



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Office fédéral de l'énergie OFEN
Recherche énergétique et cleantech

Rapport final Novembre 2019

Compensation d'énergie réactive de l'usine Camille Bloch avec des onduleurs PV



Source: Chocolats Camille Bloch SA



PLANAIR

Ingénieurs conseils en énergies et environnement

PLANAIR SA ingénieurs conseils SIA

info@planair.ch | www.planair.ch | N° TVA 541 996

Date: 26 novembre 2019

Lieu: Yverdon-les-Bains

Prestataire de subventions:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :

Planair SA
Rue Galilée 6
1400 Yverdon-les-Bains
www.planair.ch

Auteur(s):

Marine Cauz, Planair SA, marine.cauz@planair.ch
Florent Jacqmin, Planair SA, florent.jacqmin@planair.ch
Lionel Perret, Planair SA, lionel.perret@planair.ch

Suivi du projet à l'OFEN:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN: SI/501560-01





Zusammenfassung

Die Entwicklung von erneuerbaren Energien, die durch eine zunehmend dezentrale Produktion gekennzeichnet ist, erfordert neue Kontrollmethoden, um das Gleichgewicht des schweizerischen Stromnetzes zu gewährleisten. Dieses Projekt zielt darauf ab, eine wenig bekannte Eigenschaft von Photovoltaik-Wechselrichtern hervorzuheben. Neben der Wirkleistungserzeugung haben die Wechselrichter der neuesten Generation die Fähigkeit, Blindleistung zu erzeugen. Im Rahmen dieses Pilotprojekts wird die Implementierung dieser Technologie detailliert beschrieben und anschließend mit Tests auf einer Industrieanlage validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Wechselrichter zu vergleichsweise attraktiven Kosten eine größere Flexibilität in den Steuerungsverfahren bieten als herkömmliche Kompensationsschranken. Neben der industriellen Blindleistungskompensation ermöglicht ein solches System auch breitere Tag- und Nachtdienste wie Netzdienste (*'Spannungshaltung'*), ohne die Wirkleistungserzeugung der Wechselrichter zu beeinträchtigen.

Résumé

L'émergence des énergies renouvelables, caractérisée par une production de plus en plus décentralisée, nécessite de nouvelles méthodes de contrôle pour assurer l'équilibrage du réseau électrique suisse. Ce projet vise à mettre en évidence une fonctionnalité peu connue des onduleurs photovoltaïques. En plus de la production de puissance active, les onduleurs de dernière génération ont la capacité de produire de la puissance réactive. Dans le cadre de ce projet pilote, la mise en place de cette technologie est détaillée, puis validée avec des tests réalisés sur un site industriel. Les résultats montrent que les onduleurs offrent une plus grande flexibilité dans les méthodes de contrôle que les armoires de compensation classiques à un coût comparativement attractif. Outre la compensation de puissance réactive industrielle, un tel système permet de fournir des services plus larges de jour comme de nuit tels que des services réseaux (*'Maintenance de la tension'*), sans forcément impacter la production de puissance active des onduleurs.

Summary

The emergence of renewable energies, characterized by an increasingly decentralized production, requires new control methods to ensure the balancing of the Swiss electricity grid. This project aims to highlight a little-known feature of photovoltaic inverters. In addition to active power production, the latest generation inverters have the ability to produce reactive power. As part of this pilot project, the implementation of this technology is detailed and then validated with tests carried out on an industrial site. The results show that inverters offer greater flexibility in control methods than conventional reactive compensation at a comparatively attractive cost. In addition to industrial reactive power compensation, such a system makes it possible to provide broader day and night services such as network services (*'Voltage support'*), without necessarily impacting the active power production of the inverters.



Take-home messages

Afin d'atteindre les objectifs climatiques fixés par la Confédération, de nombreux projets de centrales de production photovoltaïque voient le jour en Suisse. Cependant ces nouvelles centrales électriques sont aujourd'hui encore sous-exploitées. En journée, lorsque la production photovoltaïque n'est pas à son maximum, ou la nuit, quand elle est nulle, les onduleurs pourraient être utilisés pour équilibrer la partie réactive du réseau et ainsi participer au service système de Swissgrid '*Maintien de la tension*'. Cette participation permettrait de mieux exploiter notre réseau électrique et de mettre en valeur ce nouvel atout des énergies solaires.

De manière plus large, et indépendamment du projet pilote présenté ci-dessous, les installations photovoltaïques posent différents problèmes d'intégration au sein du réseau électrique. En particulier, avec le nombre grandissant d'installations photovoltaïques installées, certains réseaux basse tension ont atteint leur capacité maximale de ressources énergétiques distribuées qu'ils peuvent accueillir en fonctionnement normal sans problèmes, tel que les surtensions. Avec un réglage adapté des onduleurs, c'est-à-dire en ajustant la puissance active et réactive générée de l'ensemble des onduleurs d'un même réseau, il est possible d'éviter ou d'atténuer les problèmes de surtension survenant dans les réseaux basse tension. En conclusion, cette fonctionnalité peu connue des onduleurs photovoltaïques offre un panel de solutions actuellement largement sous-exploité à différentes problématiques, plus large que la simple compensation de puissance réactive industrielle.



Table des matières

Zusammenfassung.....	4
Résumé.....	4
Summary	4
Take-home messages	5
Table des matières	6
Liste des abréviations.....	8
1 Introduction.....	9
1.1 Contexte et arrière-plan.....	9
1.2 Justification du projet.....	9
1.3 Objectifs du projet.....	10
1.4 Composition de l'équipe du projet.....	10
2 Notions préliminaires.....	11
2.1 Puissance réactive	11
2.2 Convention de signe.....	13
2.3 Facturation de la puissance réactive	14
2.4 Compensation traditionnelle : les bancs de condensateurs.....	15
2.5 Compensation alternative : les onduleurs photovoltaïques.....	16
2.5.1 Principe.....	16
2.5.2 Avantages et inconvénients	17
2.5.3 Fonctionnement.....	18
3 Description des installations.....	19
3.1 Site pilote	19
3.2 Architecture électrique du site pilote	19
3.3 Installation photovoltaïque.....	20
3.4 Analyse de la consommation réactive du site pilote.....	21
3.5 Caractéristiques de la compensation réactive avec les onduleurs photovoltaïques.....	24
3.6 Implémentation du régulateur.....	25
3.6.1 Le contrôleur.....	25
3.6.2 L'outil de commande.....	26
3.6.1 Le point de mesure.....	26
3.7 Communication.....	26
3.8 L'interface Homme-Machine.....	27
3.8.1 Page HOME	27
3.8.2 Page CONTROL	28
3.8.3 Page TRIOS CB	29
3.8.4 Page TRIOS Agora	29
3.8.5 Page SETTINGS LOG	30



3.8.6	Page MASTERPACT	30
4	Procédure et méthode.....	31
4.1	Régulation et point de fonctionnement.....	31
4.1.1	Régulation	31
4.1.2	Point de fonctionnement.....	31
4.1.3	Illustration sur l'IHM	31
4.2	Protocoles de tests	32
4.3	Analyse économique	40
5	Résultats et commentaire.....	42
5.1	Temps de réaction	42
5.2	Compensation effective	42
5.3	Résultats de jour et de nuit.....	42
5.4	Limite de l'étude	43
6	Conclusions et résumé.....	44



Liste des abréviations

Notations	Significations
PV	Photovoltaïque
GRD	Gestionnaire de réseau de distribution
CB	Camille Bloch (site pilote)
API	Automate de programmation
CB+	Bâtiment de production du site pilote
Agora	Bâtiment administratif Agora du site pilote
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
IHM	Interface homme-machine
TRIO	Onduleur photovoltaïque ABB
MT	Moyenne tension
BT	Basse tension
CB1	Point électrique n°1 du site pilote
CB2	Point électrique n°2 du site pilote
IFE	Centrale de mesure BT – Interface Ethernet pour un disjoncteur



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

L'émergence des énergies renouvelables, caractérisée par une production de plus en plus décentralisée, entraîne une modification profonde de notre système électrique. Pour continuer de répondre au mieux aux besoins énergétiques, de nouvelles méthodes de contrôle doivent être développées afin d'assurer l'équilibrage du réseau électrique suisse.

Parmi les gros consommateurs énergétiques, les sites industriels ont la particularité de consommer en plus de l'énergie active, dite utile, une part d'énergie réactive. Cette énergie réactive n'est pas directement utile, mais est présente lorsque les charges électriques connectées sont à caractère inductif (moteurs, fours à induction, etc.). La consommation de puissance réactive est tolérée par le fournisseur d'électricité dans une certaine mesure. Si la valeur limite est dépassée, le fournisseur d'électricité facture alors cette puissance réactive. Les industries sont donc fréquemment équipées d'installations de compensation de la puissance réactive (batteries de condensateurs) afin de ne pas dépasser les valeurs limites.

Ce projet vise ainsi à mettre en évidence une fonctionnalité méconnue des onduleurs photovoltaïques (PV). En plus de la production d'énergie active, les onduleurs de dernière génération ont la capacité de produire de la puissance réactive. Dans le cadre de ce projet pilote, la puissance réactive pourra être produite en fonction soit des besoins d'un site industriel, soit pour des besoins de service système par un système de pilotage en continu des onduleurs. Des premières réalisations avec cette technologie sont en cours de mise en œuvre sur d'autres sites, mais leur bon fonctionnement n'a pas été diffusé.

1.2 Justification du projet

La mise en évidence de la capacité des onduleurs à compenser de la puissance réactive permettrait de solutionner différents défis de plus en plus rencontrés :

1. Proposer une solution alternative ou complémentaire aux batteries de condensateurs.
2. Réguler le ratio Q/P où

$$\frac{Q}{P} = \frac{\text{Puissance réactive du site comptabilisée par le GRD}}{\text{Puissance active du site soutirée au réseau}}$$

Certains GRDs facturent la puissance réactive proportionnellement à la quantité de puissance active soutirée du réseau. Cependant de nombreux industriels mettent en place des installations photovoltaïques qui ont pour effet de limiter la quantité de puissance active soutirée et donc de réduire la quantité de puissance réactive que l'industriel peut refouler dans le réseau sans être facturé. De plus, le point d'injection photovoltaïque est parfois localisé après les batteries de condensateur de l'industrie, ce qui fausse les mesures.

3. Exploiter les onduleurs PV pour des services réseaux.



1.3 Objectifs du projet

L'objectif global de ce projet est de démontrer la faisabilité du recours à des onduleurs PV pour la génération et/ou la consommation de puissance réactive sur un site de production industrielle. Pour évaluer ce potentiel, nous avons décomposé l'étude en deux étapes.

1. Dans un premier temps, le projet a étudié la capacité des onduleurs à compenser de la puissance réactive au sein même du réseau privé de l'industriel afin de :
 - Présenter une alternative (intégrale ou partielle) aux batteries de condensateurs statiques standards,
 - Réguler le ratio Q/P afin d'éviter des frais de facturation de puissance réactive.
2. Ensuite, la capacité des onduleurs à apporter un service au réseau a été évaluée. En sa qualité de gestionnaire du réseau de transport, Swissgrid a mis en place un service système « *Maintien de la tension* ». Ce service système a pour objectif de maintenir la tension dans le réseau dans une plage sûre et stable. Le contrôle continu des onduleurs et leur capacité à produire et consommer de la puissance réactive peut permettre le maintien de la tension dans la plage d'exploitation visée.

En parallèle de ces études techniques, une analyse financière a été menée afin d'analyser la pertinence de tels mécanismes de contrôle, dans une approche de pragmatisme technico-économique.

