

# SMAP

---

*Rapport d'évaluation du Lot 3 « Réseau »*  
**SUPERVISION LOCALE ET REGULATION DE  
TENSION SUR LE RESEAU LES HAIES**

---



Liste de diffusion : Enedis, Atos WorldGrid, Nexans, Auvergne-Rhône-Alpes Energie Environnement, Syder, SAS Centrales Villageoises, Fonds Européens FEDER.

Rédacteur : Alexis LAGOUARDAT (Enedis)

Contributeurs : Gabriel MONATON (Atos WorldGrid)

Vérificateurs : Aurélie FERRAGE (Enedis), Antoine LANCON (Enedis), Hervé BARANCOURT (Atos WorldGrid)

## Résumé

Le Lot 3 assure l'expérimentation terrain autour de la supervision locale et la régulation de la basse tension afin d'étudier la mise en place d'une architecture technique visant à rendre plus agile la gestion du réseau basse tension. Il est piloté par Enedis.

### Objectif du livrable :

L'objectif du livrable est de présenter l'expérimentation concernant la régulation de tension dans l'optique de favoriser l'intégration des énergies renouvelables sur le réseau électrique basse tension du village Les Haies. Cette présentation sera complétée d'un retour d'expérience sur l'outil de supervision locale basse tension basé sur les compteurs communicants Linky, sur l'utilisation d'un transformateur avec régleur en charge installé sur le village Les Haies et sur le pilotage centralisé d'onduleurs photovoltaïques.

L'identification des freins et leviers techniques pour la mise en place de l'architecture mise en place alimentera les réflexions en cours autour de la gestion des réseaux basses tension et de l'intégration des énergies renouvelables sur ces réseaux.

### Tâches effectuées :

- Installation de compteurs communicants sur la commune Les Haies, en dehors du déploiement industriel Linky, afin de faciliter l'expérimentation autour de la supervision locale basse tension [voir ci-dessous].
- Mise en place d'une infrastructure de supervision locale basée sur les compteurs communicants Linky permettant de mesurer, faire remonter et interpréter les mesures de tension BT. L'intelligence permettant l'interprétation des informations et la réalisation d'actions de réglage de tension se situe dans le concentrateur installé dans le poste HTA/BT.
- Expérimentation du pilotage centralisé d'onduleurs photovoltaïques SMA installés dans le village Les Haies, et couplage avec l'infrastructure de supervision locale BT.
- Installation et expérimentation d'un transformateur régleur en charge de marque Ormazabal dans un poste HTA/BT du village Les Haies, et couplage avec l'infrastructure de supervision locale BT.
- Installation de capteurs de mesure de tension HTA au niveau d'un poste HTA/BT afin de surveiller l'impact des variations HTA sur la tension BT et inversement.

### Résultats atteints :

La supervision locale basée sur les compteurs communicants Linky est fiable et permet d'avoir en temps réel la vision des mesures de tension sur le réseau basse tension. Adossés à cette brique de supervision, le transformateur avec régleur en charge et le pilotage de la puissance active des onduleurs photovoltaïques, permettent d'ajuster la tension en fonction du comportement du réseau.

Des travaux autour de simulations réseaux viennent compléter ceux décrits dans ce livrable, et ont fait l'objet de livrables complémentaires.

## Table des matières

I. Rappel sur l'impact de l'intégration d'énergies renouvelables sur le réseau électrique en milieu rural.....	4
1.1. Impact de la production décentralisée sur le réseau public de distribution d'électricité.....	4
1.2. Particularités des réseaux électriques ruraux.....	6
II. Situation initiale sur le réseau des Haies .....	8
2.1. Architecture du réseau d'étude .....	8
2.2. Installation des capteurs « Flukes » .....	10
2.3. Données mesurées et interprétation .....	10
2.3.1. <b>Elévations et chutes de tension</b> .....	11
2.3.2. <b>Refoulement en puissance</b> .....	14
2.3.3. <b>Appel de puissance au début des heures creuses (HC)</b> .....	15
III. Architecture réseau mise en place.....	17
3.1. Vision globale de l'architecture réseau .....	17
3.2. Objectifs.....	19
3.3. Planning de l'expérimentation .....	20
IV. Le compteur Linky comme 1 <sup>ère</sup> brique de la régulation de la basse-tension .....	22
4.1. Installation des compteurs communicants et du concentrateur .....	22
4.2. Prise en main des compteurs Linky et du concentrateur par ATOS .....	23
4.2.1. <b>Couplage du système Atos avec le matériel Enedis</b> .....	23
4.2.2. <b>Difficultés rencontrées</b> .....	24
4.3. Fiabilité de la remontée des mesures issues des compteurs communicants.....	24
4.3.1. <b>Taux d'erreur</b> .....	24
4.3.2. <b>Une supervision locale fiable</b> .....	25
V. Transformateur avec régleur en charge.....	27
5.1. Principe de fonctionnement et caractéristiques techniques .....	27
5.1.1. <b>Principe de fonctionnement d'un transformateur avec régleur en charge</b> .....	27
5.1.2. <b>Caractéristiques du transformateur avec régleur en charge utilisé dans SMAP</b> .....	28
5.2. Installation du transformateur avec régleur en charge .....	29

5.3.	Contrôle de la tension en sortie de poste HTA/BT .....	30
5.3.1.	Communication entre le concentrateur et le transformateur régleur en charge du poste HTA/BT .....	30
5.3.2.	Evolution de l’algorithme de pilotage Atos (apprentissage).....	30
5.3.3.	Remontée des données .....	31
5.3.4.	Difficultés rencontrées .....	32
5.4.	Régulation de tension du transformateur avec régleur en charge .....	32
VI.	Pilotage des onduleurs photovoltaïques.....	34
6.1.	Caractéristiques techniques des onduleurs.....	34
6.2.	Rappels sur le pilotage des onduleurs.....	34
6.2.1.	Pilotage de la puissance réactive .....	35
6.2.2.	Lien entre puissance réactive et chute de tension .....	36
6.2.3.	Pilotage de la puissance active.....	37
6.3.	Pilotage de la tension dans le cadre du projet SMAP .....	37
6.3.1.	Communication entre le concentrateur et les onduleurs .....	37
6.3.2.	Evolution de l’algorithme de pilotage ATOS (apprentissage) .....	38
6.3.3.	Remontée des données .....	39
6.3.4.	Difficultés rencontrées .....	40
6.4.	Résultats obtenus .....	41
6.4.1.	Pilotage en puissance réactive .....	41
6.4.2.	Pilotage en puissance active.....	41
VII.	Impact de la tension HTA sur la tension BT.....	43
7.1.	Capteurs de tension HTA utilisés et objectifs .....	43
7.2.	Analyse des données HTA mesurées au poste HTA/BT « Ecole » .....	43
7.2.1.	Valeurs « élevées » de la tension HTA .....	44
7.2.2.	Creux de tension .....	45
7.2.3.	Une régulation de tension s’adaptant aux variations HTA .....	46
VIII.	Capitalisation.....	47
8.1.	Messages clés .....	47
8.2.	Axes d’amélioration et perspectives .....	48
8.3.	Répliquabilité .....	48
IX.	Conclusion .....	50

## I. Rappel sur l'impact de l'intégration d'énergies renouvelables sur le réseau électrique en milieu rural

### 1.1. Impact de la production décentralisée sur le réseau public de distribution d'électricité

Historiquement en France, l'électricité était produite de manière centralisée (par des centrales nucléaires, des centrales hydrauliques, etc.). Le réseau électrique était donc conçu pour transporter, puis distribuer l'électricité dans un seul sens, des centrales de production jusqu'aux consommateurs raccordés sur le réseau.

La transition énergétique est le passage d'un système énergétique traditionnellement axé sur des énergies non renouvelables (pétrole, gaz, charbon) à un nouveau mix énergétique moins carboné. Elle engendre donc de profonds changements pour le système électrique, avec notamment le développement massif de sources d'énergie décentralisées, tels que le photovoltaïque et l'éolien.

En France, la Loi de Transition Énergétique pour une Croissance Verte (LTECV) de 2015 a fixé une ambition nationale. L'objectif ? Faire que 32 % de la production d'électricité soient issus d'énergies renouvelables d'ici 2023 en France et 40 % en 2030. La difficulté réside dans le fait que les énergies renouvelables sont variables<sup>1</sup> et plus difficilement prévisibles. Leur accueil sur le réseau électrique représente donc un défi majeur pour leur développement, notamment pour le réseau de distribution d'électricité qui accueille aujourd'hui 95 % de l'énergie éolienne et photovoltaïque.<sup>2</sup>

Dans le cadre du projet SMAP, nous nous intéressons particulièrement à la production photovoltaïque de sites raccordés sur le réseau BT.

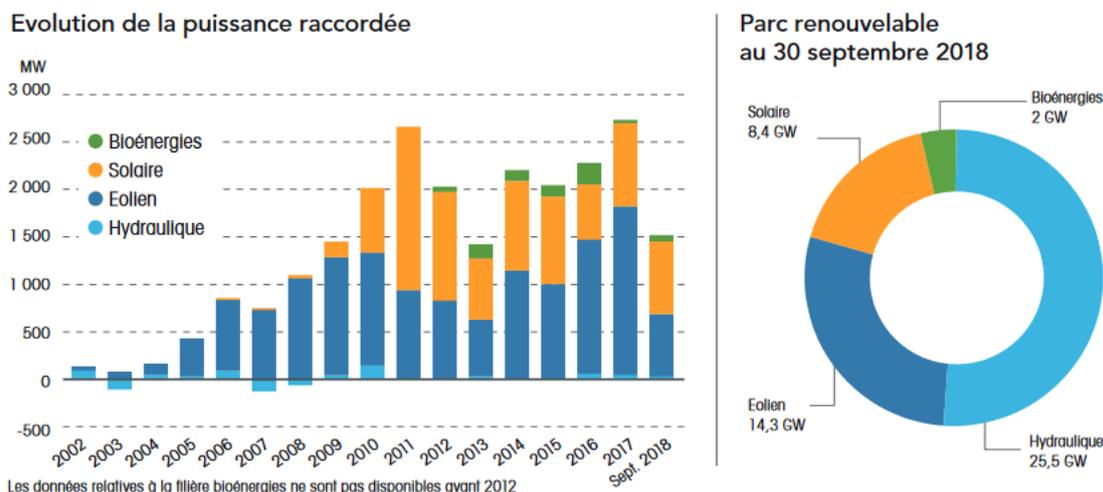


Figure 1 : Panorama des énergies renouvelables en France - Source RTE, Enedis

De par la nature passive des câbles électriques composant le réseau, la tension chute lorsqu'on s'éloigne de la source de production d'électricité : sur un réseau BT composé uniquement de points de soutirage, la tension est donc plus élevée en sortie du poste HTA/BT qu'en bout de ligne. L'arrivée de sites de production décentralisés sur les réseaux modifie ce constat, puisque l'injection

<sup>1</sup> Variable =

<sup>2</sup> Source : <https://www.enedis.fr/la-transition-energetique-et-les-smart-grids>

d'électricité va entraîner une élévation de tension au niveau du point de raccordement de l'installation. Plus la concentration et la puissance des installations d'énergies renouvelables est importante, plus l'impact sur le niveau de tension est visible. C'est d'autant plus vrai sur des réseaux peu chargés, c'est-à-dire avec un faible volume de consommation.

La variabilité de la production photovoltaïque (qui ne produit que lorsqu'il y a de l'ensoleillement) et éolienne (qui ne produit que lorsqu'il y a du vent), associée à l'impossibilité de stocker l'électricité à un coût raisonnable (à l'heure actuelle) ont pour conséquence des prévisions de production peu fiables et de nombreuses variations de tension au cours du temps. Par exemple, la figure ci-dessous illustre deux phénomènes qui peuvent apparaître sur des réseaux électriques avec une forte concentration de sites photovoltaïques : en été pendant le pic de production (14h par exemple), si la consommation du départ BT est faible, alors une surtension peut apparaître au niveau du point d'injection ; en hiver pendant le pic de consommation (19h par exemple), la production photovoltaïque est nulle, et une sous-tension peut apparaître au niveau du point de soutirage et/ou en bout de réseau BT.

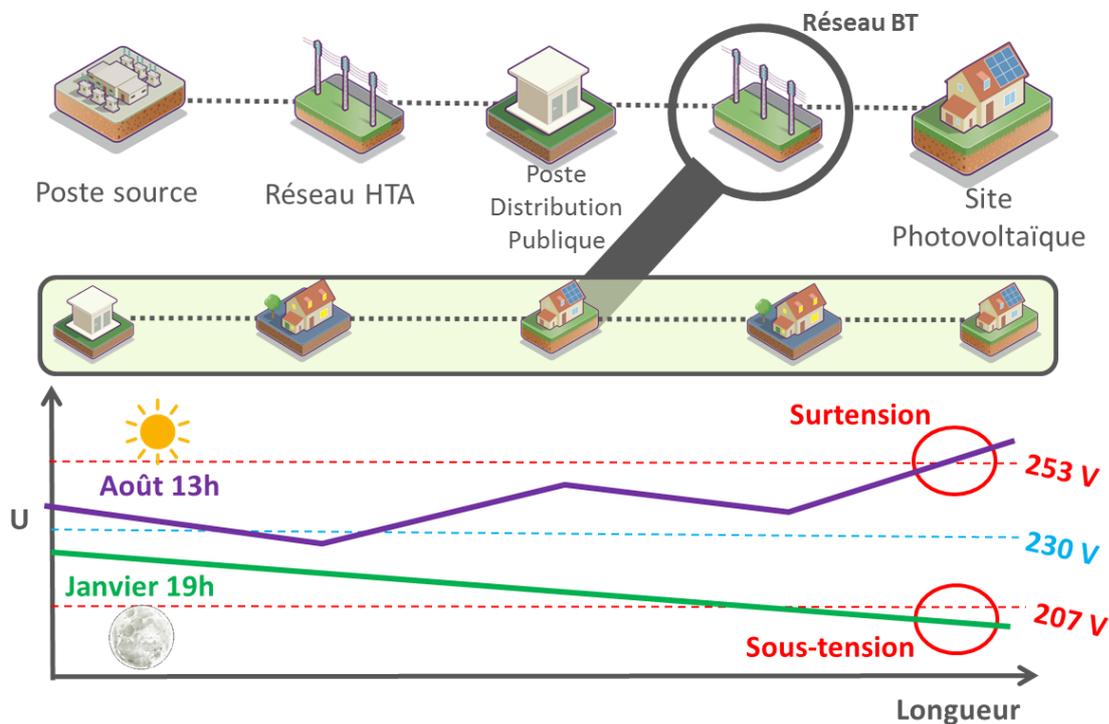


Figure 2 : Impact de la production sur la tension - Source Enedis

La tension est un paramètre clé dans la gestion du réseau : elle doit être maintenue en permanence dans une certaine plage de valeurs, en tout point du réseau, afin de garantir le bon fonctionnement et la sécurité des équipements électriques. A partir d'un certain volume d'intégration d'énergies renouvelables, il peut donc être nécessaire d'envisager des renforcements du réseau électrique afin de garantir un niveau de tension réglementaire et une qualité d'alimentation optimale. Les coûts de ces renforcements peuvent notamment freiner les projets photovoltaïques, d'où l'objectif de SMAP qui est de faciliter le développement des énergies renouvelables en minimisant les coûts de renforcements.

La gestion du réseau électrique BT pourrait permettre d'optimiser l'intégration des énergies renouvelables en devenant plus agile. Cette évolution est permise par la mise en place de nouvelles solutions

telles que la supervision locale BT et la régulation de tension, innovations mises en œuvre dans SMAP et qui sont l'objet de ce livrable.

## 1.2. Particularités des réseaux électriques ruraux

Par nature, les réseaux en zones rurales sont actuellement plus impactés par un déploiement massif des énergies renouvelables que des réseaux en zones urbaines et périurbaines.

En effet, la consommation électrique est relativement plus faible dans les zones rurales qu'en milieu urbain. La figure ci-dessous illustre cette diversité de niveau de consommation par commune : la consommation totale en 2017 était de 929 067,50 MWh à Lyon (19 408 MWh / km<sup>2</sup>), de 30 958,33 MWh à Givors (1785 MWh / km<sup>2</sup>) et de 2 264,89 MWh à Les Haies (142 MWh / km<sup>2</sup>).<sup>3</sup>

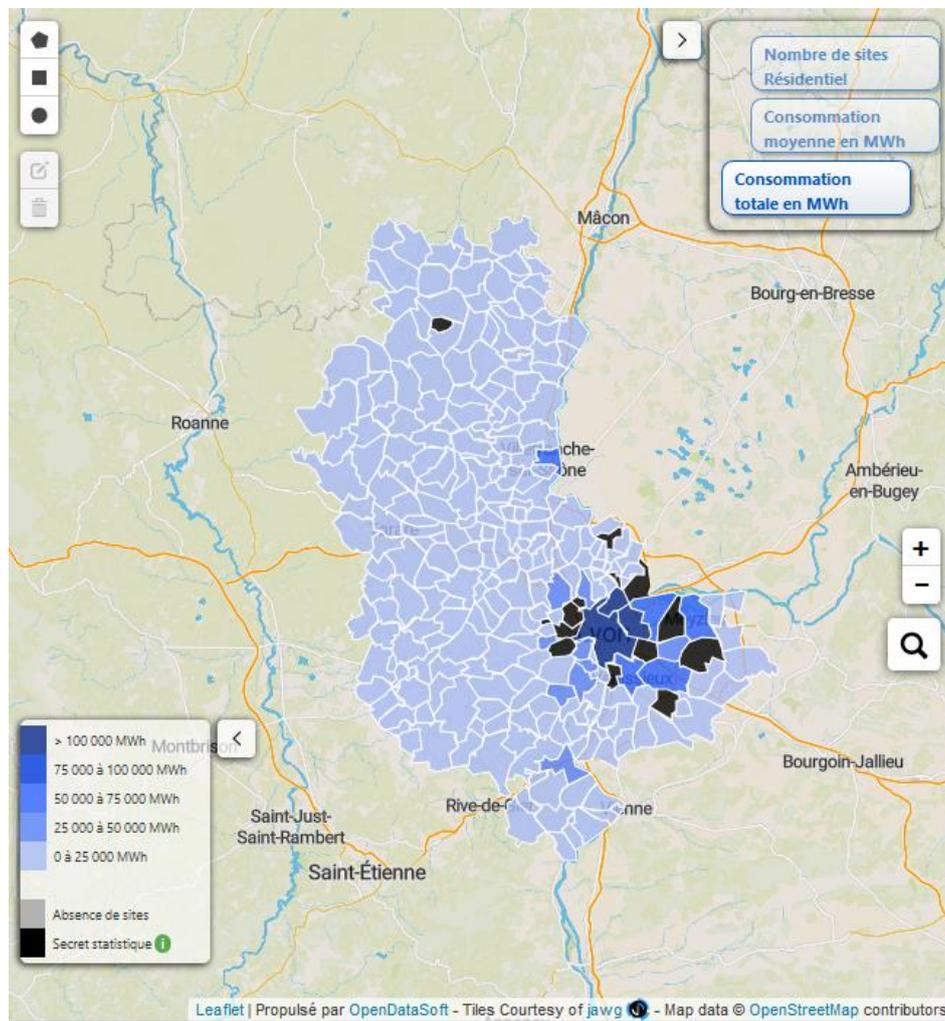


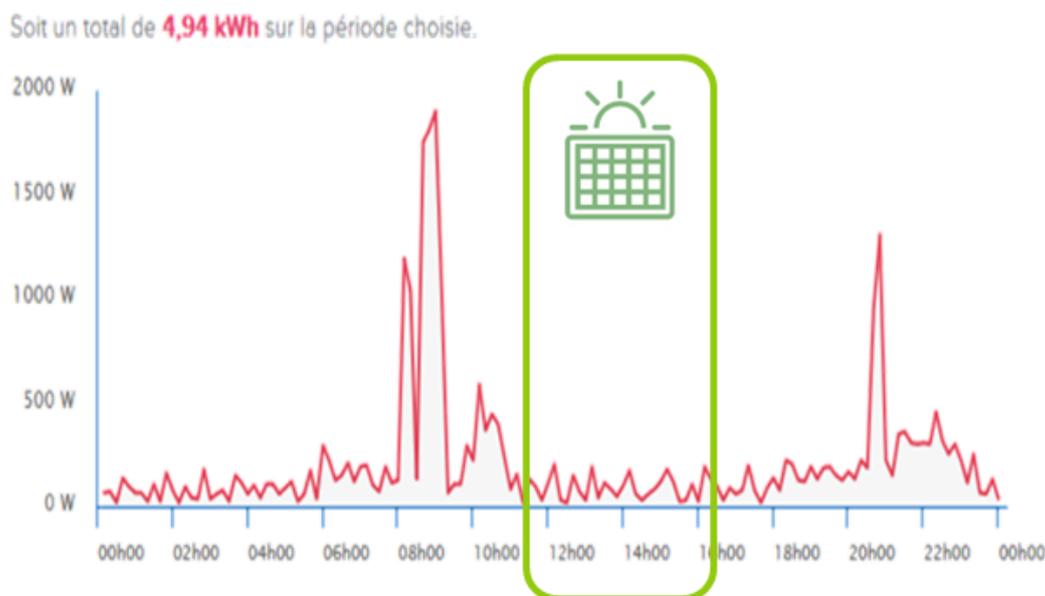
Figure 3 : Consommation totale par commune sur le département du Rhône - Source Open Data Enedis

La production photovoltaïque 880,62 MWh pour 148 sites <36kVA à Lyon, 197,07 MWh pour 57 sites à Givors et 144,86 MWh pour 24 sites à Les Haies.

