29
	PV1 ON, PV2 OFF	101.5	114.6	47		4.47
	PV1 OFF, PV2 ON	90.3	115.8	80		4.53
	PV1 ON, PV2 ON	103.9	114.5	44		4.31
SM	*PV1 OFF, PV2 OFF*	92.1	98.3	60		2.09
	PV1 ON, PV2 OFF	116.6	96.3	47		1.98
	PV1 OFF, PV2 ON	89.6	87	80		2.34
	PV1 ON, PV2 ON	115.6	94.6	44		2.25

Tableau 1 : analyse de la fiabilité de transmission CPL P-LAN au niveau de la couche Physique à Avusy – Août 2016.

Une mesure des niveaux d'émissions maximaux sur les jeux de barres du poste MT/BT sur une période de quelques minutes et à l'aide de l'analyseur de terrain MFA 400 de Swemet a permis d'établir la présence d'une source de perturbation importante à 65 kHz, donc très proche d'une des fréquences de communication PLC de type PLAN ou FSK à 63 kHz (Figure 17). La perturbation est produite par l'alimentation sans coupure d'une antenne Télécom reliée directement au départ No 8 du poste MT/BT. Cela a pu être confirmé par une mesure des courants à haute fréquence circulant depuis chaque départ du jeu de barre : les 340 mArms mesurés à 65 kHz sur le départ No 8 se répartissent entre la plupart des autres départs.

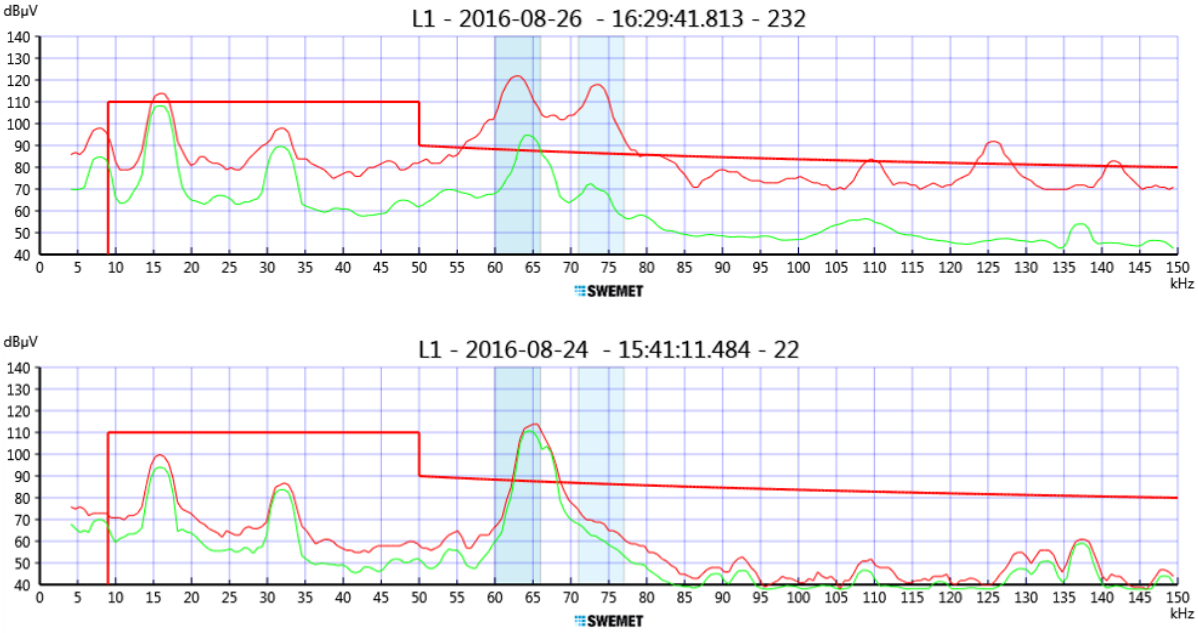


Figure 17 : niveaux d'émissions mesurés au poste MT/BT d'Avusy, valeurs maximales en rouge.
En haut: signaux PLAN à 63 et 74 kHz, commutations de l'onduleur à 16 kHz. En bas, perturbation à 64 kHz.

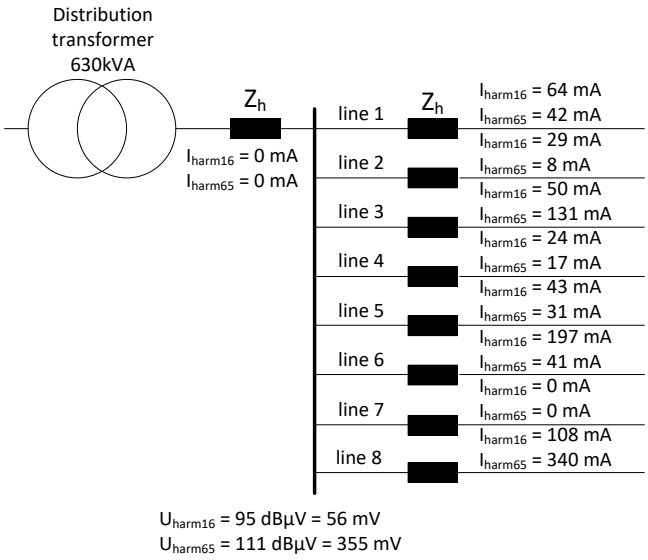


Figure 18 : répartition des courants haute fréquence entre les départs du poste d'Avusy à 16 kHz et 65 kHz.

6.3.2. Mesure de l'atténuation le long des lignes

La méthode appliquée pour la mesure de l'atténuation des signaux le long des lignes est décrite dans l'annexe 2. Une telle mesure a ét réalisée entre le Point Commun de Connexion (PCC) du concentrateur de donnée et le PCC de l'installation PV et des compteurs intelligents Rte du Cannelet 79, selon le schéma reproduit à la Figure 12. Les deux points de connexions sont réliés par un câble de type GKN de 3x150mm2 + gaine de 150mm2 d'une longueur de 90m.

Des mesures de l'atténuation des signaux ont été réalisées dans le cas de différents scénarios, tenant compte de l'état d'enclenchement ou de fonctionnement des onduleurs photovoltaïques. Le graphe de la Figure 19 représente un signal émis en début de section de ligne au niveau du concentrateur de données (en orange), le signal mesuré par le récepteur en bout de section de ligne à l'emplacement du smart Meter (en bleu) et le niveau des perturbations conduite présentes sur le réseau (en jaune), sur une plage de fréquence s'étalant de 0 à 250 kHz.

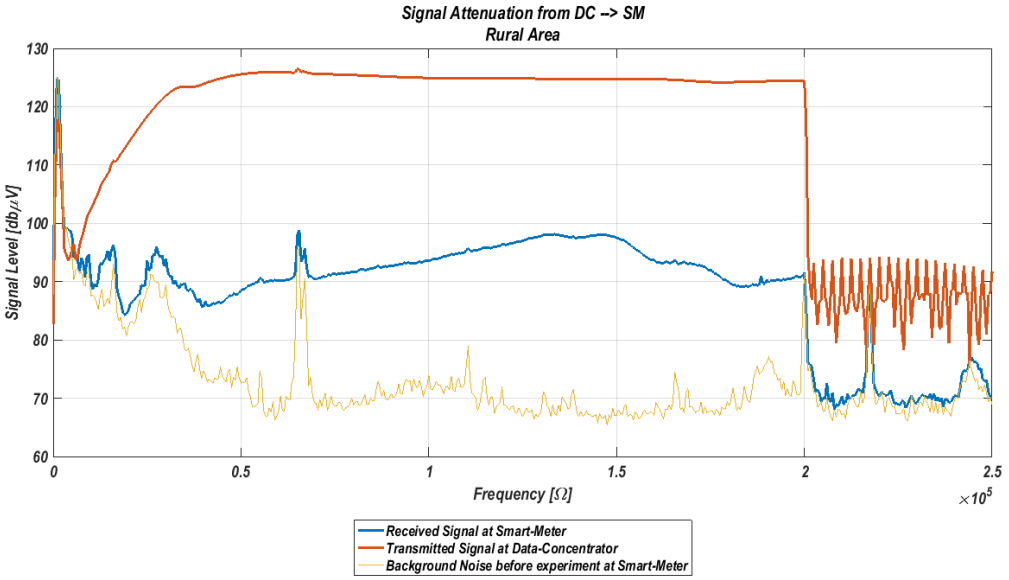


Figure 19 : exemple de mesure de l'atténuation des signaux entre DC et SM et perturbation à Avusy.

On constate que le signal émis a une amplitude quasiment constante entre 30 et 200kHz. Le signal reçu est nettement atténué. A certaines fréquences, comme par exemple à 64kHz, les perturbations présentes sur le réseau au point de connexion du compteur ont une amplitude supérieure à celle du signal mesuré en bout de la section de ligne. La communication PLAN utilisant une fréquence de 63kHz a toutes les chances d'être interrompue dans ce cas de scénario. La Figure 20 représente l'atténuation de signaux dans la gamme de fréquence CENELEC A mesurée dans le cas de deux scénarios différents : dans le premier cas les convertisseurs PV sont déclenchés (en bleu), dans le deuxième cas les onduleurs sont enclenchés (en rouge). On constate que l'atténuation dans la bande CENELEC A est importante, mais ne dépend quasiment pas de l'état de fonctionnement des onduleurs. Une atténuation aussi importante n'étant normalement pas due aux câbles eux-même, il s'agit de chercher leur source ailleurs.

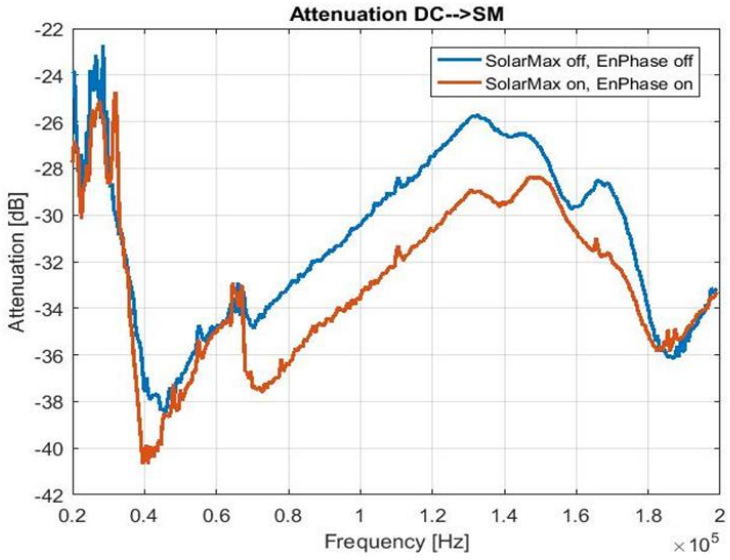


Figure 20 : atténuation des signaux transmis par la section de câble de 90m à Avusy.

6.3.3. Mesure de l'impédance harmonique aux points de connexion

La méthode de mesure de l'impédance harmonique du réseau est décrite dans l'annexe A3. Des mesures selon cette méthode ont été réalisées sur le site d'Avusy, dans le cas de différents scénarios tenant compte de l'état d'enclenchement des onduleurs PV, par exemple. Les résultats de ces mesures sont résumés ici.

La Figure 22 représente les résultats de mesure de l'impédance en fonction de la fréquence à trois points du réseau de distribution sur le site d'Avusy: au point de connexion du concentrateur de données (en bleu), sur le jeu de barres du poste MT/BT des Quoates (en vert) et au point de connexion de l'immeuble rte du Cannelet 79 (en rouge). Ces mesures ont été toutes effectuées entre la phase L+ et le neutre alors que les onduleurs PV étaient déclenchés. La mesure d'impédance proche du transformateur montre un comportement inductif. La différence entre jeu de barre et DC est due aux 8 mètre de câble de 4x1.5mm2 qui sépare les deux points. Quelques petites résonances sont remarquées au point de connexion du concentrateur de donnée. Elles ne réduisent l'impédance d'accès que de quelques dB. L'impédance au point de connexion des smart meters est normalement plus élevée, du fait du câble qui sépare le point du transformateur. Cependant, la présence de charges avec des résonances proches des 20 kHz et 30 kHz réduisent l'impédance à partir des 16kHz. L'impédance d'accès proche des fréquences du signal PLAN demeure supérieure à 4 Ohm.

La Figure 21 nous montre que l'enclenchement des convertisseurs PV n'a quasiment aucune influence sur l'impédance au point de connexion du concentrateur de données. Dans les trois cas de scénarios, sans onduleur, avec onduleur de chaine ou avec micro-onduleurs, l'impédance en fonction de la fréquence dans la bande CENELEC A varie très peu. Elle est fortement influencée par le comportement inductif du transformateur MT/BT. On remarque cependant des résonances autour des 40 kHz et 60 kHz dues à la présence des convertisseurs. Ces résonances ne réduisent l'impédance d'accès du concentrateur de données que de quelques dB à ces fréquences.

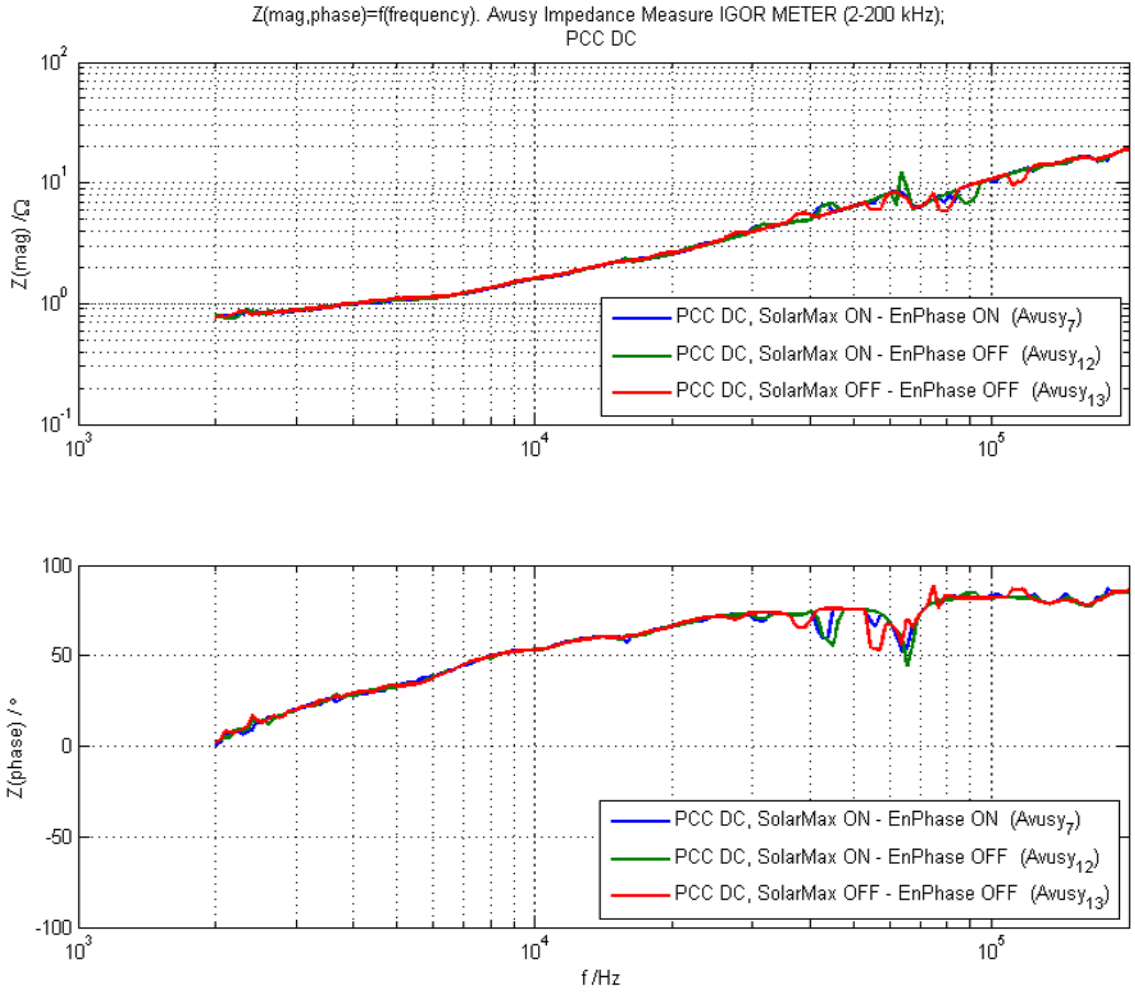


Figure 21 : mesure de l'impédance au PCC du concentrateur de donnée en fonction de la production PV.

La Figure 22 illustre le comportement fréquentiel de l'impédance à différent points le long du canal de communication entre concentrateur de donnée et premier compteur intelligent le long de la ligne ' départ 8' du poste MT/BT des Quates. On constate la prédominance du transformateur et le comportement inductif de l'impédance mesurée sur le jeu de barre du poste (trace verte). L'impédance d'accès du concentrateur de donnée est légèrement supérieure à l'impédance du transformateur, due à la section réduite du câble reliant le concentrateur (6 à 8m en 1.5mm2). Certaines petites résonances apparaissent au sommet de la bande CENELEC, probablement due à la connexion et au circuit d'alimentation du concentrateur de donnée. L'impédance d'accès demeure cependant supérieure à 5 Ohms sur toute la bande utile à la communication PLC (trace bleue). L'impédance mesurée au PCC des compteurs intelligents de l'installation PV augmente du fait de la section de câble supplémentaire de 1 Ohm sur la bande de fréquence inférieure à 15 kHz. Au-dessus de cette fréquence des résonances apparaissent et affaiblissent l'impédance d'accès des compteurs intelligents de plusieurs Ohms, sans que les onduleurs PV ne soient connectés au réseau. Cette information est importante, elle démontre que d'autre charges non linéaires ou équipées d'un filtre CEM, connectées à ce point de couplage ont une influence sur Zh et donc potentiellement sur la qualité de la communication.