1.4 Composition de l'équipe du projet

Ce projet pilote a rassemblé les partenaires suivants :

PARTENAIRES	DESCRIPTION	RÔLE ET RESPONSABILITES PRINCIPALES
Camille Bloch	Usine de chocolat implantée à Courtelary dans le canton de Berne	<ul style="list-style-type: none">- Mise à disposition du site- Aide à la réalisation- Coordination interne et support sur le site
Planair	Bureau d'ingénieurs conseils responsable de l'étude	<ul style="list-style-type: none">- Planification de l'installation PV- Gestion du projet- Contrôle d'efficacité- Etude économique- Transfert de savoir
ABB	Entreprise spécialisée dans les technologies de l'énergie et de l'automation	<ul style="list-style-type: none">- Fourniture des onduleurs PV- Fourniture du régulateur- Transfert de savoir
Société des Forces Electriques de la Goule (La Goule)	Fournisseur d'électricité local	<ul style="list-style-type: none">- Contrôle d'efficacité- Transfert de savoir

L'OFEN ainsi que le canton de Berne participent au projet en tant que contributeurs financiers.

Table 1 : Composition de l'équipe responsable du projet

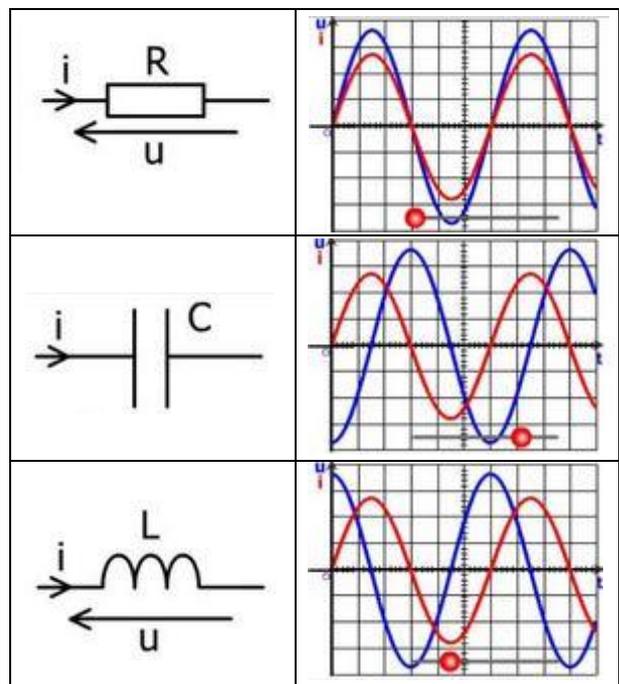


2 Notions préliminaires

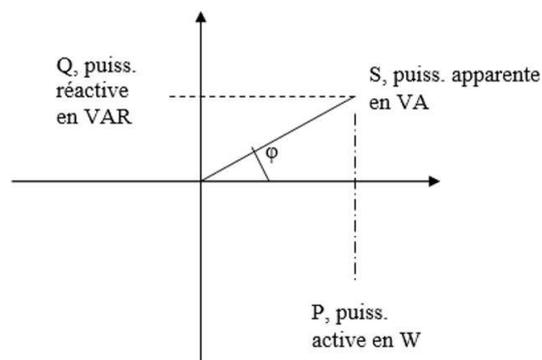
2.1 Puissance réactive

La puissance réactive est une expression du déphasage entre courant et tension dans un système électrique alternatif. Pour rappel, les trois composants électriques fondamentaux permettant de modéliser tout circuit électrique sont la résistance, la capacité et l'inductance, et leur comportement théorique et idéal est le suivant en relation avec la puissance réactive :

- Une tension alternative appliquée aux bornes d'une résistance engendre un courant alternatif en phase avec cette dernière. La résistance idéale ne consomme donc pas de puissance réactive
- Une tension alternative appliquée aux bornes d'une capacité engendre un courant alternatif en avance sur cette dernière. On dit que la capacité produit de la puissance réactive.
- Une tension alternative appliquée aux bornes d'une inductance engendre un courant alternatif en retard avec cette dernière. On dit que l'inductance consomme de la puissance réactive.



La puissance électrique, résultat d'une multiplication entre courant et tension, peut être caractérisée, lorsqu'elle est alternative, par un diagramme vectoriel tel que représenté ci-dessous, facilitant grandement la lecture de valeurs électriques courantes :



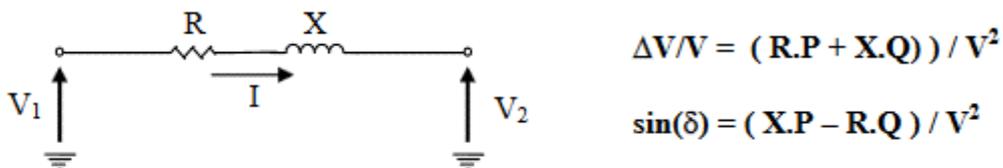


Comme représenté ci-dessus, la puissance apparente en VA est donc composée de la puissance active en W et de la puissance réactive en VAR. Les formules classiques de trigonométrie peuvent nous permettre de calculer la puissance apparente : $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

La puissance réactive (ou le déphasage courant-tension) est indésirable dans le transport de l'énergie électrique, car elle participe à une augmentation de la charge thermique des composants en augmentant la puissance apparente (réelle) traversant tout composant. C'est la raison pour laquelle elle est régulièrement compensée à différents points et tous niveaux du réseau électrique. La plupart des charges de nos industries ou de nos maisons ont un caractère inductif, ce qui explique pourquoi il existe un besoin de condensateurs pour compenser le déphasage aux points de raccordement réseau.

Les charges et les lignes électriques peuvent se représenter à titre d'équivalence par un circuit électrique composé par les trois éléments fondamentaux, R, L et C, décrits plus hauts, constituant ainsi un modèle plus ou moins complexe en fonction de la nature ou l'objet de l'étude.

Il est par exemple courant que dans le cadre d'une étude électrique de très grande échelle, les lignes électriques de transport, connectant un gros centre de production à une importante région de consommation électrique, soient schématisées de la manière suivante :



Avec :

- R en ohm (Ω) la résistance équivalente de la ligne entre la source d'alimentation (côté 1) et récepteur (côté 2),
- X en ohm (Ω) la réactance équivalente de la ligne entre la source d'alimentation (côté 1) et récepteur (côté 2),
- V en Volt (V) la tension simple en tout point du circuit,
- P en Watt (W) la puissance active générée par le circuit,
- Q en Volt Ampère Réactif (Var) la puissance réactive générée par le circuit,
- δ en degré ou en radian ($^\circ$ ou rad) l'angle de la tension en tout point du circuit.

Il existe également un lien fort entre la puissance réactive Q et la tension U :

A la fréquence de 50Hz utilisée dans notre réseau électrique, les lignes de transport électrique en haute tension sont plutôt inductives ($R \ll X$), ce qui permet de déduire en lisant les deux équations que la puissance réactive aura un fort impact sur les variations de tension du réseau électrique, et que la puissance active aura un fort impact sur l'angle de la tension.

Dans le cas de petits réseaux de distribution, les lignes sont à la fois résistives et inductives. Les puissances actives et réactives auront souvent un impact comparable sur la tension.

L'objectif de notre projet est donc de participer à ce que la puissance consommée au point d'injection de l'industrie soit en majeure partie constituée de puissance active, afin de ne pas encombrer le réseau avec une puissance réactive indésirable. La part de puissance réactive se détermine souvent sur un compteur via la mesure du facteur de charge (facteur de charge = $P / S = \cos \phi$).



2.2 Convention de signe

Dans un souci de clarté lors de la différenciation des puissances actives soutirées et réinjectées dans le réseau, ainsi que les puissances réactives inductives et capacitives, l'étude se base sur le principe des quatre cadrans présentés ci-dessous.

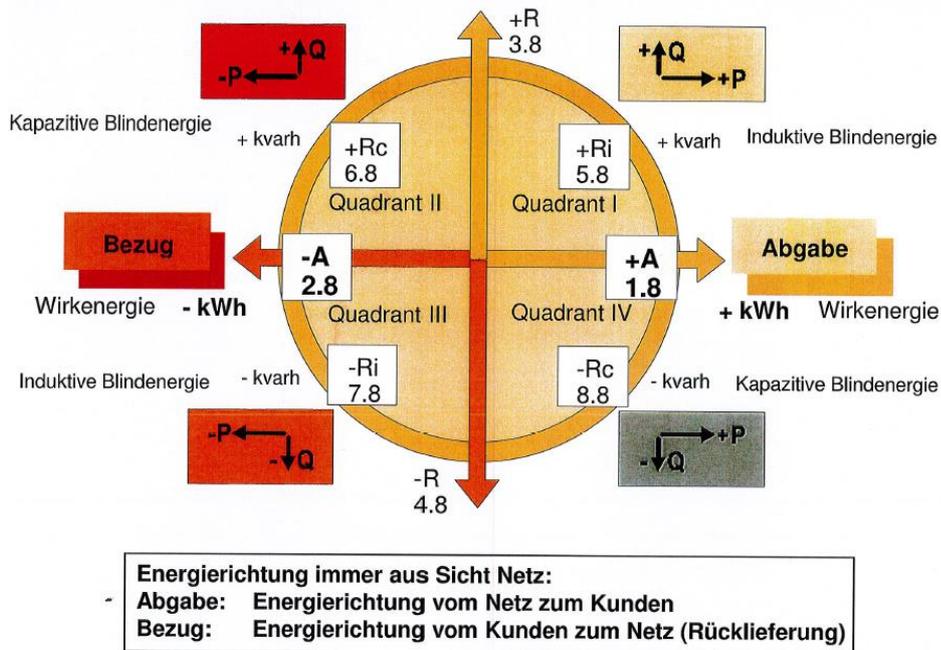


Figure 1 : Principe des quatre quadrants [Source : BKW]

En résumé, la convention de signe utilisée au point de mesure est la suivante :

Puissance active

- $P > 0$ De la puissance active est soutirée du réseau
- $P < 0$ De la puissance active est réinjectée dans le réseau
(i.e. les panneaux PV produisent plus d'énergie que la consommation de l'usine)

Puissance réactive

- $Q > 0$ La puissance réactive est dite inductive
- $Q < 0$ La puissance réactive est dite capacitive



2.3 Facturation de la puissance réactive

En raison de son impact indésirable, les gestionnaires de réseau imposent aux industriels un $\cos \phi$ en dessous duquel ils facturent la puissance réactive. L'un des principes de facturation de puissance réactive les plus répandus consiste à facturer cette puissance lorsque le ratio Q/P excède un pourcentage défini, en général 50%.

$$(1) \quad \frac{Q}{P} = \frac{\text{Puissance réactive du site comptabilisée par le GRD}}{\text{Puissance active du site soutirée au réseau}} < 50\%$$

Ce ratio impose alors aux industriels de maintenir un $\cos \phi$ supérieur à 0.8 selon les formules classiques de trigonométrie.

Soit,

$$(2) \quad \cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

$$(3) \quad \frac{Q^2}{P^2} = \frac{1 - \cos(\phi)^2}{\cos(\phi)^2} < (1/2)^2$$

Qui fournit le résultat suivant :

$$(4) \quad \cos \phi > \sqrt{2/3} = 0.8$$

La principale différence de facturation d'un fournisseur à l'autre réside dans la définition de Q au sein du ration Q/P (1), par conséquent la puissance réactive comptabilisée peut varier. Ces différences de définition impliquent différents schémas tarifaires qui impactent les algorithmes de décision qui peuvent être implémentés pour la compensation.