<sup>3</sup> Consommation totale (Source Open Data Enedis) : pour un secteur/segment donné, sur une maille géographique donnée, l'énergie annuelle totale correspond au volume d'électricité consommée sur une année par l'ensemble des sites du secteur/segment sur la maille géographique. Le secteur est ici le résidentiel.

Le rapport entre consommation et production locales est donc bien plus faible sur la commune de Les Haies qu'à Lyon ou Givors : le volume de consommation est 1 055 fois plus important que la production à Lyon, 157 fois à Givors, et seulement 15 fois à Les Haies. Ce ratio aura tendance à diminuer encore dans le futur, avec la volonté du gouvernement et des collectivités de développer d'avantage d'énergies renouvelables et de réduire la consommation énergétique (rénovation thermique, comportements vertueux, etc.). L'influence de la production photovoltaïque est donc bien plus nette sur les réseaux électriques ruraux, avec une consommation globale plus faible par rapport aux zones urbaines.

Un autre phénomène caractéristique des zones rurales est une faible consommation pendant la journée liée à la migration pendulaire (les habitants travaillent souvent dans les villes alentours) et à la faible activité tertiaire et commerciale dans les villages ruraux. Un profil illustratif de consommation d'un client résidentiel sur la commune Les Haies est donné ci-dessous, illustrant cette tendance. Or c'est pendant cette période de faible consommation que la production photovoltaïque est maximale (entre 13h et 14h en général). Le ratio entre consommation et production peut donc être très faible, entraînant des hausses de tension localisées au niveau des points d'injection.



Les zones rurales représentent donc des territoires impactés par le développement des énergies renouvelables, et le village Les Haies en est l'illustration [voir paragraphe 2.1].

Dans le cadre du projet Greenlys<sup>4</sup> (2013-2016) des travaux autour de la régulation de tension ont été menés sur un panel de réseaux BT sur des zones urbaines et périurbaines à Lyon. Les résultats qui en découlent ne peuvent pas être extrapolés à d'autres zones, ni au milieu rural où les problématiques d'intégration des énergies renouvelables sont très différentes, comme nous l'avons précisé précédemment. Le projet SMAP se veut donc complémentaire du projet Greenlys sur les sujets de régulation de tension, et offre de nouvelles perspectives autour de la supervision locale BT.

<sup>4</sup> Présentation du projet Greenlys : <https://www.enedis.fr/greenlys>

## II. Situation initiale sur le réseau des Haies

### 2.1. Architecture du réseau d'étude

La commune Les Haies (69420) est au cœur du projet SMAP. Elle est située dans le Parc Naturel Régional (PNR) du Pilat et compte 810 habitants. C'est ce village qui a accueilli la première Centrale Villageoise photovoltaïque<sup>5</sup> (SAS CVRC) de France en 2014 : 500 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques couvrent ainsi les toits publics et privés de la commune. Le projet SMAP s'adosse donc à ce projet de Centrales Villageoises photovoltaïques, qui illustre le développement croissant des énergies renouvelables dans les territoires ruraux.

Dans le cadre de SMAP, cette dynamique est renforcée par le fait que le PNR du Pilat et Saint-Etienne Métropole forment ensemble un territoire TEPOS (Territoire à Energie POSitive)<sup>6</sup> engagé dans des objectifs ambitieux de production d'énergie renouvelable et de réduction de consommation. Cette caractéristique donne encore plus de sens à la mise en place d'un projet pour faciliter le développement des sites de production photovoltaïque, en lien avec les ambitions du Territoire, et impliquant les citoyens et l'ensemble de l'écosystème local.

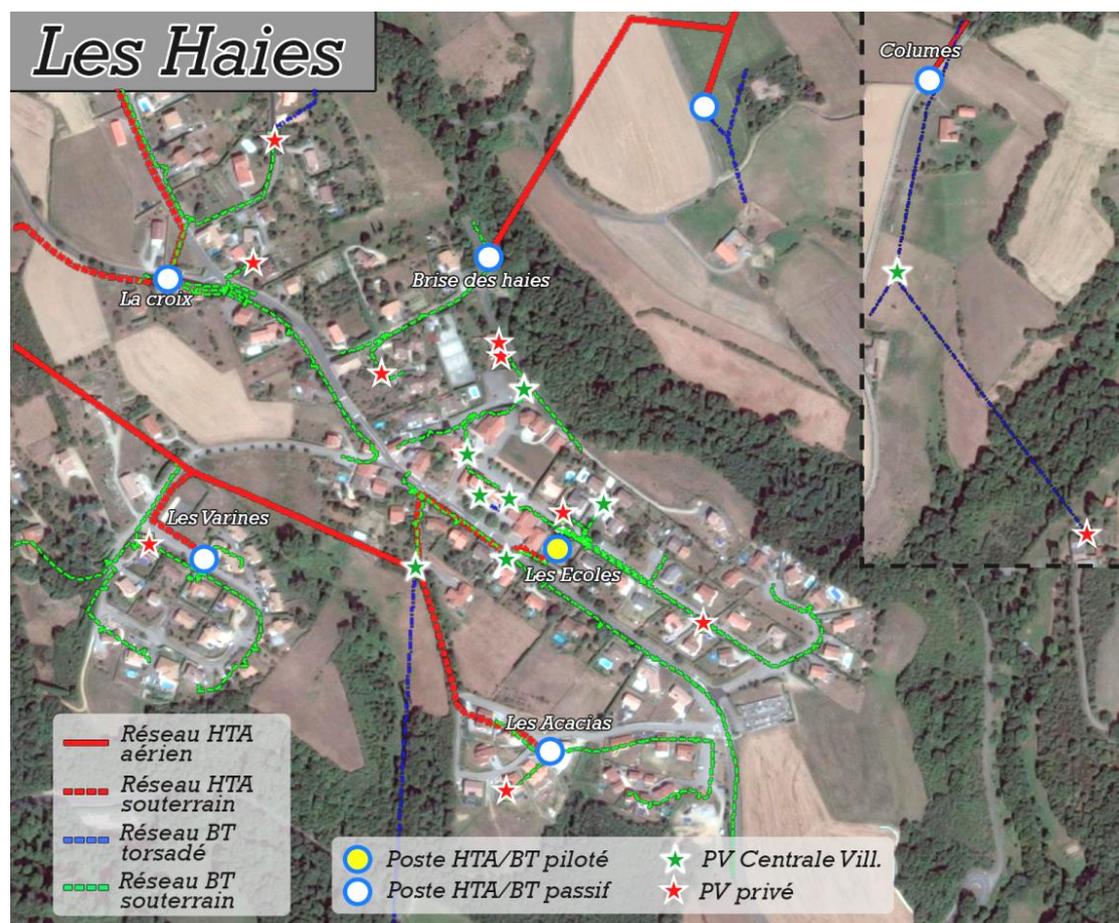


Figure 5 : Cartographie des réseaux sur Les Haies – Source Enedis

<sup>5</sup> Les Centrales Villageoises sont des sociétés locales qui associent citoyens, collectivités et entreprises locales pour développer des projets de production d'énergie renouvelable au sein d'un territoire.

<sup>6</sup> Un territoire à énergie positive vise l'objectif de réduire ses besoins d'énergie au maximum, par la sobriété et l'efficacité énergétiques, et de les couvrir par les énergies renouvelables locales ("100% renouvelables et plus").

La maille globale de l'expérimentation concerne 6 postes HTA/BT alimentant 171 clients (consommateurs et producteurs) de la commune Les Haies. Ces 6 postes ont des caractéristiques différentes illustrées dans la figure ci-dessous : puissance, nombre de clients raccordés, puissance photovoltaïque raccordée, etc.

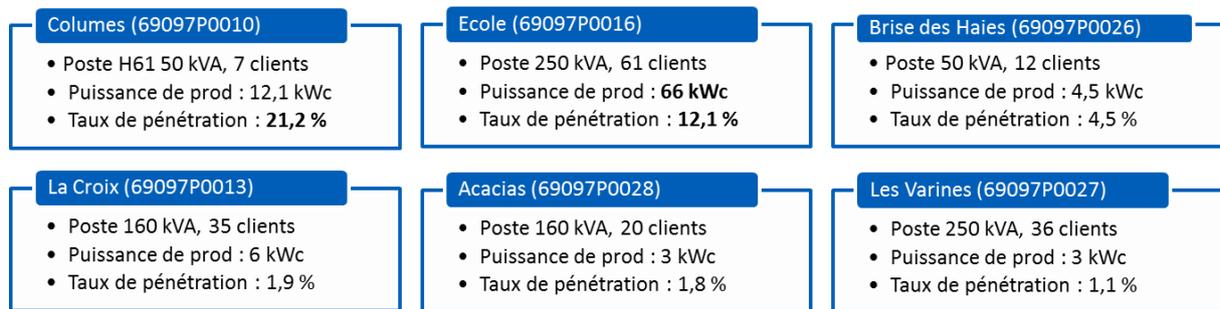


Figure 6 : Caractéristiques des 6 postes HTA/BT de Les Haies <sup>7</sup>

Le cœur de l'expérimentation autour de la régulation de tension concerne le poste HTA/BT « Ecole », au centre du village. Il est situé au 380 Champ Blanc, 69420 Les Haies (GPS : 45.503266, 4.749677). Le poste source de rattachement est le poste « GIVORS ». C'est dans le poste « Ecole » qu'ont été installés le concentrateur » [voir paragraphe 4.1], le transformateur avec régleur en charge [voir paragraphe 5.2] et les capteurs HTA [voir paragraphe 7.1]. Les caractéristiques des différents départs BT du poste « Ecole » sont données dans le tableau ci-dessous : le nombre de consommateurs, le nombre de producteurs, la puissance totale des installations photovoltaïques raccordées au réseau et la longueur du départ.

	Départ 1	Départ 2	Départ 3	Départ 4	Départ 5	Total Poste Ecole
Nb conso	6	21	13	7	14	61
Nb prod	0	6	1	2	2	11
Pi	0 kWc	38 kWc	3 kWc	11 kWc	14 kWc	66 kWc
Lmax	131 m	301 m	362 m	79 m	697 m	697 m

Figure 7 : Caractéristiques des départs BT du poste "Ecole" - Source Enedis

Le tableau ci-dessus illustre la forte concentration des sites de production photovoltaïque, liée à une densité de consommateurs relativement faible par rapport à des réseaux urbains (par exemple le départ 2, qui est le plus chargé, a une moyenne de 0,07 consommateurs / mètre de ligne).

Cette topologie de réseau et de charge confirme l'impact non négligeable des sites de production sur les flux et l'état en tension du réseau BT.

<sup>7</sup> Ici, le taux de pénétration est défini par le rapport entre production et consommation, à la maille d'un poste HTA/BT.

## 2.2. Installation des capteurs « Flukes »

6 capteurs Flukes ont été posés le 28 Juillet 2015 dans les 6 postes électriques de la commune Les Haies. L'installation de ces capteurs dans la 1<sup>ère</sup> phase du projet a permis d'évaluer l'impact de la production décentralisée sur les niveaux de tension et la puissance transitée au niveau des postes HTA/BT. Cet état des lieux a permis de mettre en évidence certains phénomènes liés aux pics de production photovoltaïques [voir paragraphe 2.3] et de justifier la mise en place d'une expérimentation sur le réseau de Les Haies.



Figure 8 : Capteurs Fluke installés sur la commune Les Haies – Source Enedis

Cette campagne de mesure s'est réalisée en 3 temps, nécessitant le déploiement d'un technicien Enedis du fait de la nécessité d'une relève manuelle :

- 1<sup>er</sup> relevé le 26 août 2015 ;
- 2<sup>ème</sup> relevé le 1<sup>er</sup> octobre 2015 ;
- 3<sup>ème</sup> relevé le 13 Novembre 2015.

Les données mesurées sont ensuite traitées grâce au logiciel PQlog, leur interprétation étant explicitées dans le paragraphe suivant.

## 2.3. Données mesurées et interprétation

Les capteurs Fluke permettent l'accès aux grandeurs moyennes (pas de temps 10 min) et les valeurs minimales et maximales (sur 1s, pas de temps 10 min) au niveau du poste HTA/BT pour les 3 phases et le neutre. Ces grandeurs correspondent aux tensions, courants et puissances.

L'analyse de ces données a mise en évidence plusieurs phénomènes plus ou moins impactant sur la bonne tenue du réseau électrique : des refoulements en puissance (qui n'influe pas directement sur la tension du réseau), des élévations et des chutes de tension et des appels de puissance importants.

Dans la suite de ce paragraphe, nous détaillerons 4 de ces phénomènes plus ou moins directement liés à la production photovoltaïque BT.



Figure 9 : Phénomènes observables lors d'une étude de grandeurs mesurées au niveau d'un poste HTA/BT – Source Enedis

### 2.3.1. Elévations et chutes de tension

En posant des enregistreurs Flukes, sur les 6 postes HTA/BT des Haies dont le poste « Ecole », il a été détecté entre août et novembre 2015, des élévations de tensions entre +/-4% et +/-8% pouvant être liées aux variations de l'injection de la production photovoltaïques BT de la Centrale Villageoise (et probablement également à celles des autres panneaux PV privés raccordés sur le même poste). Les graphes ci-dessous présentent des données issues des enregistreurs, participant à la justification de la mise en place d'une régulation de tension dans le cadre de SMAP.

Les deux figures ci-dessous mettent en évidence une élévation de tension due à la production photovoltaïque. Le 25 et 28 septembre, la tension au niveau du poste Ecole a atteint 245 V, soit +6,5% par rapport à la tension nominale de 230 V.

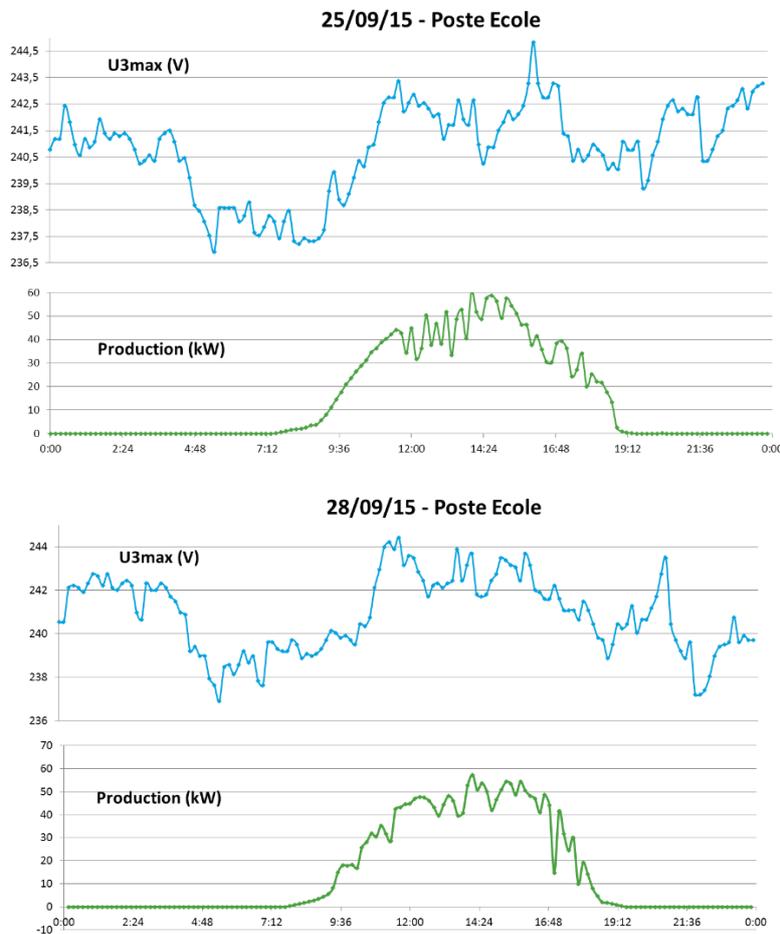


Figure 10 : Elévations de tension au niveau du poste HTA/BT pendant les heures de production PV - Source Enedis

Ces élévations de tension sont prises en compte dans les études électriques concernant le dimensionnement des réseaux afin que les valeurs de tension respectent les normes en vigueur, ce qui est le cas dans l'exemple ci-dessus, la norme fixant une limite à +/- 10% en BT. Le raccordement d'une nouvelle installation photovoltaïque peut donc induire des besoins de renforcement (travaux d'extension), et donc des coûts de raccordement pour le porteur de projet<sup>8</sup> : c'est l'origine même de la problématique de la Centrale Villageoise de Les Haies et du projet SMAP.

Sur un réseau électrique avec peu de consommation, comme c'est le cas sur Les Haies, les valeurs de tension sont très sensibles aux variations de production photovoltaïque. Ces variations de tension sont visibles au niveau du poste HTA/BT, mais surtout au niveau des points d'injection. Les deux graphes ci-dessous illustrent cette nette corrélation entre la production locale et la tension.