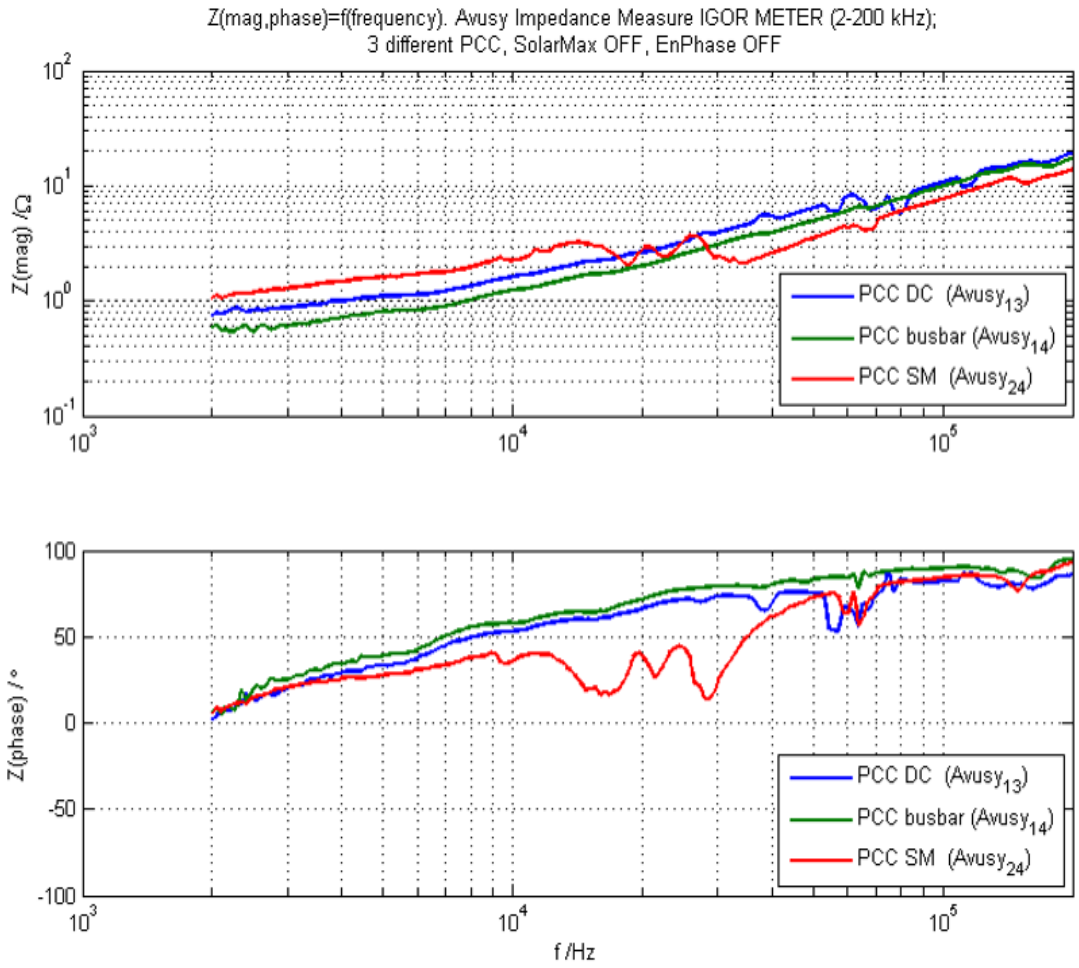


Figure 22 : comparaison de la mesure de l'impédance de réseau à 3 points de couplage, onduleur déclenchés.

La Figure 23 démontre qu'au contraire d'autres charges présentes sur le site mesuré en début de ligne 6 à Avusy, l'onduleur photovoltaïque de chaine (10 kW) n'a qu'une influence minimale sur l'impédance d'accès des compteurs intelligents **dans la bande CENELEC**. Ce filtre de type LCL- montre par contre une résonance aux environs des 6 kHz, ce qui est usuel pour un onduleur commutant à 16 kHz. Le filtre CEM de sortie de cet onduleur de chaîne peut être considéré comme 'PLC friendly'.

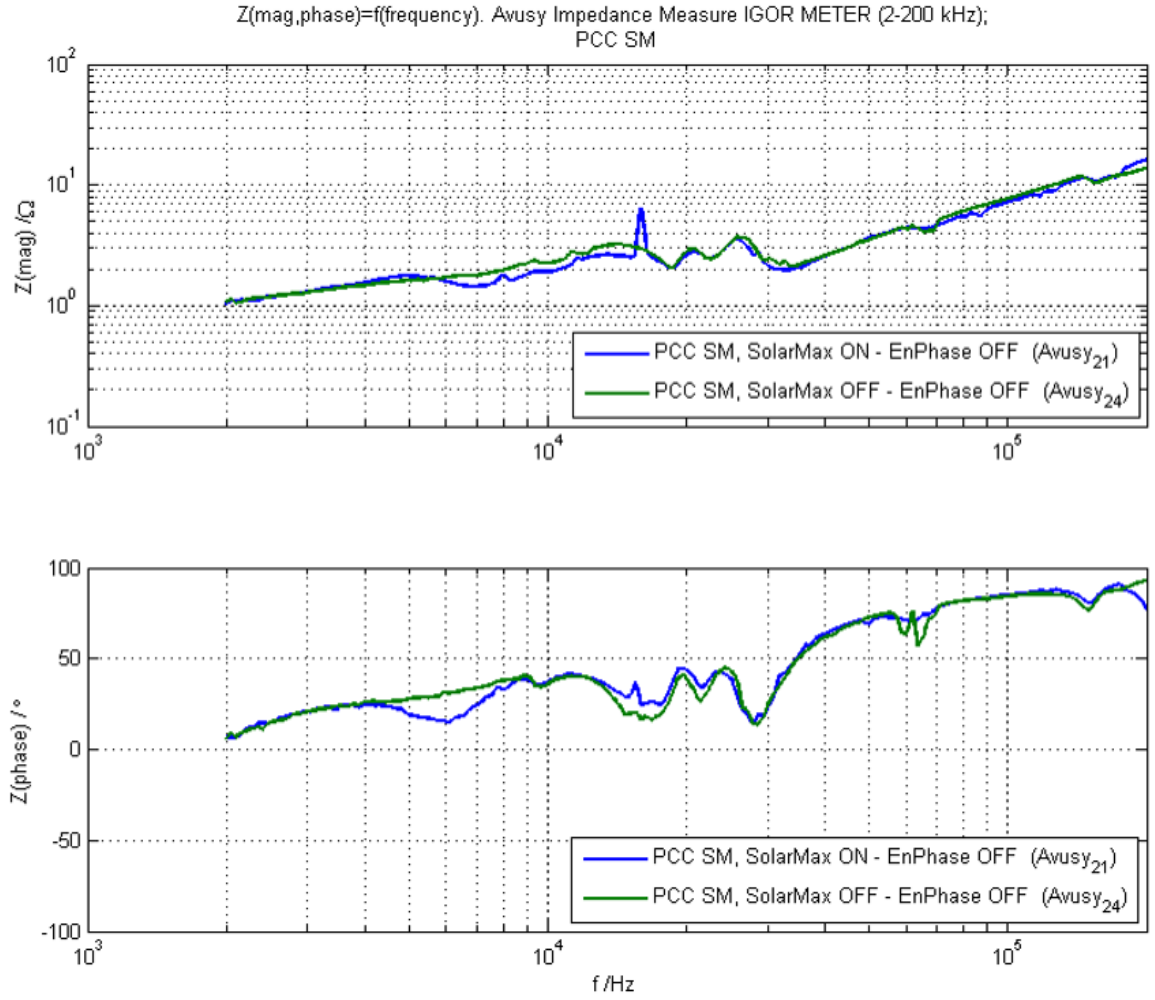


Figure 23 : influence de l'onduleur de chaine au point de couplage des compteurs intelligents.

6.3.4. Mesure de la qualité de la transmission CPL avec technologie G3-PLC

Au cours du pintemps 2017, les compteurs intelligents originaux ont été remplacés par de nouveaux compteurs plus modernes communicant en OFDM selon la norme G3-PLC. Les mesures de qualité de la transmission des signaux PLC à la suite de l'installation des nouveaux compteurs ont montrés des résultats nettement meilleurs, proches des 90% en moyenne. Ce résultat positif illustré à la Figure 24 était espéré par le GRD en tant qu'utilisateur et attendu par le fournisseur de compteurs intelligents.

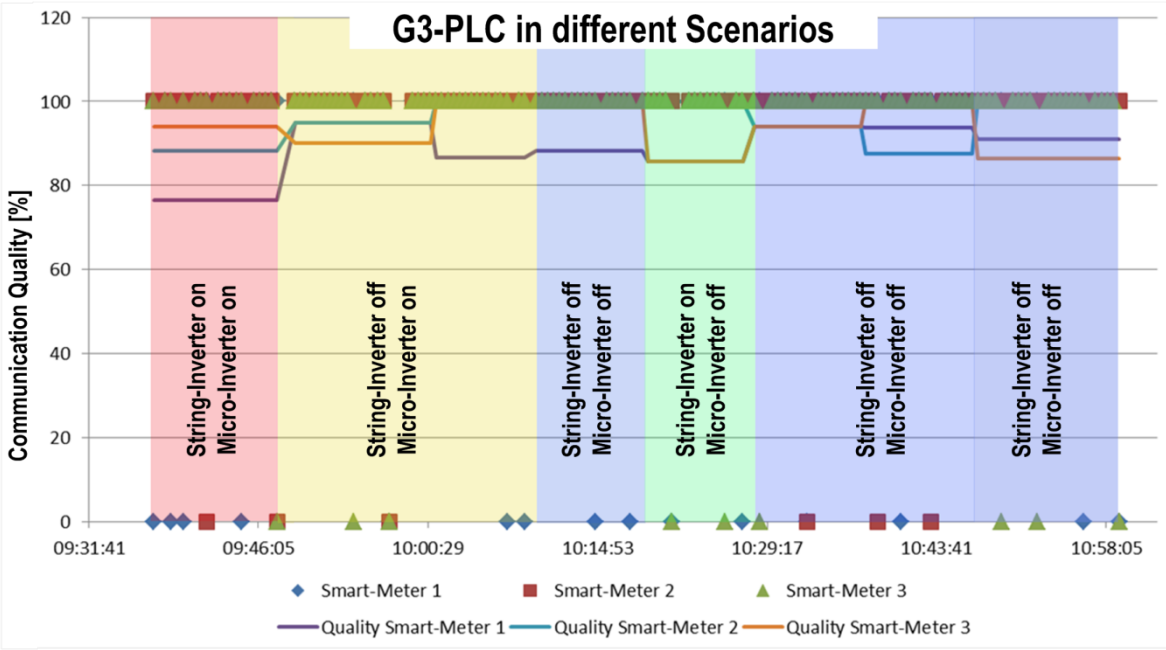


Figure 24 : évolution du taux de succès de communication G3-PLC à Avusy en fonction de la production PV.

6.3.5. Analyse des résultats

Les résultats présentés ci-dessus démontrent clairement l'influence négative des onduleurs de production d'énergie photovoltaïque sur l'efficacité des transmissions de donnée par CPL de type PLAN. Les mesures effectuées sur le site réel nous ont permis d'évaluer et d'améliorer nos méthodes de mesures d'impédance de réseau, d'atténuation des signaux et d'émissions conduite sur le terrain. L'influence directe des onduleurs photovoltaïques sur l'atténuation des signaux CPL ou sur l'impédance spectrale de réseau $Z_{h,grid}$ sur le site d'Avusy n'a cependant pas pu être clairement établie. La raison évoquée est la présence d'équipement inconnus ou non localisés sur la section de réseau. Les mesures au point commun de connexion (PCC) dans la station de transformation MT/BT ont montré que d'autres équipements que les IPD généraient des interférences. Ceci est au moins le cas pour un ballast électronique pour éclairage et une alimentation sans coupure pour une antenne télécom. Même sans injection d'énergie de source photovoltaïque le niveau de communication dépasse rarement les 80%. A noter que des perturbations générées par ce même type d'alimentation pour antenne Télécom ont pu être observés dans deux autres site équipés de compteurs intelligents PLAN, l'un à St-Gall et l'autre à Verbier (VS).

Dans le cas d'Avusy, le passage à une modulation OFDM selon la 'norme' G3-PLC a clairement amélioré la situation et la robustesse de la communication entre compteurs intelligents et concentrateur de données. Une explication probable est l'immunité améliorée face à une source de bruit ponctuelle, telle que la perturbation à 65 kHz générée par l'alimentation télécom.

Afin de mieux pouvoir étudier l'impact des onduleurs photovoltaïques sur la communication entre compteurs intelligents, nous avons pris l'option de continuer les travaux de mesures au laboratoire GridLab de la HES-SO Valais-Wallis, où une version simplifiée de l'installation d'AVUSY a été reproduite.

7. Modèle du site réel au laboratoire GridLab

De trop nombreux équipements inconnus sont susceptibles de créer des interférences ou de modifier l'impédance du réseau dans le site réel SIG d'Avusy. Un modèle simplifié et de taille réduite a donc été reconstitué au GridLab, laboratoire pour l'intégration des énergies de source renouvelable au réseau, sur le site de la HES-SO Valais-Wallis à Sion (VS). L'objectif principal des essais effectués au GridLab était de valider les méthodes de modélisation des canaux de communication dans le domaine de fréquence. Une évaluation de la robustesse de la communication avec différentes sources de perturbation a également été effectuée. Le modèle réalisé au GridLab et présenté à la Figure 25 ne correspond pas aux infrastructures de test proposées dans les normes ou dans différentes publications au sujet de la caractérisation des transmission de signaux par PLC. ([7] par exemple). Le modèle simplifié du site d'Avusy comprend un transformateur triphasé de 25 kVA, une section de câble de type GKN de 6mm^2 et de 60 m, trois compteurs intelligents, un onduleur PV de chaîne de type Solarmax 10MT2 et quatre micro-onduleurs connectés aux modules solaires photovoltaïques. Des charges complémentaires peuvent être connectées à différents points du circuit afin de simuler des équipements consommateurs. La section de réseau d'essai est découplée du réseau de distribution AC par une impédance normalisée de type V-LISN selon la norme CISPR 16-1-2. Malgré les nombreux équipements connectés au réseau du laboratoire GridLab, un niveau de bruit inférieur à 70 dBuV a été mesuré sur l'artère d'essai, en aval de l'impédance normalisée, lorsque les compteurs intelligents et les onduleurs photovoltaïques étaient désactivés.

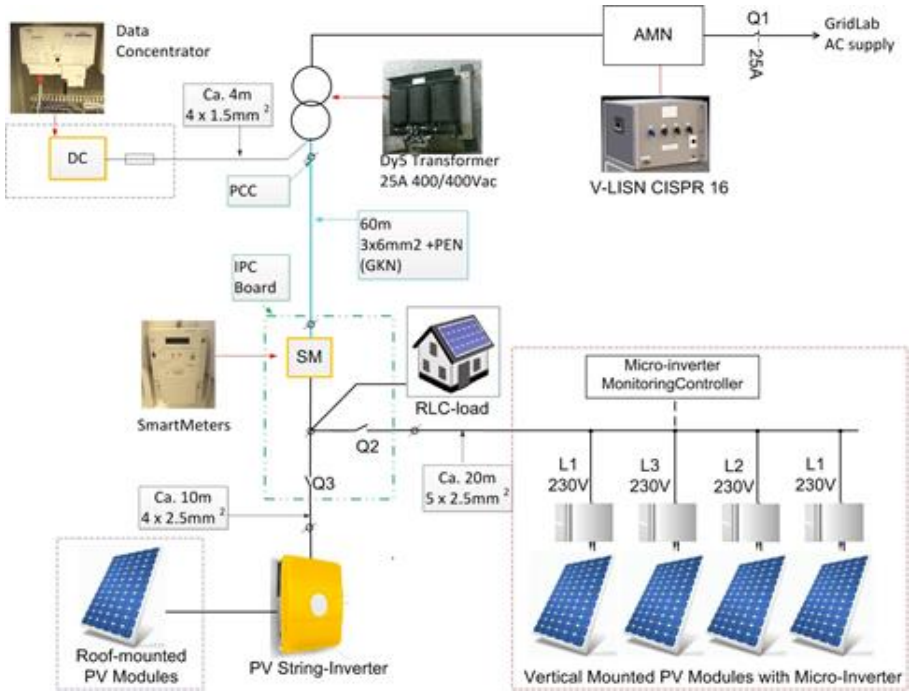


Figure 25 : schéma de principe du modèle de section de réseau BT réalisé au GridLab.

Un câble de type GKN de 3 x 6 mm2 avec une gaine de 6mm2 a été installé dans le GridLab. Ce type de câble correspond à celui des câbles enterrés à Avusy. La réduction de section par rapport au site réel représente le meilleur compromis en termes de coûts et de maniabilité. La longueur du câble de 60 m a été choisie afin de générer une chute de tension de ligne +/- 1,5% à charge nominale. Ce dimensionnement correspond à celui réalisé de manière homogène pour les artères du GridLab District.

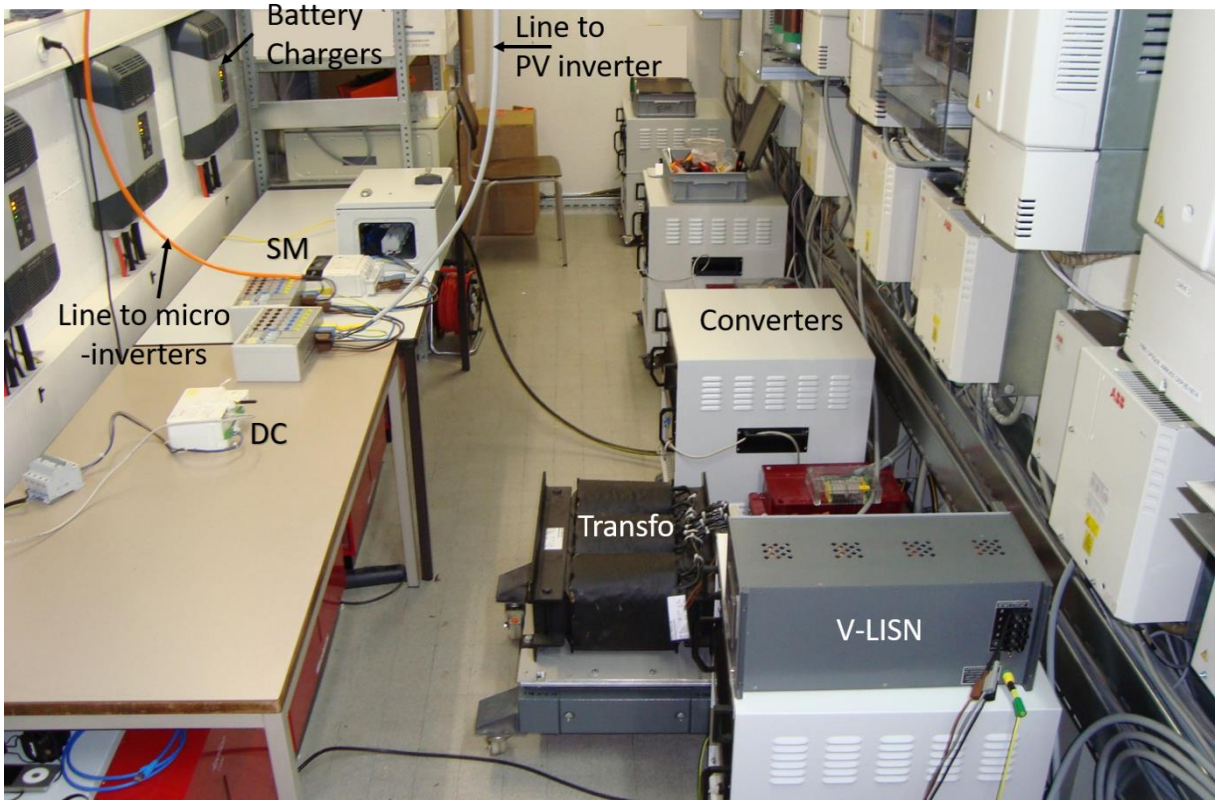


Figure 26 : modèle du site d'Avusy au GridLab.