1. Certains fournisseurs, dont La Goule, facturent uniquement la puissance réactive inductive. Comme le fournisseur différencie la puissance capacitive et inductive, il est nécessaire de compenser la consommation inductive en produisant du capacitif au sein d'un même pas de temps, en général 15 minutes. En d'autres termes, toutes les 15 minutes, une moyenne de la puissance réactive est calculée. Dans le cas d'une surcompensation, où la puissance réactive nette deviendrait alors capacitive, cette dernière ne serait pas comptabilisée par le GRD et la valeur inductive pour ce pas de temps aurait une valeur nulle.
2. D'autres, comme BKW, additionnent (en valeur absolue) les puissances réactives capacitive et inductive. Par conséquent, toute surcompensation de la puissance réactive est facturée au même titre que la consommation inductive. Dans ce cas de figure, il est important de compenser dans un même pas de temps et de viser une puissance réactive nulle afin d'éviter une double facture, l'une pour l'inductif et l'autre pour le capacitif.

Dans le cas d'étude présenté dans ce rapport, le fournisseur d'électricité local, La Goule, facture la puissance réactive à 4.1 cts/kvarh lorsque la puissance réactive **inductive** dépasse les 50% de la puissance active, soit lorsque le $\cos \phi$ est inférieur à 0.8.



2.4 Compensation traditionnelle : les bancs de condensateurs

Afin d'éviter ou de limiter la facturation de puissance réactive, la majorité des industriels mettent en place un système de compensation en parallèle de leurs équipements, constitué de batteries de condensateurs. Ce système permet de compenser le retard du courant sur la tension, induit par le caractère inductif des équipements, afin de maintenir la valeur du $\cos \phi$ dans une plage de valeur adéquate.

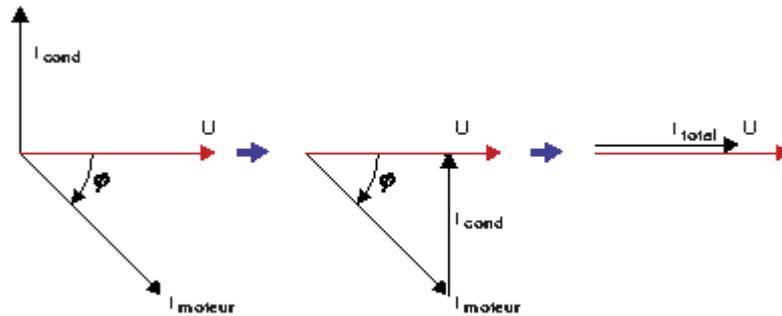


Figure 2 : Principe de compensation [source: energieplus-lesite.be]

Ce dispositif relativement simple est en général centralisé du côté basse tension. Une batterie de condensateurs est constituée d'un ensemble de condensateurs qui s'enclenchent en fonction des besoins selon un pas de régulation prédéfini afin de respecter la plage de valeurs admissibles du $\cos \phi$. Ce système de compensation a largement fait ses preuves : il est facile à mettre en place, relativement bon marché et présente peu d'inconvénients. On retrouve également différents types de compensation dont les principales sont la compensation individuelle et globale.

La compensation individuelle est privilégiée pour un équipement de grosse puissance qui demeure sous tension pendant la majeure partie de la journée, tel qu'un moteur entraînant un ventilateur ou un compresseur. Dans ce cas, la puissance réactive est produite directement là où elle est consommée. Les câbles électriques ont l'avantage d'être ainsi mieux exploités.

La compensation globale consiste à centraliser la production de puissance réactive à un seul endroit, généralement dans le poste MT. Cette concentration est financièrement plus intéressante et permet une surveillance/maintenance plus aisée. Cette solution est facile à mettre en place sur des anciennes ou nouvelles installations, mais le choix du pas de régulation est particulièrement important pour éviter tout sous ou surcompensation de puissance réactive. Le principal défaut en comparaison de la compensation individuelle est que le $\cos \phi$ est équilibré sur les lignes extérieures, mais les lignes intérieures à l'usine peuvent rester mal exploitées.

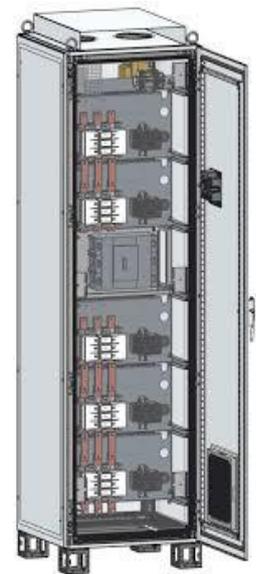


Figure 3: Illustration d'une batterie de condensateurs [source: ABB]

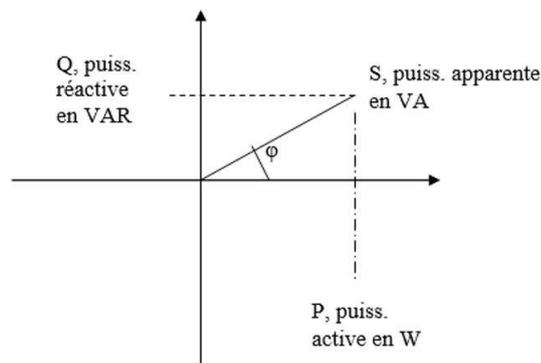


2.5 Compensation alternative : les onduleurs photovoltaïques

2.5.1 Principe

Par définition, un onduleur est un appareil qui transforme un courant continu en courant alternatif. Dans le cas des onduleurs photovoltaïques, l'objectif est de convertir le courant continu généré par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif utilisé par les équipements industriels et le réseau.

Dans le cadre de ce projet, l'idée est d'exploiter la capacité des onduleurs à déphaser le courant et la tension afin de fournir une puissance réactive capacitive ou inductive. Ce travail de compensation n'implique pas d'augmentation de consommation de l'onduleur, à l'exception de la puissance de veille la nuit qui est très faible. L'impact éventuel sur l'installation photovoltaïque est une limitation de la puissance active maximale produite. En d'autres termes, cette compensation est « gratuite » pour l'industriel à condition de compenser des puissances réactives limitées. L'impact sur la production de puissance active peut être déterminé sur base du diagramme vectoriel présenté précédemment.



Les puissances P et Q s'expriment comme suit :

$$\begin{array}{l} P = S * \cos \phi \\ Q = S * \sin \phi \end{array} \quad \left| \quad \text{avec } S^2 = P^2 + Q^2 \right.$$

La puissance nominale des onduleurs S_N peut être obtenue à partir de la documentation technique. Connaissant la puissance réactive à compenser Q_{comp} , la nouvelle puissance active maximale que peuvent produire les onduleurs peut être déterminée :

$$P_{max} = \sqrt{(S_N^2 - Q_{comp}^2)}$$

Si les onduleurs photovoltaïques produisent une puissance active inférieure à P_{max} lorsqu'ils compensent Q_{comp} , la compensation de puissance réactive n'a aucun impact sur la production de l'installation photovoltaïque.



2.5.2 Avantages et inconvénients

L'exploitation des onduleurs PV pour la compensation de puissance réactive offre, premièrement, une certaine **flexibilité** en cas de modification de la production et/ou des caractéristiques de la charge. Typiquement, l'ajout d'une installation PV implique généralement une réduction de la puissance active soutirée du réseau et donc une réduction de la quantité de puissance réactive qui peut être consommée par les sites industriels sans frais additionnels. Les onduleurs peuvent alors servir d'appui à la batterie de compensation existante afin de compenser cette différence, voire éventuellement remplacer complètement la batterie de compensation. Ils pourraient également être utilisés dans le cas d'une extension d'usine où les bancs de condensateurs deviendraient insuffisants. Deuxièmement, les onduleurs sont capables d'agir dans les deux sens, c'est-à-dire qu'ils peuvent fournir de la puissance réactive capacitive ou inductive. Cela est particulièrement utile pour les services réseau ou pour le maintien d'une puissance réactive nulle au point de mesure. Finalement, cette compensation est « **gratuite** » dans un certain intervalle, comme démontré ci-dessus, étant donné que les coûts de maintenance annuelle doivent être payés pour l'installation photovoltaïque.

D'un point de vue des inconvénients, citons tout d'abord la condition qu'une **installation photovoltaïque soit installée** ou en voie d'installation sur le site. Cette contrainte est essentielle, car il n'y aurait aucun intérêt de remplacer un système qui a largement fait ses preuves par des équipements plus volumineux, pour une même quantité de puissance réactive. Ensuite, si une installation PV est présente sur le site, la compensation de puissance réactive avec les onduleurs n'a de sens que si la batterie de compensation est sous-dimensionnée. En effet, si un banc de condensateurs est disponible sur le site, celui-ci devrait être privilégié afin d'éviter de **brider la quantité de puissance active** produite par les onduleurs. Cependant, si ce banc de condensateurs arrive en fin de vie, il ne serait pas nécessaire de réinvestir dans une nouvelle armoire, et les onduleurs pourraient remplacer ces condensateurs. Enfin, il pourrait être nécessaire de **surdimensionner** légèrement les onduleurs afin de limiter la compensation de puissance réactive qui peut être générée sans impacter la production de puissance active. Cela aurait alors un impact financier, car aujourd'hui les onduleurs sont habituellement sous-dimensionnés, entre 80 et 90% de la puissance PV.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Flexibilité- Puissance réactive capacitive et inductive- Pas de surcoût de maintenance	<ul style="list-style-type: none">- Installation PV requise- Risque de brider la production de puissance active- Besoin potentiel de surdimensionner les onduleurs



2.5.3 Fonctionnement

Pour établir le principe de contrôle des onduleurs, nous avons schématisé un site industriel avec le schéma physique suivant :

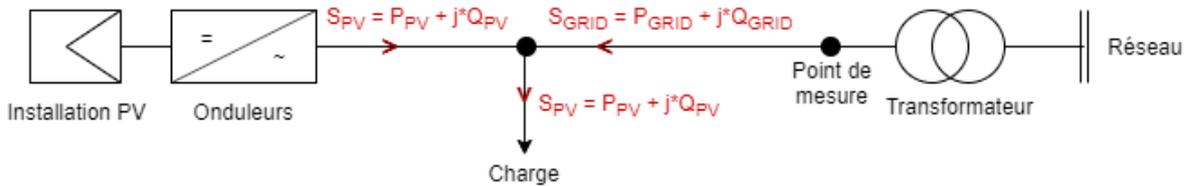


Figure 4: Description physique d'un site industriel équipé d'une installation PV

A l'aide de ce schéma, nous pouvons identifier l'entrée S_{PV} , représentant la puissance produite par les onduleurs, et la sortie S_{GRID} , représentant la puissance au point de mesure, de notre futur système de contrôle. La puissance soutirée par la charge, S_{LOAD} , est associée aux perturbations du système. La charge inclut la consommation de l'usine ainsi que les batteries de compensation éventuelles. En d'autres termes, notre système de contrôle vise à atteindre une valeur désirée S_{GRID}^* au point de mesure en fournissant une entrée S_{PV}^* et en tenant compte de la perturbation S_{LOAD}^* . Considérant le sens des puissances produites et soutirées, nous obtenons l'équation suivante :

$$S_{PV} + S_{GRID} = S_{LOAD}$$

En négligeant la dynamique des réseaux internes, la relation entre l'entrée et la sortie du système peut être modélisée au moyen de la fonction de transfert $G(s)$:

$$G(s) = \frac{Q_{PV}}{Q_{GRID}}$$

Afin de contrôler les onduleurs, nous avons implémenté un régulateur classique de type PID. Sur base de la description physique présentée ci-dessus, le schéma de contrôle suivant a été établi :

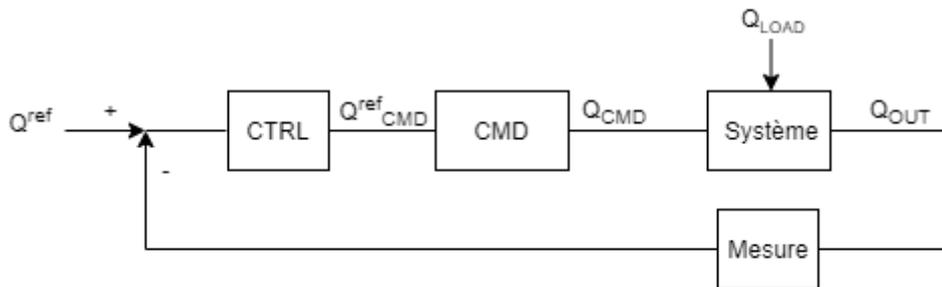


Figure 5: Schéma de contrôle

Le principe de contrôle est le suivant : Sur base d'une valeur cible Q^{ref} le contrôleur détermine une valeur de Q_{CMD}^{ref} correspondant à la valeur cible demandée à l'outil de commande. Cette valeur cible Q^{ref} peut être fixe, adaptée selon la valeur de puissance active soutirée au réseau ou égale à 0 pour obtenir une puissance réactive nulle au point de mesure. En pratique, l'outil de commande fournit une valeur Q_{CMD} , à laquelle s'ajoute la perturbation Q_{LOAD} correspondant à la charge de l'usine. Dans le cas de cette étude, le délai de réaction de la commande, c'est-à-dire les onduleurs, est négligé. Le résultat, Q_{OUT} est mesuré au point de mesure et le système tourne en boucle de manière à maintenir la puissance Q_{OUT} la plus proche possible de la valeur cible Q^{ref} .