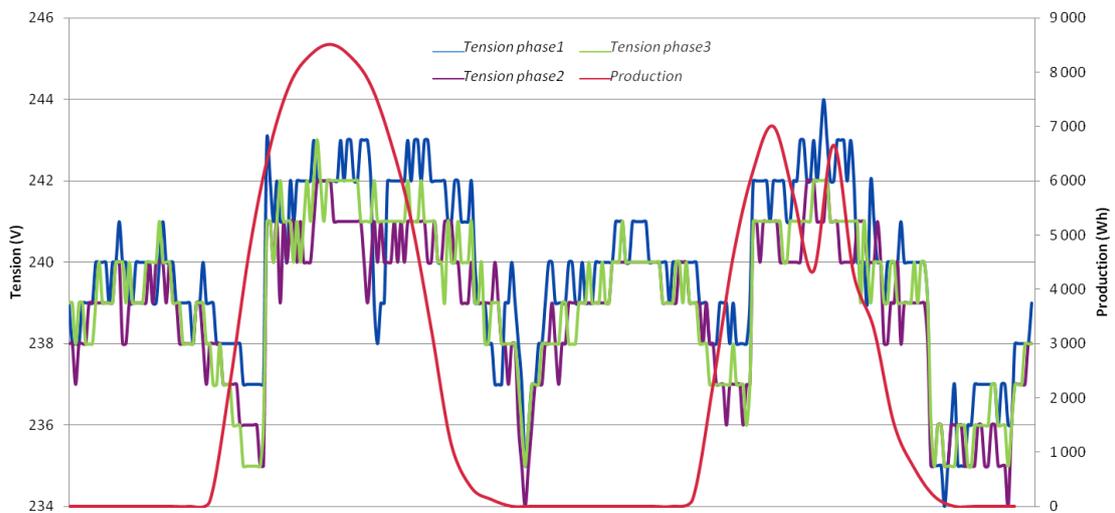


Figure 11 : Production entraînant une élévation de tension au niveau d'un producteur (15 kWc) - Source Enedis

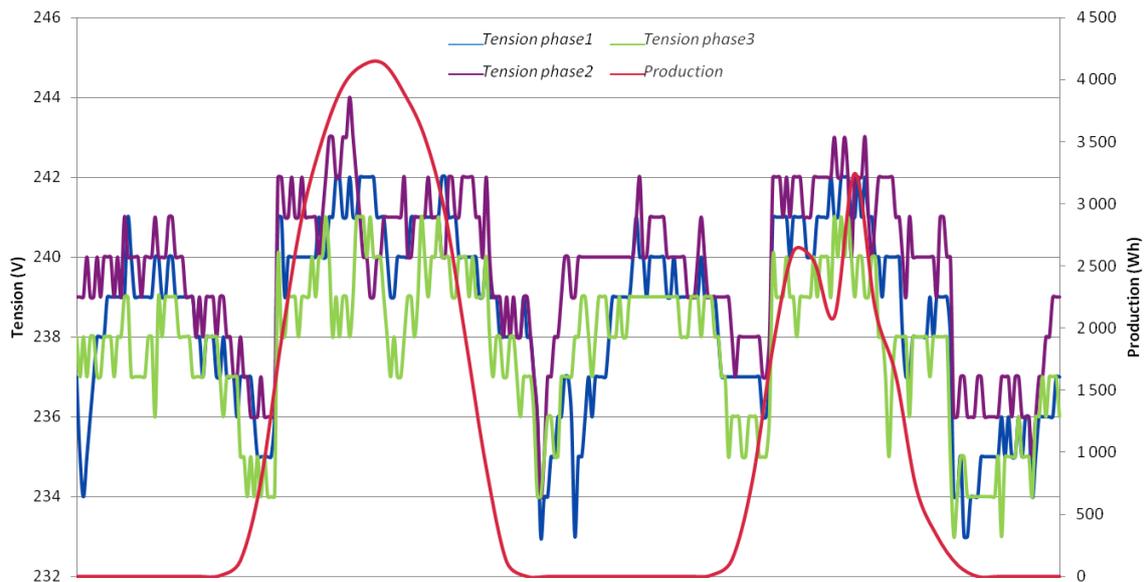


Figure 12 : Production entraînant une élévation de tension en bout de ligne BT - Source Enedis

<sup>8</sup> Les coûts de raccordement pour les installations < 36 kVA se basent sur le barème de raccordement d'Enedis proposant des montants forfaitaires, qui varient selon la nature des travaux (branchement avec ou sans extension) et sur lesquels s'appliquent le taux de réfaction de 40% - Source photovoltaïque.info

Les producteurs concernés par les courbes de production ci-dessus sont raccordés en triphasé. L'impact de la production concerne donc les 3 phases électriques. On observe bien un lien important entre production photovoltaïque et tension. Ces variations de tension au niveau du point d'injection doivent également être prises en compte dans le dimensionnement du réseau.

A travers l'étude pré-SMAP réalisée grâce aux mesures des Flukes et des compteurs Linky, des élévations de tension ont été observées mais aussi des chutes de tension. Par exemple, sur le mois d'août 2015, 10 chutes de tension ont été identifiées. L'origine de ces chutes est variée : défaut à la terre, mise HS d'un départ HTA adjacent, court-circuit HTB, etc. Le graphe ci-dessous est un exemple de chute de tension observée en BT, issue d'un court-circuit sur la ligne 225 kV amont. L'origine de ce court-circuit est un impact de foudre, d'une durée de 40 ms et d'une profondeur de 11%. On retrouve cette chute sur les 6 postes de Les Haies, et cet évènement était effectivement référencé à l'Agence de Conduite Régionale Enedis.

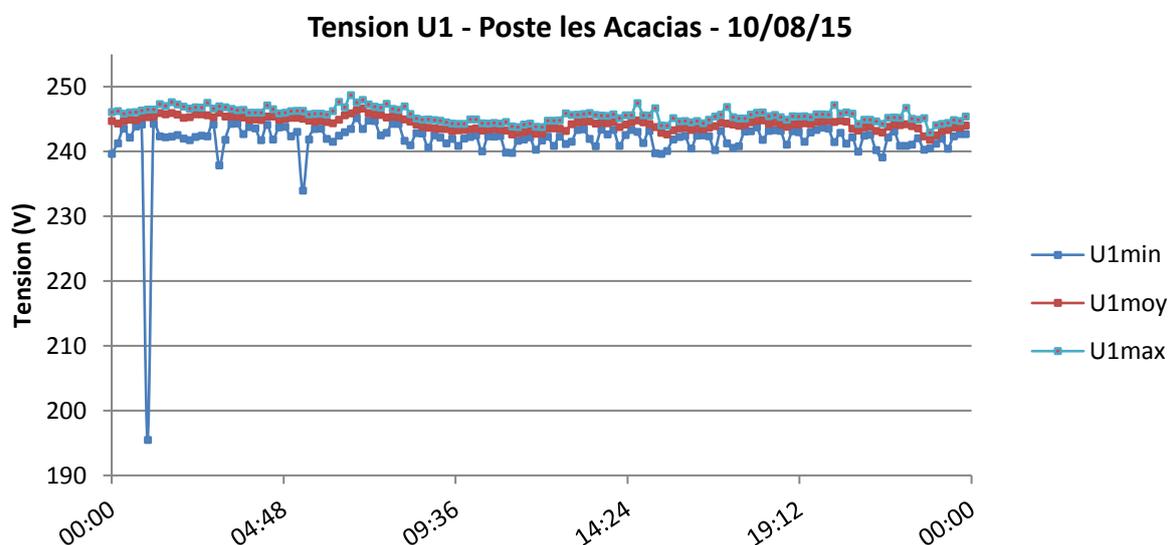


Figure 13 : Chute de tension au niveau du poste "Les Acacias" - Source Enedis

Ces chutes de tension ne sont pas en écart avec la norme. En effet, la tension normale de distribution BT est régie par l'arrêté interministériel du 24 décembre 2007. Celui-ci fixe à 230/400 V le niveau de la tension nominale. Il définit des valeurs minimales et maximales admissibles au Point de Livraison d'un utilisateur (valeurs moyennées sur 10 min), correspondant à une plage de [-10%, +10%] autour des valeurs nominales. Les valeurs prises en compte dans la qualité de tension sont donc moyennées sur 10 min, car certains écarts de tension de durée courte sont inhérents au fonctionnement normal du réseau et ne peuvent être éliminés. Il s'agit notamment de ceux résultants de l'élimination de défaut électrique (quelques centaines de ms à quelques dizaines de secondes).<sup>9</sup>

L'analyse de ces chutes de tension permet de rappeler que lorsqu'une étude concernant des producteurs BT est réalisée, il ne faut pas simplement prendre en compte les tensions hautes, mais aussi les tensions basses. Il ne faut en aucun cas que le raccordement d'un producteur mette en contrainte un consommateur raccordé sur le même réseau.

<sup>9</sup> Source : Enedis-PRO-RES\_43<sup>E</sup>, « Principes d'étude et de développement du réseau pour le raccordement des clients consommateurs et producteurs BT »

### 2.3.2. Refoulement en puissance

Au-delà des élévations de tension liées à l'injection de production photovoltaïque, qui peuvent avoir un impact négatif sur les équipements électriques si elles ne sont pas maîtrisées, un autre phénomène illustre la forte concentration de production BT : le refoulement en puissance.

On parle de refoulement en puissance lorsque le courant circule du réseau BT jusqu'au réseau HTA. Le refoulement en puissance correspond donc à une remontée du flux d'énergie lié à un volume de production plus important que le volume de consommation sur le réseau BT correspondant. Ce phénomène est illustré dans le graphe ci-dessous, correspondant à une journée de forte production : entre 10h30 et 17h30 la quantité d'énergie produite est supérieure à celle consommée au niveau du poste « Ecole ».

Le refoulement de puissance illustre la forte concentration photovoltaïque sur le réseau Les Haies mais n'a pas d'impact néfaste sur le réseau et les équipements électriques tant qu'il reste maîtrisé. En effet, tant que la puissance transitée au niveau du poste HTA ne dépasse pas sa puissance admissible, alors le réseau électrique n'est pas en contrainte : le courant peut circuler dans un sens comme dans un autre.

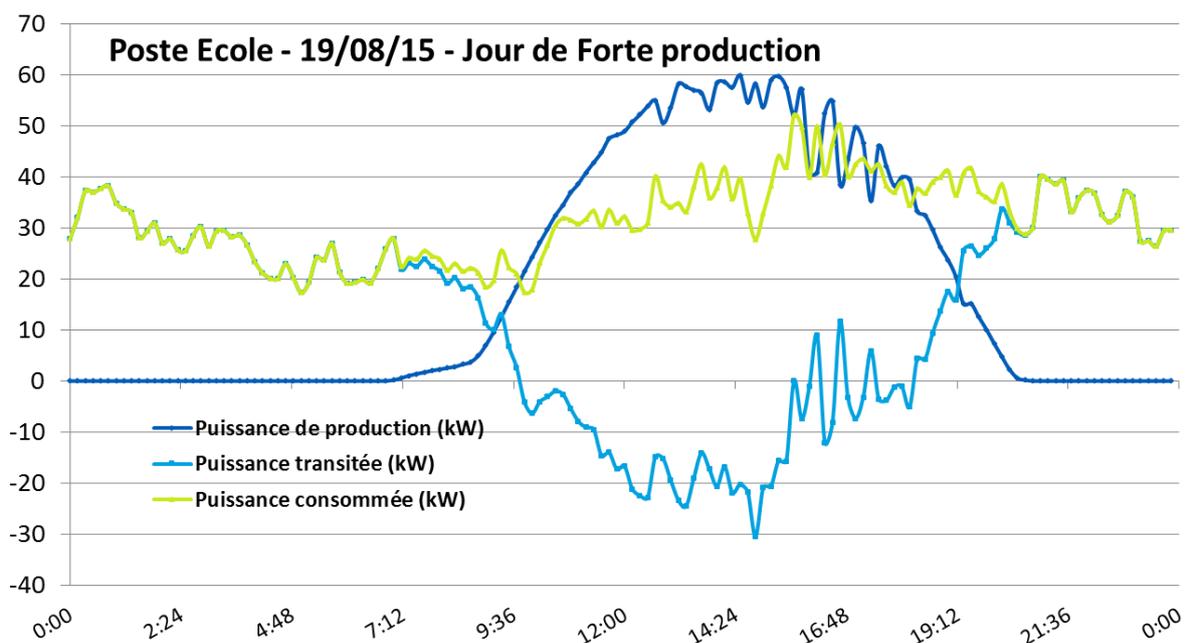


Figure 14 : Puissances mesurées au poste « Ecole » pour la journée du 19/08/2015 – Source Enedis

Comme l'illustre le graphe ci-dessous, le phénomène de refoulement en puissance n'apparaît pas seulement les jours de forte production. Il « suffit » d'un pic de production (à 12h30 et 17h30 sur le graphe), sûrement lié à une éclaircie de plusieurs minutes, pour que le transit (conso – prod) au niveau du poste soit négatif, étant donnée la « faible » consommation sur les départs BT.

Ce phénomène concerne particulièrement les zones rurales, et il ne serait pas étonnant que l'on le retrouve sur d'autres réseaux électriques ruraux.

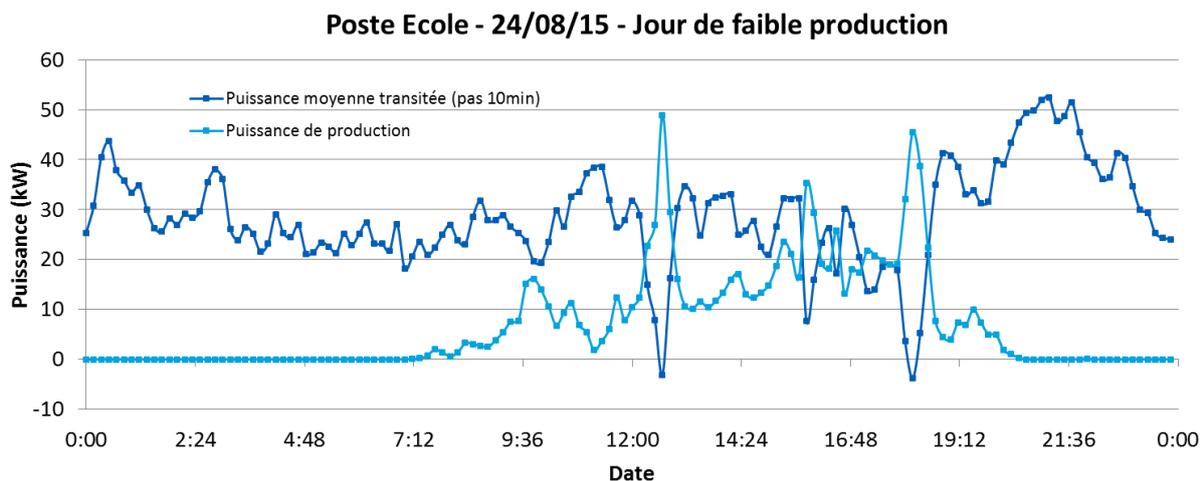


Figure 15 : Puissances mesurées au poste « Ecole » pour la journée du 24/08/2015 - Source Enedis

Sur la période août - octobre 2015, on relève 186 heures de refoulement, soit 8,4% du temps. Sur cette même période, on observe statistiquement 1 jour sur 2, avec environ 1 heure de refoulement. Cette moyenne augmente jusqu'à 4h30 pour le mois d'août.

### 2.3.3. Appel de puissance au début des heures creuses (HC)

Sur la commune Les Haies, 86 clients ont une option tarifaire « Heures Creuses » (HC). Si l'on s'intéresse au poste « Ecole », 31 clients ont une option tarifaire HC : 15 d'entre eux entre 15h et 17h et entre 20h et 22h. Le début des HC déclenche un appel de puissance important, notamment lié au lancement des ballons d'eau chaude sanitaire. Ce phénomène est illustré dans la figure ci-dessous.

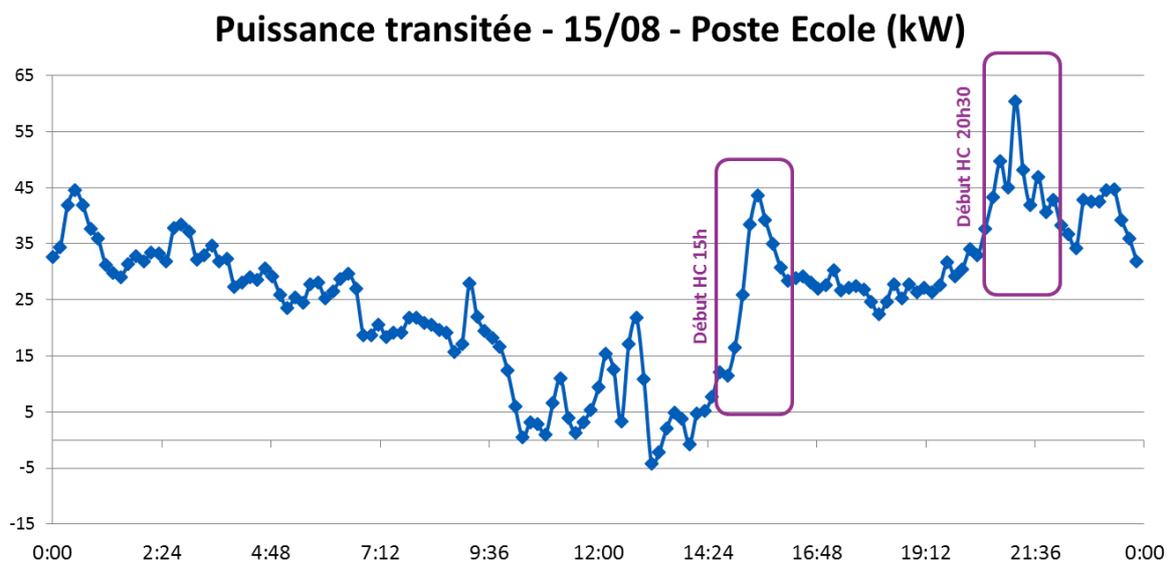


Figure 16 : Appel de puissance important au niveau du poste Ecole - Source Enedis

Ces appels de puissance importants ne sont pas liés à la présence de producteurs photovoltaïques, mais ils illustrent les décalages temporels entre la production décentralisée et la consommation.

Entre 20h et 22h la production photovoltaïque est nulle et l'appel de puissance du début des HC entraîne donc une baisse de tension qui doit être maîtrisée par le gestionnaire de réseau lors du dimensionnement. Ces pics de consommation sont maîtrisés par le Gestionnaire du Réseau de Distribution, grâce notamment à une optimisation des HC à la maille du Poste Source.

Ces phénomènes illustrent le comportement du réseau BT de Les Haies. Les élévations et baisses de tension, observées dans cette étude post-projet, justifient l'expérimentation autour de la supervision locale BT pour offrir une meilleure vision de l'état en tension du réseau, et de la régulation de tension pour gagner en agilité dans la gestion du réseau.

### III. Architecture réseau mise en place

#### 3.1. Vision globale de l'architecture réseau

Dans le cadre du projet SMAP, une architecture technique spécifique a été mise en place sur le réseau électrique BT du village Les Haies. Les objectifs de cette expérimentation terrain sont de démontrer la faisabilité technique d'une architecture réseau pour la régulation de tension basée sur les compteurs communicants, d'identifier les leviers et les freins à sa mise en place et à son bon fonctionnement.

Les compteurs communicants Linky composent la brique de base de cette expérimentation, permettant d'avoir une vision en temps réel de l'état de tension en certains points du réseau BT. Pour cela, l'infrastructure Linky a été configurée afin de permettre la remontée des mesures de tension en quasi temps-réel (toutes les 2min) de certains compteurs Linky : ce sont les compteurs « sentinelles ». Ces derniers ont été choisis pour être représentatifs des extremums de tension sur le réseau BT.

Cette sélection se base sur les résultats de la thèse « *Industrial Aspects of Voltage Management and Hosting Capacity of Photovoltaic Power Generation in Low Voltage Networks* » réalisée par Kalle RAUMA dans le cadre du projet Greenlys.<sup>10</sup>

De manière très simplifiée, les points en bout de ligne ou au niveau de gros producteurs sont ceux qui ont le plus tendance à s'approcher des extremums de tension. Ce sont donc eux qu'il faut prendre en compte dans la remontée des mesures. Dans le cadre de SMAP, ce sont 4 compteurs Linky au niveau de producteurs (sur 7 raccordés au poste HTA/BT « Ecole ») et 11 au niveau de consommateurs (sur 44 raccordés au poste HTA/BT « Ecole ») qui ont été sélectionnés pour servir de capteur pour la supervision locale BT. Cette sélection doit permettre d'avoir une vision globale du comportement du réseau en aval du poste concerné (ici le poste « Ecole »).

Le tableau ci-dessous donne les informations sur les compteurs rattachés à ce poste et sur les compteurs « sentinelles » (en rouge).