7.1. Mesure de l'atténuation des signaux et performance PLC au GridLab

Les essais réalisés au GridLab nous ont permis de construire et de valider des méthodes de mesures et d'évaluation de la qualité de transmission dans des conditions optimales. La méthode de mesure de l'atténuation des signaux en fonction de la topologie de la section de réseau étudié à l'aide des analyseurs de réseau DEWESOFT iSirius et DEWE571 a été développée et affinée aux cours de ces essais, avant même d'être appliquée au cours des mesures effectuées à AVUSY. Pour la suite des travaux au GridLab les mesures ont pu être avantageusement effectuées avec deux canaux du DEWESOFT iSirius uniquement, les points de mesures en début et en fin de ligne étant physiquement très rapprochés. La technique de mesure fait largement appels aux capacités exceptionnelle de programmation du DWESOFT pour le post traitement et l'analyse des résultats (filtres, FFT, calculs entre canaux, etc.) Un circuit de couplage des signaux injectés sur les lignes à la tension de 230Vrms a également été développé pour les essais d'atténuation au GridLab et sur les sites pilotes. Ce coupleur s'inspire et indique des performances très similaires au systèmes d'injection de signaux CPL équipant les compteurs intelligents testés. Le développement des techniques de mesures pour l'atténuation des signaux CPL sont détaillées dans le rapport spécifique à l'annexe 2.

Une méthode pour l'évaluation de la qualité de la transmission CPL a également pu être développée au GridLab sur la base des outils informatiques fournis par le fournisseur de compteurs intelligents. Cette méthode repose sur des appels d'essais simples émis artificiellement par le concentrateur de donnée (DC) aux compteurs intelligents. Ces appels nommés 'PING's' dans le jargon des experts en communication, sont transmis régulièrement à l'un ou à plusieurs compteur(s) intelligent(s) et exigent une réponse de celui-ci. Si le compteur adressé retourne un signal au concentrateur et manifeste ainsi sa présence dans le temps limite prévu, on estime que la communication est fonctionnelle. Partant de

l'outil web standard fournit par L+G, il a toutefois fallu développer un outil pour l'analyse statistique des résultats dans le temps adapté à nos besoins. Cette méthode, développée au GridLab, a été transmise à nos partenaires de projets et a pu être appliquée au cours de la plupart des mesures sur site du projet REMIGATE.

L'atténuation des signaux entre le concentrateur de donnée et les Smart Meters a été mesurée dans différentes configuration de réseau et différents scénarios : d'abord sans production d'énergie décentralisée (Figure 27), puis au cours des scénarios suivants: a) Micro-onduleurs seuls branchés, b) onduleur de chaîne seul branché et c) production totale (Figure 28). L'atténuation sans onduleurs est minime (< 2 dB entre 1 kHz et 100 kHz). Quasiment aucune différence d'atténuation n'a pu être mesurée entre les deux scénario sans onduleurs, l'un communicant du concentrateur de donnée DC vers les compteurs intelligent (SM), l'autre transmettant un signal depuis le compteur vers le concentrateur. Ce résultat était toutefois celui attendu.

Il est important de noter ici qu'aucune différence notoire n'a pu être mesurée entre les configurations avec un câble de 30 ou avec un câble de 60m. Un câble de 60 m reste toutefois 'court' pour ce qui concerne la transmission de signaux CPL à des fréquences inférieures à 100 kHz.

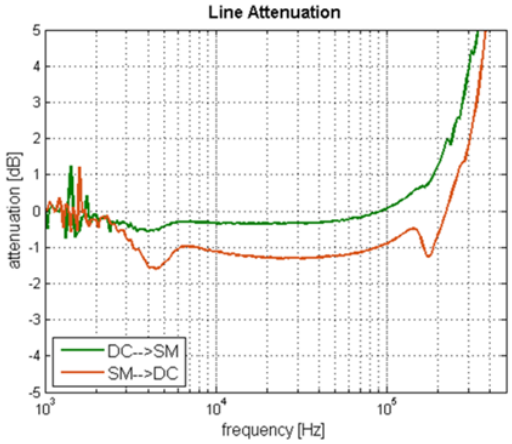


Figure 27 : mesure de l'atténuation au GridLab, à vide (sans convertisseur).

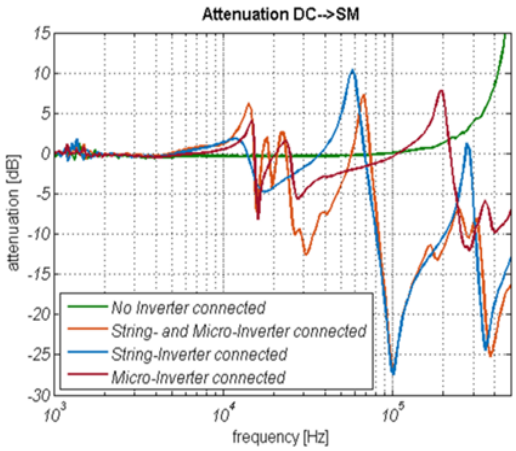


Figure 28: gains de la transmission DC vers SM mesurée avec onduleurs connectés mais inactivés.

Dans le cas des scénarios impliquant des convertisseurs, les résultats sont toutefois plus intéressants. Sur la mesure illustrée à la Figure 28, les onduleurs sont connectés au point d'installation commun (IPC), mais ils ne sont pas activés. Ils ne génèrent donc pas d'émissions non intentionnelles pouvant interférer avec les signaux de communication eux-mêmes. Dans ce cas, seuls les filtres CEM destinés à limiter les émissions non intentionnelles générées par les onduleurs peuvent influencer les gains de transmission mesurés. En observant la Figure 28, on constate que les filtres CEM des convertisseurs connectés en parallèle avec le Smart Meter créent dans le cas de la communication DC vers SM des atténuations de l'ordre de -10dB dans la bande CENELEC A (-12dB à 30 kHz). Ce résultat obtenu avec un nombre très restreint d'équipements pourrait s'accentuer fortement dans le cas normal d'installation PV plus conséquentes (24 micro-onduleurs à Avusy en comparaison des 4 installés au GridLab). On remarquera par ailleurs les variations de gains très fortes et leurs changements de signe en fonction de la fréquence. Ce phénomène est dû aux résonances des filtres CEM constitués principalement d'inductances et de capacités.

Ce résultat confirme la théorie présentée par le comité normatif IEC TC 22 dans un rapport très complet publié en 2012 ainsi que par le comité CENELEC SC 205A dans leurs rapports sur les interférences dans la plage de fréquence 2 à 150 kHZ : la communication par courant porteur de ligne peut être affectée non seulement par des émissions conduites non intentionnelles dites 'actives', mais également de manière 'passive' par absorption des signaux par les résonances séries des filtres CEM. Ce processus sera décrit de manière détaillée au chapitre traitant des essais réalisés avec le banc de test d'immunité des systèmes de communication PLC au laboratoire d'électronique industrielle.

Les gains de transmission DC vers SM relativement faibles dans la bande CENELEC A, tels que mesurés au GridLab et représentés à la Figure 28 n'ont cependant pas conduits à une réduction de performance de la communication PLC de manière notoire. Cela est aussi valable pour la communication PLAN que pour la communication par G3-PLC. La situation s'est toutefois nettement détériorée lorsque de plus nombreux équipements, en particulier des chargeurs de batterie supplémentaires ont été connectés à proximité du point de couplage IPC.

8. Mesures de l’impédance du réseau de distribution

During the time of the REMIGATE project access impedances in different places all over Switzerland were measured. An overview of the measuring locations is shown below. Measurements were done in urban (high costumer) and in rural areas with a lower density of costumers. This diversity is important to show if differences on the grid impedance are visible depending on costumer density (power level).

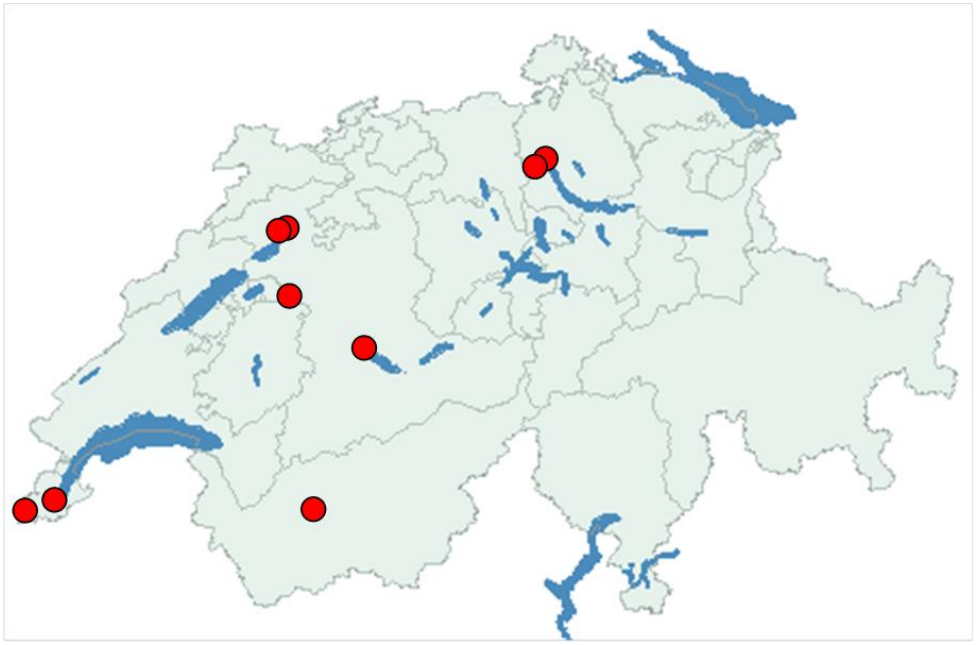


Figure 29 : Overview of the locations of the different measuring points.

Measurements were done at three levels of the grid, on the low-voltage busbar in transformer stations, at distribution cabinets and at the introduction of costumers. This reflects the installation points of smart-meters (near to costumers) and data-concentrators (distribution cabinets, transformer stations).

These measurements have shown that impedance at transformer stations and distribution cabinets have a very similar shape for all measured points. This leads to the conclusion, that at these two points of the grid the impedance depends mainly on the grid configuration and not on connected loads. By measuring impedances over several days no significant time-variant behaviour was recognized. This is positive for PLC since injected voltage level will stay constant over the whole day. Also for PLC-companies this fact will offer the capability to match output impedance to the grid.

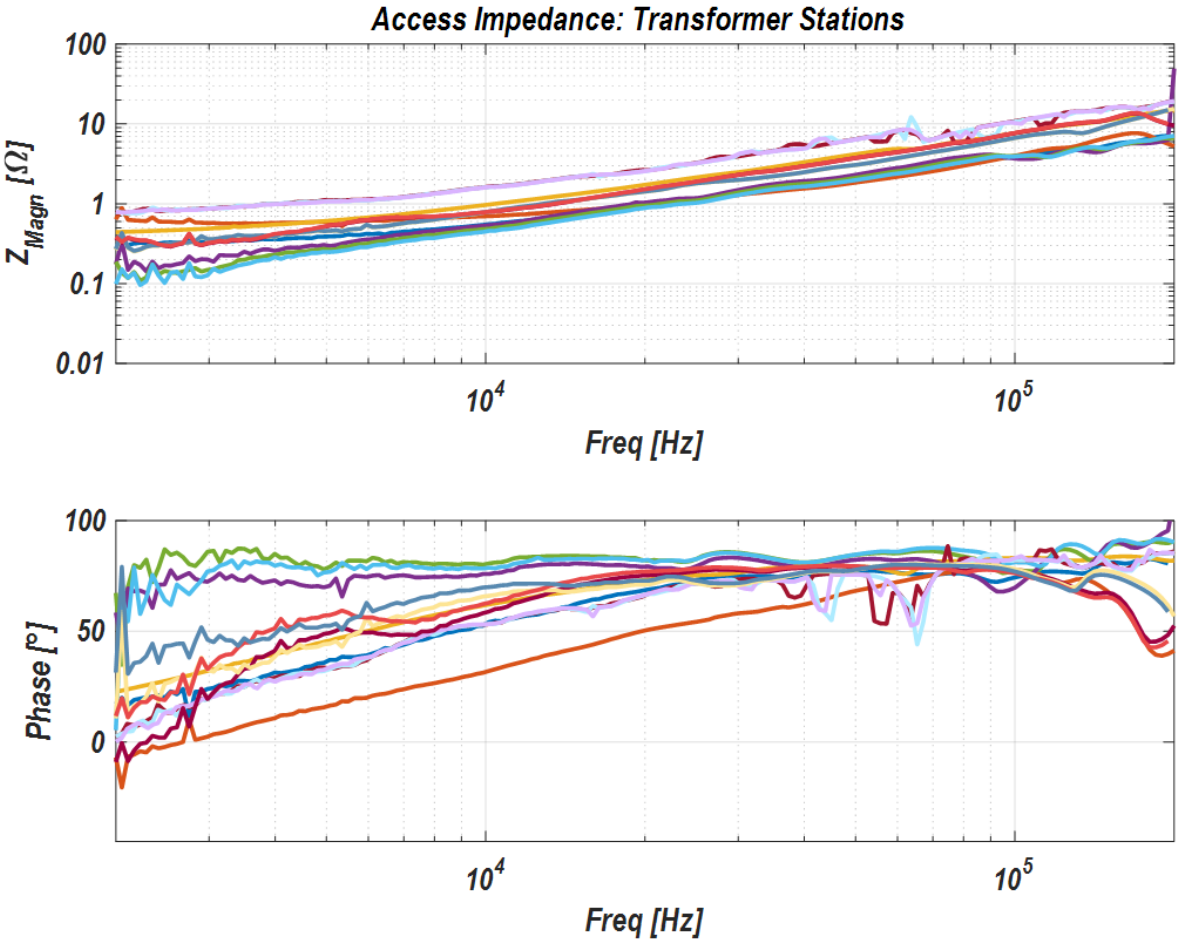


Figure 30 : summarized impedance measurements at transformer stations.

The situation is totally different when measurements were done near to costumers. The impedance for frequencies higher than some kHz at this point of the grid depends mainly on connected loads. Almost all characterised loads and devices show very high impedance up to some kHz. As a result, loads will affect access impedance below a few kHz only minimally, since grid impedance is much lower. Since end-users are free to connect and disconnect every kind of load or device, the impedance shows time-varying behaviour. This leads also to change in the transmission channel. These effects make a reliable communication between transmitter and receiver hard to reach, since every device connected to the grid can stop communication. This also explains why PLC communication works with one costumer, but not with the neighbour.

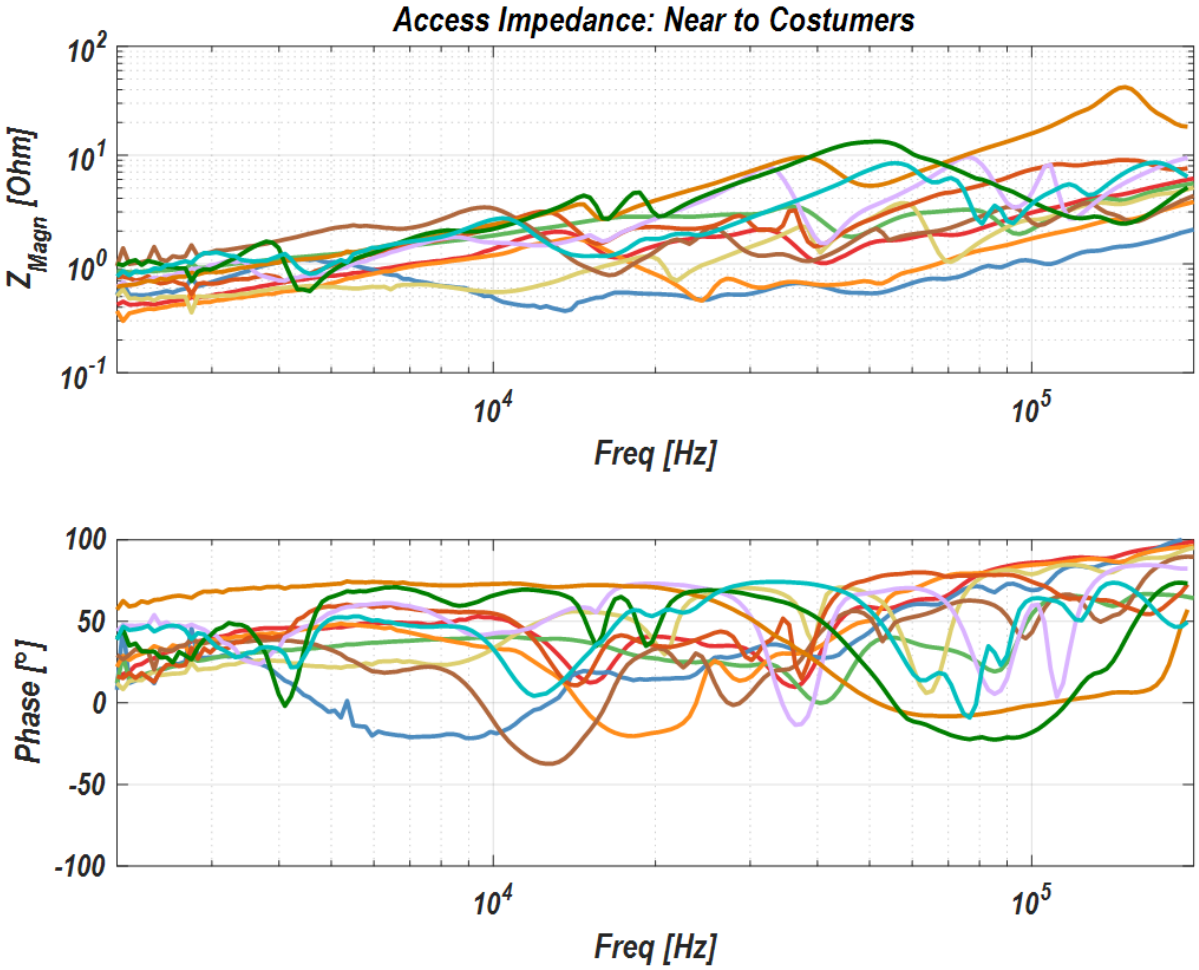


Figure 31 : summarized impedance measurements near to costumers.