3 Description des installations

3.1 Site pilote

Le site industriel pilote de cette étude est l'usine de chocolat Camille Bloch (CB), à Courtelary (BE). L'industriel a décidé d'installer des panneaux photovoltaïques sur son nouveau bâtiment administratif ainsi que sur son usine de production à des fins d'autoconsommation. L'usine a été agrandie en 2017 avec :

- L'extension de la partie production, entraînant la mise en œuvre de nouvelles charges inductives,
- La construction d'un bâtiment administratif, appelé Agora, accueillant les bureaux et un espace réservé au public, comprenant un musée, un magasin et un restaurant.

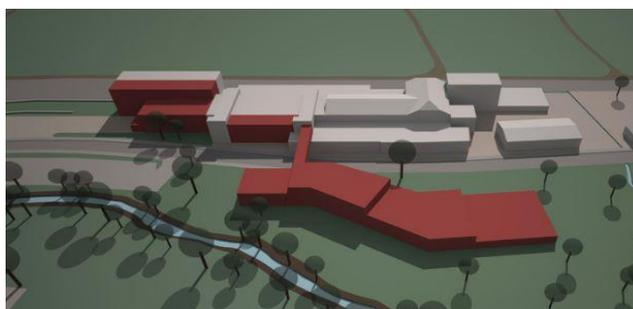


Figure 6 : Illustration du nouveau bâtiment administratif Agora (en rouge en bas) et de l'extension de l'usine de production (en rouge à gauche)

La puissance réactive de l'usine d'origine est compensée au moyen de bancs de condensateurs situés dans le poste moyenne tension. Ce système de compensation initial n'a pas été modifié, suite à l'agrandissement de l'usine, en raison d'une faible augmentation de la puissance réactive et du potentiel des onduleurs photovoltaïques à jouer ce rôle. Il a été décidé de contrôler, après une durée d'exploitation et selon les résultats de la présente étude, si une batterie de condensateurs est nécessaire sur site.

3.2 Architecture électrique du site pilote

L'architecture électrique des bâtiments du site pilote peut être représentée comme sur le schéma ci-dessous. Le point de facturation de CB est le point électrique N°1 (CB1) du schéma, la mesure se faisant en moyenne tension (MT). Le point électrique N°2 représente la nouvelle station désignée sous-station CB2. Les deux points d'injection photovoltaïque, celui de l'installation du bâtiment administratif et celui de l'extension de l'usine, sont tous les deux raccordés à la station CB2.

Compte tenu de contraintes économiques et techniques à se connecter directement au point n°1 en moyenne tension, le contrôle sera mis en œuvre à partir du point de référence n°2, en basse tension. L'étude se portera ainsi sur les données présentes à la station CB2, car les données électriques nécessaires y sont plus accessibles (courant, tension, cos phi, puissance active et réactive). L'ensemble de ces données seront extraites d'une des cellules de la station, le Masterpack.

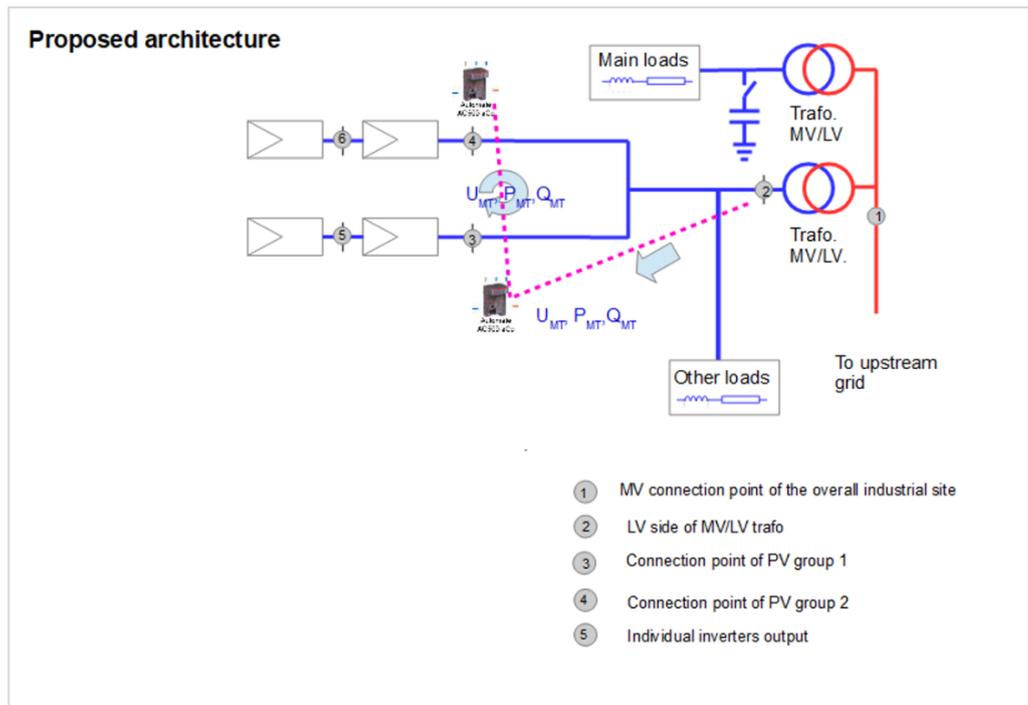


Figure 7 : Schéma électrique simplifié

La station CB2 regroupe les données de production photovoltaïque ainsi que la consommation des nouveaux bâtiments (bâtiment administratif et l'extension de l'usine de production). La principale charge de l'usine de CB est cependant toujours raccordée à la station CB1 comme illustré sur la Figure 3. Par conséquent, la compensation qui peut être faite depuis la station CB2 ne compensera qu'une partie de la charge totale de l'usine. Pour prendre en compte la charge globale, les données de consommation de la station CB1 sont nécessaires. De plus, tout rapport de transformation d'un transformateur est susceptible de varier de +/- 5% ce qui peut induire à partir d'une petite variation en BT une variation plus importante en MT. La quantité d'énergie réactive compensée depuis les données de CB2 ne sera alors pas exactement adaptée à la puissance réactive finalement facturée à CB.

Dans notre cas d'étude, il est actuellement difficile d'accéder aux données présentes à la station CB1 en raison des droits d'accès. C'est pourquoi l'étude se portera uniquement sur la consommation du bâtiment Agora et CB+ au point de mesure CB2.

3.3 Installation photovoltaïque

Des installations PV ont été planifiées sur les deux bâtiments du site pilote :

- Une centrale de 141 kWc sur la toiture du centre administratif Agora,
- Une centrale de 168 kWc sur l'extension du bâtiment de production (CB+).

La puissance cumulée des installations atteint 309 kWc et permet de produire environ 300'000 kWh/an.

Une mise en soumission des installations a été effectuée pour la sélection du constructeur, afin de répondre aux exigences du projet pilote, ainsi qu'aux caractéristiques des bâtiments, notamment la conception architecturale du bâtiment Agora.



L'étude de projet a permis d'identifier le meilleur positionnement des onduleurs en fonction des contraintes de production et de sécurité (incendie notamment). Afin de limiter le transport de courant continu au sein du site et faciliter l'intervention potentielle des SDIS, les onduleurs ont été positionnés :

- Dans un local technique en toiture pour le bâtiment de production,
- Dans un local technique à proximité des toitures situées à l'ouest pour la moitié des onduleurs d'Agora, et dans un local technique au sous-sol pour l'autre moitié

Les onduleurs ont été sélectionnés afin de répondre aux contraintes du projet pilote :

- Pilotage en $\cos \phi$ et en quantité d'énergie réactive produite,
- Communication compatible avec les automates d'ABB.

Les onduleurs installés sont des onduleurs solaires triphasés *TRIO-20.0/27.6* de la marque ABB. Ils sont capables de communiquer en Modbus RTU, permettant le transfert des données de production au contrôleur.

Ces onduleurs permettent de déphaser le courant et la tension jusqu'à 80% de leur puissance nominale. En d'autres termes, chaque TRIO peut compenser une puissance réactive de 16 ou 22 kvar. Comme 2 onduleurs *TRIO-20.0* et 8 onduleurs *TRIO-27.6* ont été installés, l'ensemble des 10 onduleurs présents sur le site permettent de compenser une puissance réactive de 208 kvar (inductif ou capacitif).

Notons également que des onduleurs plus récents permettent aujourd'hui d'ajuster le $\cos \phi$ sur l'ensemble de ses valeurs admissibles, soit entre 0 et 1, permettant ainsi une compensation plus importante par onduleur.

3.4 Analyse de la consommation réactive du site pilote

La consommation de l'usine Camille Bloch a été analysée sur le mois d'août 2019. Ce mois d'été a été choisi pour prendre en compte une production solaire importante : 29.72 MWh sur le mois, entraînant une réduction de la consommation de puissance active soutirée au réseau. Etant donné que la puissance active soutirée est réduite, l'usine dispose d'une marge restreinte pour sa consommation de puissance réactive.

Consommation de jour sur le réseau		Consommation de nuit sur le réseau	
Consommation active, P	218'800 kWh	Consommation active, P	118'880 kWh
Consommation réactive, Q	53'160 kvarh	Consommation réactive, Q	23'880 kvarh
⇒ Q = 24% * P		⇒ Q = 20% * P	

L'analyse de ces consommations montre que l'usine Camille Bloch n'est, aujourd'hui, pas facturée pour sa consommation de puissance réactive inductive comme celle-ci est inférieure à 50% de la puissance active soutirée au réseau. Au vu de ce constat, il n'a pas été jugé nécessaire dans le cadre de cette étude pilote d'accéder au compteur principal de l'usine (CB1) pour compenser la consommation complète de l'usine.