Identifiant du compteur	Type installation	Distance au poste (m)	Prod / Conso	Linky Sentinelle
1	MONO	74.00	Conso	
2	MONO	136.22	Conso	
3	MONO	74.22	Conso	
4	MONO	74.22	Conso	
5	MONO	127.22	Conso	
6	TRI	246.22	Conso	
7	TRI	763.22	Conso	
8	TRI	298.00	Conso	OUI
9	TRI	245.00	Conso	OUI
10	TRI	117.00	Conso	
11	TRI	226.00	Conso	OUI
12	TRI	133.00	Conso	

<sup>10</sup> <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01345202>

13	MONO	0.00	Conso	
14	TRI	64.00	Conso	
15	TRI	58.00	Conso	
16	TRI	473.22	Conso	OUI
17	TRI	226.00	Conso	
18	MONO	226.00	Conso	
19	TRI	133.00	Conso	
20	Inconnu	133.00	Conso	
21	TRI	65.00	Conso	OUI
22	MONO	72.00	Conso	
23	MONO	77.00	Conso	
24	MONO	67.00	Conso	
25	MONO	108.00	Conso	
26	MONO	127.00	Conso	OUI
27	MONO	123.00	Conso	OUI
28	MONO	167.00	Conso	
29	MONO	268.00	Conso	OUI
30	MONO	362.00	Conso	OUI
31	MONO	268.00	Conso	OUI
32	MONO	182.00	Conso	
33	MONO	182.00	Conso	
34	TRI	153.00	Conso	
35	MONO	153.00	Conso	
36	MONO	89.00	Conso	
37	MONO	51.00	Conso	
38	MONO	0.00	Conso	
39	MONO	20.00	Conso	
40	MONO	193.22	Conso	
41	MONO	193.22	Conso	
42	TRI	723.22	Conso	OUI
43	MONO	232.22	Conso	
44	MONO	79.00	Conso	
45	TRI	226.00	Prod	OUI
46	TRI	117.00	Prod	OUI
47	TRI	58.00	Prod	
48	TRI	91.00	Prod	
49	TRI	77.00	Prod	OUI
50	TRI	74.22	Prod	
51	TRI	277.22	Prod	OUI

Figure 17 : Compteurs Linky rattachés au poste HTA/BT "Ecole" – Source Enedis

Concrètement, les compteurs Linky « sentinelles » mesurent la tension au niveau des producteurs et consommateurs du village, puis envoient les informations au concentrateur installé dans le poste HTA/BT « Ecole » via CPL. Un algorithme installé dans le concentrateur permet de traiter les informations afin d'évaluer si l'envoi d'un ordre de régulation de tension est pertinent ou non pour maintenir la tension dans la plage de valeurs souhaitée.

Cette intelligence déportée dans le concentrateur du poste HTA/BT offre donc une vision dynamique de l'état de tension du réseau BT et sert de support à une gestion plus agile de la tension BT. Des équipements de régulation de la tension peuvent ainsi être adossés à cette supervision locale :

- le contrôle de la tension BT via un transformateur avec régleur en charge HTA/BT ;
- le pilotage des onduleurs photovoltaïques depuis le poste HTA /BT.

Ces deux instrumentations doivent permettre de maîtriser les élévations de tension, générées par la production photovoltaïque lorsqu'il y a peu de consommation locale, et de s'adapter aux variations de tension HTA [voir paragraphe VII], permettant ainsi d'assurer une tension réglementaire sur le réseau électrique et donc une qualité de fourniture optimisée.

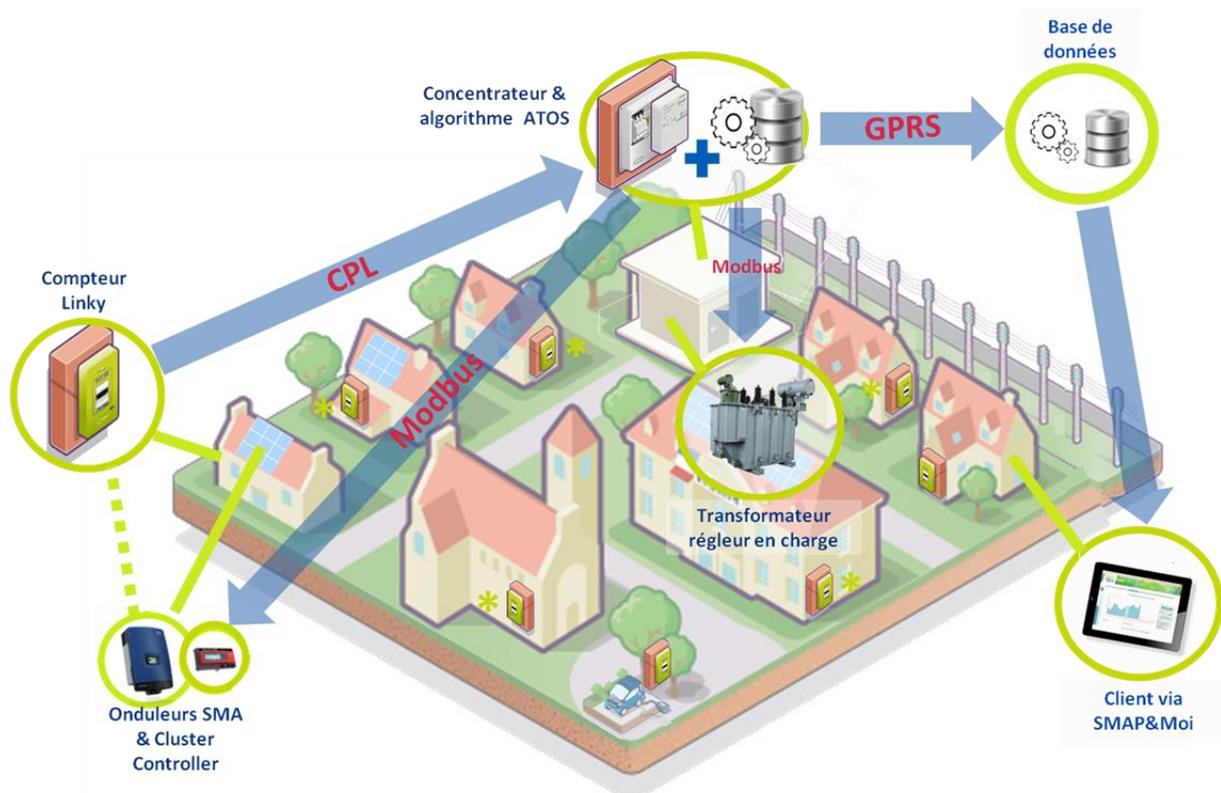


Figure 18 : Architecture réseau mise en place dans SMAP – Source Enedis

Comme indiqué dans la figure ci-dessus, les compteurs communicants permettent également la remontée des données de consommation et de production (index ou courbe de charge si consentement du client). Ces informations servent de support à des animations impliquant les citoyens dans le projet. Le détail de ce volet « Communauté » est précisé dans le livrable 4.1 du projet SMAP.

### 3.2. Objectifs

L'objectif global de cette expérimentation est de tester une architecture technique autour de la régulation de tension BT, sur un réseau réel. Cette ambition peut se décliner en plusieurs sous-objectifs étroitement liés et complémentaires :

- Identifier les bénéfices et évaluer la fiabilité d'une supervision locale BT basée sur les compteurs communicants ;

- Utiliser le concentrateur installé dans le poste HTA/BT pour piloter de manière autonome des équipements de régulations de tension [voir ci-dessous] ;
- Réussir à contrôler la tension en sortie de poste HTA/BT grâce à un transformateur avec régleur en charge, en se basant sur les informations issues de la supervision locale ;
- Préparer la mise en place d'éventuelles futures 1<sup>ères</sup> Offres de Raccordement Intelligent (ORI) BT et réussir à ajuster la tension au niveau des points d'injection BT grâce à un pilotage intelligent d'onduleurs photovoltaïques, en se basant sur les informations issues de la supervision locale ;
- Identifier les freins et leviers à la mise en place de solutions de régulation de tension s'adossant à la supervision locale BT.

La régulation de tension BT s'appuie sur une infrastructure de comptage communicant permettant la supervision locale. Cette fonction consiste à estimer l'état du réseau BT à partir de mesures de tension provenant des compteurs et à définir, au niveau d'un concentrateur installé dans le poste HTA/BT, une consigne aux onduleurs photovoltaïques ou au transformateur avec régleur en charge. L'objectif est de qualifier les performances techniques d'un système mobilisant la flexibilité disponible au niveau des moyens de productions décentralisées, et l'agilité offerte par le transformateur avec régleur en charge.

### 3.3. Planning de l'expérimentation

L'expérimentation « Réseau » du projet SMAP s'étend sur 3 ans, de janvier 2016 à décembre 2018. Elle peut être décomposée en 3 phases principales : mise en place et observation, avec notamment l'installation des capteurs Flukes [voir paragraphe 2.2] ; tests et expérimentations ; et capitalisation.

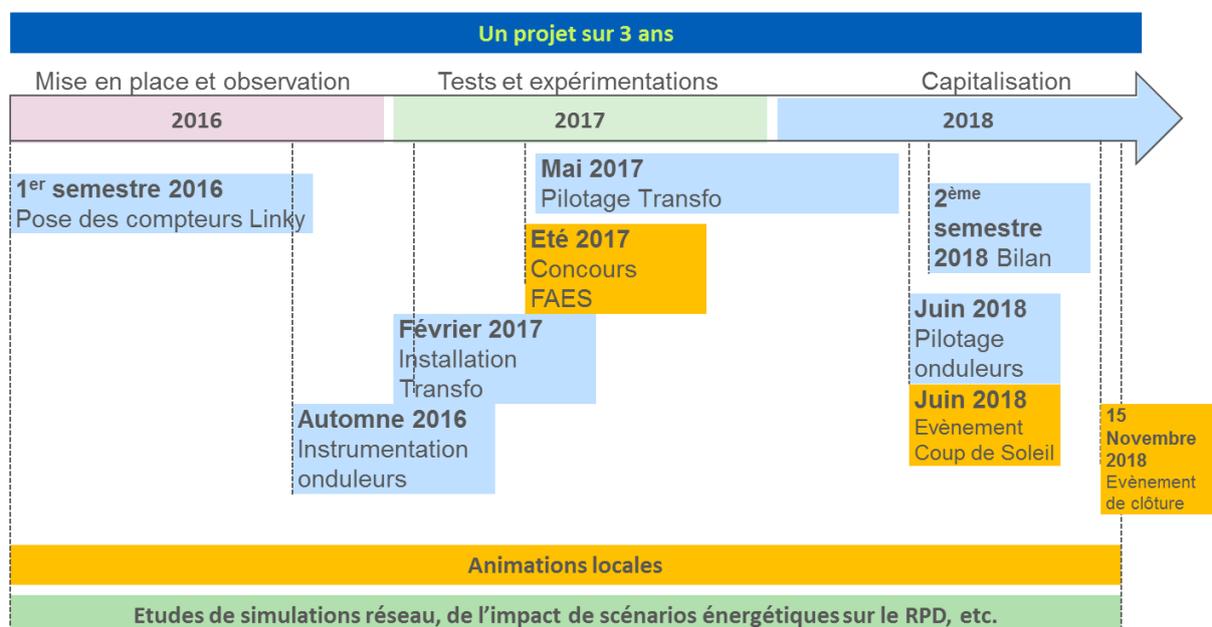


Figure 19 : Planning macroscopique du projet SMAP - Source Enedis

Les travaux autour de la supervision locale et de la régulation de tension s'inscrivent dans le lot 3 « Réseau » du projet SMAP, intégrant notamment la thèse de Mahana BERNIER (Grenoble INP-G2ELab) sur « l'étude de différentes options innovantes pour l'intégration massive de la production photovoltaïque au réseau publique de distribution en zone rurale, et études de cas concrets sur un territoire dans le cadre du projet SMAP ». En parallèle de cette expérimentation, des travaux autour

de l'outillage des Territoires via la déclinaison de scénarios énergétiques à une maille locale, l'étude de leur impact sur le réseau électrique et la mise en place d'animations citoyennes, ont été mises en œuvre. Ces sujets sont détaillés dans d'autres livrables.

Dans la 1<sup>ère</sup> phase du projet, des équipements ont été installés [voir figure ci-dessous] afin d'analyser le comportement du réseau avant le lancement de l'expérimentation « Réseau » et de préparer la réalisation des tests terrains.



Figure 20 : Chronologie de l'installation des équipements sur le réseau - Source Enedis

Les compteurs communicants Linky servent de base à la supervision locale BT et ont été installés durant le 1<sup>er</sup> semestre 2016. Adossés à cette 1<sup>ère</sup> brique de base, un transformateur avec régleur en charge (en février 2017) et des « Cluster Controller » permettant le pilotage des onduleurs (en octobre 2016) ont été installés.

Une fois le réseau BT et le poste HTA/BT équipés, les tests se sont succédé sur plusieurs mois : contrôle de la tension en sortie de poste HTA/BT grâce au transformateur régleur en charge, contrôle local de la tension au niveau des points d'injection grâce au pilotage des onduleurs, en réactif et en actif. Cette expérimentation s'est déroulée entre mars 2017 et octobre 2018, permettant une diversité dans la typologie des journées et des saisons.

## IV. Le compteur Linky comme 1<sup>ère</sup> brique de la régulation de la basse-tension

### 4.1. Installation des compteurs communicants et du concentrateur

L'installation des compteurs communicants Linky Palier 0 s'est déroulée du 11 au 27 février 2016. Elle a concerné 149 points de livraison, dont 24 producteurs photovoltaïques.

Dans le cadre de l'expérimentation, il a été décidé que ce soit Atos qui gère les informations remontées par les compteurs communicants (intelligence dans le concentrateur). De ce fait, au vu de la nouveauté de l'architecture mise en place et des risques de sécurité induits, les compteurs communicants installés sur le poste « Ecole » ne font pas partie de la chaîne Linky classique. Dans le cadre de SMAP, les compteurs permettent de :

- Envoyer toutes les 2 minutes au concentrateur les mesures de tension de 15 compteurs « sentinelles » [voir paragraphe 3.1] ;
- Permettre aux habitants raccordés sur le poste « Ecole » d'avoir accès à leurs données de consommation personnelle et de production à la maille du village ;
- Mesurer les index de consommation et/ou de production (pour les producteurs) en vue de la facturation (hors poste « Ecole », où la relève à pied a été maintenue).



Figure 21 : Installation des compteurs communicants sur Les Haies – Source Enedis

Des concentrateurs ont été installés dans les postes HTA/BT du village, dont le poste « Ecole ». Tout comme les compteurs Linky rattachés à ce poste, le concentrateur SMAP ne fait pas partie de la chaîne Linky classique. Il a été configuré de telle sorte à pouvoir récupérer les mesures de tension, les lire, les interpréter, et envoyer des ordres de pilotage à des équipements installés sur le réseau.

En tout point d'un réseau basse tension, la plage de tension réglementaire correspond à +/-10% de la tension nominale [voir paragraphe 1.1]. Dans une optique industrielle, un pilotage intelligent de la tension aurait donc pour objectif d'assurer que la tension ne sorte pas de ces limites réglementaires et qu'il n'y ait donc pas d'excursions de tension. Or les réseaux électriques ont été dimensionnés de telle sorte qu'il n'y ait pas d'excursions de tension afin que la qualité de fourniture et la qualité de l'onde de tension soient garanties.

Dans le cadre de SMAP, nous avons donc basé la régulation de la tension sur les valeurs +/-4% de la tension nominale ( $U_n$ ) et non +/-10% afin qu'il y ait un nombre suffisant de « sorties de plage ». Nous avons donc simulé des excursions de tension en réduisant notre plage de tensions admissibles.

## 4.2. Prise en main des compteurs Linky et du concentrateur par ATOS

### 4.2.1. Couplage du système Atos avec le matériel Enedis

Le concentrateur utilisé dans le projet SMAP bénéficie du logiciel embarqué ASGS d'Atos (G-DIS). Ce logiciel embarqué contient nativement les fonctions liées au comptage : gestion du LAN CPL, collecte et validation des données collectées, communication avec le SI central ASGS, etc. Dans l'expérimentation SMAP, des fonctions « smart grid » ont été ajoutées par Atos au sein du G-DIS. Ces fonctions sont décrites en détail dans les paragraphes suivants [voir paragraphes 5.3 et 6.3].

Le déploiement du G-DIS sur le concentrateur a été réalisé par Atos dans ses locaux. Le concentrateur utilisé a été fourni par Enedis après avoir été réinitialisé, afin de permettre une prise en main optimale par Atos.

Les mises à jour ultérieures du G-DIS ont pu être réalisées à distance par Atos, via le canal WAN-GPRS mis en œuvre pour la communication concentrateur / SI ASGS.

Le concentrateur est installé dans le poste HTA/BT « Ecole », au centre du village Les Haies. Il gère la collecte des données issues de 49 compteurs Linky G1 et transmet l'ensemble des données de comptage au SI de Smart Metering ASGS. Ce dernier est conçu pour :

- Récupérer les données de comptage transmises par le concentrateur ;
- Stocker les données de comptage ;
- Valider les données de comptage ;
- Exécuter des traitements sur les données de comptage ;
- Publier les données de comptage ;
- Superviser la chaîne communicante ;
- Programmer les compteurs à distance ;
- Administrer les concentrateurs à distance.

Les données de comptages collectées sont les suivantes :

- Index tarifaires quotidien arrêtés à 00h00 ;
- Courbe de charge d'énergie active en soutirage si le recueil de consentement a été transmis par le consommateur (pas variable suivant les compteurs) ;
- Courbe de charge d'énergie active en injection si le recueil de consentement a été transmis par le producteur (pas variable suivant les compteurs) ;
- Journaux d'évènements enregistrés par les compteurs.

Dans le cadre du projet SMAP, ASGS n'est connecté qu'à un seul SI externe, la plateforme SMAP&Moi, qui permet aux habitants de Les Haies, équipés du compteur Linky, de visualiser leur consommation, leur production (si producteur) et la production à la maille du village. Quotidiennement, le SI ASGS transmet les données des courbes de charge à la plateforme SMAP&Moi via un lien FTP sécurisé. Pour les besoins du projet, la plateforme ASGS est installée à Grenoble, dans les locaux d'Atos.

## 4.2.2. Difficultés rencontrées

Après installation du concentrateur dans le poste HTA/BT (en novembre 2016), la communication ne s'est pas faite correctement avec le SI ASGS. Des investigations de l'équipe technique Atos ont permis d'identifier l'origine du problème : une défaillance du modem du concentrateur. Ce modem accueille une carte SIM et permet la collecte des données de comptage en GPRS. Une fois le modem remplacé (avec une nouvelle carte SIM par sécurité), la communication a été rétablie.

Au cours de l'expérimentation, le concentrateur a été touché par une deuxième panne (en avril 2018). Pendant cette période, le concentrateur était incapable de démarrer correctement et donc d'exécuter ses fonctions habituelles : communication avec le SI, collecte, surveillance de la tension, etc. L'équipe technique Atos a diagnostiqué une corruption du firmware (logiciel interne du constructeur) probablement dû au vieillissement d'une zone de mémoire (problème matériel). La réinstallation complète du firmware du concentrateur a permis de rétablir le fonctionnement normal de l'équipement.

L'analyse de l'origine de ces aléas et de leur résolution pourra permettre d'optimiser la résolution de ce type d'incident dans le cadre du déploiement industriel des compteurs et concentrateurs Linky.

## 4.3. Fiabilité de la remontée des mesures issues des compteurs communicants

### 4.3.1. Taux d'erreur

Le G-DIS utilisé pour cette expérimentation est celui développé par Atos dans le cadre de la R&D du produit ASGS. Sa maturité a permis de rendre rapidement opérationnelle la collecte des données de comptage et de monitoring de la tension.

Voici plus de précision concernant le taux d'erreur de collecte des tensions des compteurs sentinelle (on appelle « erreur » les données manquantes qui ne remontent pas) :

- Taux d'erreur de lecture des mesures de tension du 01/01/2018 au 05/11/2018 = 0,42 %
- Taux d'erreur de lecture des mesures de tension du 19/06/2017 au 31/12/2017 = 0,82 %

*Nous n'avons pas les données du premier semestre 2017 (l'archivage ayant commencé en juin).*

Vu du concentrateur, les erreurs apparaissent et disparaissent de façon aléatoire. Il faut noter qu'en 2017 67 % des erreurs concernent 1 seul des 15 compteurs « sentinelles », le taux d'erreur des 14 autres étant de l'ordre de 2,2 à 2,3 %. Ce qui veut dire qu'en analysant plus finement le contexte CPL de ce compteur et en réalisant quelques actions de *cleanup*<sup>11</sup>, le taux d'erreur pourrait diminuer drastiquement.

En 2018, la répartition des erreurs est différente :

- Le compteur à taux d'erreur majoritaire de 2017 cause 42,6 % des erreurs et reste donc le principal problème ;
- Un second compteur comptabilise 28,5 % des erreurs. On peut supposer que quelque chose a évolué dans son environnement (son taux d'erreur en 2017 était de 2,17 %) ;

---

<sup>11</sup> Les activités de « *cleanup* » consistent à enquêter sur le terrain pour identifier les causes des dysfonctionnements CPL et de mettre en place des correctifs soit en éliminant l'origine du problème, soit en paramétrant différemment le CPL, soit en adoptant d'autres stratégies de collecte, soit en combinant ces 3 solutions.