Main results are summarized in the figure shown below. At the transformer station level of the grid, impedance of all measured points over Switzerland was of similar shape and magnitude. Further, impedance showed negligible time-variant behaviour. The magnitude of impedance was always higher than 1 ohm. In distribution cabinets, a similar behaviour was measured. In terms of magnitude and time variance of the impedance, this point of the grid is very similar to the distribution transformer. Near to costumers, access impedance will change from one costumer to another. Thus, impedance at this grid level depends mainly on connected loads and devices and shows resonances according the input characteristic of these. Below an illustrative example of this change in access impedance due to the connection of an inverter is shown. One can see that resonances in the input impedance characteristic of the inverter will lower down overall grid impedance at the connection point. Thus it is a parallel connection between the input impedance of the device and the grid impedance at the connection point.

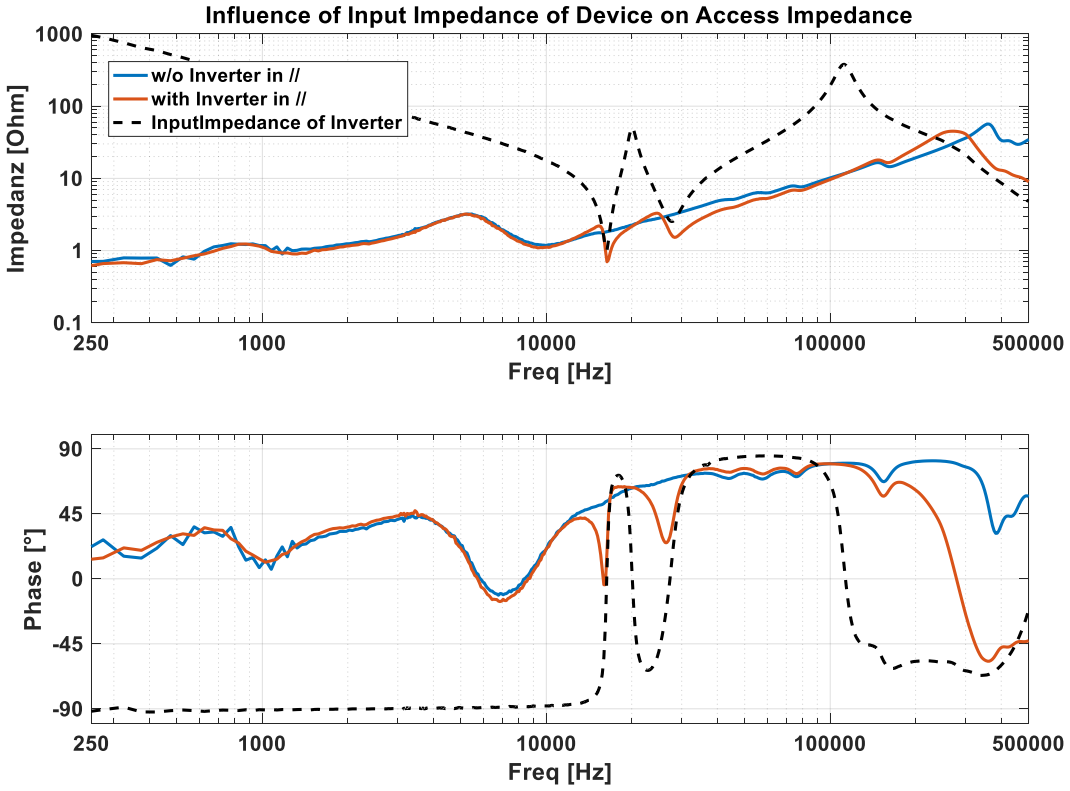


Figure 32 : change of access impedance due to the connection of a PV inverter.

This fact makes it really hard to establish a reliable communication channel since every connected or disconnected load will change the impedance and thus the channel.

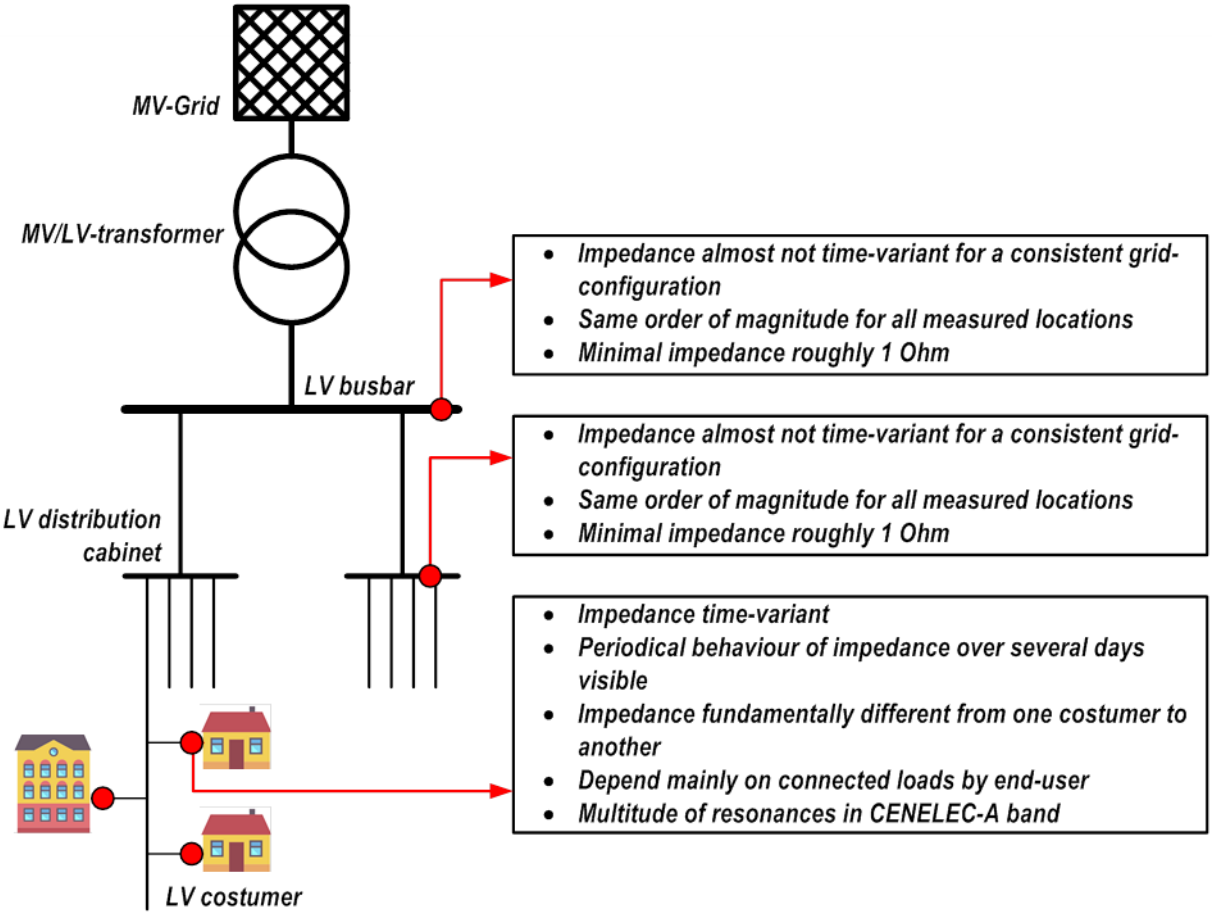


Figure 33 : summary of the impedance measurements.

Obtained results clearly show the negative impact of loads and devices connected by an end-user. Furthermore distribution system operator cannot influence the connection or disconnection of such loads, since costumers are free to plug devices to the grid. In order to decrease the influence, normative regulation on input impedance characteristic is needed.

9. Banc d'essais d'immunité des signaux PLC

In order to be able to quantify the influence of any kind of device or load on PLC, the standardised performance test bench according to the ETSI recommendation [8] was established in the laboratory. Building our own PLC immunity test set-up was also intended to support our standardisation activities. It is worth mentioning that any PLC technology working up to 500 kHz can be tested and compared on this test-bench. The final setup is shown in Figure 34. Power is supplied through some filter and a V-network to the transmitter and the receiver. Theses filter and artificial mains networks insert an attenuation of 90 dB in minimum between the transmitter and the receiver to avoid HF-signals to pass through the grid. It is worth mentioning that transmitter and receiver are state-of-the-art data-concentrator and smart-meter. A high-pass connection between the two networks is established with the capacitor C3 and the audio taper VR1. By changing resistance of VR1, attenuation between the transmitter and the receiver can be changed continuously from 0 dB to 90 dB. Any kind of load or perturbation device can be connected by closing switch SW1, which leads to a great flexibility. Communication quality is evaluated by means of data rate and ok-rate. The ok-rate is complementary to the so-called message error rate (MER) defined as:

$$MER(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{M_r}{M_s}\right), OKRate = 100\% - MER(\%)$$

Thus it is a ration of received messages at the receiver and sent messages of the transmitter.

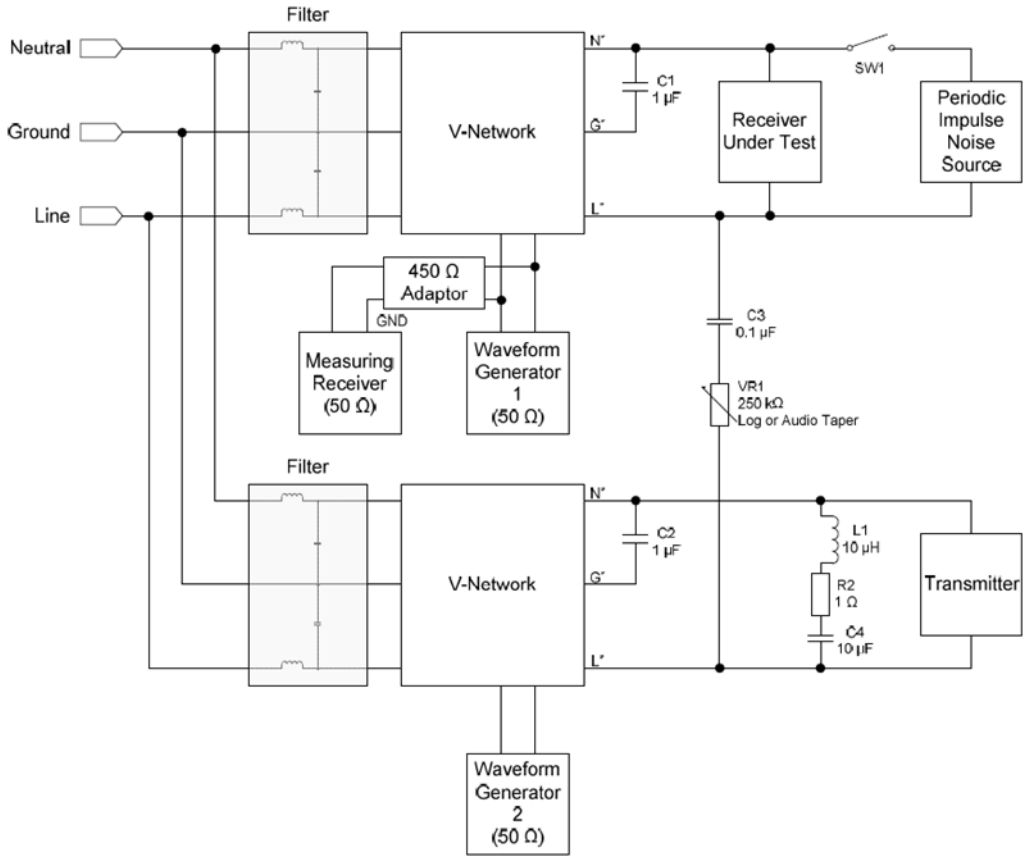


Figure 34 : banc de test pour la mesure de performances de technologies de PLC selon [8].

First, the influence of a battery charger on transmission quality of two different PLC technologies was analysed. For the reference measurements switch SW1 was open and thus the battery charger had no influence on transmission quality. It was measured, that technology PLAN+ worked up to an attenuation of 75 dB between transmitter and receiver. For G3-PLC technology data transmission stopped for an attenuation higher than 65 dB. After this, battery charger was connected by means of the switch SW1 to the setup. For PLAN+ transmission quality was already perturbed when no additional attenuation between receiver and transmitter was set. G3-PLC worked up to 10 dB of attenuation and then transmission quality collapsed. It was found, that mainly the shape of the input impedance of the battery charger is responsible for the drastic worsening of communication quality. In addition the device increases the noise level at the receiver due to injected non intentional emission.

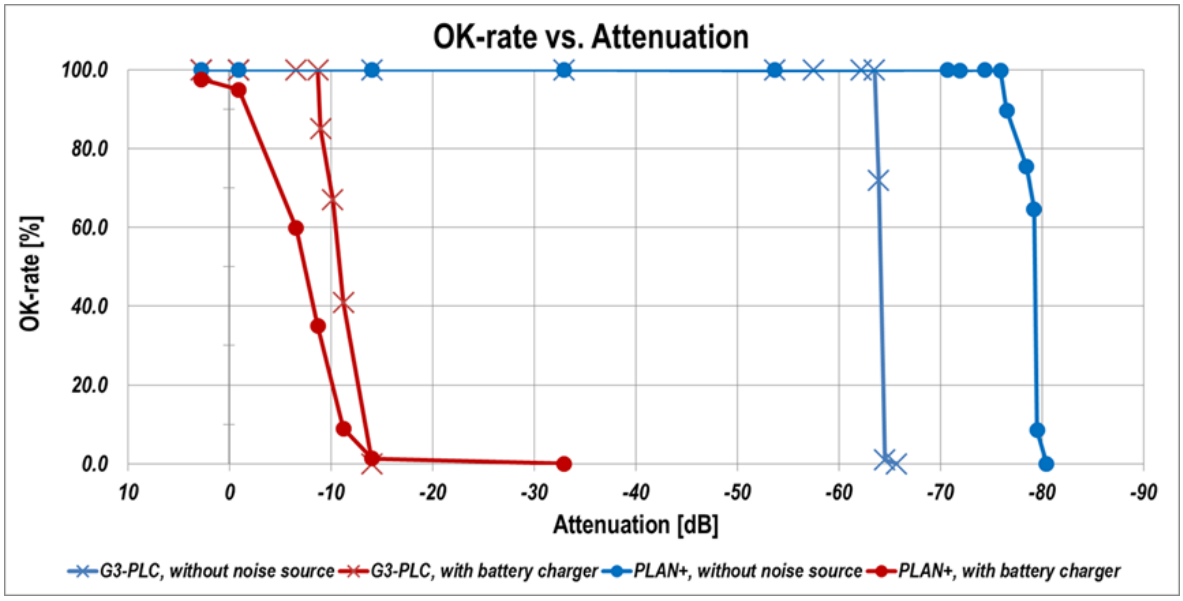


Figure 35 : Comparaison de l'impact d'un chargeur de batterie sur l'atténuation des signaux avec celui sur la qualité de transmission de données en CPL

In addition, also notching effect due to loads forming a low impedance path can be visualized on the test-bench. Different effect if this low impedance path, named Z_low afterwards, is placed close to the transmitter or the receiver can also be measured. When Z_low is placed close to the transmitter will drop down to low signal levels. In contrast when Z_low is placed close to the receiver, signal level at the transmitter will not be affected by this load. When Z_low is low, PLC signal tends to flow to ground through this load impedance causing significant attenuation of the signal. This effect is shown in the Figure 36.

On the test-bench some EMC-filter consisting low impedance values are placed close to the receiver. One can see, as expected, that signal level at the transmitter is not affected by this load. Signal level only drops near to the receiver and notching effect of the two low impedance resonances are clearly visible. Carrier at those frequencies will not be able to transmit data and thus communication data rate will decrease.

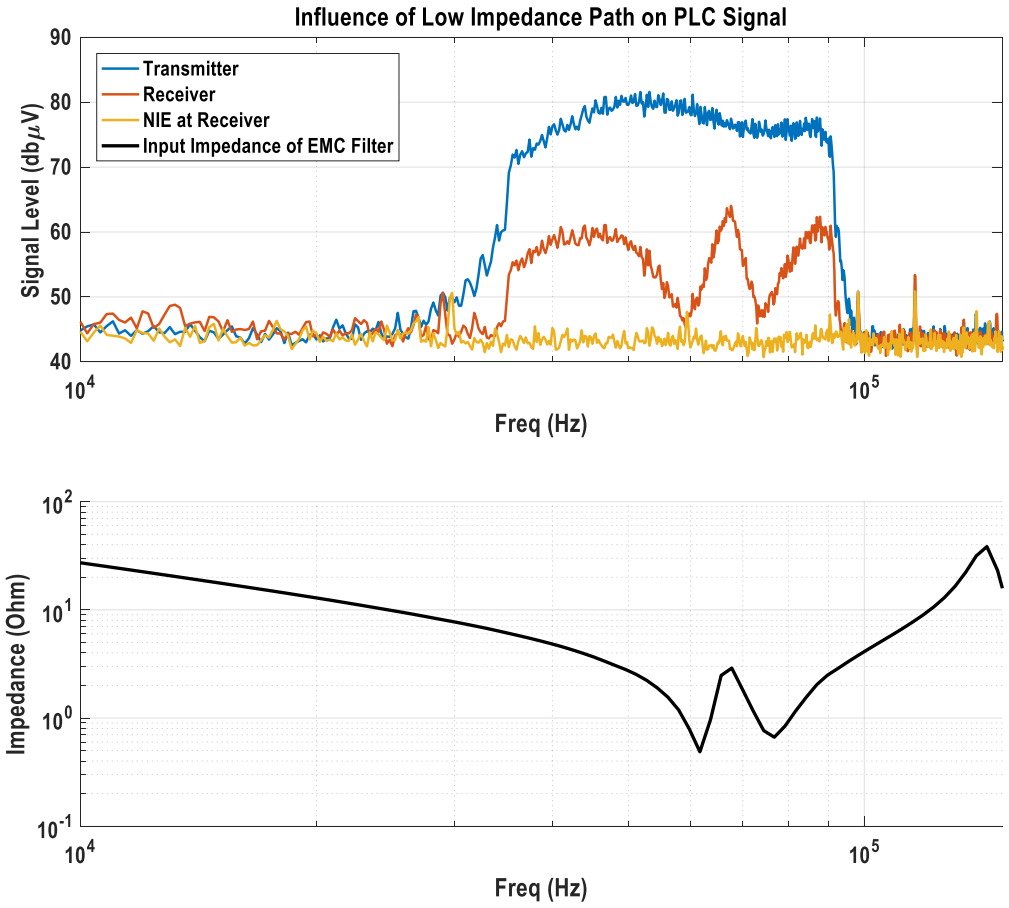


Figure 36 : notching effect due to low impedance path of connected EMC filter.