BÂTIMENT CB+
10° Est/ouest Incl. 10°
166.65 Kwc
606 x Trina Solar TCM275

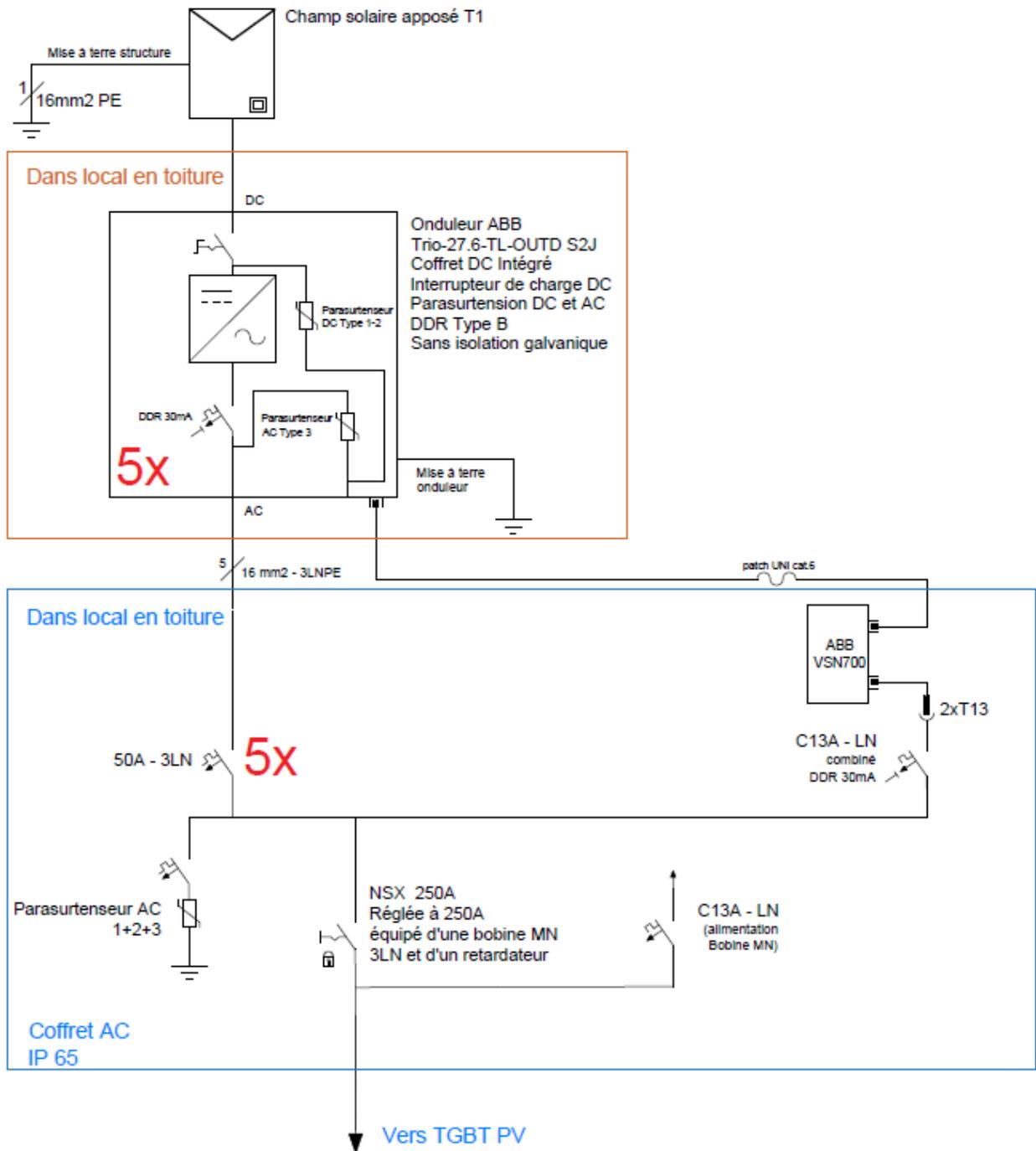


Figure 8 : Schéma de principe bâtiment production (CB+)

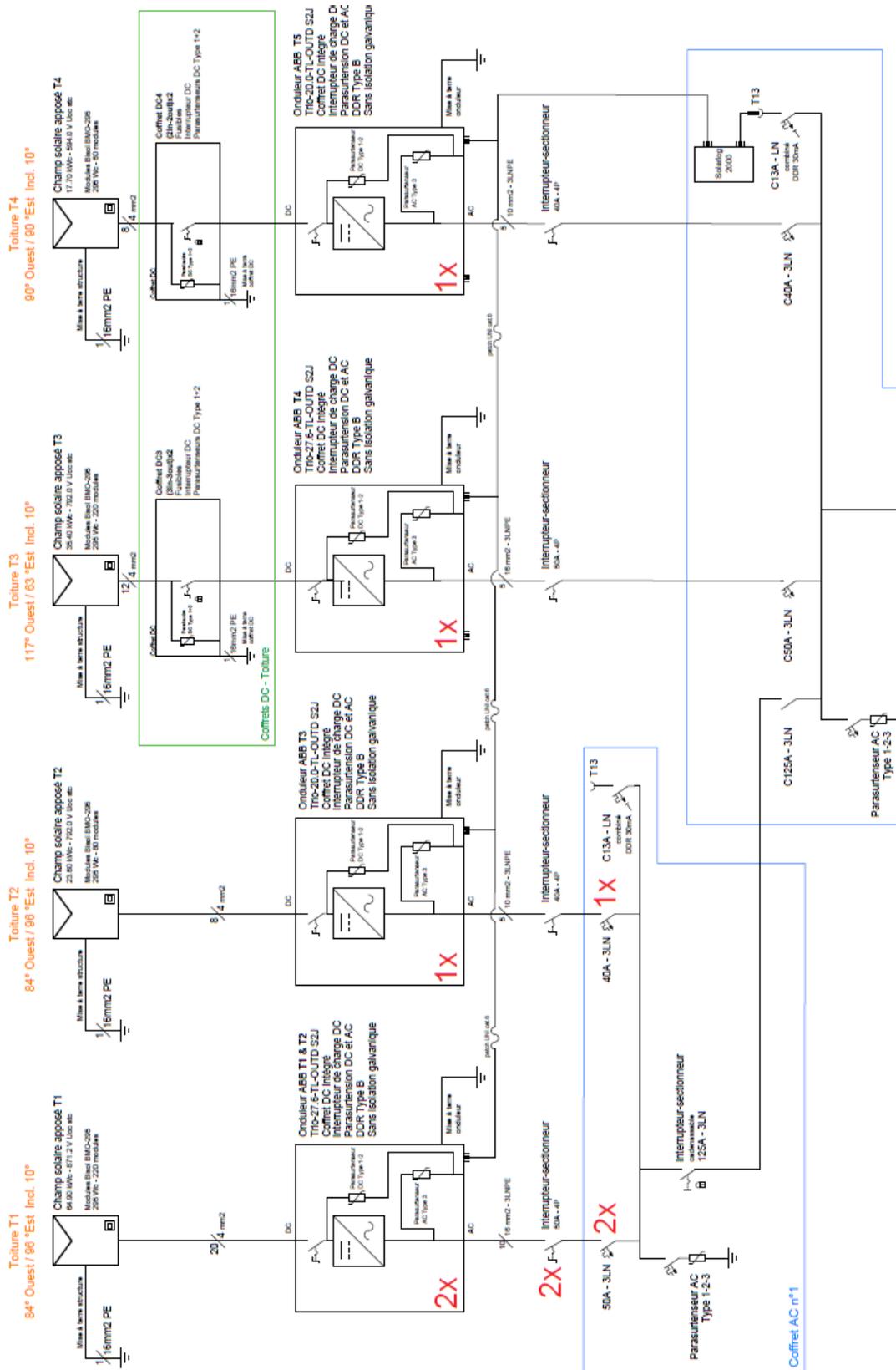


Figure 9 : Schéma de principe bâtiment Agora



3.5 Caractéristiques de la compensation réactive avec les onduleurs photovoltaïques

Les puissances active et réactive des onduleurs sont liées par la formule de puissance apparente mentionnée précédemment : $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$. Sur base de cette formule, il est possible de déterminer l'impact de la compensation sur la production des onduleurs.

En connaissant la puissance nominale totale des onduleurs :

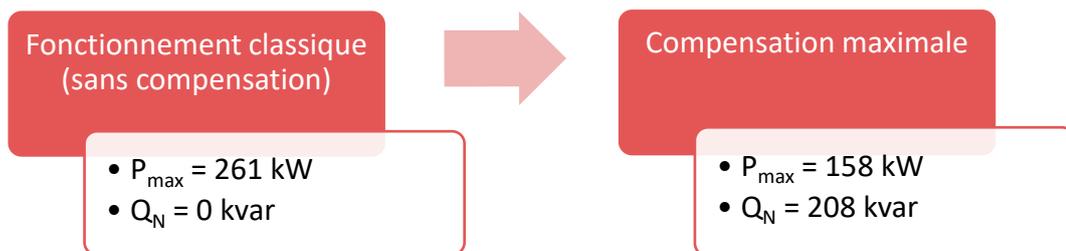
$$S_N = 2 \cdot 20 + 8 \cdot 27.6 = 261 \text{ kVA}$$

Et la quantité maximale de puissance réactive qui peut être produite (inductive ou capacitive) :

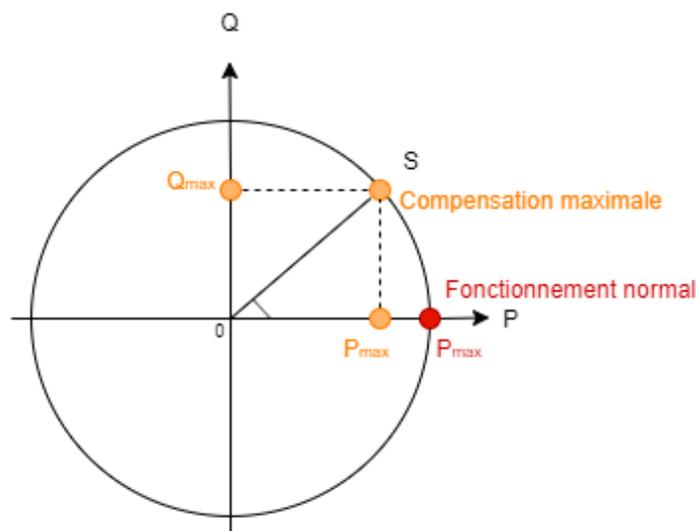
$$Q_N = 208 \text{ kvar}$$

Nous pouvons déterminer la production maximale de puissance active des onduleurs lors d'une compensation maximale¹ :

$$P_{\max} = \sqrt{(S^2 - Q^2)} = \sqrt{(261^2 - 226^2)} = 158 \text{ kW}$$



Ces valeurs peuvent être illustrées sur le cercle trigonométrique suivant :



¹ Ces valeurs de puissance tiennent compte de la marge sur la puissance DC avec laquelle les onduleurs ont été dimensionnés.



3.6 Implémentation du régulateur

Le régulateur a pour objectif de contrôler notre système pour en modifier le point de fonctionnement ainsi que pour potentiellement réagir automatiquement aux perturbations externes. Pour le mettre en place, nous avons ainsi pu reprendre le schéma de contrôle décrit précédemment et l'adapter au cadre de l'étude.

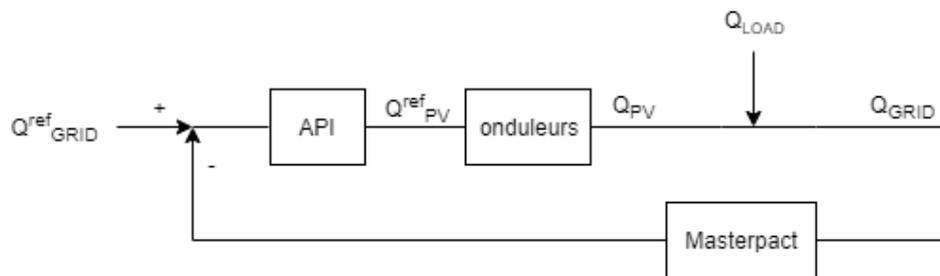


Figure 10 : Schéma de contrôle de l'étude pilote

Concrètement, la valeur de puissance réactive mesurée au Masterpact est comparée en entrée du système à la valeur désirée, Q_{GRID}^{ref} . Connaissant la différence entre ces deux valeurs, appelée l'erreur, le contrôleur envoie alors une consigne aux onduleurs pour que ceux-ci compensent cette différence. La quantité de puissance réactive générée par les onduleurs s'additionne à la charge de l'usine pour fournir la valeur Q_{GRID} correspondant à la valeur mesurée au Masterpact. Grâce à ce régulateur, la consigne transmise aux onduleurs permet de maintenir la valeur de puissance réactive mesurée à la valeur désirée tout en tenant compte automatiquement d'une modification de la charge de l'usine.