- Un troisième compteur comptabilise 5,4 % des erreurs (en 2017 le taux d'erreur était de 2,8%) ;
- Un quatrième 3,7 % des erreurs (en 2017 le taux d'erreur était de 2,2 %) ;
- Les 10 autres compteurs ont un taux d'erreur très faible de l'ordre de 0,5 %.

En ramenant le compteur au taux d'erreur le plus élevé à la moyenne des autres compteurs, on arriverait un à taux d'erreur théorique de 0,29 % en 2017 et de 0,24 % en 2018.

### 4.3.2. Une supervision locale fiable

La supervision locale BT offre une vision des niveaux de tension du réseau proche du temps réel permettant d'y adosser des solutions de régulation de tension pilotées par une intelligence centralisée au niveau du poste HTA/BT. Dans le cadre de SMAP, les deux solutions testées ont été un transformateur avec régleur en charge et le pilotage d'onduleurs photovoltaïques, mais d'autres solutions pourraient être pilotées grâce aux informations remontées par les compteurs communicants.

La remontée dynamique des mesures de tension permet de connaître en temps-réel les extremums de tension sur le réseau. La figure ci-dessous représente les variations des tensions min et max entre le 30 avril et le 10 juin 2018.

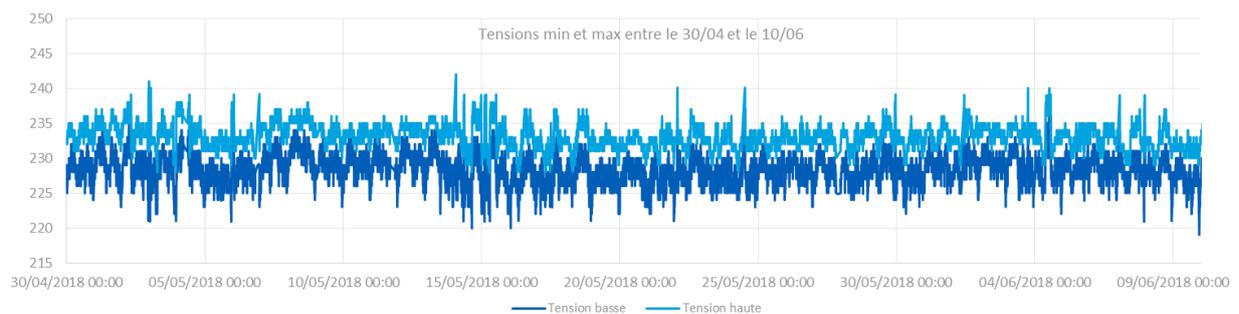


Figure 22 : Extremums de tension sur le réseau BT de Les Haies - Source Enedis

Si l'on zoome sur une journée, nous pouvons ainsi observer les variations de tension min et max au cours du temps. Dans l'exemple ci-dessous, la tension min sur la journée est de 224 V à 23h et la tension max 236 V à plusieurs moments de la journée. Ce sont ces valeurs, au pas de temps 2 min qui servent de référence pour la régulation de tension mise en place sur Les Haies.

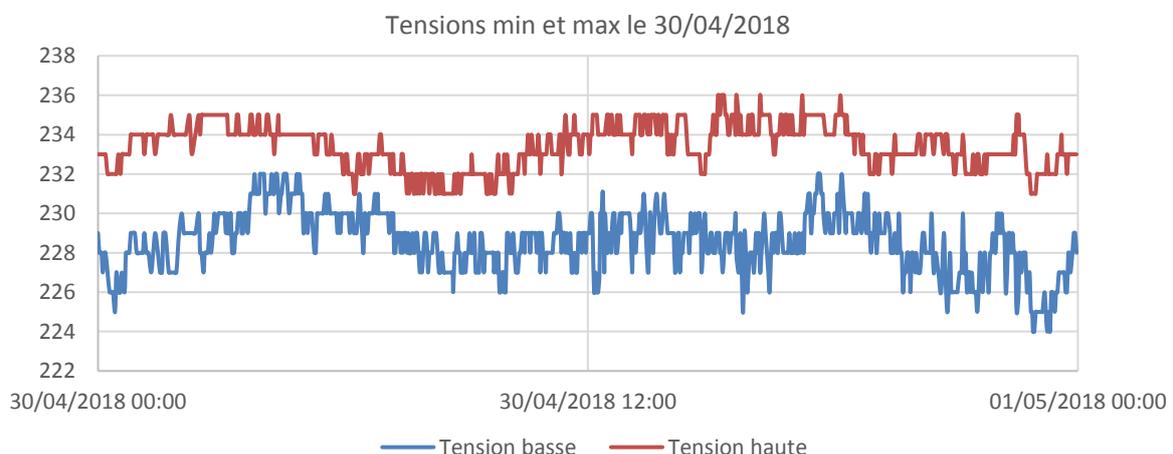


Figure 23 : Tension min et max sur la journée du 30/04/2018 - Source Enedis

L'objectif de cette expérimentation était de valider la faisabilité technique de l'architecture de supervision locale basée sur l'infrastructure Linky. Au vu du taux d'erreur de la remontée des mesures de tension, la communication temps-réel entre les compteurs et le concentrateur, ainsi que le traitement des informations par l'algorithme installé dans le concentrateur sont fonctionnels dans le contexte de Les Haies. Cette fonctionnalité « temps-réel » offre une visibilité sur les variations de tension, permettant ainsi de gagner en flexibilité dans la gestion des contraintes électriques.

L'analyse a posteriori des mesures de tension, permet notamment d'évaluer le comportement du réseau BT, ou du moins, les tendances qui se dégagent. Le graphique ci-dessous représente la répartition des tensions min et max entre le 30 avril et le 10 juin 2018.

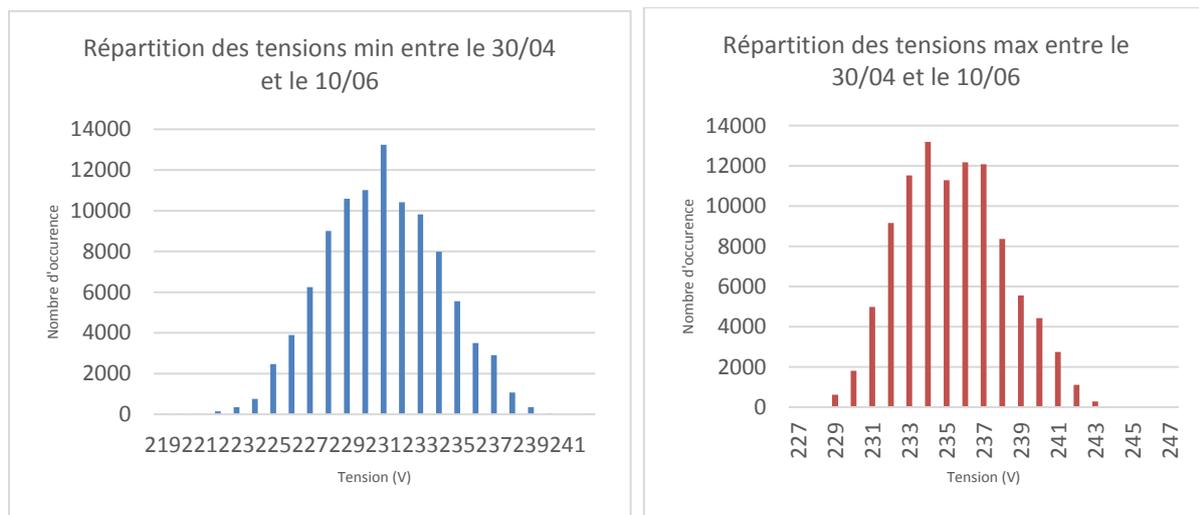


Figure 24 : Répartition des tensions min et max - Source Enedis

La tension min observée sur cette période est de 221 V, valeur correspondant au -4% Un, défini comme valeur minimale acceptable dans le cadre des études SMAP [voir paragraphe 4.1]. De même, la tension max observée est de 243 V. Cette valeur est supérieure à la tension maximale admissible lors de la régulation (+4%). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que certaines périodes n'étaient pas concernées par la régulation de tension (ni transformateur avec régleur en charge, ni pilotage des onduleurs), et par le fait que l'écrêtage de la puissance active ne permet pas de lever toutes les sorties de plage +4% : si le nombre d'actions quotidiennes autorisées est atteint, ou si la contrainte provient d'une variation HTA [voir paragraphe 7.2.1].

Cette architecture pourrait, en fonction des retours d'expérience à consolider, être le socle de base des éventuelles futures Offres de Raccordement Intelligent (ORI) BT<sup>12</sup>, offrant ainsi une meilleure agilité pour piloter le réseau en fonction des consommations, des productions, du niveau de tension HTA, etc.

<sup>12</sup> L'Offre de Raccordement Intelligent permet aux producteurs d'énergies renouvelables de raccorder leur installation au réseau le plus proche, et donc de réduire le coût et le délai de raccordement au réseau, en échange de limitations ponctuelles de production. Ce type d'offre est en cours d'industrialisation pour les producteurs HTA, et est à peine effleurée dans le projet SMAP pour les producteurs BT.

## V. Transformateur avec régleur en charge

### 5.1. Principe de fonctionnement et caractéristiques techniques

#### 5.1.1. Principe de fonctionnement d'un transformateur avec régleur en charge

Pour rappel, un transformateur HTA/BT permet d'abaisser la tension (de 20 kV à 230/400V en général, soit un rapport de transformation de 50) afin que la tension de l'électricité acheminée jusqu'aux clients soit compatible avec les appareils électriques des consommateurs. Sur un transformateur HTA/BT « standard » (sans régleur en charge), ce rapport de transformation ne peut être modifié qu'en intervenant dans le poste hors charge (le poste doit être coupé du réseau) pour manœuvrer une prise ; ces interventions sont donc exceptionnelles. La particularité du transformateur avec régleur en charge est qu'il ajuste automatiquement en charge (sans être coupé du réseau) le rapport de transformation, et donc la tension en sortie du poste électrique côté basse tension, en fonction des tensions minimales et maximales mesurées en temps réel sur le réseau.

Dans le cadre de SMAP, la commutation du transformateur avec régleur en charge se fait côté HTA. Cela signifie que le nombre des spires au primaire est variable et dépend du rapport de transformation défini par le paramétrage. La tension au niveau BT et le rapport de transformation sont exprimées par les relations suivantes :

$$K = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{HTA}}{V_{BT}}$$

$$V_{BT} = V_{HTA} * \frac{N_s}{N_p} = \frac{V_{HTA}}{K}$$

Avec :

- K = rapport de transformation
- Np : nombre de spires au primaire
- Ns : nombre de spires au secondaire

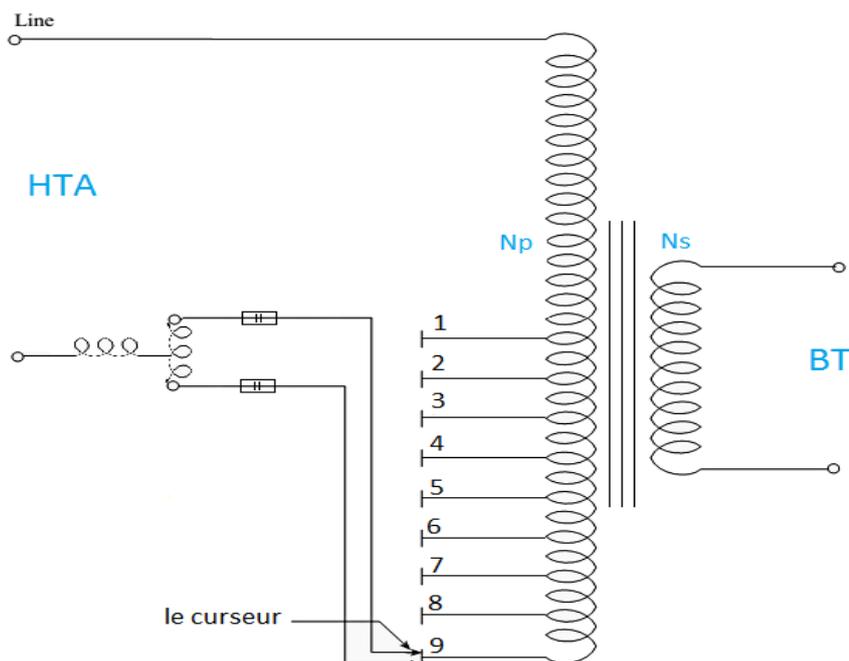


Figure 25 : Schéma du transformateur avec régleur en charge

### 5.1.2. Caractéristiques du transformateur avec régleur en charge utilisé dans SMAP

Le transformateur avec régleur en charge utilisé dans SMAP a été acheté à l'entreprise Ormazabal. C'est le 4<sup>ème</sup> transformateur « prototype » de ce type installé en France par Enedis, et le 1<sup>er</sup> de cette marque.

Pour le projet, la puissance du transformateur est de 250 kVA /20 kV. Le concept innovant de cette instrumentation permet d'aboutir à un transformateur intelligent compact en gardant une empreinte similaire à celle des transformateurs conventionnels du type HN 52 S S27 (encombrement similaire). D'après le constructeur, la durée de vie du régleur en charge est équivalente à celle du régleur à manœuvre hors charge soit la durée de vie du transformateur (30 ans). Les conditions de stockage, de transport et d'exploitation du « Smart transformateur » sont conformes à celles demandées par la HN 52-S-27. Les caractéristiques du transformateur avec régleur en charge utilisé sont données dans la figure ci-dessous :

<b>Puissance Transformateur régleur en charge</b>	Jusqu'à 250 kVA
<b>Tension assignée</b>	Jusqu'à 20 kV
<b>Nombre de positions pour commutations</b>	9 positions
<b>Valeur du « pas » de la tension réglage</b>	300 V; (20 kV x 1,5%)
<b>Enroulements</b>	Aluminium
<b>Pertes</b>	Suivant règlement européen 548/2014
<b>Tension de court-circuit</b>	Suivant cahier des charges client
<b>Groupe de connexion</b>	Suivant cahier des charges client
<b>Fréquence</b>	50 Hz
<b>Refroidissement</b>	ONAN
<b>Température maximale</b>	+40°C
<b>Nombre de phases</b>	3
<b>Valeur maximale du courant de commutation (I com)</b>	50 A
<b>Valeur du courant de court-circuit de courte durée</b>	1000 A
<b>Durée courant de court-circuit</b>	2s
<b>Valeur du courant de crête</b>	2500 A
<b>Valeur maximale de la tension borne ampoule (Uim)</b>	1150 V
<b>Valeur maximale de la tension en dérivation (Udm)</b>	1000 V
<b>Valeur puissance instantanée (Uim x Icom)</b>	25000 VA
<b>Nombre maximal d'opérations de commutations</b>	9
<b>Valeur diélectriques de tenue</b>	
- Tension la plus élevée pour l'équipement	24 kV
- Choc de foudre 1,2/50 µs	125 kV
- Fréquence industrielle 50Hz /1min	50 kV
<b>Fréquence</b>	50 Hz
<b>Plages de température huile</b>	-25°C à 105°C
<b>Limites surpression huile transformateur</b>	±0.3 bar
<b>Nombre de commutations</b>	>500 000
<b>Maintenance</b>	Sans objet
<b>Indice protection du moteur</b>	IP 65

Figure 26 : Caractéristiques techniques du transformateur avec régleur en charge SMAP - Source Ormazabal

La commutation se fait côté HTA, par l'intermédiaire d'ampoules sous vide solidaires d'un système mécanique plongé dans l'huile du transformateur et fixé en dessus de la partie active.

L'entraînement du système de commutation est réalisé par un mécanisme de forme circulaire de manière à optimiser son encombrement dans les transformateurs. L'entraînement du système de commutation se fait par un moteur pas à pas fixé sur le dessus du capot du transformateur. Un coffret de contrôle placé sur la paroi du poste, gère la partie commande de la commutation soit en automatique à partir d'une consigne, soit en télécommande, soit en mode local.

La règle qui est retenue pour le contrôle de la tension sur le réseau BT de Les Haies est de n'envoyer une consigne au transformateur avec régleur en charge que si les mesures de tension mesurées par les compteurs « sentinelles » se rapprochent des limites suivantes :

- Si une ou plusieurs tensions sont 4% inférieures à la tension nominale (221V en tension simple) et si aucune tension n'est 4% supérieure à la tension nominale alors envoi d'une consigne « hausse de la tension » ;
- Si une ou plusieurs tensions sont 4% supérieures à la tension nominale (239V en tension simple) et si aucune tension n'est 4% inférieure à la tension nominale alors envoi d'une consigne « baisse de la tension ».

La plage +/- 4% a été choisie afin d'avoir un nombre pertinent de changements de prise. En effet, si nous nous étions basés sur la plage +/-10%, correspondant à la limite réglementaire, le nombre de changements de prise aurait été infime (voire inexistant) et n'aurait pas permis de tirer des conclusions sur le fonctionnement de l'architecture technique.

## 5.2. Installation du transformateur avec régleur en charge

L'installation du transformateur régleur en charge a été réalisée avec succès le 8 février 2017 dans le poste HTA/BT « Ecole » du village Les Haies. Ci-dessous des photos de son installation par les techniciens Enedis et Ormazabal :



Figure 27 : Installation du transformateur avec régleur en charge dans le poste "Ecole" – Source Enedis

Le travail autour de l'installation du transformateur est le fruit d'une collaboration entre les équipes techniques d'Enedis, les pilotes du projet SMAP et l'équipe d'Ormazabal. En effet dans un premier temps, la rédaction d'un contrat liant les différentes entités est indispensable afin de tracer les tenants et aboutissants de la collaboration. Une fois les éléments contractualisés, la phase de test peut commencer : il est obligatoire de tester en amont, chaque équipement qui va être installé sur le réseau électrique. En effet, il en est de la responsabilité d'Enedis d'assurer la sécurité et la qualité d'alimentation qui dépendent directement de la fiabilité des équipements et câbles électriques. Enfin, une fois les différentes certifications et validations obtenues au sein d'Enedis, l'installation du

transformateur régleur en charge peut être préparée de concert avec les équipes techniques d'Enedis qui sont les seuls à pouvoir accéder au poste électrique et réaliser la manœuvre.

### 5.3. Contrôle de la tension en sortie de poste HTA/BT

Dans le projet SMAP, le concentrateur est responsable du suivi et du pilotage de la tension sur le réseau basse tension. Le concentrateur utilise les compteurs Linky G1 pour lire la tension en différents points du réseau. Lorsqu'une excursion de tension est détectée (surtension ou sous-tension), le concentrateur utilise les leviers mis à sa disposition pour piloter la tension. Le transformateur régleur en charge est un de ces leviers.

#### 5.3.1. Communication entre le concentrateur et le transformateur régleur en charge du poste HTA/BT

Le concentrateur communique avec le transformateur via le protocole Modbus / IP. Les deux équipements sont installés dans le poste « Ecole » et sont connectés via un hub Ethernet. Quand le concentrateur détecte une excursion de tension sur le réseau basse tension, il envoie la consigne adéquate vers le transformateur grâce à ce canal de communication.



Figure 28 : Connexion entre le concentrateur et le transformateur avec régleur en charge - Source ATOS

Par exemple, en cas de journée ensoleillée avec peu de consommation, des tensions > 4% peuvent être observées. Dans ce cas le concentrateur identifie les sorties de plage +4%, calcule la consigne adéquate puis la transmet au transformateur sous forme de message Modbus. Le transformateur reçoit ce message, l'interprète et exécute la consigne envoyée par le concentrateur.