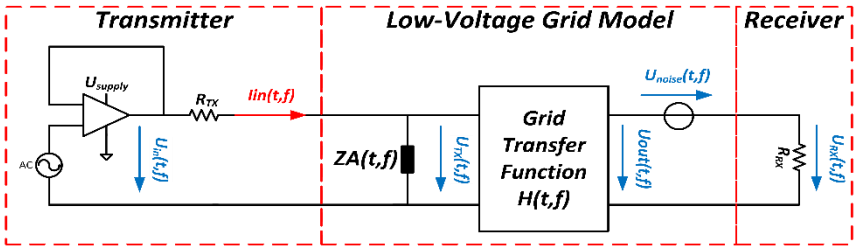


Figure 37 : schéma simplifié d'un canal de communication par PLC.

10. Modélisation des composants du réseau pour simulation dans le domaine des fréquences

Les explications du chapitre précédent ont montré l'influence de l'Impédance spectrale du réseau au point de couplage des systèmes de communication. Afin de pouvoir déterminer la valeur de cette impédance aux fréquences critiques, un effort particulier a été porté sur la création de modèles des équipements du réseau dans la bande de fréquences CENELEC A, de 3 à 95 kHz. Des circuits équivalents ont été établis pour chaque équipement faisant partie ou étant connecté à l'artère d'essai du GridLab. Les circuits équivalents pour le transformateur et les câbles d'alimentation GKN sont exposés à la Figure 38 et à la

Figure 39. L'établissement et la paramétrisation de ces modèles en collaboration avec l'HEIA de Fribourg sont détaillée dans la référence [9].

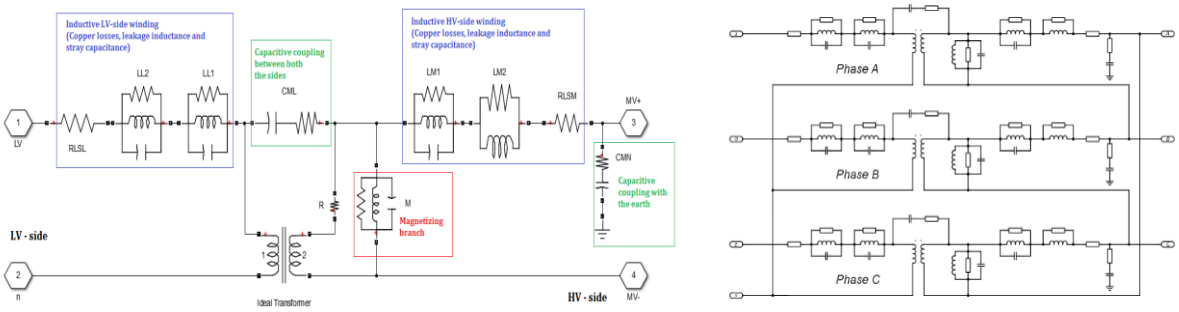


Figure 38 : modèle équivalent 'Grey Box' d'un transformateur Dyn, modèle détaillé d'une phase à gauche et modèle résumé d'un transformateur 3-phasé à droite.

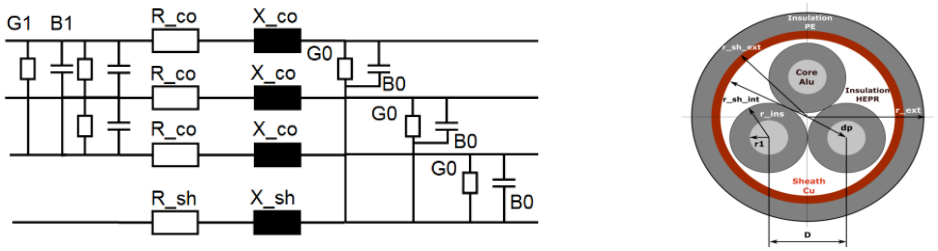


Figure 39 : modèle équivalent appliqué pour les câbles de type GKN

Afin d'évaluer l'impact des différents onduleurs d'injection installés à Avusy, un modèle de chacun d'eux a été établi sous forme de circuit équivalents. Seul les composants pouvant altérer l'impédance harmonique mesurée au point de connexion ont été considérés dans ces modèles. Ne disposant pas des schémas électriques de ces convertisseurs, les composants et topologies ont été établies sur forme de 'reverse Engineering', procédé parfois délicat et laborieux. La Figure 40 représente le schéma équivalent obtenu suite à la 'reconstruction' du circuit de filtre CEM d'un micro-onduleur identique à ceux installés à Avusy. L'impédance du circuit équivalent de ce convertisseur obtenue par simulation correspond bien avec celle mesurée avec l'impédance-mètre IGOR IV (Figure 41).

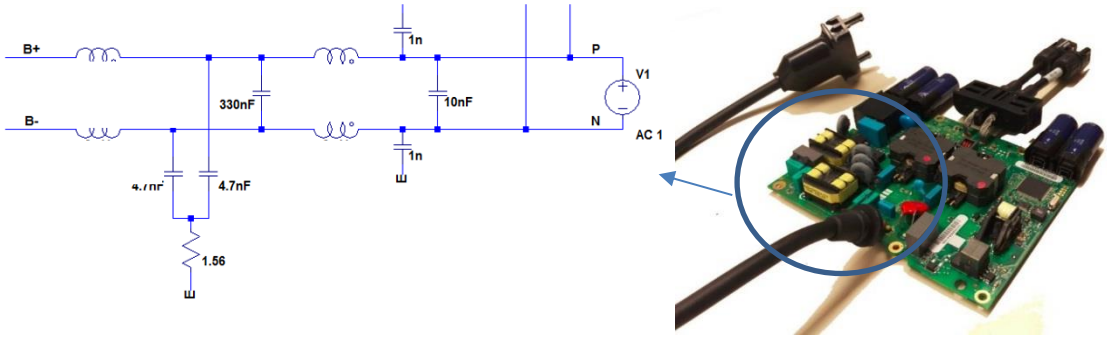


Figure 40 : schéma équivalent du filtre de sortie d'un micro-onduleur obtenu par 'reverse engineering'.

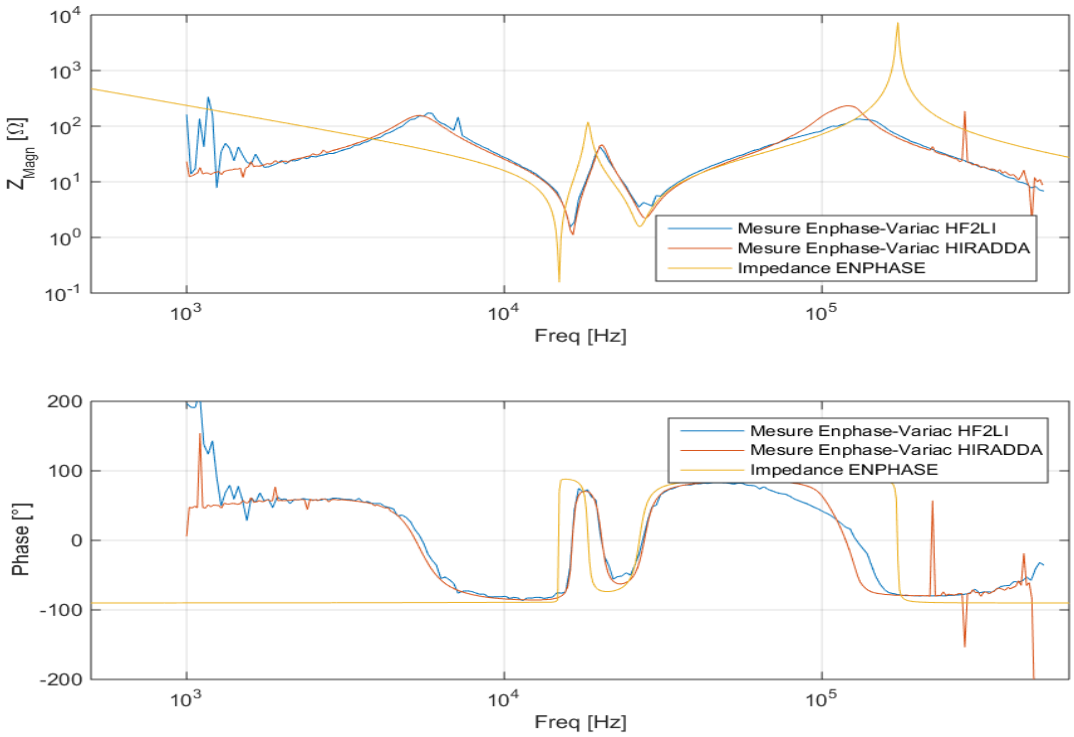


Figure 41 : comparaison entre mesure et modélisation de l'impédance en fonction de la fréquence pour un micro-onduleur PV.

In addition, also input impedance characteristic of various EMC-filters were analysed during the project. Nowadays almost every device connected to the grid consists of such a filter, thus it is of high importance to know how it affects access impedance of a connection point and PLC communication. Measurements show, that such filters can affect access impedance at the connection point in a very negative way since many of them show low impedance magnitudes in PLC frequency band. One can see that simulation model and measurements with impedance-meter show very good correlation for the whole frequency range from 1 kHz up to 500 kHz. Accuracy of the result is satisfactory for the wide range of impedance magnitudes.

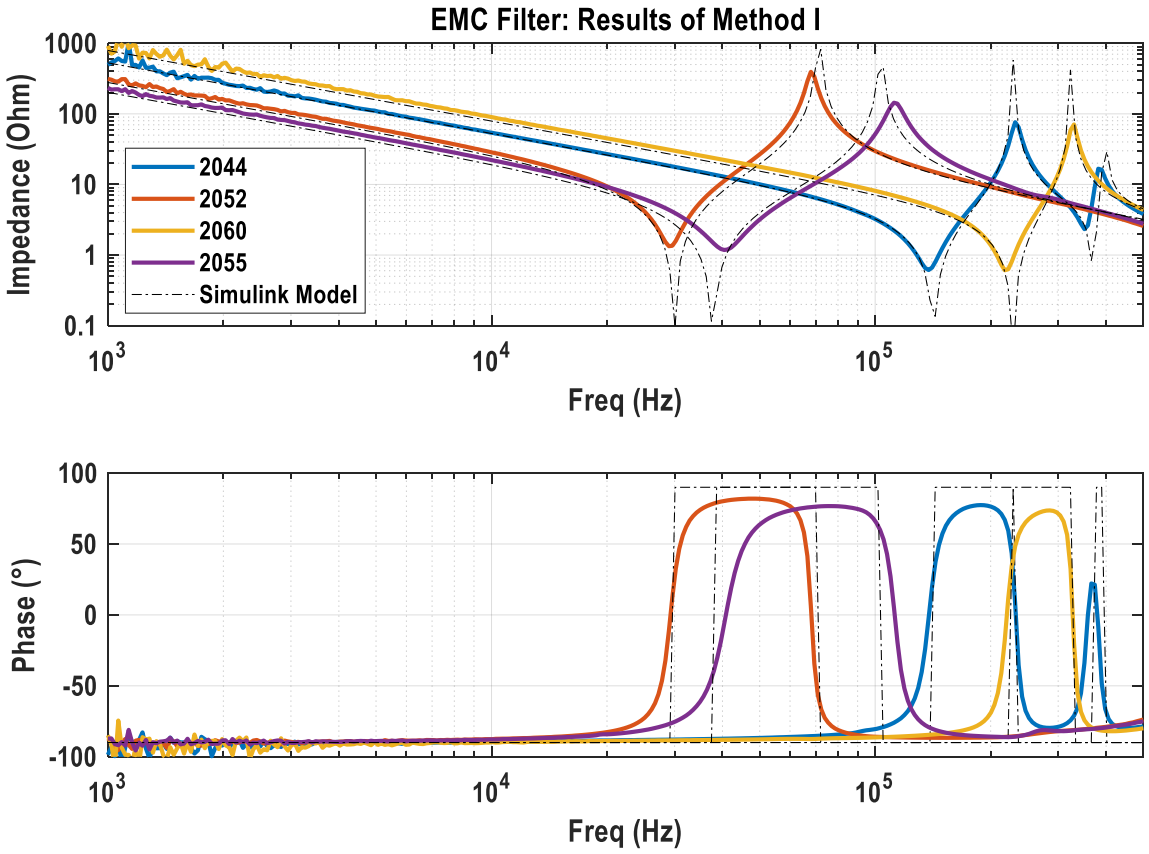


Figure 42 : input impedance of different EMC filters; comparison of simulation and measurement.

Also other effects like parallel connection of different filters or influence of the cable length were analysed with simulation and measurements. By connecting different filters - with different resonances - in parallel, low impedance resonances will add up. This will lead to a multitude of resonances in the CENELEC A band or FCC band. Such low impedance resonances have the capability to notch out a part of the PLC carriers. By adding up resonances – due to parallel connection of filters – more and more carriers are notched out and communication will fail.

Measurements have shown that resonances shift depending on the cable length. This makes the situation even worse, since the same type of filter will have resonances at different frequencies depending on the length of the connection cable.

10.1. Simulation de l’atténuation des signaux

Des simulations en mode d’analyse fréquentielle permettent d’évaluer le canal de transmission PLC entre concentrateur de données et compteurs intelligents. Les résultats de l’analyse fréquentielle du circuit équivalent établi pour l’ensemble des composants intégrés au modèle ‘GridLab’ sont comparés avec des mesures d’atténuation des signaux transmis par CPL dans la bande de fréquence CENELEC A. La Figure 43 représente l’atténuation mesurée (en rouge) et celle calculée (en bleu) pour des signaux de type dans la bande de fréquence de 1 kHz à 200 kHz en présence d’un micro-onduleur. La même situation pour un onduleur de chaine est représentée à la Figure 44.

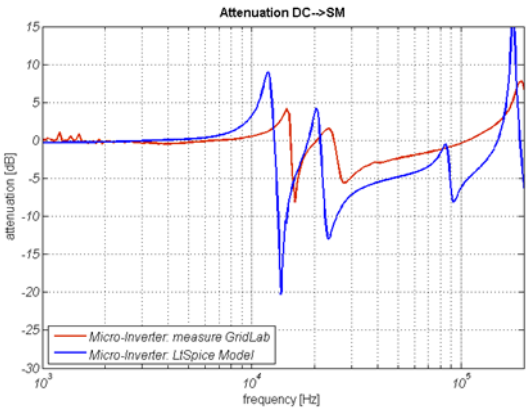


Figure 43 : comparaison entre simulation et mesure de l'atténuation de signaux CPL avec micro-onduleur.

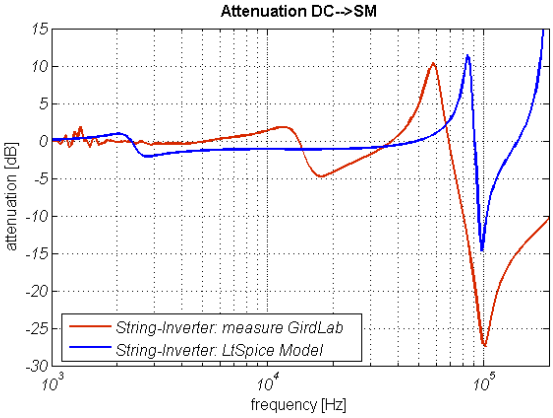


Figure 44 : comparaison de l'atténuation de signaux CPL en présence d'un onduleur de chaine.

Les courbes calculées correspondent relativement bien aux courbes mesurées. Même si leur fréquence est un peu décalée vers le bas, les résonances principales calculées dans la bande CENELEC A ont été vérifiées par la mesure. Elles présentent toutefois un amortissement plus important dans la réalité. Cela est dû aux composants dont il n'a pas été tenu compte dans les simulations, tels que connecteurs, disjoncteurs et sections de câbles courtes.

Une atténuation du signal par absorption a plus de chances de se produire en cas de résonance parallèle du côté du récepteur. Même si des résonnances apparaissent dans la bande CENELEC A sur la Figure 43, un faible risque d'atténuation existe pour des signaux PLC en modulation OFDM (G3 – PLC) ou en modulation FSK (P-LAN) en présence de micro-onduleurs. Par contre la résonance à 100kHz figurant sur la Figure 44 avec une atténuation de -20 dB à 90 kHz représente un risque d'atténuation pour des communications selon le protocole PLAN en FSK à 74 kHz en présence de l'onduleur de chaine. Cela correspond à ce qui a été mesuré à Avusy (Figure 14).

Il est intéressant de noter que l'atténuation obtenue avec une combinaison de deux types d'appareils peut être supérieures à la somme des atténuations obtenues avec chaque équipement considéré séparément. L'atténuation du signal représentée par la courbe orange sur la Figure 28 permet d'envisager des difficultés dans le cas d'une présence des deux types d'onduleurs aux fréquences inférieures utilisées par la modulation OFDM du protocole G3-PLC.

11. Simulation de réseau dans Digsilent Power Factory

Last task was the simulation of a small distribution grid at PLC frequencies in a state-of-the-art load flow simulator. This kind of software is used in distribution grid utilities for planning their grid extensions, identify critical grid nodes and much more. This software provides has numerous add-on modules that can be used to analyse transient processes and the propagation of harmonics in the grid.

We assume that with this kind of simulation distribution system operator will be able to simulate their grids and to identify nodes for the placements of repeaters. Next a minimal example of a simulation of signal attenuation between a smart-meter and the data-concentrator is shown.