3.6.1 Le contrôleur

Tout d'abord, le contrôleur a été implémenté sous forme d'automates programmables (API). Ces automates ont pour objectif de piloter les onduleurs, pour la production ou la consommation de puissance réactive, en fonction des consignes qui leur sont transmises. Lorsque ces équipements sont inactifs, l'onduleur fonctionne alors comme un onduleur classique.

Dans le cadre du projet pilote, deux API ont été fournis par ABB (AC500-eCo, modèle PM566-Eth.), l'un pour les onduleurs de l'Agora et l'autre pour les onduleurs de CB+. Ce composant dispose d'une interface Ethernet (RJ45) afin de permettre la communication Modbus et sont alimentés par une alimentation 24 V DC du type CP-E 24/5A. Afin de faciliter leur gestion et l'affichage des informations une Interface Homme-Machine (IHM), spécialement conçue pour le projet, a été installée sur le site pilote. Le modèle utilisé est le CP635-Web qui dispose de la fonction Web et d'un écran tactile de 7". L'interface web permet le contrôle à distance du système.





3.6.2 L'outil de commande

Dans le cadre de cette étude, la commande correspond aux onduleurs. Ce sont eux qui sont chargés de fournir la puissance réactive demandée par l'API.

3.6.1 Le point de mesure

Les données de consommation de l'exploitant sont réceptionnées au disjoncteur d'introduction de l'usine, type Masterpact, à la station CB2. Une interface Ethernet (IFE) a été installée afin de connecter ce disjoncteur à un réseau Ethernet. C'est en ce point que les données de consommation sont mesurées et enregistrées dans une base de données SQL. Dans le cadre du projet pilote, les données suivantes sont enregistrées :

- Les puissances actives, réactives et le cos phi mesurés au Masterpact
- Quantité de TRIO actifs (valeur comprise entre 0 et 10)
- Puissance active produite par l'ensemble des TRIO
- Puissance réactive, moyennée sur 30 secondes, à l'entrée du PID
- Consigne de puissance réactive demandée au régulateur
- Valeur totale de puissance réactive qu'on demande aux TRIO de produire
- Valeur binaire indiquant si le système est actif ou pas

3.7 Communication

De nombreuses possibilités de communication existent pour connecter entre elles différentes machines. Le choix du protocole de communication est dépendant des caractéristiques des appareils utilisés. Dans le cadre de cette étude, le protocole de communication Modbus a été privilégié en raison de sa simplicité, sa bonne fiabilité et sa bonne adéquation avec les besoins du projet. Ce protocole est disponible sous deux versions, en mode RTU et en mode TCP (Ethernet), qui se différencient principalement par la topologie du réseau de communication. Le principe de communication Modbus est de type maître-esclave où le maître est actif et les esclaves sont complètement passifs. Le maître est responsable de l'écriture et de la lecture dans les registres Modbus de chaque esclave. Le schéma ci-dessous illustre les différents canaux de communication utilisés pour le projet pilote.

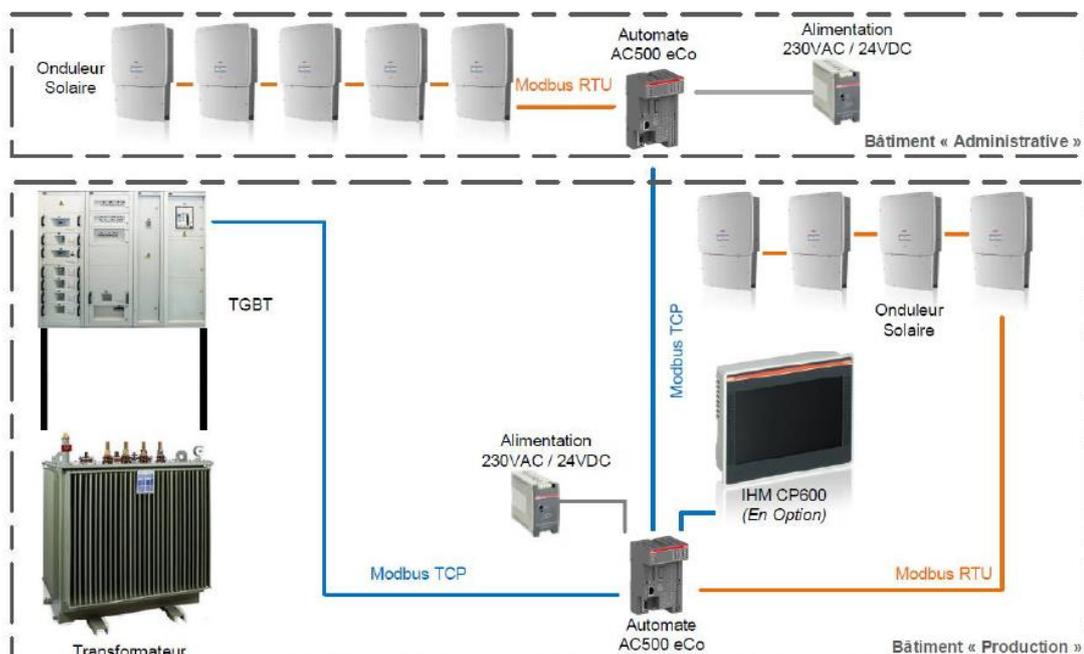


Figure 11: Architecture du réseau de communication



Dans le cas d'une gestion centralisée du système, il est nécessaire que l'un des deux automates joue le rôle de maître et la seconde joue le rôle d'esclave. Dans le cadre de ce projet pilote, nous avons arbitrairement choisi de désigner comme l'automate « maître », celui associé aux onduleurs du bâtiment de production et qualifié « d'esclave » celui du bâtiment administratif. Par conséquent, si l'automate du bâtiment Agora perd sa connexion, le système peut continuer à fonctionner, mais uniquement avec les onduleurs du bâtiment de production. Dans le cas contraire, où l'automate du bâtiment de production perd sa connexion, le système de compensation est mis à l'arrêt, car l'automate d'Agora communique uniquement avec l'automate maître.

Pour des raisons de sécurité, lorsque la connexion entre les automates et les onduleurs est perdue, le système de régulation s'arrête. Les TRIO sont programmés de manière à vérifier toutes les 10 secondes que la connexion avec les automates est fonctionnelle. Après une interruption de plus de 2 minutes, les onduleurs remettent les paramètres standards, c'est-à-dire qu'ils convertissent toujours la puissance active de l'installation PV mais sans compensation de puissance réactive.

3.8 L'interface Homme-Machine

Le contrôle des automates et du système dans son ensemble se fait au moyen de l'interface Homme-Machine (IHM). Cette interface web développée par ABB permet le contrôle à distance et en temps réel de l'installation.

3.8.1 Page HOME

La page HOME offre une vue générale sur les paramètres importants du système.

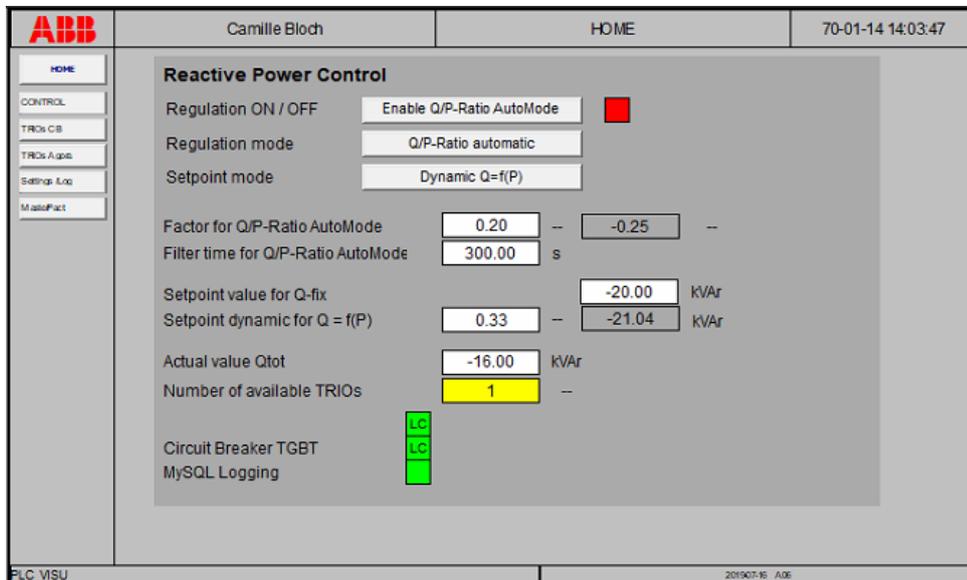


Figure 12 : Illustration de la page HOME de l'IHM

Cette page permet de réaliser les actions suivantes :

- Définir et activer le mode de régulation,
- Définir et activer le type de *setpoint*,
- Indiquer la valeur de puissance réactive mesurée au point de mesure,
- Informer sur le nombre d'onduleurs disponibles,
- Vérifier la connexion des deux automates,
- Vérifier que les données lues au Masterpact sont bien sauveés dans la base de données.



3.8.2 Page CONTROL

La page CONTROL permet de paramétrer les caractéristiques du régulateur.

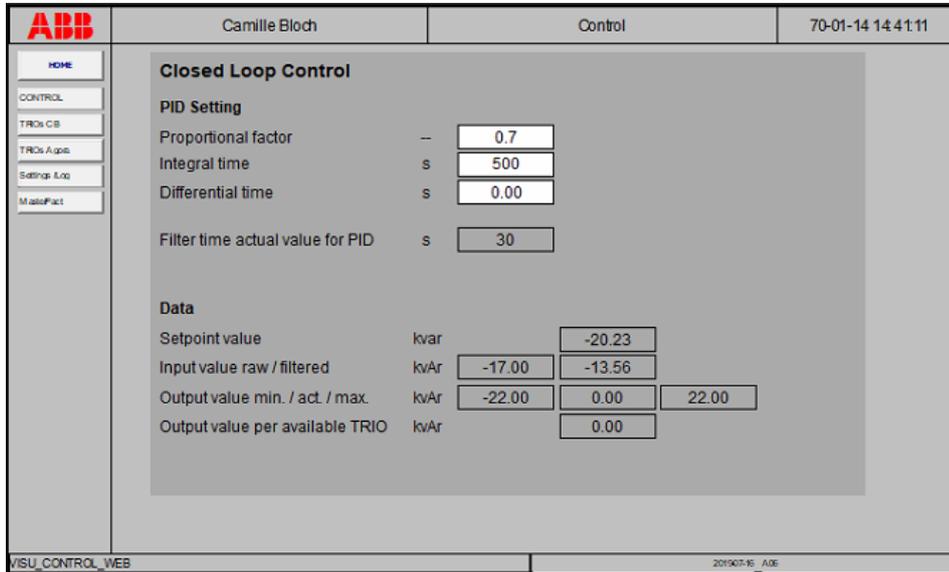


Figure 13 : Illustration de la page CONTROL de l'IHM

Le régulateur implémenté est de type classique PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) qui agit de trois manières :

- **Proportionnel** : l'erreur est multipliée par le facteur proportionnel,
- **Intégral** : l'erreur est intégrée et divisée par le facteur intégral,
- **Dérivé** : l'erreur est dérivée et multipliée par le facteur différentiel.