#### 5.3.2. Evolution de l'algorithme de pilotage Atos (apprentissage)

Initialement, l'algorithme de pilotage proposé par Atos intégrait plusieurs règles :

1. Le pilotage est effectué pour une durée maximale de 10 min. Cette durée maximale a été mise en place afin de minimiser les impacts négatifs possibles sur le réseau BT au cours de la phase de fiabilisation de l'algorithme de régulation, l'ampleur des effets sur la tension

n'étant pas connue a priori. Cela a permis de se prémunir de surtensions ou de sous-tensions excessives sur une période trop longue que le réglage aurait pu provoquer sur le réseau BT ;

2. Une consigne est envoyée au transformateur uniquement lorsque les informations de tension mesurées par les compteurs sentinelles sont cohérentes :
  - Si une ou plusieurs tensions sont 4% inférieures à la tension nominale et si aucune tension n'est 4% supérieure à la tension nominale alors envoi d'une consigne « UP » au régulateur afin d'augmenter la tension ;
  - Si une ou plusieurs tensions sont 4% supérieures à la tension nominale et si aucune tension n'est 4% inférieure à la tension nominale alors envoi d'une consigne « DOWN » au régulateur afin d'abaisser la tension ;
3. Suite à l'envoi d'une consigne, le retour à la normale se fait au bout de 10 min (cf. point 1 ci-dessus). A l'issue de ces 10 min, une période d'observation de 30 min est conservée. Pendant cette période, aucune consigne n'est envoyée : cette période d'observation permet de ne pas agir en permanence sur le réseau afin que le retour à la normale soit effectif avant le déclenchement suivant de l'algorithme. Cette phase permet de filtrer des états transitoires potentiels pouvant apparaître après arrêt de la régulation.

Ces règles ont évolué suite aux premières observations sur le terrain. Le point 1 ci-dessus a été réévalué car :

- Aucun effet excessif de l'algorithme n'a été observé (aucune surtension ou sous-tension excessive après réglage) ;
- Le transformateur revenant systématiquement dans sa position initiale, cela oblige régulièrement le concentrateur à envoyer de nouveau la même consigne dès la période d'observation terminée (point 3) lorsque le phénomène de surtension ou de sous-tension perdure ;
- Les actions répétées sur le régulateur diminuent d'autant sa durée de vie.

La deuxième version de l'algorithme intègre donc une règle qui annule et remplace le point 1 ci-dessus : si une action de pilotage du transformateur est réalisée, la consigne envoyée reste en place tant que la tension reste dans les limites demandées (tension nominale plus ou moins 4%).

Cette nouvelle version de l'algorithme a permis de limiter l'envoi de consignes au transformateur au strict nécessaire compte-tenu des variations de tension observées.

### 5.3.3. Remontée des données

Le logiciel ASGS embarqué sur le concentrateur (G-DIS) enregistre un certain nombre d'informations au cours de l'exécution de l'algorithme de réglage du transformateur :

- Tensions lues toutes les 2 minutes sur les compteurs « sentinelles » ;
- Traces d'exécution de l'algorithme :
  - Jalons de détection des surtensions et sous-tensions ;
  - Valeurs des consignes transmises au régulateur en charge (position de la prise) ;
  - Jalons d'exécution de l'envoi des consignes ;
  - Jalons des débuts et fins des périodes d'observation ;
  - Trames Modbus envoyées au régulateur en charge.

Toutes ces informations sont collectées quotidiennement par le SI ASGS et mises à disposition des équipes Enedis en charge de l'expérimentation SMAP, une fois par semaine (à semaine échue). Les informations sont enregistrées par le G-DIS en format texte au sein de fichiers de log tournants dédiés.

### 5.3.4. Difficultés rencontrées

La principale difficulté rencontrée dans le projet a été le paramétrage de l'algorithme de pilotage du transformateur, en particulier pour la valeur des temporisations. En effet, les mécanismes internes font que le transformateur met plus d'une dizaine de secondes à exécuter une consigne envoyée par le concentrateur (traitement de l'information puis exécution des manœuvres électromécaniques). Si le concentrateur vérifie l'exécution de sa consigne trop tôt, il identifie que la consigne n'est pas respectée par le transformateur puisque ce dernier est encore en train de l'exécuter. Le concentrateur renvoie alors la même consigne au transformateur, entraînant un double changement de prise non nécessaire.

Cette situation a été rencontrée sur le terrain. La correction proposée a été la suivante : allonger la temporisation de 10 à 20 secondes dans l'algorithme du concentrateur, avant de vérifier l'exécution correcte de la consigne par le transformateur. Cette correction de temporisation règle l'anomalie décrite ci-dessus.

La latence du transformateur avec régleur en charge entre le moment où l'ordre est envoyé et la réalisation de la consigne est de l'ordre de 5 à 7 secondes. La prise en compte de ce temps de latence est donc indispensable afin de ne pas fausser le pilotage des équipements.

## 5.4. Régulation de tension du transformateur avec régleur en charge

Les résultats obtenus sont conformes aux attentes : l'impact du réglage sur le réseau corrige instantanément et durablement les sorties de plage +/- 4% observées (les sorties de plage +4% observées sont comprises entre 240 et 241 volts ; les sorties de plage -4% observées sont comprises entre 220 et 221 volts).

De plus, aucun phénomène de bagotement de la tension n'a été observé, c'est-à-dire un réglage excessif des sorties de plage +4% provoquant l'apparition de sorties de plage -4% sur le réseau et inversement.

Enfin, le fonctionnement sans limitation de la durée de régulation a permis de réduire drastiquement le nombre des changements de prise demandés au régleur en charge.



Figure 29 : Exemple d'un changement de prise réussi

L'analyse des mesures de tension a permis de mettre en lumière les variations de tension résultant d'une forte production photovoltaïque, compensées par l'action du transformateur avec régleur en charge. La figure ci-dessous illustre cette observation.



Figure 30 : Une régulation réussie s'adaptant aux variations de tension sur le réseau BT

A 10h00, une forte production photovoltaïque élève le niveau de tension. La régulation automatique du transformateur avec régleur en charge permet alors un changement de prise et donc une diminution de la tension. A 16h00, la production diminue, la prise retrouve donc son état initial.

On peut également observer la répartition des tensions > 4% Un sans réglage de la tension à travers le graphe ci-dessous. La majorité d'entre elles apparaissent entre 12h et 16h, heures de production photovoltaïque. Les variations de tension HTA ont également un fort impact sur ces hausses de tension [voir paragraphe 7.2].

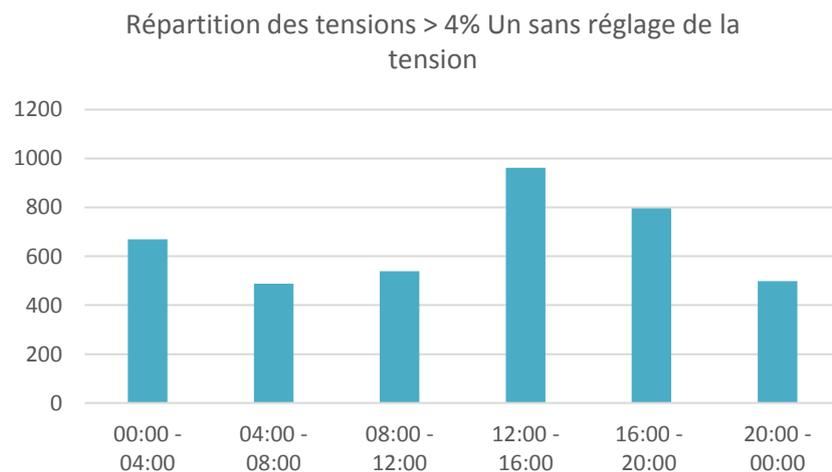


Figure 31 : Répartition des tensions > 4% Un sans réglage de tension - Source Enedis

Comme pour la supervision locale, l'objectif de ces tests est de vérifier la faisabilité de l'architecture technique. L'impact sur le réseau du transformateur avec régleur en charge avec l'arrivée massive des EnR a déjà fait l'objet de travaux dans d'autres projets démonstrateurs et ce sujet est décliné dans le projet SMAP dans la thèse de Mahana BERNIER sous la forme d'étude de simulations.

## VI. Pilotage des onduleurs photovoltaïques

### 6.1. Caractéristiques techniques des onduleurs

Dans le cadre du projet SMAP, deux types d'onduleurs de marque SMA ont été utilisés : le Sunny Boy et le Sunny Tripower. Implanté dans des petites installations résidentielles en monophasé, le Sunny Boy est adapté aux puissances allant de 1,5 à 5 kVA. Le Sunny Tripower, est quant à lui utilisé en raccordement triphasé lorsque la puissance de production se situe entre 5 et 60 kVA. Ces gammes de puissance correspondent à celles des installations de la Centrale Villageoise de Les Haies.



Figure 32 : Onduleurs SMA équipant les installations photovoltaïques de la Centrale Villageoise sur Les Haies – Source SMA

Ces onduleurs permettent un pilotage local de la puissance réactive suivant différents concepts [voir paragraphe 6.2.1], la limitation de puissance active en fonction de la fréquence, la réduction temporaire de puissance active en fonction de la tension, et l'adaptation de son fonctionnement lors de défauts ou perturbations du réseau (découplage si incident par exemple). Dans le cadre du projet SMAP, nous nous sommes focalisés sur la gestion des puissances réactive et active en fonction des mesures de tension.

Afin de piloter à distance les 6 onduleurs correspondant aux 6 installations de la Centrale Villageoise raccordées sur le poste « Ecole », des « Cluster Controller » ont été installés. Associés aux onduleurs SMA, les « Cluster Controller » permettent une surveillance et un pilotage centralisé des onduleurs, ainsi qu'un échange de données en temps réel avec d'autres appareils et systèmes via le protocole de communication standard Modbus.

### 6.2. Rappels sur le pilotage des onduleurs

La figure ci-dessous rappelle le lien entre les différentes puissances : P (active), Q (réactive) et S (apparente). L'angle  $\varphi$  est appelé déphasage entre la tension et le courant.

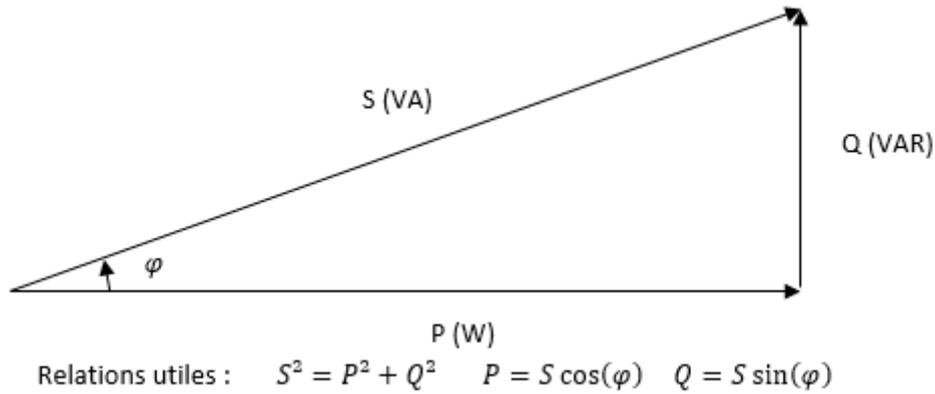


Figure 33 : Triangle des puissances - Source Enedis

Dans la suite de ce paragraphe nous allons détailler les différents types de pilotages possibles concernant la puissance réactive et active.

### 6.2.1. Pilotage de la puissance réactive

Dans le cadre de SMAP, les onduleurs pilotés à distance sont de marque SMA. Pour le type d'onduleurs concernés, il existe trois concepts de gestion de la puissance réactive<sup>13</sup>, explicités à travers les 3 figures ci-dessous. De nombreuses options permettent de paramétrer et d'adapter ces différents concepts.

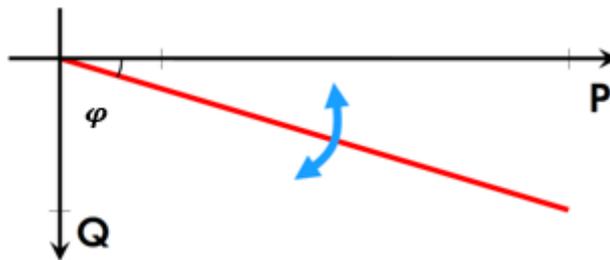


Figure 34 : Gestion de la puissance réactive avec un facteur de charge fixe<sup>14</sup> – Source SMA

<sup>13</sup> Ernst, Dr. Bernhard - SMA Solar Technology AG : [http://www.epia.org/fileadmin/user\\_upload/Events/EPIA-EDSO\\_event\\_EUSEW\\_2014/2-B.-SMA-PV\\_from\\_a\\_trouble-maker\\_to\\_a\\_solution\\_provider.pdf](http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Events/EPIA-EDSO_event_EUSEW_2014/2-B.-SMA-PV_from_a_trouble-maker_to_a_solution_provider.pdf)

<sup>14</sup> Le facteur de charge d'une installation photovoltaïque,  $\tan(\varphi)$ , est le rapport entre la puissance réactive (Q) et la puissance active (P).

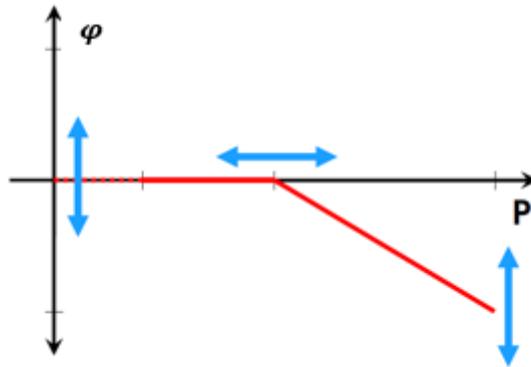


Figure 35 : Gestion de la puissance réactive avec un facteur de charge fonction de la puissance active injectée - Source SMA

La puissance réactive n'est pas explicitement représentée dans le graphe ci-dessus. Elle dépend directement de la valeur du facteur de charge : si l'on modifie le facteur de charge (axe des ordonnées) en fonction de la puissance active (axe des abscisses) alors on modifie implicitement la puissance réactive.

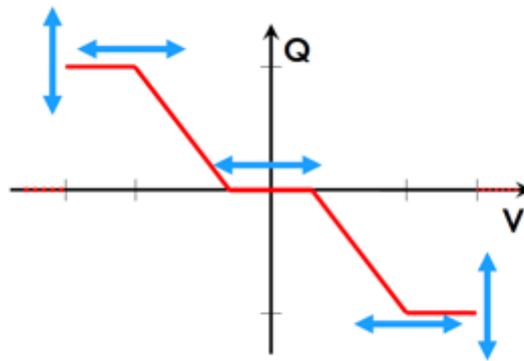


Figure 36 : Gestion de la puissance réactive fonction de la tension

Plusieurs critères peuvent être considérés pour évaluer ces différents concepts. Selon la situation, on peut chercher à maximiser la capacité d'accueil, minimiser la charge en puissance réactive du réseau, optimiser le rapport puissance active / puissance apparente etc.

### 6.2.2. Lien entre puissance réactive et chute de tension

Au-delà d'un certain seuil de tension la production de puissance réactive augmente pour tenter de compenser la variation de tension. Plus la tension est haute, plus la consommation de réactif sera grande et plus la tension est basse, plus la production de réactif sera grande.

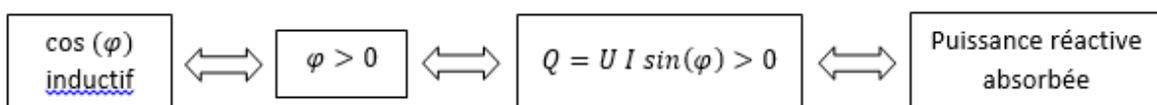


Figure 37 : Lien entre le facteur de charge et la puissance réactive

La modification de ce facteur induit alors une chute de tension, comme l'illustre la figure ci-dessous. Dans l'exemple pris pour un réseau BT, lorsque l'on passe d'un facteur de puissance de 1 à 0,95 inductif, on diminue de 20 % la tension du réseau.

Dans le cadre de SMAP, le réglage de la tension en puissance réactive au niveau des onduleurs se fait grâce à une modification du facteur de charge  $\cos(\phi)$  : ce dernier bascule en inductif avec  $\cos(\phi) = 0,8$  lorsqu'on a besoin d'absorber de la puissance réactive (et donc de diminuer la tension), et en capacitif avec  $\cos(\phi) = -0,8$  lorsqu'on a besoin d'injecter de la puissance réactive (et donc d'augmenter la tension).

### 6.2.3. Pilotage de la puissance active

Les onduleurs SMA permettent d'interpréter une hausse de la fréquence ou une hausse de tension comme une condition de « surproduction ». Dans ce cas, la production de puissance active est réduite jusqu'à ce que la fréquence ou la tension diminue. Dans le cadre de SMAP, le pilotage de la puissance active est fonction des tensions sur le réseau BT, la fréquence n'étant pas un paramètre abordé dans le projet. L'envoi d'ordre d'écrêtage n'est pas réalisé en local, au niveau de l'onduleur, mais grâce à un pilotage centralisé au niveau du poste HT/BT : si le concentrateur détecte une sortie de plage +4% sur le réseau BT, il envoie un ordre d'écrêtage à tous les producteurs du réseau.

## 6.3. Pilotage de la tension dans le cadre du projet SMAP

Dans le projet SMAP, le concentrateur est responsable du suivi et du pilotage de la tension sur le réseau basse tension. Le concentrateur utilise les compteurs Linky G1 pour lire la tension en différents points du réseau. Lorsqu'une sortie de plage de tension est détectée (+/- 4% de la tension nominale dans SMAP), le concentrateur utilise les leviers mis à sa disposition pour piloter la tension. Le pilotage des onduleurs photovoltaïques est un des leviers disponibles.

### 6.3.1. Communication entre le concentrateur et les onduleurs

Le concentrateur communique avec les onduleurs grâce au protocole Modbus. Une antenne est reliée au concentrateur afin qu'il puisse communiquer avec les onduleurs via un réseau radio dédié.

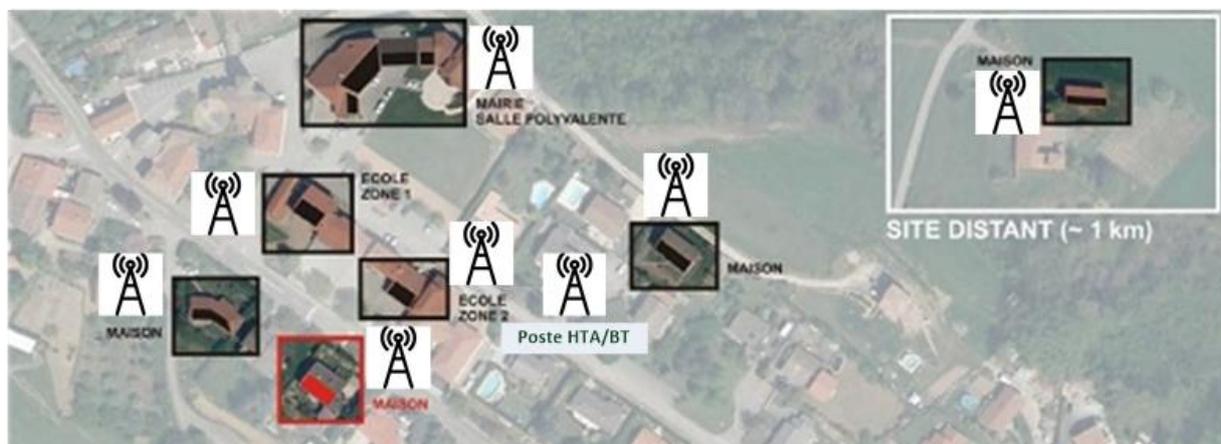


Figure 38 : Topologie des installations photovoltaïques pilotées

Chaque installation photovoltaïque participant à l'expérimentation SMAP comporte :

- Une antenne radio assurant la connexion avec le concentrateur ;
- Un onduleur relié au réseau BT et aux panneaux photovoltaïques ;
- Un « Cluster Controller » qui reçoit les ordres envoyés par le concentrateur via le réseau radio et qui les répercute à l'onduleur.