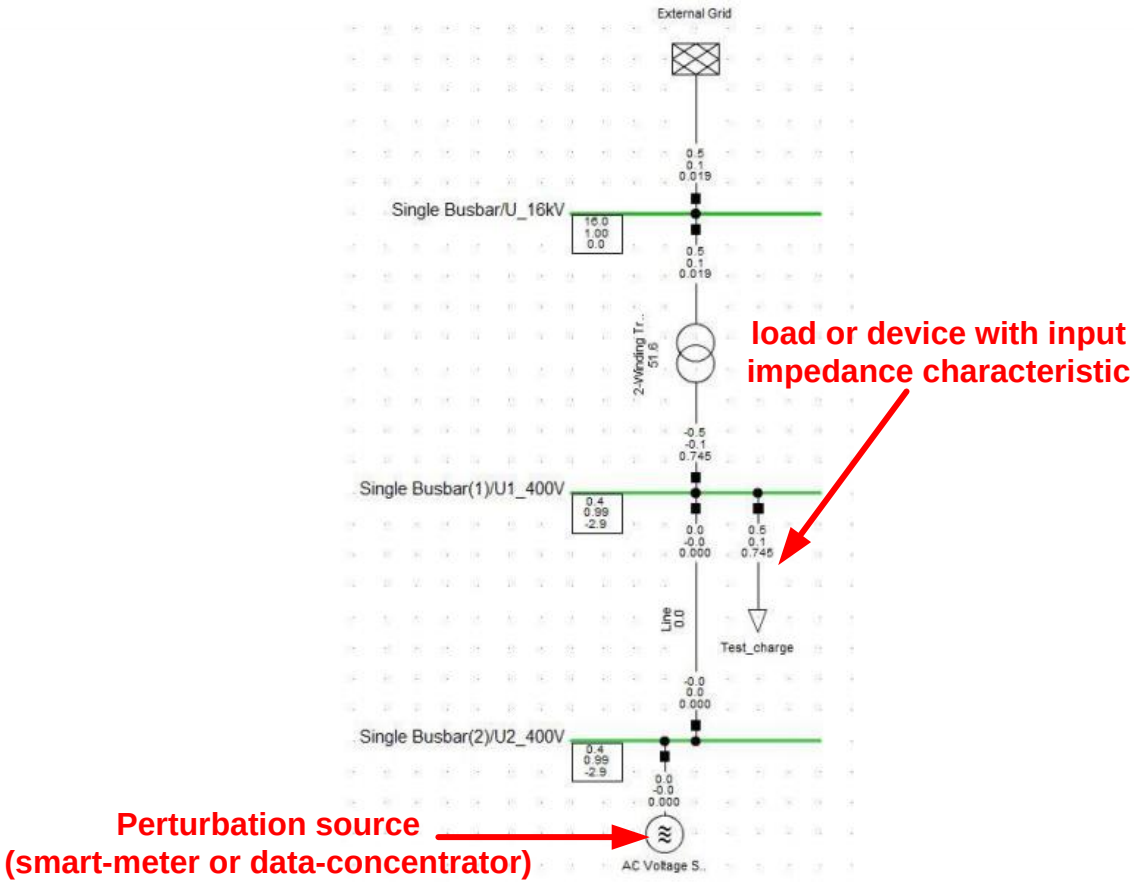


Figure 45 : example of attenuation simulation in load-flow simulator.

The transmitter is modelled with a voltage perturbation source (ideal RC-source). This type of source is able to inject voltages at different frequencies specified in a table. Next to the receiver some low impedance path is connected to absorb some PLC frequencies. This load is characterised with the measured input-impedance. Thus, measured impedance can directly be used in the grid-simulation. By evaluation of the ratio between received voltage near to the load and injected voltage at the source injection point, the attenuation can be displayed. Below a result of such attenuation simulation is shown. One can see that up to 10 kHz an almost constant attenuation of about 20 dB occurs. Due to resonance effect some amplifications occurs at 30 kHz. Afterwards, signal level at the receiver drop down with

about 20 dB/dec.

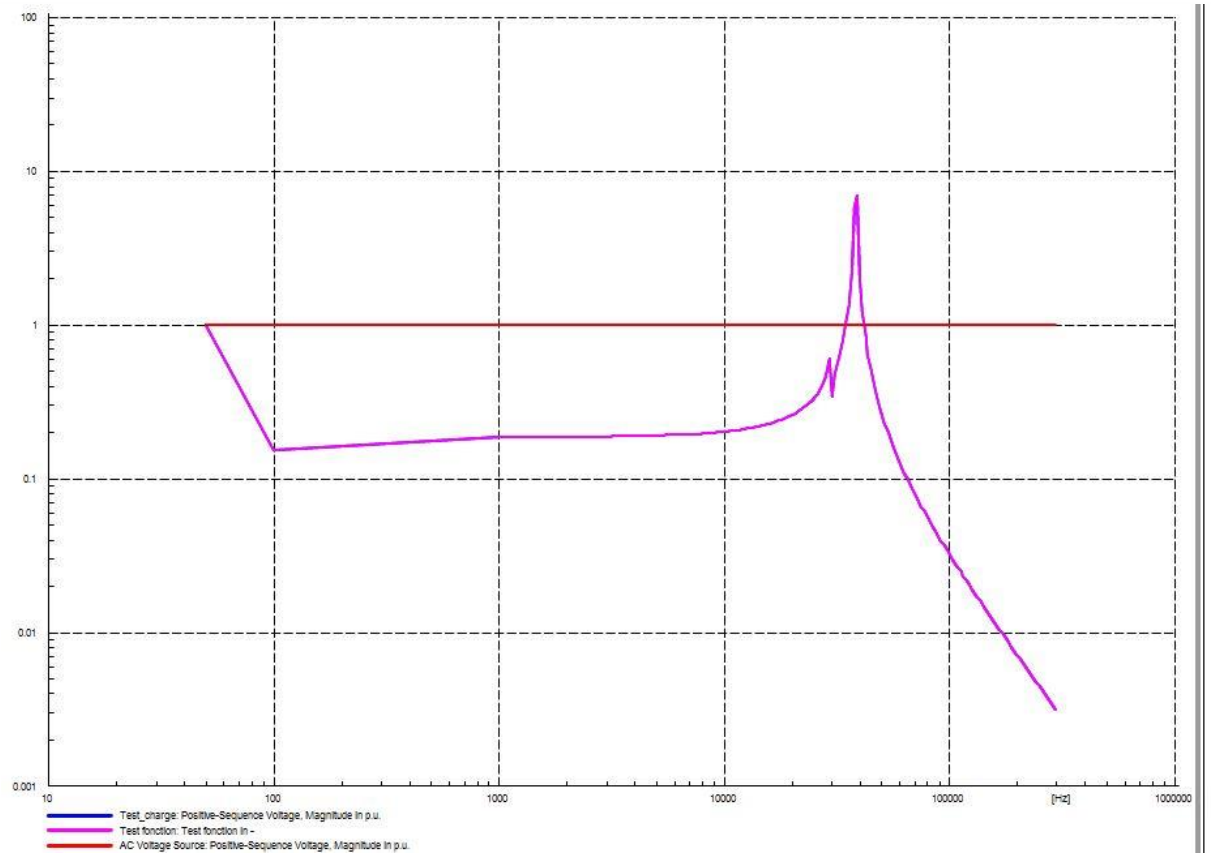


Figure 46 : attenuation result obtained with load-flow simulator Power Factory.

The use of existing software has the following advantages:

- The distribution system operator has already implemented his grid for analysing the behaviour of the grid at nominal frequency
- Approach based on measurements of real devices, loads and grid sections.

In contrast, however, there are some disadvantages:

- Models of cables and transformers not well known for PLC frequencies
- Number of loads to be considered. This can be avoided by grouping several loads into one characteristic impedance by means of parallel connection.

The results obtained show that the software is capable of performing load flow calculations at PLC frequencies. In addition loads, devices and grid sections can be modelled by their characteristic impedane. By further refining cable models, more precise results are expected.

12. Utilisation et développement d'instruments de mesure spécifiques

L'évolution rapide des normes dans la bande CENELEC A révèle le manque d'équipements adéquats pour la mesure des Emissions Non Intentionnelle (NIE) sur la plage de fréquences entre 2 et 150 kHz. Cela est non seulement valable pour la mesure d'impédance, mais également pour les mesures d'émissions en tension ou en courant. Une tâche importante a été de choisir, d'apprendre à utiliser et d'évaluer des équipements appropriés. Cette démarche s'est effectuée en collaboration avec le groupe 'Mesures et qualité' du gestionnaire du réseau de distribution partenaire, SIG.

Un analyseur de réseau à large bande de fréquence, le SIRIUSi-HS de la firme DEWESOFT a été acquis. Cet appareil a la capacité de réaliser et d'enregistrer la mesure de quatre tensions et quatre courants simultanément (3 phases et le neutre par exemple) sur une bande passante utile de 300kHz avec une dynamique de 90dB. La mesure de courant exige des pinces de courant ou capteurs externes précis et à large bande de fréquence. La force des produits DEWESOFT réside dans le logiciel de traitement des résultats, qui permet de visionner les résultats et de réaliser des opérations sur les signaux acquis en des temps record. Un traitement numérique des résultats à l'aide du logiciel de commande de l'appareil ont permis de conditionner le spectre des mesures de tension entre 2 et 150 kHz selon la recommandation de la norme IEC 61000-4-30. Cet équipement nous a permis de mesurer et d'enregistrer les niveaux d'émissions non intentionnelles et les signaux CPL sur le site d'Avusy et au GridLab (voir exemples sur les Figure 12 et Figure 49)

L'impédance mètre développés à la HES-SO Valais-Wallis au cours des dernières années a été mis à forte contribution dans le cadre du projet REMIGATE. Les mesures effectuées avec la version IGOR IV se sont avérées erronées dans certaines conditions. L'équipement a même cessé de fonctionner au cours d'une intervention dans un poste MT/BT. Des défauts de conception de l'amplificateur de courant et du filtre d'entrée pour les mesures ont été à la source de ces problèmes. Ces circuits ont été entièrement revus et améliorés afin de garantir la stabilité des mesures. Des sondes de tension et courant externes ont été évaluées et le système complet calibré à nouveau. Parallèlement à cela la nouvelle carte d'acquisition haut de gamme HiRADDA a été terminée, testée et programmée pour la mesure d'impédance en ligne entre 100 Hz et 500 kHz. Cette carte sera intégrée à un nouvel impédance-mètre IGOR V et nous permettra d'augmenter la plage de fréquence, la rapidité de mesure et la flexibilité d'utilisation de cet équipement. Une mesure comparative d'un filtre CEM on-line est présentée à la Figure 41 ci-dessus.

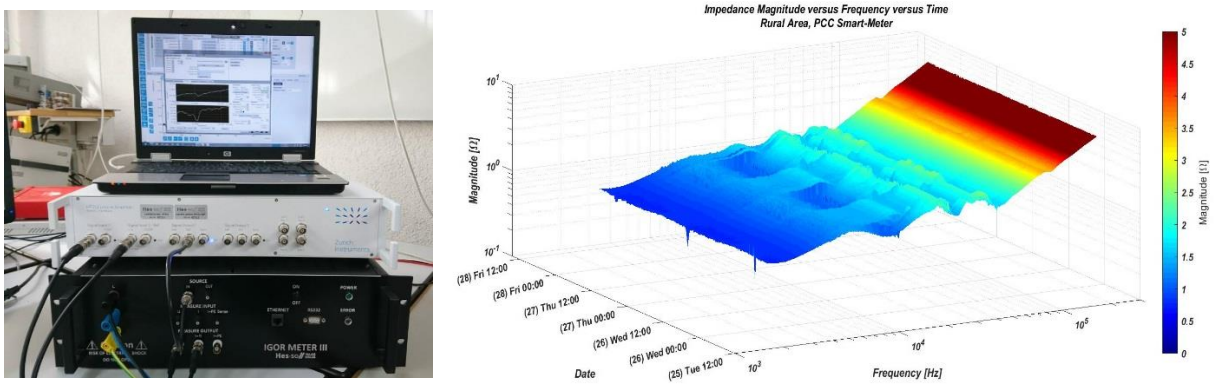


Figure 47 : analyseur d'impédance du réseau IGOR IV développé à la HES-SO Valais-Wallis, et mesure d'impédance sur 3 jours au PCC du poste MT/BT d'Avusy.

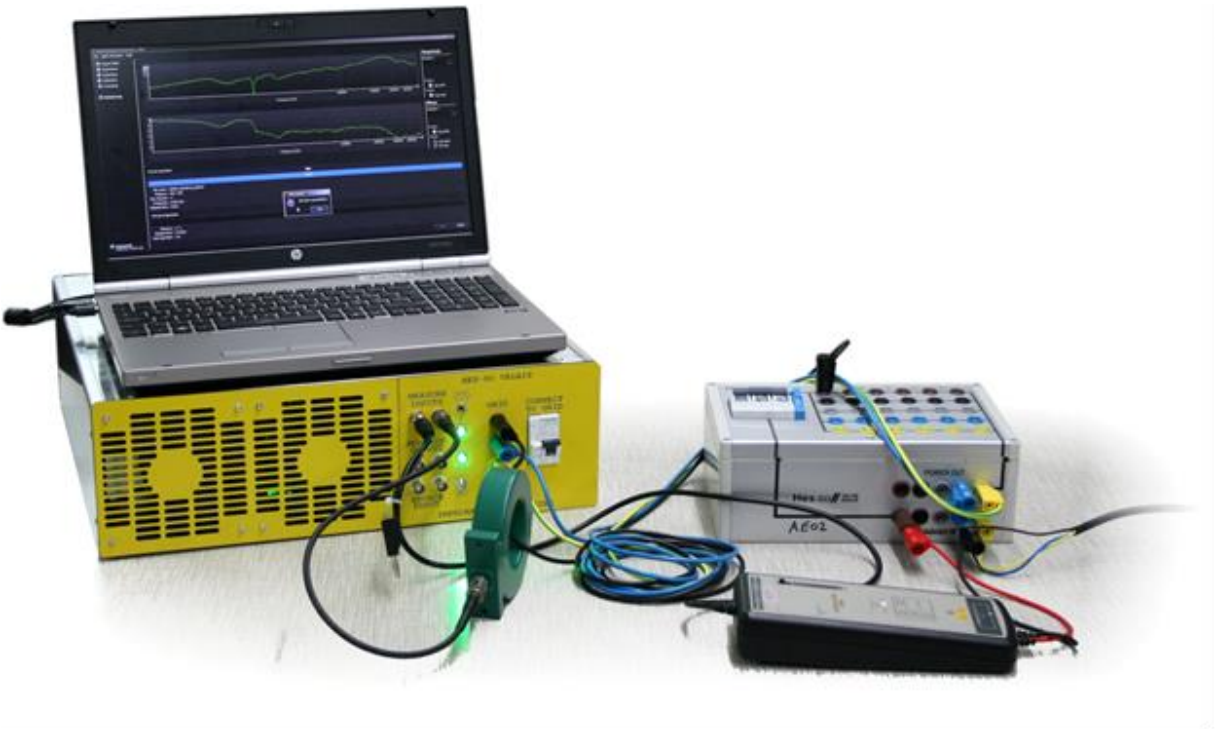


Figure 48 : IGOR V, with HiRADDA, power amplifier and battery inside a rack.

In order to be able to measure attenuation between two distant points of a distribution grid, a simple method was developed during the project. The method is based on measuring voltage level at the injection point and the receiving point. By means of a standard capacitive coupling circuit used in smart-meters a linear amplifier is connected to the low voltage grid. This amplifier receives some reference signal that sweeps between 1 kHz and 500 kHz in a few seconds. Thus, a voltage in the whole PLC spectre is injected. By measuring at the same time the voltage at the injection point and the receiving point the signal attenuation can be evaluate. Since in real grid situations the transmitting and receiving points are distant from each other, signals are measured with two non-synchronized systems. It was found that synchronization between the two measuring equipment is not of interest for this type of measurement. Measuring setup was first tested and refined in protected laboratory environment. A schematic representation is shown in the figure below.

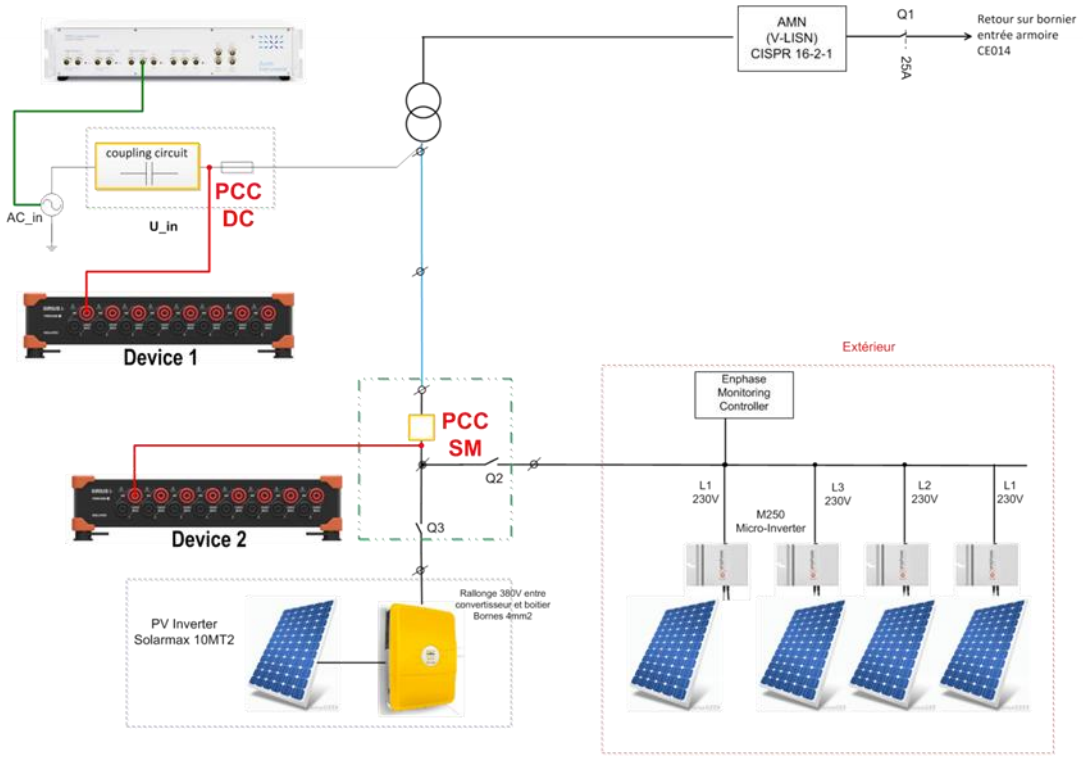


Figure 49 : setup for attenuation measurements in the field.