Dans le cadre de cette étude, nous avons exploité uniquement les facteurs proportionnel et intégral, représentés sur l'image ci-dessous respectivement par les paramètres K_p et T_i . Le choix de leur valeur a été déterminé pour répondre au mieux aux besoins du projet pilote, mais il ne fait pas l'objet de cette étude. La Figure 14 illustre l'effet de ces paramètres sur le régulateur lorsque leur valeur est mal adaptée et la valeur parfaite qui permet d'obtenir une situation idéale telle que représenté par l'image centrale.

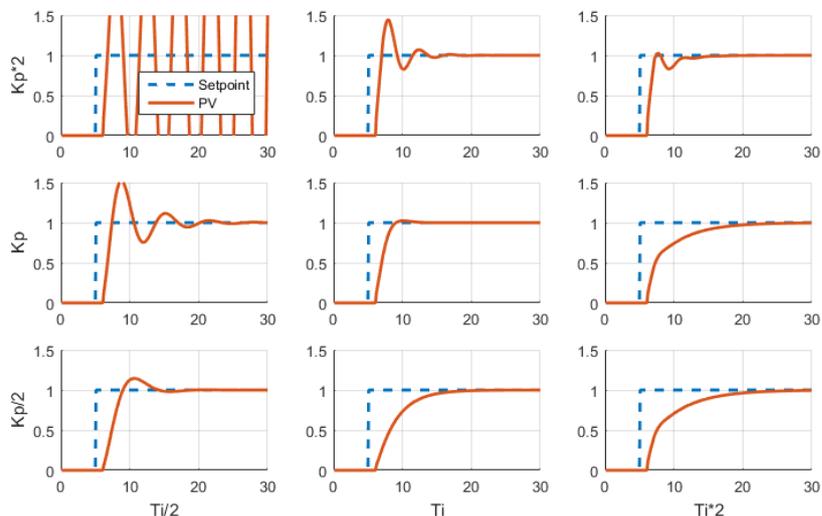


Figure 14 : Effets des paramètres du PID [Source: pid-tuner.com]



3.8.3 Page TRIOS CB

La page TRIOS CB fournit toutes les données disponibles pour les 5 onduleurs photovoltaïques installés sur le bâtiment de production, CB+.

ABB		Camille Bloch		TRIOs CBValues					70-02-02 07:38:25			
HOME	CONTROL	TRIOs CB	TRIOs Agora	Setting Log	Manufact	Description	Unit	TRIO 1	TRIO 2	TRIO 3	TRIO 4	TRIO 5
		Actual Values				Grid Voltage	V	242.9	241.2	241.6	241.5	241.8
						Grid Current	A	7.8	7.9	7.5	6.8	6.7
						Grid Power	W	5630	5662	5342	4895	4895
						Frequency	Hz	49.9	50.0	50.0	49.8	49.8
						Input 1 Voltage	V	601.7	596.1	640.6	517.2	555.5
						Input 1 Current	A	5.3	5.2	4.5	5.2	5.1
						Input 1 Power	W	3143	3123	2877	2677	2784
						Input 2 Voltage	V	607.8	630.3	597.9	550.9	519.9
						Input 2 Current	A	4.4	4.3	4.4	4.3	4.3
						Input 2 Power	W	2631	2719	2639	2355	2228
						Temperature	°C	49.6	50.1	50.3	49.8	49.7
						Temp. Booster	°C	49.0	49.9	49.4	50.2	49.4
						Isolation	MOhm	1.7	1.7	1.7	1.3	1.4
						Wind Gen. Freq.	Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
						Cos Phi	--	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		Setpoint Values				Reactive Power .0.1%		0	0	0	0	0

Figure 15 : Illustration de la page TRIOS CB de l'IHM en mode jour

3.8.4 Page TRIOS Agora

La page TRIOS Agora fournit toutes les données disponibles pour les 5 onduleurs du bâtiment administratif, Agora. Seuls les TRIOS dont les données sont colorées en vert sont disponibles pour la compensation de puissance réactive. Dans le cadre du projet pilote, lors des heures de production photovoltaïque, l'ensemble des onduleurs sont disponibles pour le contrôle, alors que la nuit actuellement un seul onduleur est mis à disposition comme l'usine n'est pas en activité.

ABB		Camille Bloch		TRIOs Agora Values					70-01-14 15:22:11			
HOME	CONTROL	TRIOs CB	TRIOs Agora	Setting Log	Manufact	Description	Unit	TRIO 6	TRIO 7	TRIO 8	TRIO 9	TRIO 10
		Actual Values				Grid Voltage	V	240.4	238.4	240.4	235.0	242.4
						Grid Current	A	0.5	0.7	0.5	0.0	0.5
						Grid Power	W	0	0	0	0	0
						Frequency	Hz	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8
						Input 1 Voltage	V	302.0	300.0	276.0	32.6	298.8
						Input 1 Current	A	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
						Input 1 Power	W	0	-0	0	0	0
						Input 2 Voltage	V	297.9	303.7	274.0	31.1	289.5
						Input 2 Current	A	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
						Input 2 Power	W	-0	0	0	0	0
						Temperature	°C	31.9	32.8	30.4	32.5	34.1
						Temp. Booster	°C	31.8	31.8	30.4	32.5	35.3
						Isolation	MOhm	1.7	1.8	3.4	20.0	2.4
						Wind Gen. Freq.	Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
						Cos Phi	--	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		Setpoint Values				Reactive Power .0.1%		0	0	0	0	0

Figure 16 : Illustration de la page TRIOS Agora de l'IHM en mode nuit



3.8.5 Page SETTINGS LOG

Cette page offre un aperçu général des communications actives entre les différents TRIOs et les automates. Elle permet également de se logger via un mot de passe afin de pouvoir modifier les paramètres des autres pages de l'interface.

The screenshot shows the 'SETTINGS LOG' page. On the left is a navigation menu with 'HOME', 'CONTROL', 'TRIOs CB', 'TRIOs Appie', 'Settings Log', and 'MasterPact'. The main content is divided into two sections: 'Settings' and 'Communication'. The 'Settings' section includes: 'Enable editing' (red indicator, PWD field), 'Logging ON / OFF' (green indicator, ON / OFF field), 'Server address of database' (10.222.3.217), 'Server port nr. of database' (3306), and 'Logging sample time' (T#10s0ms). The 'Communication' section is a table with columns 'Modbus', 'RTU', and 'TCP' and rows for TRIO 1 through TRIO 10 and Masterpact. Red indicators show active Modbus connections, and green indicators show active RTU or TCP connections.

	Modbus	RTU	TCP
TRIO 1	Red		
TRIO 2	Red		
TRIO 3	Red		
TRIO 4	Red		
TRIO 5	Red		
TRIO 6	Red		Green
TRIO 7	Red		Green
TRIO 8	Red		Green
TRIO 9	Green		Green
TRIO 10	Red		Green
Masterpact			Green

Figure 17 : Illustration de la page SETTINGS LOG de l'IHM

3.8.6 Page MASTERPACT

Les données lues au Masterpact sont reprises sur cette page.

The screenshot shows the 'MASTERPACT' page. On the left is a navigation menu with 'HOME', 'CONTROL', 'TRIOs CB', 'TRIOs Appie', 'Settings Log', and 'MasterPact'. The main content is divided into two sections: 'Actual Values' and 'CB plus Masterpact'. The 'Actual Values' section is a table with columns 'Description' and 'Unit'. The 'CB plus Masterpact' section is a table with columns 'Phase 1', 'Phase 2', 'Phase 3', and 'Total'.

Description	Unit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Total
Active Power P	KW	19.00	18.00	24.00	62.00
Reactive Power Q	KVAR	-5.00	-5.00	-6.00	-17.00
Apparent Power S	KVA	20.00	19.00	25.00	64.00
Power Factor PF	--				97
Cosinus Phi	--				100

Figure 18 : Illustration de la page MASTERPACT de l'IHM



4 Procédure et méthode

4.1 Régulation et point de fonctionnement

Les API implémentés peuvent être paramétrés selon différents modes de régulation et point de fonctionnement afin de s'adapter à différentes situations et différents schémas tarifaires.

4.1.1 Régulation

Le système connaît deux modes de régulations.

- La régulation peut être **permanente**, en étant soit ON, soit OFF,
- La régulation peut être en **AutoMode** (i.e. en mode automatique) en fonction du ratio Q/P^2 , la régulation s'active alors en fonction d'un seuil défini grâce au paramètre appelé « *Factor for Q/P Ratio AutoMode* ». Les données fournies par la Masterpact étant en temps réel, il est également possible de moyennner le ratio Q/P sur un pas de temps afin d'éviter des fluctuations indésirables grâce au paramètre « *Filter time for Q/P-Ratio AutoMode* ».

4.1.2 Point de fonctionnement

Le système dispose également de deux types de fonctionnements.

- Le point de fonctionnement peut être **fixe**, c'est-à-dire que le système va maintenir une valeur fixe de Q au point de mesure, appelée « *setpoint value for Q-fix* »,
- Le point de mesure peut être **dynamique** en fonction de la quantité de puissance active soutirée au réseau, c'est-à-dire que le système va compenser la puissance réactive de manière à toujours respecter une valeur de ration $X = Q/P$ où X est paramétrable comme « *setpoint dynamic for $Q=f(P)$* ».

4.1.3 Illustration sur l'IHM

Les différents modes de régulation et de setpoint présentés précédemment sont paramétrables sur la page HOME de l'IHM. Ces modes sont indépendants les uns des autres et sont donc permutable.

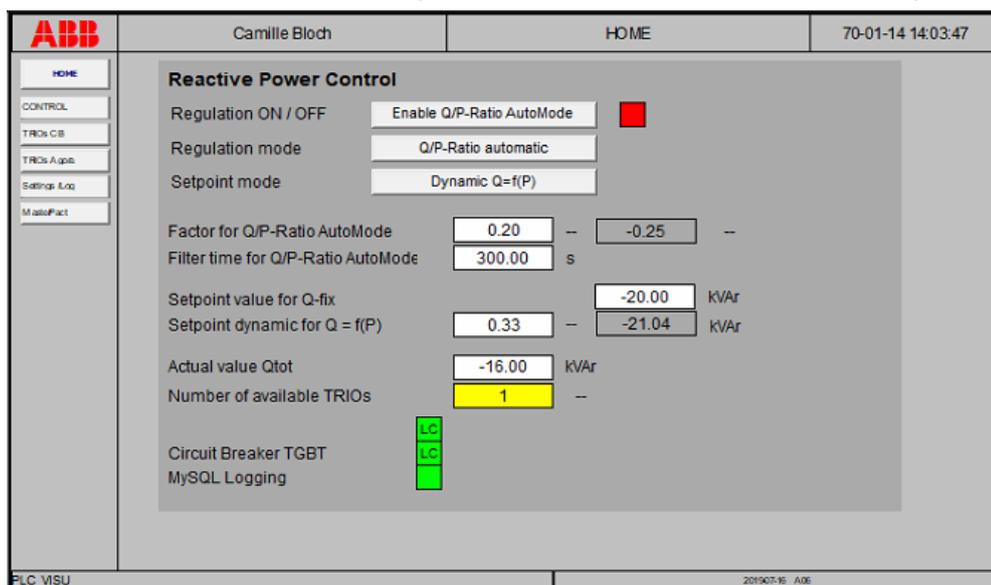


Figure 19 : Illustration de la page 'HOME' de l'IHM

² Où Q est la quantité de puissance réactive enregistrée au Masterpact et P la quantité de puissance active soutirée du réseau.



4.2 Protocoles de tests

Afin d'évaluer le potentiel de compensation et la réactivité d'un tel système, différents tests ont été réalisés. L'ensemble de ces tests sont illustrés ci-dessous au moyen de 4 figures.

- Les deux premières représentent respectivement les valeurs de puissances réactive et active monitorées chaque seconde,
- Les deux suivantes représentent ces mêmes valeurs moyennées sur des intervalles de 15 minutes correspondants à des périodes temporelles utilisées par le GRD.