Par exemple, lorsqu'une surtension est détectée, le concentrateur peut demander aux onduleurs de réduire la puissance produite par l'installation. Dans ce cas, lorsque le concentrateur détecte la sortie de plage +4%, il calcule la consigne de limitation en puissance active à envoyer aux onduleurs et leur transmet grâce au protocole Modbus. Chaque « Cluster Controller » reçoit cette consigne et modifie les paramètres de son onduleur afin qu'il réduise sa puissance active injectée sur le réseau.

### 6.3.2. Evolution de l'algorithme de pilotage ATOS (apprentissage)

La version initiale de l'algorithme suit les règles décrites ci-après.

Une action de contrôle ne peut être lancée qu'après une boucle complète d'observation, c'est-à-dire lorsque la tension de chaque compteur « sentinelle » a été lue une fois. La combinaison des lectures indique le cas rencontré :

- Cas normal : la tension des 15 compteurs sentinelles reste dans les limites souhaitées ;
- Sortie de plage +4% : au moins 1 compteur mesure une tension  $> 4\% U_n$  et les autres mesurent une tension dans la plage de valeurs souhaitée ;
- Sortie de plage -4% : au moins 1 compteur mesure une tension  $< 4\% U_n$  et les autres mesurent une tension dans la plage de valeurs souhaitée ;
- Divergence : certains compteurs mesurent une tension  $< 4\% U_n$  et d'autres une tension  $> 4\% U_n$ .

En fonction des informations de tension mesurées par les compteurs communicants et traitées par le concentrateur, un onduleur peut recevoir trois types de consignes de réduction de production :

- Lorsqu'une sortie de plage +4% est détectée :
  - le concentrateur demande à tous les onduleurs de diminuer de 25% leur puissance active produite pour les 10 prochaines minutes. C'est le pilotage de la puissance active ;
  - le concentrateur demande aux onduleurs de passer en mode inductif, avec un  $\cos(\phi) = 0.8$  pour les 10 prochaines minutes. C'est le pilotage de la puissance réactive ;
- Lorsqu'une sortie de plage -4% est détectée, le concentrateur demande aux onduleurs de passer en mode capacitif, avec un  $\cos(\phi) = 0.8$  pour les 10 prochaines minutes. C'est le pilotage de la puissance réactive.

A titre d'exemple, en cas de sortie de plage +4% et de régulation de la puissance active, le fonctionnement de l'algorithme est le suivant :

- Détection de la sortie de plage +4% via les mesures acquises par les compteurs « sentinelles » ;

- Calcul de la consigne de limitation de puissance active à envoyer à chaque onduleur en prenant en compte la puissance produite et la puissance maximale de l'installation ;
- Transmission des consignes aux « Cluster Controller » grâce à la mise en œuvre du protocole Modbus. Chaque « Cluster Controller » recevant une consigne modifiée alors les paramètres de son onduleur afin qu'il réduise la puissance active injectée sur le réseau dans le laps de temps prédéfini.

Afin d'étudier au mieux les impacts de chaque réglage, le G-DIS est paramétré pour envoyer soit des consignes en actif, soit des consignes en réactif. Cela permet de distinguer l'effet de chaque réglage dans des cas similaires.

Suite à l'envoi d'une consigne, le retour à la normale se fait au bout de 10 min. A l'issue de ces 10 min, une période d'observation de 30 min est mise en œuvre. Pendant cette période, aucune consigne n'est envoyée. Les consignes sont également limitées en nombre d'occurrences : trois consignes maximum le matin, trois consignes maximum l'après-midi. Toutes ces restrictions limitent l'impact sur la production des producteurs volontaires pour participer à l'expérimentation.

Après plusieurs mois d'observation sur le terrain, le temps alloué à chaque limitation de puissance a été augmenté. En effet, les 10 min paramétrées initialement ne permettent pas de voir assez nettement l'impact du pilotage sur la tension. La durée et la profondeur des écrêtages ne permettant pas d'influencer suffisamment la tension. Les règles de pilotage deviennent donc :

- Le matin, un pilotage de 20 min est autorisé,
- L'après-midi, deux pilotages de 20 min sont autorisés.

Avec ces nouvelles règles, le temps de pilotage maximum sur la journée reste de 60 min mais est réparti de façon différente. Cet allongement permet de mieux observer les impacts du pilotage sur la tension du réseau BT.

### **6.3.3. Remontée des données**

Le logiciel ASGS embarqué sur le concentrateur (G-DIS) enregistre un certain nombre d'informations au cours de l'exécution de l'algorithme de réglage des onduleurs :

- Tensions lues toutes les 2 minutes sur les compteurs « sentinelles » ;
- Traces d'exécution de l'algorithme :
  - Jalons de détection des sorties de plage +/-4% ;
  - Valeurs des consignes transmises aux « Cluster Controller » ;
  - Jalons d'exécution de l'envoi des consignes ;
  - Jalons des débuts et fins des périodes d'observation ;
  - Trames Modbus envoyées aux « Cluster Controller ».

Toutes ces informations sont collectées quotidiennement par le SI ASGS et mises à disposition des équipes Enedis en charge de l'expérimentation SMAP, une fois par semaine (à semaine échue). Les informations sont enregistrées par le G-DIS en format texte au sein de fichiers de log tournants dédiés. Cette remontée d'information permet de traiter à posteriori les données afin de réaliser une analyse des variations de tension, de leurs valeurs, etc.

### 6.3.4. Difficultés rencontrées

#### **Difficultés non techniques**

La principale difficulté pour cette partie de l'expérimentation a été l'absence de fabricant d'onduleur dans le consortium (SMA). Cette absence a rendu difficiles les tests en laboratoire, qui sont pourtant indispensables avant toute mise en œuvre terrain. Le fabricant SMA a cependant accepté une journée de tests avec Atos, afin de valider les échanges Modbus et fourni la spécification de l'interface Modbus à laquelle se conformer pour le réglage de l'actif et du réactif.

De plus l'absence d'information concernant les versions des « Cluster Controller », des onduleurs et de leurs réglages chez les 6 producteurs photovoltaïques volontaires a rendu difficile le diagnostic des erreurs rencontrées.

D'autre part, des algorithmes alternatifs auraient pu être testés pour le pilotage. Ces algorithmes n'ont pas été testés sur le terrain, par crainte d'impacter les producteurs photovoltaïques volontaires pour participer à l'expérimentation. Si ces algorithmes alternatifs avaient été testés en laboratoire, ils auraient pu être installés en toute confiance sur le terrain. L'absence de tests en laboratoire a donc été un frein à l'évolution de l'algorithme de pilotage.

#### **Difficultés techniques**

Plusieurs difficultés rencontrées sur le terrain sont induites par les difficultés non techniques listées ci-dessus.

En particulier, des cas d'erreur ont été constatés sur le terrain, alors qu'ils auraient dû être identifiés lors de tests en laboratoire. Ces cas d'erreur ont malgré tout été corrigés rapidement. Parmi les cas d'erreur rencontrés on peut citer :

- Des valeurs aberrantes remontées par les onduleurs la nuit : ce constat a permis de durcir le code de l'algorithme en renforçant les contrôles des valeurs de puissance lues sur les onduleurs ;
- Des problèmes de communication intermittents avec les « Cluster Controller » : ce type de problème réduit l'efficacité des consignes de régulation transmises ;
- L'absence de communication avec un des 6 « Cluster Controller » : l'expérimentation a donc été réalisée avec 5 onduleurs au lieu des 6 initialement prévus ;
- Certains « Cluster Controller » n'étaient pas paramétrés pour recevoir des consignes de régulation via l'interface Modbus : ceci a rendu nécessaire l'intervention de l'installateur des « Cluster Controller » pour changer le paramétrage et a perturbé les premiers tests des algorithmes réalisés sur le terrain.

Une autre difficulté rencontrée concerne le protocole Modbus mis en œuvre pour communiquer avec les « Cluster Controller » : en cas d'erreur, mises à part celles qui sont génériques, le code de retour ne fournit aucun détail sur le problème qui a pu survenir lors du passage d'un ordre. Cet état de fait rend difficile (voire impossible) la mise au point des algorithmes et constitue donc un réel frein à la mise au point des algorithmes. Il serait donc intéressant d'étudier un autre mode de communication entre le concentrateur et les onduleurs.

## 6.4. Résultats obtenus

### 6.4.1. Pilotage en puissance réactive

L'efficacité des consignes de réglage de la puissance réactive injectée sur le réseau BT n'a pu être démontrée sur le terrain pour les raisons exposées dans le chapitre 6.3.4. Cependant, des simulations réalisées par Grenoble-INP mettant en œuvre la modélisation du réseau BT testé et les relevés de tensions ont démontré que l'absorption de réactif produit des résultats probants.

### 6.4.2. Pilotage en puissance active

L'action des consignes de réduction de production d'actif permet de ramener la tension dans ses limites autorisées (les surtensions observées sont comprises entre 240 et 241 volts). Comme indiqué précédemment [voir paragraphe 6.3], l'écrtage de la production est étroitement encadré par une convention entre Enedis et les producteurs afin de limiter les pertes de ces derniers. Dans un premier temps, 6 consignes d'écrtage, de 10 min chacune, pouvaient être envoyées chaque jour par le concentrateur. Puis, seulement 3 consignes d'écrtage par jour, de 20 min chacune.

Par exemple, pendant la journée du 20 juin 2018, le concentrateur a écrté 4 fois la production : une fois le matin et 3 fois l'après-midi. Chaque écrtage dure 10 minutes soit un total de 40 minutes pendant toute la journée.



Figure 39 : Courbe de production illustrant le pilotage en actif des onduleurs

Sur cette journée, ce producteur a produit « 100 191 Wh » avec 40 minutes d'écrtage. Théoriquement, selon la courbe de production maximale, ce producteur aurait dû produire environ « 102 055 Wh », et a donc perdu « 1 864 Wh » de production, ce qui représente 1.8% de la puissance produite sans écrtage.

Nous sommes ici dans un cadre expérimental, et l'implication de la Centrale Villageoise permet de réaliser ce pilotage, moyennant un accord tacite au travers une convention. A l'heure actuelle, la réglementation ne permet pas de réaliser ce genre d'opération sur la BT. Dans un hypothétique futur déploiement industriel de ce pilotage centralisé des onduleurs, le nombre d'écrtages serait également limité dans le temps et permettrait aux producteurs d'avoir des coûts de raccordement bien moins élevés, dans certains cas bien spécifiques. SMAP a donc testé des éléments permettant d'instruire les éventuelles futures Offres de Raccordement Intelligent BT, dont la mise en œuvre se base sur l'infrastructure Linky : mesures issues des compteurs, et pilotage centralisé grâce au concentrateur [voir paragraphe 4.3.2].

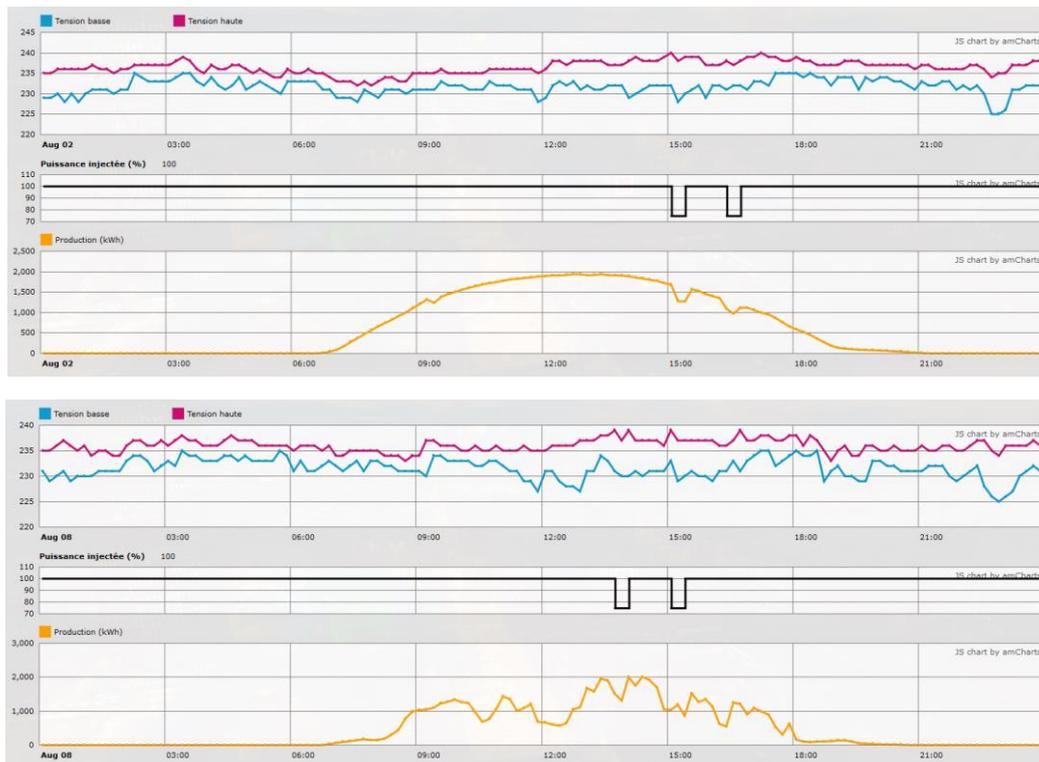


Figure 40 : Illustrations d'un écrêtage de production et impact sur la tension – Source Enedis

Dans le cadre de SMAP, l'impact de l'écrêtage sur la tension est difficilement mesurable. En effet, la durée et la profondeur des écrêtages étaient relativement faibles, du fait des contraintes définies dans la convention entre Enedis et les producteurs. Ces derniers n'étant pas rémunérés dans le cadre du projet, il ne pouvait pas être envisageable de leur faire perdre davantage de productible. Dans une optique industrielle, il est nécessaire d'envisager des écrêtages plus importants, notamment en termes de profondeur et de durée, pour assurer une diminution de tension quantifiable.

L'expérimentation a permis de confirmer que la régulation de tension basée sur le pilotage des onduleurs en puissance active, adossée à la supervision locale BT, peut être mise en œuvre sur un réseau réel, moyennant les conditions explicitées précédemment.

## VII. Impact de la tension HTA sur la tension BT

### 7.1. Capteurs de tension HTA utilisés et objectifs

Afin d'évaluer l'impact de la tension HTA sur les variations de tension BT et sur la régulation de tension mise en place, des capteurs HTA ont été installés par Nexans dans le poste HTA/BT « Ecole ».

Enedis a été formé pour récupérer les mesures en local étant donné que le choix a été fait de ne pas mettre en place une infrastructure permettant leur envoi automatique.

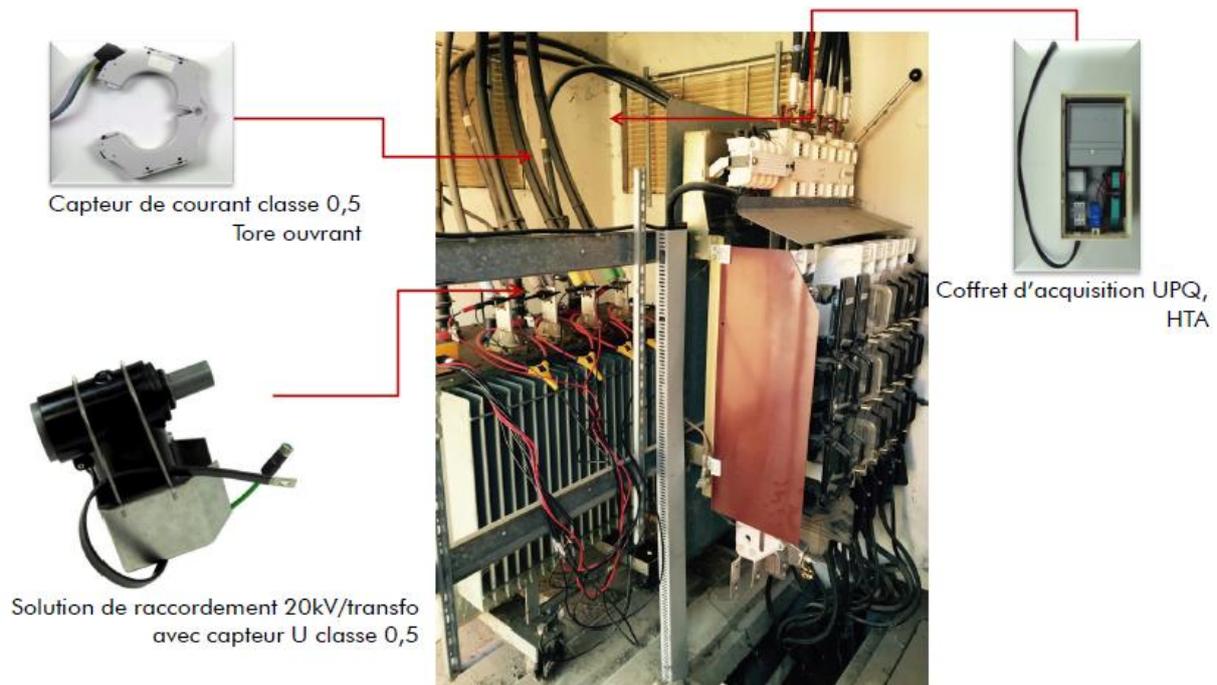


Figure 41 : Infrastructure de mesure HTA mise en place dans le poste "Ecole" - Source Nexans

### 7.2. Analyse des données HTA mesurées au poste HTA/BT « Ecole »

Les capteurs HTA permettent de mettre en lumière l'influence des variations de tension HTA sur la tension BT. Cette observation est clairement établie, et n'est pas une nouveauté en soi, mais les mesures locales permettent de communiquer sur cet impact qui n'est pas sans lien avec la gestion des réseaux. Il faut en effet prendre en compte ces variations, qui peuvent notamment être liées à des situations de secours, dans les hypothèses des études réseaux.

Il faut savoir que les tensions HTA et BT sont liées et que le plan de tension déployé par Enedis cherche à partager équitablement les variations de tension entre réseau HTA et réseau BT de sorte à ce que les utilisateurs raccordés aux différents niveaux de tension soient traités également en fonction de leur impact sur la tension. Les mesures effectuées permettent de mettre en évidence les dynamiques sur chacun des deux réseaux et faire apparaître les occurrences de contraintes simultanées ou au contraire de disjonctions temporelles de l'apparition des contraintes. Lorsque les contraintes sont simultanées sur les deux réseaux des actions conjuguées peuvent ainsi avoir un intérêt.

### 7.2.1. Valeurs « élevées » de la tension HTA

Dans le graphe ci-dessous, on remarque bien la corrélation entre la tension HTA au niveau du poste source et celle mesurée au niveau du poste HTA/BT « Ecole ». Cependant, la HTA mesurée au poste « Ecole » est retardée de 50 minutes par rapport à la HTA mesurée au poste source. Ce décalage temporel est lié au fait qu'aucune solution n'a été proposée pour la synchronisation horaire des capteurs. La dérive est donc importante et explique le décalage des données au niveau du poste HTA/BT.

La tension au niveau du poste HTA/BT est toujours inférieure à la tension au niveau du poste source, du fait de l'impédance des lignes électriques (principalement du réseau aérien autour de Les Haies), et de la présence des sites de soutirage sur le réseau HTA (peu de producteurs HTA).