The impedance-meter together with the DEWESoft (for attenuation and NIE measurements) are able to deliver all needed information to describe a communication channel according Figure 7. Thus with a few measurements and limited number of devices a channel can be entirely described.

13. Valorisation du projet

Les recommandations pour les gestionnaires du réseau, pour les installateurs de compteurs intelligents ou aux comités normatifs représentent la valorisation principale du projet REMIGATE et des résultats obtenus. L'expertise acquise au sein de la HES-SO est mise en valeur par des publications, des cours de formation et par l'enseignement régulièrement transmis aux futurs ingénieurs de l'orientation Smart Grids.

Une meilleure compréhension des phénomènes de perturbations, les méthodes de modélisation et l'impédance-mètre améliorés dans le cadre du projet REMIGATE pourront contribuer au développement de techniques de communication par courant porteurs de ligne en général. Des solutions techniques de communication entre compteurs intelligents et systèmes de gestion du réseau plus fiables, plus robustes et à moindre coûts pourront être mises à disposition des GRDs, motivés à déployer des compteurs intelligents à large échelle, en accord avec le programme ED 2050 de la confédération suisse.

Les techniques affinées au cours du projet sont susceptibles de générer des plus-values pour l'industrie de la branche électrique, de la conduite des réseaux intelligents et de l'instrumentation de de mesure. Pour laHES-SO, une forme privilégiée de valeur ajoutée est la création de modèles et d'opportunités d'affaires, sous forme de produits commerciaux, de logiciels ou de consulting. Une partie des développements poursuivis dans le cadre de ce projet pourront être utilisés à ces fins.

13.1. Collaborations au niveau national et international

Les collaborations avec les partenaires industriels Landis+Gyr et en particulier avec les SIG ce sont déroulées dans de très bon termes et ont apporté leurs fruits. Une relation privilégiée a été établie avec les ingénieurs du groupe responsable de la Qualité de la tension des SIG. Cette collaboration nous a permis de développer ensemble des compétences et une certaine expertise en matière de mesures des paramètres du réseau dans le domaine des fréquences élevées. La collaboration avec L+G et les ingénieurs responsables du déploiement pratique des compteurs intelligents sur les sites pilotes genevois nous ont permis de developper une meilleure compréhension de la communication par CPL, ainsi que des avantages et des défis liès à cette technologie.

Une collaboration fructueuse avec les équipes du prof. patrick Favre-Perrod à la HEIA-FR et du prof. Mauro Carpita à la HEIG-VD dans le cadre du projet EOS-Holding nous a permis d'obtenir des modèles dans le domaine des fréquences des composants principaux du réseau de distribution. La HEIA-FR a fournis des modèles de lignes et de transformateurs dans la bande de fréquence de 2 à 150 kHz.

L'équipe de la HEIG-VD a développé un convertisseur destiné à l'étude de l'impact de la production distribuée sur les harmoniques et l'impédance du réseau pour les basses fréquences dans le cadre du projet CEM-Smart Grids. L'impédance de ligne du réseau joue un rôle clé dans la réalisation d'un contrôle d'onduleur stable. Les mesures éffectuées à l'aide de l'impédance-mètre IGOR ont permis de mieux connaître cette caractéristique du réseau.

La participation au programme SCCER FURIES a pris forme sous une collaboration avec l'équipe du professeur Michael Höckel de la Berner Fachhochschule à Bienne (BFH). Dans un premier temps, le projet *Swinging Grid* a eu pour objet l'étude de l'impact de contrôleurs d'onduleurs et l'impédance spectrale du réseau sur la génération et la propagation des courants harmoniques basses fréquences jusqu'à 2 kHz. Notre collaboration avec BFH ainsi qu'avec les SIG se prolonge dans le cadre du WP 4 du nouveau projet OptiQ soutenu par l'OFEN : *«WP4: Effekt der Zunahme von nichtlinearen Geräten auf die Ausbreitung von Oberschwingungen und auf die Netzimpedanz»*.

Notre collègue le Prof. Dominique Gabioud a initié l'ébauche d'un projet de collaboration avec la Fachhochschule de Lucerne pour le développement de techniques de communications robustes.

Des discussions avec plusieurs partenaires industriels ont été initiées dans le cadre des projets CEM Smart Grids et REMIGATE. Ces discussions ont eu lieu à l'occasion de visites, soit dans les laboratoires de la HES-SO Valais-Wallis, soit sur les sites de production des industriels. Nous pouvons citer SEIC à Vernayaz, SEFA à Aubonne, Camille Bauer à Wohlen et Schaffner EMC à Luterbach.

Une collaboration active avec l'institut de métrologie suisse METAS débutera à l'automne 2018 débutera dans le cadre du nouveau projet Z-Net : *Pre-normalisation of grid impedance measurement in the power line communication frequency band.* L'objectif de ce projet est d'établir la traçabilité métrologique pour la mesure de l'impédance dans les réseaux basse-tension et de permettre la comparaison des différentes méthodes de mesures. Le second but de ce projet est de commencer la normalisation de la mesure de l'impédance, ce qui faciliterait la réalisation de produits commerciaux pouvant aider la résolution de problèmes de communication.

Au cours des conférences, des séances du groupe de travail WG 11 et à d'autres occasion, des discussions sur les aspects techniques et scientifiques ont été établies avec l'équipe de Jan Meyer à la TU Dresden. Plusieurs idées de collaboration ont émergé de ces discussions, en particulier la thématique de la normalisation de la mesure de l'impédance et la comparaison entre différentes techniques qui seront abordées au cours du projet de recherche Z-Net soutenu par l'OFEN.

Finalement, une collaboration a démarré en 2017 avec le groupe de recherche TSR Tratamiento de la Señal y Radiocomunicaciones de l'Université du Pays Basque UPV/EHU conduit par le prof. David de la Vega. Un échange d'informations sur la problématique des interférences entre production d'énergie décentralisée et systèmes de communication par CPL a été initié suite à la lecture d'une excellente publication du TSR sur le sujet. [2]. Cet échange a amené le team TSR à concrétiser l'idée et à réaliser un impédance-mètre 'low cost' aprticulièrement efficace dans la bande de communication FCC. La comparaison entre l'impédance-mètre de la HES-SO et celui de l'UPV à la rédaction une publication en commun pour la conférence AMPS à Bologne en septembre 2018.

13.2. Normalisation

Des projets de normes CEM (compatibilité électromagnétique) sont en cours pour la bande de fréquence entre 2 et 150kHz, en particulier en ce qui concerne les limites d'émissions générées par les onduleurs d'injection. Cependant, les limites d'émissions non intentionnelles (NIE) proposées par les représentants des systèmes de communication sont en-dessous des émissions mesurées dans de nombreux cas de production d'énergie décentralisée en Europe [1]. La situation est complexe car d'une part, les technologies mises sur le marché ont largement devancé les normes. D'autre part, les phénomènes d'interférence mettent toujours au moins en jeu des équipements issus de domaines technologiques très différents.

Des conflits d'intérêts, tout à fait légitimes, viennent pimenter les choses: dans une situation de marché tendue, les fabricants d'onduleurs ne peuvent, d'une part, pas se permettre d'augmenter leurs coûts avec des filtres supplémentaires; d'autre part, les fournisseurs de technologies « smart » ne peuvent pas revenir sur des choix stratégiques et des développements coûteux liés aux systèmes de communication. Il faudra patienter encore quelques temps jusqu'à ce qu'un compromis soit trouvé. Une norme pour le test d'immunité des équipements aux perturbations est bien apparue (IEC 61000-4-19) et une seconde est en bonne voie (IEC 61000-4-16), mais la question des niveaux d'émission pour les équipements individuels reste ouverte.

C'est dans ce contexte qu'intervient la proposition de ne pas considérer uniquement les niveaux de perturbation et d'immunité des équipements de manière individuelle, dans des conditions de laboratoire « stériles », mais d'aborder les problèmes CEM de manière plus systémique. Le comportement des équipements, des lignes et des transformateurs doit en effet être considéré dans l'application et dans le domaine fréquentiel. Une importance particulière doit être portée sur le risque d'absorption des signaux CPL par un filtrage exagéré des harmoniques.

Ce message a été transmis au comité normatif suisse TC 77A par le biais d'une présentation faite à l'occasion de l'assemblée régulière du comité en mai 2016.

Il est également exprimé dans les éditions suivantes du rapport sur les interférences électromagnétiques dans la bande 2 à 150 kHz [10] établi par le comité spécial SC 205A (Special Comittee 'Mains Communicating Systems' de la CENELEC) et à la réduction duquel les auteurs ont participé. Les informations supplémentaires présentées dans cette nouvelle édition sont résumées comme suit sur le site de la CENELEC et reflètent bien l'impact du projet REMIGATE :

Citation:*Following to [1, 2, 3] having proceeded with the collection of related information, with this Technical Report, further extended information is provided including: - the given EMC problems in the frequency range 2 kHz - 150 kHz, concerning EMC between electrical equipment in general as well as EMC between non-mains communicating equipment / systems (NCE) and mains communicating*

systems (MCS) as a particular issue - the given situation of related emissions in the grid, with other measurement results - EMI cases and related investigation results - new findings on parameters to be considered when dealing with EMC in this frequency range, in particular related to - ***the impact of the network impedance*** *and its variation over time on the more or less disturbing effect of emissions in this frequency range - the behaviour of emissions in this frequency range over time and the increasing need for performing also time domain measurements for comprehensively evaluating emissions and their disturbance potential - the actual standardisation situation - needs for the future, concerning - measurement of related emissions* ***- investigation on the impedance of the grid / in installations over time - closing gaps in standardisation*** *- installation guidelines and possibly regulatory measures related to the ageing effect. In light of different positions on and in evaluating related EMC problems, with additional measurement results concerning emission levels in the supply network and results from investigations of additional proven EMI cases, the given problems are highlighted in more detail and recommendations for what to do in the future are provided.*

L'expertise acquise au cours des projets CEM-Smart Grids et REMIGATE nous permet de participer activement aux travaux de deux groupes de travails de comités normatifs internationaux :

- le **WG 11 du SC 2015A de la CENELEC** récolte les informations et rédige les rapport techniques EMI 2 à 150 kHz [1], [10]. Ce groupe de travail met également à jour la norme définissant les essais d'immunité pour les systèmes de communication par PLC pour les applications de Smar Metering (EN 50065-2-3 Ed. 2: 'Transmission de signaux sur les réseaux électriques basse-tension dans la bande de fréquences de 3 kHz à 148,5 kHz - Partie 2-3 : exigences d'immunité pour les appareils et les systèmes de communication sur le réseau électrique dans la bande de fréquences de 3 kHz à 95 kHz et destinés à être utilisés par les fournisseurs et les distributeurs d'énergie électrique'). Une tâche importante réside dans la définition du banc de test pour les essais d'immunité aux interférences, tel que décrit quelques chapitres plus haut. Nous nous efforçons d'inclure un élément de circuit permettant de tenir compte de l'impact de l'impédance d'accès d'une manière réaliste dans ces tests d'immunité aux interférences.

- le comité technique TC 77A de l'IEC est en charge de la normalisation internationale pour la compatibilité électromagnétique, phénomènes basse fréquence. ('officiellement', les basses fréquences sont par définition limitées à 9 kHz). Le groupe de travail **WG8 du TC 77A** a pour responsabilité la description et la normalisation des environnements électromagnétiques associés à des perturbations présentes sur les réseaux d'alimentation électrique. Le WG8 a reçu la difficile mission d'établir des 'niveaux de compatibilité' pour les émissions conduites dans la bande de fréquence de 2 kHz à 150 kHz. Il s'agit de la première étape vers une normalisation pour la compatibilité électromagnétique dans cette bande de fréquence. Les niveaux de compatibilité correspondent à une suite de valeurs théoriques d'émissions conduites située entre les niveau d'émissions tolérées et les niveaux d'immunités minimaux pour les équipements connectés au réseau. Après de longues années de négociations un compromis a finalement pu être établi en 2017 entre la plupart des GRDs et entreprises fournissant des équipements Smart Grid et les fournisseurs de convertisseurs, en particulier les onduleurs d'injection d'énergie renouvelable au réseau. Les premiers ont soutenu des niveaux de compatibilité bas, dans l'espoir d'obtenir des niveaux de bruits faibles selon le schéma de principe à la Figure 7. Les fabricants de convertisseurs ont préconisé des niveaux de compatibilités plus élevés, afin de ne pas avoir à augmenter les contraintes et les coûts de fabrication dans un marché très serré, avec le risque supplémentaire de perdre en efficience énergétique. Le résultat obtenu sur la base de compromis de la part des deux camps sera inclus sous forme d'amendement à la norme internationale IEC 61000-2-2, tel que représenté en bleu sur la Figure 50. La bande 10 à 50 kHz avec des valeurs de 6dB supérieures

correspond en fait la bande de fréquence où les onduleurs génèrent les émissions les plus importantes, dues au mode de contrôle en modulation de largeur d'impulsions (PWM).

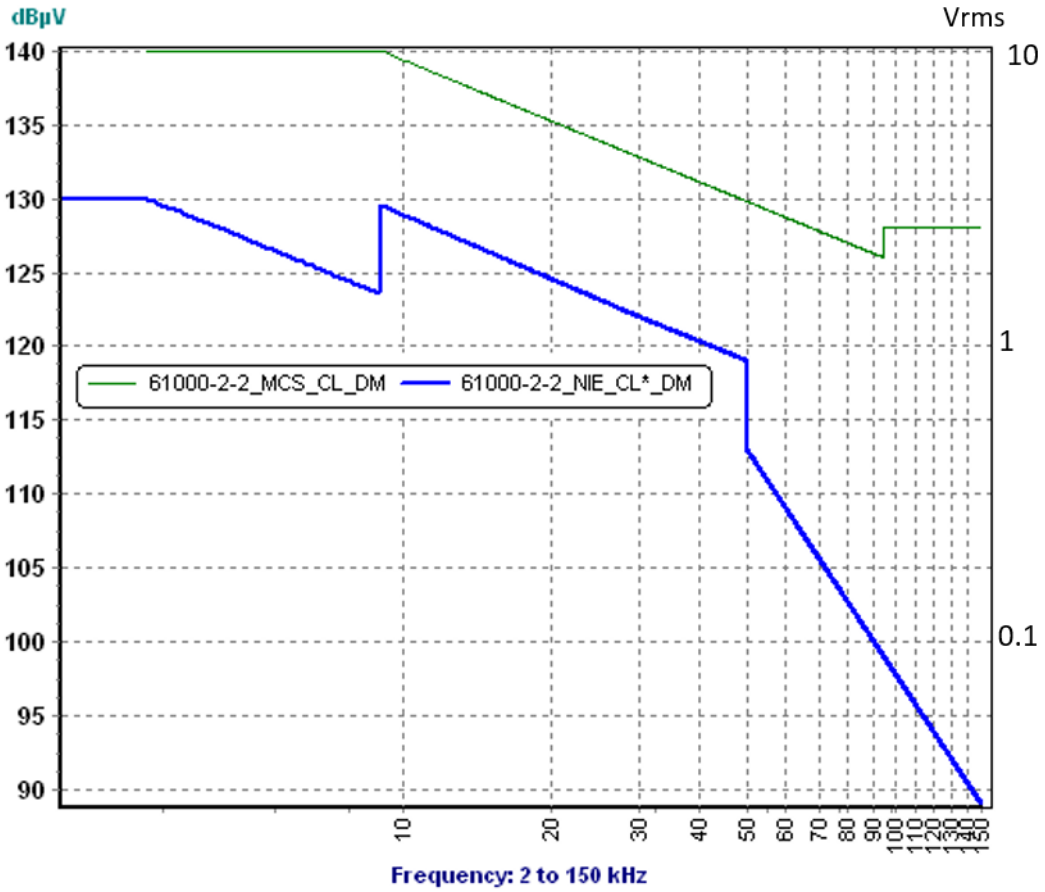


Figure 50: Niveaux de compatibilité pour les émission conduites en Mode différentiels (bleu) et limite maximale d'émission intentionnelles pour les systèmes de communication CPL (vert)

Malgré le consensus sur les niveaux de compatibilités, de nombreux points restent à définir jusqu'à que l'on obtienne des limites d'émissions utilisables pour des essais d'accréditation dans la pratique et efficace pour la réduction des interférences avec les signaux CPL :

- Les niveaux de compatibilités sont définis en mode différentiel (mesurés entre phase et neutre) alors que les normes et les techniques de mesures pour les essais d'émissions sont définis en mode commun (valeur moyenne phase-neutre vers terre).

- Les techniques de mesures et les définitions standardisées pour les émissions conduites diffèrent largement entre les basses fréquences (<9kHz) et les hautes fréquences supérieures à 150 kHz. Un nouveau consensus doit être établi pour les mesures entre 9 et 150 KHz.

- Les impédances normalisées pour découpler les bancs de test du réseau de distribution (V-LISN selon la norme CISPR 16 ou V-Network sur le schéma de la Figure 34) ont des valeurs statistiquement trop élevées par rapport aux valeurs mesurées sur le terrain et ne correspondent pas à la réalité [10]. (Voir par exemple les niveaux mesurés en Suisse reportés

sur la Figure 31) Pour un équipement donné, les niveaux d'émission mesurés en laboratoire seront finalement nettement supérieurs à ceux mesurés en moyenne sur le terrain.

- L'impédance d'accès n'est pas encore considérée de manière pratique dans le banc d'essai défini pour la future norme d'immunité pour les systèmes de communication CPL (EN 50065-2-3 Ed2.).

- Les nouvelles normes d'émissions conduites entre 2 et 150 kHz vont imposer l'utilisation de filtres CEM plus efficaces. Les solutions à moindre coûts et ne péjorant pas l'efficience des onduleurs reposent généralement sur l'augmentation des capacités montées en parallèle avec le réseau. Cela correspondra finalement à une diminution générale de l'impédance d'accès pour les SM connectés à proximités des onduleurs. Si l'on ne tient pas compte de ce phénomène, tous les efforts mis en place pour réduire les interférences risque d'être vain !

Le soutien scientifique et technique apporté aux groupes de travail WG8 et WG11 doit être continué. C'est dans cette optique qu'une présentation résumant les résultats du projet REMIGATE a été transmise et montrée au groupe de travail WG8 à l'occasion de la dernière séance de travail à Rome en avril 2018.

13.3. Formations, transmission d'information et conférences

Diverses formations spécialisées nous ont permis de partager l'expertise acquise avec les GRDs romands pendant la durée du projet REMIGATE :

- Un second cours Installations PV pour GRDs, a été mis sur pied par certains grands GRDs romands et la HES-SO Valais-Wallis à Sion en collaboration avec l'AES en novembre 2016 (AES) (HEI-VS).

- Une journée de formation dediée à l'entreprie GRD SEFA a été mise sur pied au GridLab de la HES-SO Valais-Wallis. Cette formation traitait des installations photovoltaïque en général et de la qualité de la tension en particulier. La question de la perturbation des signaux CPL par les onduleurs a été abordée.

- Une rencontre d'échange avec les ingénieurs de l'entreprise de gestion du réseau Groupe-E sur les aspects de communication pour les compteurs intelligents, en particulier la CPL, a eu lieu au GridLab de la HES-SO Valais-Wallis en juin 2017.

- Le projet REMIGATE a été présenté à la communauté des techniciens des GRDs romands à l'occasion d'un séminaire organisé sur les compteurs intelligents par l'entreprise partenaire du projet Landis+Gyr en septembre 2016 à Bussigny (VD).

- La problématique de l'impact des onduleurs d'injection et des chargeurs de batteries sur la qualité de la tension a été présentée à l'occasion d'un séminaire 'Vers la classe du Megawatt, développement de la production photovoltaïque en Finlande' organisé par la Turku University of Applied Science (TUAS) en Finlande au mois de mai 2017. Une large part de la présentation 'Renewable energy grid integration and smart metering' a été consacrée à la communication CPL et à la normalisation des phénomènes EMC dans la bande 2 à 150 kHz.

- Les résultats intermédiaires du projet REMIGATE ont été présentés en séance plénière de la conférence internationale CIRED 2017 à Glasgow en juin 2017. Les résultats des mesures

effectuées sur les site d'Avusy et au GridLab, ainsi que les résultats de la modélisation dans le domaine de fréquence des équipements connectés au réseau de distribution ainsi que les premières conclusions du projet ont été présentées à cette occasion. Les transparents de cette présentation figurent en annexe 5 de ce rapport.

- Le projet REMIGATE et les résultats obtenus seront présentés en interne à la HES-SO Valais-Wallis le 4 juillet prochain. La présentation sera suivie d'une démonstration de la mesure d'impédance au laboratoire.

- Un cours de formation sur les aspects de communication pour les compteurs intelligents avec démonstrations pratiques au GridLab sera organisé par la HES-SO Valais-Wallis en collaboration avec les partenaires du projet REMIGATE en Novembre 2018. Ce cours sera destiné aux techniciens des GRDs et aux membres du Groupe Romand d'uniformisation technique.

13.4. Publications

'Spectral Grid Impedance and Electromagnetic Interferences in the 2 to 150 kHz frequency range' publié dans le numéro 2 du Volume 11 de l'International Journal of Distributed Energy Resources' en avril 2015

CEM et réseaux intelligents : le rôle de l'impédance harmonique, publié dans le Bulletin de l'AES en juin 2015

EMC Studies on Grid Integration of Distributed Energy Ressources, Part 1: 10kW IEC-61850 Compliant Inverter, publié à l'occasion de la conférence SPEEDAM à Capri en juin 2016Bulletin AES, Juin 2016.

La collaboration sur les modèles de composant du réseau électrique avec la HEIA-FR a abouti à deux publications : l'une à la conférence CIRED 2017 à Glasgow [11], l'autre dans le journal scientifique *IEEE Transaction on Power Delivery* en 2017 [9].

Sur le plan international, a publication la plus importante pour le projet REMIGATE à été réalisée dans le cadre de la conférence CIRED 2017 à Glasgow. Les transparents présentés en séance plénière 'Power Quality and Electromagnetic Compatibility' sont visibles en Annexe 6.

Sur la demande de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), un rapport technique sur le projet de recherche REMIGATE a été rédigé par M. Benedikt Vogel. Cet article a déjà paru dans plusieurs revues ainsi que sur la page Web de l'OFEN et est disponible pour les lecteurs intéressés : 'Des smart meter pas perturbés' disponible sur le lien : **www.bfe.admin.ch/CT/electricite**.

Une publication sur la mesure d'impédance pour les applications CPL a été rédigée en collaboration avec le groupe TSR de l'Université du Pays Basque. Elle sera publiée à l'occasion de la conférence AMPS à Bologne en septembre 2018.

14. Conclusions et perspectives

En début de projet, les premiers essais de qualité de transmission des signaux et mesures d'impédance ont été réalisé sur le site d'Avusy. Il a pu être démontré que les onduleurs photovoltaïques avaient une influence sur la qualité de la transmission par CPL en mode P-LAN, en particulier dans le cas de signaux transmis par diaphonie entre deux phases (voir Figure 15). Ce constat a pu être partiellement expliqué par les mesures d'atténuation des signaux dans la bande CENELEC A au GridLab. La communication PLAN fonctionne toutefois de manière satisfaisante dans l'environnement confiné du GridLab lorsque des onduleurs PV sont enclenché uniquement.

Les premiers essais sur trois jours effectués sur le site d'Avusy avec la technologie avancée de communication G3-PLC ont affiché un taux de succès de la communication, nettement supérieur, de l'ordre des 90% (Voir Figure 24). Un des compteurs montre le taux le plus faible quand tous les onduleurs PV sont enclenchés. Ce n'est cependant pas le cas pour les autres compteurs. Les cycles de communication interrompus sontrépartis de manière irrégulière entre le jour et la nuit. Ils ne semblent donc pas liés à la production photovoltaïque. La communication de type G3-PLC fonctionne parfaitement dans l'environnement confiné du GridLab lorsque des onduleurs PV sont enclenché uniquement.

Il a pu être démontré au cours du projet que les interférences dépendent fortement de la complexité du réseau considéré. Chaque départ de ligne du poste MT/BT, avec tous les équipements qui y sont connectés, contribue à une diminution générale de l'impédance spectrale au point de connexion du concentrateur. Malgré que cette diminution de l'impédance d'accès est relativement faible, elle augmente le risque d'atténuation des signaux. Elle augmente également le risque de 'saturation' et un échauffement des compensants des coupleurs de signaux à l'intérieur du concentrateur de donnée. Au-delà des pertes en communication, ce dernier effet peu amener à une diminution de la durée de vie des équipements concernés.

La situation avec l'impédance du réseau se détériore notablement au niveau des points de connexion des installations (IPC). L'impédance d'accès pour les compteurs intelligents y varie fortement en fonction de la fréquence et de cas en cas (voir Figure 31). Les effets énnoncés ci-dessus augmentent fortement. Dans l'ensemble, il a pu être montré qu'un équipement particulier peut fortement diminuer la qualité de transmission. Pour le PLAN, il suffit d'avoir une impédance d'accès faible et une perturbation proches d'une des deux fréquences porteuses (63 kHz et 74 kHz). Le G3-PLC est nettement plus robuste par rapport à un nombre réduit d'émissions conduites perturbantes, même si leur amplitude est importante. Une résonance sur une bande de fréquence réduite, (dans le cas d'un filtre avec qualité élevée et situé proche du SM, par exemple) ne pose pas trop de problèmes. Une résonance série avec un effet de réduction de l'impédance d'accès sur une large bande de fréquence peut avoir des conséquences dramatiques sur le taux de réussite de commmunication en G3-PLC. Ce constat est confirmé par les travaux de recherche de l'Université du Pays Basque avec la technologie CPL PRIME [2].

Un progrès a pu être mis en évidence de manière générale avec cette nouvelle technologie, particulièrement dans les zones à faible densité (zone résidentielle en proximité des villes par exemple). Il demeure toutefois certains cas d'application dans des zones à très forte densité de compteurs intelligents et de consommateurs où la robustesse de la communication par courant porteurs de ligne ne répond pas aux besoin des GRD. Cela a été le cas par exemple dans un immeuble résidentiel genevois. Les technologies PLC sont donc très avantageusement utilisées dans certains d'applications. La technologie PLC doit cependant encore progresser si on veut pouvoir compter sur elle sur tous les cas de figure. Nous voyons une bonne possibilité de complémentarité entre la CPL pour les zones pas

trop denses avec de grande distances et là u d'autres technologies comme la fibre sont beaucoupplus onéreuses en investissements. D'autres technologies de communication pour compteurs intelligents pourraient cependant être favorisées dans les zones à grande densité. doivent donc encore progresser.

La technologie CPL sera certainement favorisée par une approche plus systémique au niveau normatif. Il ne s'agit pas seulement de réduire les niveaux d'émissions conduites perturbantes des équipements. Les filtres installés dans les alimentations pour appareils électronique et dans les convertisseurs de manière plus général doivent non seulement atténuer les émissions. Ils doivent également être conçus de manière à ne pas diminuer fortement l'impédance d'accès pour les systèmes de communication dans les bandes de fréquences concernées (CENELEC A actuellement, bande FCC dans un futur proche).

Ce dernier constat était déjà fait par les auteurs des rapports techniques publiés par le TC 22 de l'IEC en 2012 et le SC 205A de la CENELEC en 2017 [1]. D'avoir pu le comprendre, démontrer et de pouvoir l'expliquer aux utilisateurs de la technologie PLC en Suisse est le plus important résultat du projet REMIGATE. Nous estimons important de pouvoir continuer notre collaboration avec les comités normatifs, afin que l'impédance dépendante de la fréquence et du temps soit aussi considérée pour les équipements connectés au réseau et pour les essais d'immunité des systèmes de communication par courant porteurs de ligne.

La collaboration entre partenaires a été excellente et a porté ses fruits. Nous avons particulièrement apprécié la disponibilité des collaborateurs du groupe mesures et qualité aux SIG. Les compétences en terme de mesures et les connaissances du réseau de distribution au sein de ce groupe ont permis au projet d'avancer rapidement.

Notre participation à un séminaire dédié aux utilisateurs de compteurs intelligents fournis par le partenaire industriel du projet et aux différents groupes de travail des comités de normalisation ont permis de mieux cerner l'application et de sceller des liens directs avec leurs spécialistes.

Notre participation à la conférence internationale de CIRED 2017 par le biais d'une publication, d'une présentation orale et d'un poster au mois de juin 2017 a marqué un jalon important pour le projet REMIGATE. Cette publication nous a donné l'occasion de faire le point sur l'avancement du projet et de rendre publique les premiers résultats. Elle a aussi apporté une grande part de visibilité pour les équipes du groupe Réseaux électriques de la HEIA-FR et de l'Institut Systèmes industriels de la HES-SO Valais-Wallis.

Le prototype amélioré du nouvel impédance-mètre IGOR V est maintenant disponible. Cet équipement permettra plus de flexibilité pour la réalisation des mesures sur site et au laboratoire. Une alimentation autonome pour les impédances mètres IGOR IV et IGOR V a été réalisée et testée sur deux sites. Des mesures répétitives chaque 10 min. sur 1 semaine, resp. 3 jours ont pu être effectuées ont montré qu'un impédance-mètre autonome était disponible pour des mesures en de longue durée en Suisse.

La modélisation des lignes et câble de distribution doit être affinée et complétée. Une idée intéressante est issue du projet : celle d'utiliser un logiciel de calcul de flux dans les lignes (Load Flow) déjà utilisé par certains GRDs pour modéliser les canaux de communication CPL. Il s'agira ensuite d'établir un catalogue de convertisseurs générant plus ou moins d'interférences avec les signaux CPL. Ce catalogue pourrait être mis à la disposition des GRDs partenaires de nos activités CEM-Smart Grid. Un premier essair avec Power Factory a montré que c'était possible et a donnée un résultat prometteur. Le prolongement de cette idée est l'une des tâches prévue dans le cadre du projet OFEN OptiQ en collaboration avec BFH. Enfin, la collaboration active à l'établissement de normes est poursuivie.

Un nouveau banc d'essais pour convertisseurs photovoltaique a été mis en place à la HES-SO Valais-Wallis dans le cadre des projet CEM-Smart Grids et REMIGATE. Cet outil nous permettra d'évaluer certaines normes récemment apparues : par exemple la norme IEC 61000-4-19 qui définit les méthodes d'essais de l'immunité des équipements dans la bande 2 à 150 kHz.

La participation aux conférences, séminaire et comités normatifs nous a permis d'établir des contacts avec de nombreux chercheurs et spécialistes dans les domaines de la compatibilité électromagnétique, de la télécommunication et des smart grids. Les discussions engagées au cours de ces rencontres ont participé au développement d'une certaine expertise dans ces domaines.

Une collaboration internationale est proposée avec un réseau de chercheurs du Nord de l'Espagne, actifs depuis pluieurs années dans le domaine des interférences entre sources d'énergie renouvelable et compteurs intelligents [2].

Finalement nous sommes très satisfaits de pouvoir donner suite au projet REMIGATE dans le domaine de la normalisation sur l'impédance dépendante de la fréquence et du temps dans le cadre d'un nouveau projet soutenu par l'OFEN, les SIG et plusieurs partenaires industriels donc un fabricant de filtre CEM.

14.1. Perspectives selon le partenaire fabricant de compteurs intelligents

Le partenaire de projet fournisseur de compteurs intelligents s'exprime en ces termes à propos des perspectives pour la technologie G3-PLC, en lien avec les résultats et acquis du projet REMIGATE.

L'utilisation de la technologie G3 PLC dans la bande CENELEC A a permis de confirmer cette solution de communication comme étant stable, fiable et économiquement optimale. Néanmoins, dans certaines situations, une augmentation des performances est souhaitable, spécialement dans les cas où le niveau de service est proche de la limite demandée. La prochaine étape de l'évolution de la communication PLC est l'utilisation de la bande 150 à 500 kHz communément appelée bande FCC.

Le passage de la bande CENELEC A à la bande FCC a déjà été réalisée chez plusieurs clients dont *Linde Energi* et *Falkenberg* en Suède, des projets sont prévus en Autriche et des installations pilotes ont été réalisées en Suisse. Globalement, le taux de réussite de lecture des valeurs est passé de 90 à 95% de la bande CENELEC A à une performance proche de 100% dans la bande FCC.

En Suisse, l'utilisation de la bande FCC est réglementée par l'Office Fédéral de la communication (annexe 5.1 de l'ordonnance de l'OFCOM). Les détails figurent dans le document appelé prescriptions techniques et administratives (PTA) concernant les installations de télécommunications filaires utilisant la technologie des courants porteurs en ligne (technologie CPL) dans le cadre de services de télécommunication et réseaux privés s'étendant sur plusieurs bâtiments non contigus.

Une nouvelle version (PTA 5.1 version 4) est disponible qui facilite l'utilisation de la bande FCC en Suisse sous certaines conditions. Une mise à jour du Firmware des compteurs va permettre prochainement de s'adapter aux nouvelles règles en vigueur.

Ce commentaire est complété par une annonce de la direction des ventes de Landis+Gyr qui sera rendue publique prochainement (annexe A7).

15. Remerciements

OFEN

EOS-H

SCCER FURIES

SIG

Landis+Gyr

HES-SO

BFH Biel

M. Benedikt Vogel

AES- Bulletin

GRUT

SC 205A, TC 77A

University Pays Basque

Equipe HES-SO Valais-Wallis – Institut Systèmes industriels

16. Références

[1] CENELEC SC205A Mains Communicating Systems, «Study Report on Electromagnetic Interference between 3851 Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range Below 150 kHz Ed. 2" (TR60527),» CENELEC, 2015.

[2] I. A. L. H.-C. T. A. D. d. l. V. a. A. A. Noelia Uribe-Pérez, «Study of Unwanted Emissions in the CENELEC-A Band Generated by Distributed Energy Resources and Their Influence over Narrow Band PowerLineCommunications,» *Energies,* 2016.

[3] A. A. I. F. I. A. D. R. D. d. l. V. L. Capponi, «Comparison of measurement methods of grid impedance for Narrow Band-PLC up to 500 kHz,» chez *AMPS 2018*, Bologna, 2018.

[4] L. M. D. F. Roggo D, «On-line 2 to 150 kHz Grid Impdance Meter,» chez *CIRED*, Stockholm, 2013.

[5] G. H. G. Bumiller, «Data rate optimization on PLC devices with current controller for low access impedance,» chez *International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC),* , Bottrop, 2016.

[6] S. M. P. H. D. J. F. R. Cettou, «Innovative Solutions for Distribution Automation and Automatic Meters Reading,» chez *CIRED '99*, Paris, 1999.

[7] C. L. e. al., «ERDF Endorse Power Quality for E-Mobility,» chez *CIRED*, Lyon, 2015.

[8] ETSI, «ETSI TS 103 909 V1.1.1,» 2012.

[9] L. E. R. W. P. F.-P. D. R. O. Galland, «Application of Resonance Analysis to AC-DC Networks,» *IEEE Transaction on Power Delivery,* 2017.

[10] SC 205A, «CLC/TR 50669: Investigation Results on Electromagnetic Interference in the Frequency Range below 150 kHz,» CENELEC, 2017.

[11] O. g. P. F.-P. D. C. F. D. D. R. L. Eggenschwiler, «Frequency scans and resonance mode analysis for resonance problems identification in power net-works in presence of harmonic pollution,» chez *Paper 0807*, Glasgow, 2017.

17. Liste des abréviations

AMI	: Advanced Metering Infrastructure
CEM	: Compatibilité électromagnétique
CENELEC	: Comité Européen de Normalisation Electrique
CISPR	: Comité International Spécial de Perturbation Radioélectriques
CPL	: Communication par courant porteur de ligne
DC	: Data Concentrator
FSK	: Frequency Shift Keying Modulation
GKN	: Type de câble pour ligne enterrée
GRD	: Gestionnaire du réseau de distribution
IGOR	: Interférences Générées par les Onduleurs sur le Réseau
IPC	: Point de connexion de l'installation
IPD	: Installation de production décentralisée
LISN	: Line Impedance Stabilisation Network
MAC	: Medium Access Communication
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PLAN	: Power Line Automation Network
PV	: production d'énergie photovoltaïque
RMS	: Root Mean Square (valeur efficace)
SM	: Smart Meter / Compteur intelligent
TC	: Technical committee for standardization
WG	: Working Group

18. Annexes

A1 : Projets pilotes, de démonstration et projets phares: requête pour l'octroi d'une aide financière, projet REMIGATE

A2 : PLC-DÄMPFUNG IM NIEDERSPANNUNGSNETZ - TECHNISCHER BERICHT

A3: Mesure de l'impédance spectrale en ligne, IGOR V

A4 : Enphase Micro-Inverter, Rapport technique V2. (2016)

A5: Présentation transmise au WG8 du TC 77A: 'Frequency Dependant Grid Impedance, Standardisation need in the frequency range 2 to 150 kHz'

A6 : EMI in Smart Grid Applications:A case study of PLC Smart Meters with PV Energy Generation Presentation CIRED 2017

A7 : Annonce publique de Landis+ Gyrsur la communication CPL