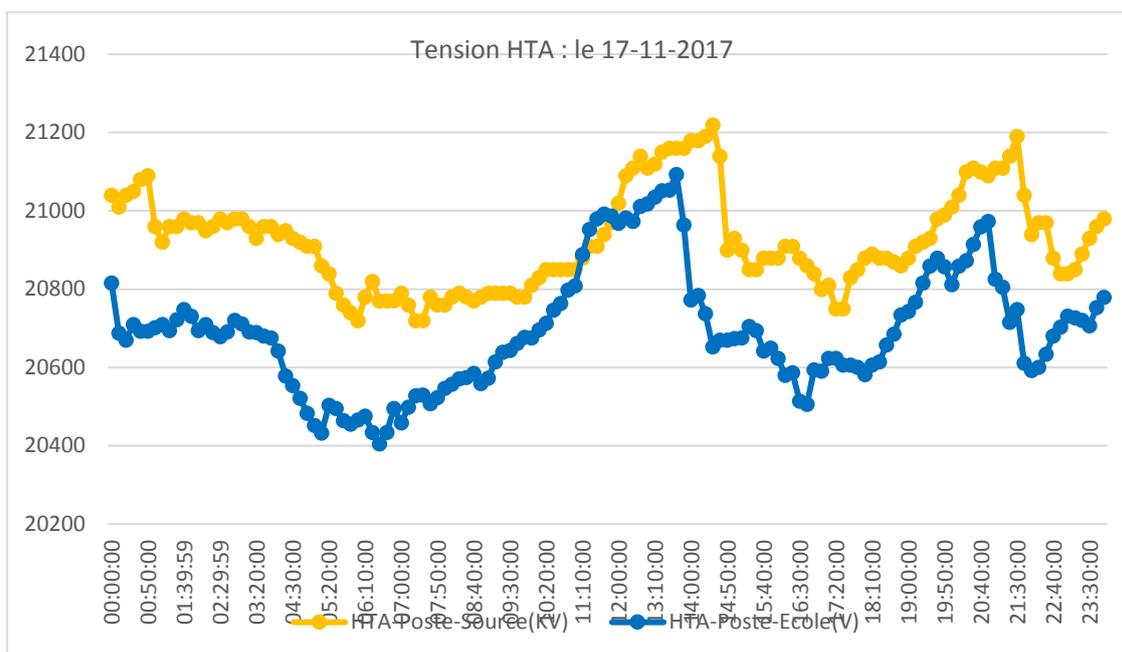


Figure 42 : Tension HTA au niveau du Poste Source et du poste HTA/BT "Ecole"

L'analyse des données de tension mesurées au poste « Ecole » montre que les valeurs de tension HTA sont très souvent entre 20,8 et 21 kV. Par exemple, pour le mois d'octobre 2017 toutes les valeurs sont supérieures à 20,5 kV et 78% des valeurs sont supérieures à 20,7 kV. Cette observation s'explique par plusieurs éléments explicités ci-dessous.

Premier élément à noter c'est qu'il n'y a pas de producteur HTA raccordé sur le poste source dont dépend le poste Ecole. De ce fait, par défaut, la tension de consigne du transformateur au niveau du poste source est de 20,8 kV (hypothèse explicitée dans la note publique suivante : [https://www.enedis.fr/sites/default/files/Enedis-PRO-RES\\_43E.pdf](https://www.enedis.fr/sites/default/files/Enedis-PRO-RES_43E.pdf)). De plus, la charge sur le départ HTA est faible ce qui explique pourquoi la tension HTA en bout de ligne est régulièrement entre 20,5 kV et 20,8 kV.

Cependant, même s'il n'y a pas de producteur raccordé sur le réseau HTA, il y a 565 kW de production BT installée, soit plus que la consommation minimale du départ en été. Or suivant la Documentation Technique de Référence (DTR), la tension de consigne du transformateur HTB/HTA (20,8 kV) ne peut pas être modifiée lors de l'insertion de production BT. En effet, le plan de tension prévoit de répartir également la marge de variation de la tension admissible entre les deux réseaux (5% sur chacun des réseaux). Les études sur le réseau BT s'effectuent en considérant une tension amont du transformateur HTA/BT de  $U_n+5\%$ , car c'est la marge de variation de tension laissée aux utilisateurs

HTA, les 5% restants étant attribués aux utilisateurs BT. Aussi, le réglage de la consigne du transformateur du poste source, n'a pas d'influence par construction sur les études réalisées en BT justement car le plan de tension est segmenté dans ce but.

### 7.2.2. Creux de tension

Un autre phénomène peut interroger, à savoir des variations soudaines et importantes de tension HTA mesurées au niveau du poste Ecole. Le graphique ci-dessous nous montre que les chutes de tension au niveau poste Ecole ne sont pas causées par un évènement au niveau du poste source (changement de prise du transformateur HTB/HTA par exemple), mais bien par un évènement sur le réseau HTA.

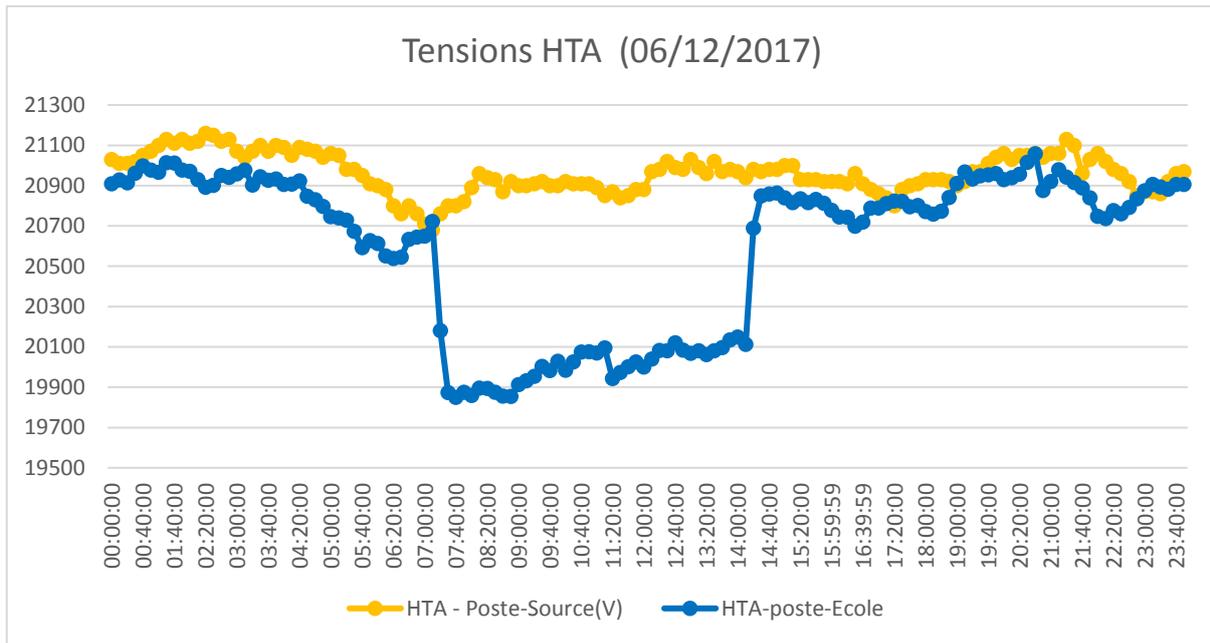


Figure 43 : Creux de tension HTA - Source Enedis

Ces creux de tension correspondent à des situations où le départ HTA n'est plus en schéma normal. Le poste Ecole est alors alimenté par un autre départ HTA, potentiellement par un autre transformateur HTB/HTA voire un autre poste source. C'est le cas pour la journée du 06/12 où le départ sur lequel est rattaché le poste Ecole était repris par le départ HTA d'un poste source voisin. Les télémesures des intensités en tête des départs concernés confirment cette analyse.

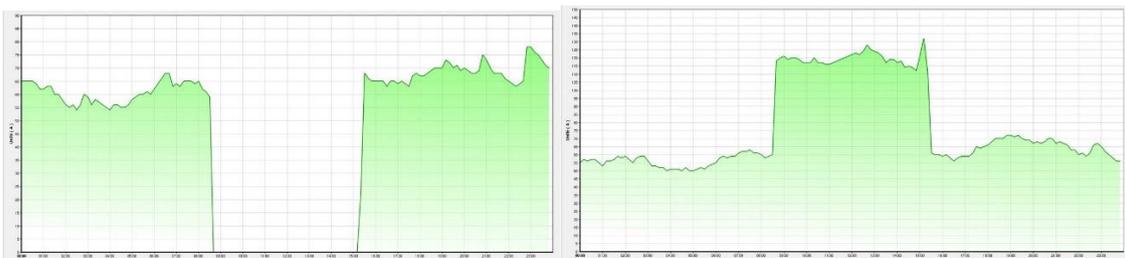


Figure 44 : intensités en tête des départs - Source Enedis

### **7.2.3. Une régulation de tension s'adaptant aux variations HTA**

Le transformateur régleur en charge permet également d'ajuster la tension BT en fonction des variations de tension HTA. En effet, les variations HTA illustrées dans le paragraphe précédent impactent directement la tension BT. Ces variations sont donc mesurées par les compteurs Linky, qui remontent l'information au concentrateur, qui ajuste automatiquement la tension grâce au pilotage du transformateur avec régleur en charge.

## VIII. Capitalisation

### 8.1. Messages clés

Les messages clés de cette expérimentation sont les suivants :

- **Supervision BT basée sur les compteurs communicants**
  - Les compteurs communicants permettent une supervision de la tension sur le réseau BT fiable grâce à la remontée dynamique des mesures de tension.
  - Cette supervision offre une vision des niveaux de tension du réseau BT proche du temps réel permettant d'y adosser des solutions de régulation de tension pilotées par une intelligence centralisée au niveau du poste HTA/BT. Dans le cadre de SMAP, les solutions testées ont été un transformateur avec régleur en charge et le pilotage d'onduleurs photovoltaïques, mais d'autres solutions pourraient être pilotées grâce aux informations remontées par les compteurs communicants.
  - La mise en place d'une intelligence dans le concentrateur Linky permet un pilotage automatisé des équipements réglant la tension.
- **Régulation de tension via un transformateur avec régleur en charge**
  - Le lien entre le concentrateur et le transformateur avec régleur en charge est fonctionnel et permet le réglage de la tension en fonction des mesures remontées par les compteurs communicants Linky.
  - Le transformateur régleur en charge a permis sur la durée d'expérimentation considérée, et sur le réseau électrique rural des Haies, de maintenir la tension dans les plages souhaitées (+/-4% dans SMAP), s'adaptant aux variations HTA et BT.
- **Régulation de tension via le pilotage des onduleurs**
  - La communication fonctionnelle entre le concentrateur et les onduleurs pour le pilotage de la puissance active a permis l'écrêtage de la production sur des durées prédéfinies. Leur mise en œuvre ne nécessite aucune intervention du producteur puisqu'elle est automatiquement pilotée par le concentrateur. La durée et le nombre d'écrêtages ont été définis en amont, au travers une contractualisation entre Enedis et le producteur : ce sont les principes qui pourraient être utilisés pour de potentielles futures Offres de Raccordement Intelligent sur le domaine BT.
  - Dans une optique industrielle, cette régulation de tension centralisée via la puissance active ou réactive des onduleurs devra s'intégrer dans une optique de minimisation des coûts collectifs d'insertion des énergies renouvelables. Toutefois, les contraintes de tension devraient prioritairement être levées via des leviers portant sur la gestion de la puissance réactive pour limiter l'impact sur le productible.
  - Le potentiel de répliquabilité des solutions de type pilotage centralisé en actif ou réactif dépendra largement de son coût de mise en place de manière fiable à l'échelle industrielle. En particulier, il serait intéressant de pouvoir utiliser des algorithmes

communs pour le pilotage de l'ensemble des onduleurs photovoltaïques, ce qui nécessiterait une harmonisation des protocoles de communication avec les onduleurs.

## 8.2. Axes d'amélioration et perspectives

- **Régulation de tension via un transformateur avec régleur en charge**
  - Une expérimentation sur un réseau dont la tension est plus perturbée permettrait de conforter les résultats obtenus ;
  - La production d'un reporting plus synthétique faciliterait son exploitation par le système informatique Enedis ;
  - La génération d'une alarme vers le SI en cas d'instabilité de la régulation (détection de situation instable et durable) permettrait la mise en place de mesures alternatives (par exemple un changement des paramètres de l'algorithme).
  
- **Régulation de tension via le pilotage des onduleurs**

Les mêmes axes d'amélioration que ceux proposés pour le régleur en charge s'appliquent aux onduleurs [voir paragraphe ci-dessus].

Des axes d'amélioration supplémentaires sont aussi à considérer :

- Faire participer en tant que parties prenantes de l'expérimentation le ou les fournisseurs des « Cluster Controller » et onduleurs : cela permettrait d'avoir un réel support en cas de problème survenant lors des interactions avec les équipements.
- L'expérimentation a été menée avec des « Cluster Controller » d'une même origine (SMA) et de la même famille. On constate que même avec cette homogénéité, de nombreux problèmes d'intégration et de réglage sont à traiter. Afin de réduire au maximum l'impact d'une probable hétérogénéité des « Cluster Controller » sur d'autres réseaux BT, il faudrait lancer une réflexion avec les fabricants afin d'homogénéiser les protocoles mis en œuvre pour interagir avec ce type d'équipement. Dans le cas contraire, la mise au point et la maintenance des algorithmes pourrait s'avérer rapidement complexe et coûteuse.
- Faire fonctionner l'algorithme sans limitation temporelle permettrait de vérifier sa stabilité dans le temps et d'évaluer plus finement les pertes de production engendrées.

## 8.3. Réplicabilité

L'expérimentation réseau ne permet pas de conclure sur la replicabilité de l'architecture mise en œuvre. Techniquement, le transformateur avec régleur en charge est une alternative pertinente pour faciliter l'insertion photovoltaïque. Cependant son coût d'installation reste très élevé. La question reste la même pour le pilotage des onduleurs et la supervision locale BT. Une Analyse Coûts-Bénéfices devra être réalisée pour répondre à ces questions de coût, en gardant à l'esprit les con-

traintes techniques et non techniques qui ne pourraient pas être mesurées par cet exercice d'analyse économique.

Une piste de réflexion intéressante serait d'établir une communication CPL entre le concentrateur et les onduleurs. Cela permettrait de supprimer le « Cluster Controller » et d'ajouter simplement un modem CPL dans les onduleurs. Les spécifications G3 PLC permettant l'ajout d'objets de contrôle, il suffirait d'en spécialiser un pour l'onduleur. Cette possibilité pourrait faire l'objet d'une future expérimentation, suivant les futurs objectifs envisagés.

## IX. Conclusion

Les travaux « réseaux » réalisés dans le cadre du projet SMAP ont permis de mettre en application des innovations autour de l'intégration des énergies renouvelables sur les réseaux BT ruraux.

La supervision locale basée sur les compteurs communicants, pilotée ici par ATOS WorldGrid, offre au Gestionnaire de Réseau de Distribution d'électricité une vision nouvelle de l'évolution de l'état de tension du réseau BT au cours du temps. L'architecture mise en place permet d'exploiter les fonctionnalités offertes par l'infrastructure Linky (mesure de la tension, envoi par CPL, utilisation du concentrateur pour héberger l'intelligence algorithmique, etc.). La mise en œuvre de cette innovation sur le réseau de Les Haies a montré qu'il était techniquement possible de la déployer sur un réseau de distribution d'électricité BT, dans un contexte de fiabilisation et d'industrialisation des solutions à travers leur intégration au cœur de la chaîne Linky. Il faut tout de même prendre en considération que l'expérimentation ne traite pas les aspects performances du système Linky global dont la vocation principale est la collecte des données. Le projet SMAP n'aborde pas les coûts liés aux évolutions matérielles des concentrateurs, et au traitement des mesures de tension. Cette notion de coût devra évidemment être prise en compte en vue d'un déploiement de la supervision locale testée dans le projet SMAP.

Le réglage dynamique de la tension BT grâce au pilotage du transformateur avec régleur en charge ou des onduleurs, a permis de compenser de manière dynamique et automatique les variations de tension HTA et BT. Ce pilotage centralisé pose les bases de potentielles futures Offres de Raccordement Intelligent BT à destination des producteurs photovoltaïques, mais le sujet doit encore être approfondi au travers d'autres expérimentations complémentaires.

L'expérimentation SMAP autour de la régulation de la basse tension peut se décomposer en deux livrables complémentaires. Le 1<sup>er</sup> présenté ici, concerne les tests terrains réalisés sur le réseau électrique de la commune Les Haie. Le 2<sup>nd</sup> livrable concerne les simulations réalisées sur les réseaux ruraux autour de la commune Les Haies dont les objectifs sont d'évaluer l'impact de solutions techniques (dont celles testées sur le terrain) sur l'intégration des énergies renouvelables en milieu rural, et d'évaluer la pertinence technique et économique de leur déploiement en local.

## Table des illustrations

Figure 1 : Panorama des énergies renouvelables en France - Source RTE, Enedis .....	4
Figure 2 : Impact de la production sur la tension - Source Enedis .....	5
Figure 3 : Consommation totale par commune sur le département du Rhône - Source Open Data Enedis .....	6
Figure 4 : Courbe de charge illustrative d'un consommateur de Les Haies - Source Enedis .....	7
Figure 5 : Cartographie des réseaux sur Les Haies – Source Enedis.....	8
Figure 6 : Caractéristiques des 6 postes HTA/BT de Les Haies .....	9
Figure 7 : Caractéristiques des départs BT du poste "Ecole" - Source Enedis.....	9
Figure 8 : Capteurs Fluke installés sur la commune Les Haies – Source Enedis.....	10
Figure 9 : Phénomènes observables lors d'une étude de grandeurs mesurées au niveau d'un poste HTA/BT – Source Enedis .....	11
Figure 10 : Elévations de tension au niveau du poste HTA/BT pendant les heures de production PV - Source Enedis .....	11
Figure 11 : Production entraînant une élévation de tension au niveau d'un producteur (15 kWc) - Source Enedis .....	12
Figure 12 : Production entraînant une élévation de tension en bout de ligne BT - Source Enedis .....	12
Figure 13 : Chute de tension au niveau du poste "Les Acacias" - Source Enedis.....	13
Figure 14 : Puissances mesurées au poste « Ecole » pour la journée du 19/08/2015 – Source Enedis	14
Figure 15 : Puissances mesurées au poste « Ecole » pour la journée du 24/08/2015 - Source Enedis	15
Figure 16 : Appel de puissance important au niveau du poste Ecole - Source Enedis.....	15
Figure 17 : Compteurs Linky rattachés au poste HTA/BT "Ecole" – Source Enedis.....	18
Figure 18 : Architecture réseau mise en place dans SMAP – Source Enedis.....	19
Figure 19 : Planning macroscopique du projet SMAP - Source Enedis .....	20
Figure 20 : Chronologie de l'installation des équipements sur le réseau - Source Enedis.....	21
Figure 21 : Installation des compteurs communicants sur Les Haies – Source Enedis .....	22
Figure 22 : Extremums de tension sur le réseau BT de Les Haies - Source Enedis.....	25
Figure 23 : Tension min et max sur la journée du 30/04/2018 - Source Enedis .....	26
Figure 24 : Répartition des tensions min et max - Source Enedis .....	26
Figure 25 : Schéma du transformateur avec régleur en charge .....	27
Figure 26 : Caractéristiques techniques du transformateur avec régleur en charge SMAP - Source Ormazabal .....	28
Figure 27 : Installation du transformateur avec régleur en charge dans le poste "Ecole" – Source Enedis .....	29
Figure 28 : Connexion entre le concentrateur et le transformateur avec régleur en charge - Source ATOS .....	30
Figure 29 : Exemple d'un changement de prise réussi.....	32
Figure 30 : Une régulation réussie s'adaptant aux variations de tension sur le réseau BT .....	33
Figure 31 : Répartition des tensions > 4% Un sans réglage de tension - Source Enedis.....	33
Figure 32 : Onduleurs SMA équipant les installations photovoltaïques de la Centrale Villageoise sur Les Haies – Source SMA.....	34
Figure 33 : Triangle des puissances - Source Enedis .....	35
Figure 34 : Gestion de la puissance réactive avec un facteur de charge fixe – Source SMA .....	35
Figure 35 : Gestion de la puissance réactive avec un facteur de charge fonction de la puissance active injectée - Source SMA .....	36
Figure 36 : Gestion de la puissance réactive fonction de la tension .....	36
Figure 37 : Lien entre le facteur de charge et la puissance réactive .....	36
Figure 39 : Topologie des installations photovoltaïques pilotées.....	37

Figure 40 : Courbe de production illustrant le pilotage en actif des onduleurs.....	41
Figure 41 : Illustrations d'un écrêtage de production et impact sur la tension – Source Enedis.....	42
Figure 42 : Infrastructure de mesure HTA mise en place dans le poste "Ecole" - Source Nexans.....	43
Figure 43 : Tension HTA au niveau du Poste Source et du poste HTA/BT "Ecole" .....	44
Figure 44 : Creux de tension HTA - Source Enedis .....	45
Figure 45 : intensités en tête des départs - Source Enedis .....	45