Les couleurs utilisées pour la représentation des données respectent les significations suivantes :

<i>En bleu</i>	Les valeurs de P et Q mesurées au Masterpact
<i>En vert</i>	Les puissances de P et Q produites par les onduleurs PV
<i>En rouge</i>	La valeur de référence désirée au Masterpact
<i>En orange</i>	Un pourcentage x de la puissance active lue au Masterpact qui sert de valeur cible au système pour maintenir : $Q \leq x\% * P$
<i>En rosée</i>	La couleur de fond <i>rosée</i> précise les périodes où le système est actif

1. Test 1 : Capacité du système à compenser une valeur fixe

Un premier test a été réalisé pour valider la capacité du système à compenser entièrement la puissance réactive mesurée au Masterpact du site pilote. Les résultats sont illustrés graphiquement et les paramètres du système ont été définis comme suit :

- *Mode de régulation* : Permanent,
- *Point de fonctionnement* : Fixe,
- *Valeur de référence* : 0 kvar.

Deux périodes de test ont été réalisées pour évaluer la réactivité du système à différentes périodes de la journée et sur des périodes de temps relativement courtes.

	Période 1	Période 2
Heure de début	14h10	17h12
Heure de fin	15h56	17h30
Durée du test	106 min	18 min
Nombres de TRIO actif	10	10
Période d'activité	Journée de travail	Fin de journée de travail
Temps d'établissement	8 min	7 min
Valeur moyenne compensée (produite/consommée) par le système	15 kvar	20 kvar
Erreur absolue moyenne en régime établi	0.43 kvar	3.7 kvar



Afin de vérifier le bon fonctionnement de notre système, l'analyse des résultats se concentre sur chaque composant de notre système séparément.

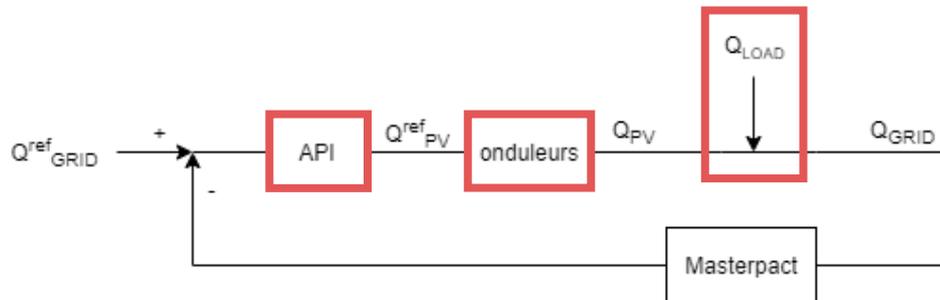


Figure 20 : Schéma de contrôle du site pilote

Tout d'abord, on constate que le système de commande (i.e. les onduleurs) respecte bien la consigne du contrôleur (i.e. les automates). En effet, les onduleurs compensent quasi instantanément la valeur qu'on leur demande de produire. Cela peut être observé sur la Figure 21 où les pentes des courbes bleues et vertes du graphique supérieur sont très proches.

Ensuite, le système parvient bien à minimiser l'impact de la perturbation (i.e. la charge de l'usine) sur notre système. Sur la Figure 21 supérieure, on observe lors de la première période de test que la consigne transmise aux onduleurs varie pour tenter de maintenir la valeur de sortie à la valeur de référence désirée. Malgré des variations de charge, visibles sur les graphiques représentant la puissance active, ces perturbations ont un faible impact sur la valeur de sortie.

Finalement, on peut visualiser sur ces graphiques les caractéristiques du contrôleur qui a été implémenté. On observe tout d'abord, un temps d'établissement de l'ordre de 7 minutes. C'est-à-dire que le contrôleur agit relativement lentement au début de son activation pour éviter de créer des perturbations indésirables. Tenant compte de la valeur cible de référence et de la valeur mesurée au Masterpact, les automates fournissent une consigne aux onduleurs qui augmente progressivement. En conséquence, ce temps d'établissement est induit par le contrôleur et pourrait être réduit, dans la mesure du possible, en agissant uniquement sur les API.

En conclusion, ce premier test montre que le système permet de compenser significativement la puissance réactive du site pilote en un laps de temps respectable. Ce délai pourrait être réduit en agissant sur les automates. Le contrôleur, tel qu'il est implémenté, s'adapte mieux à de longues périodes d'activité plutôt que des périodes d'activation courte (inférieures à 20 minutes), l'erreur absolue moyenne deviendrait alors négligeable.

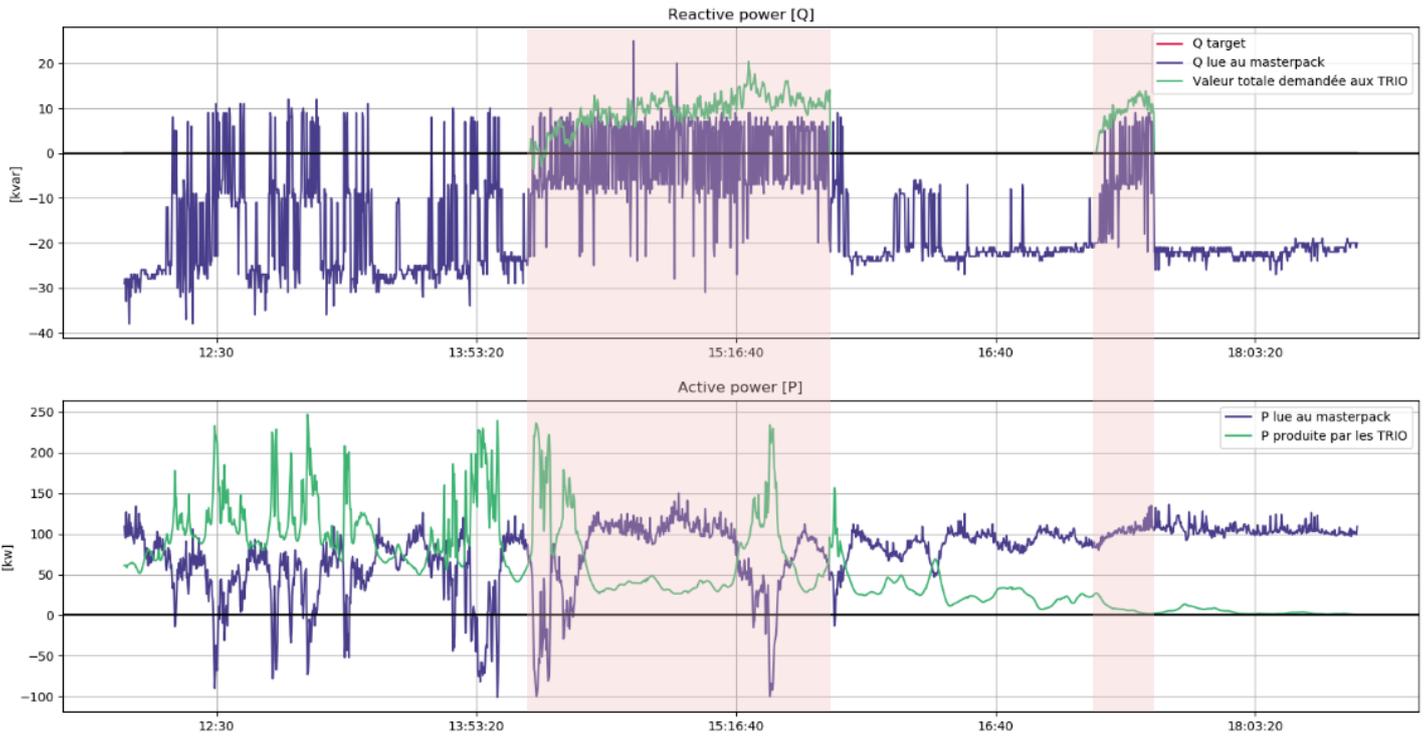


Figure 21 : Test 1 - Compensation permanente avec une valeur cible fixe - Valeurs monitorées en seconde

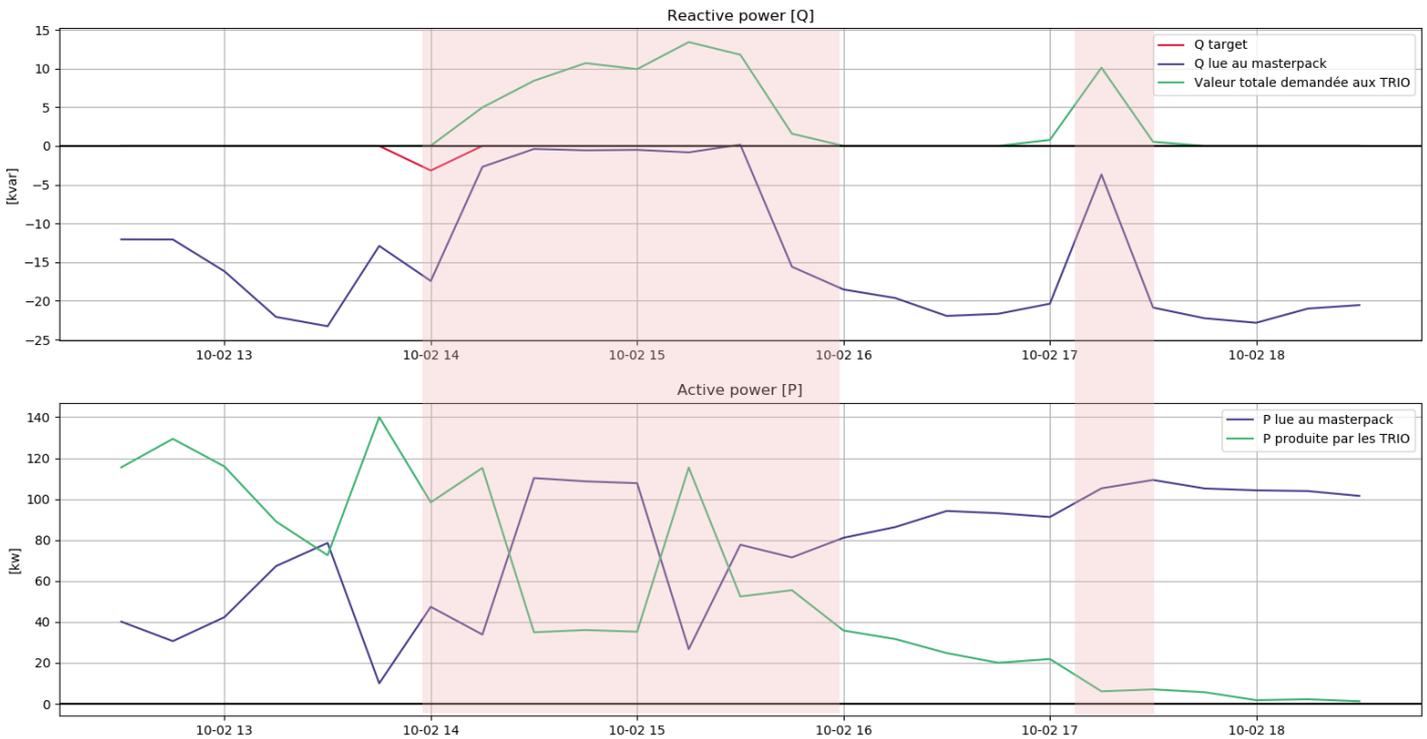


Figure 22 : Test 1 - Compensation permanente avec une valeur cible fixe - Valeurs moyennées sur 15min



2. Test 2 : Capacité du système à maintenir un ratio Q/P maximal

Ce second test vise à évaluer le potentiel du système à maintenir une valeur de puissance réactive inférieure à un pourcentage de la puissance active lue au Masterpact.

$$Q < x\% * P$$

Basé sur un mode de régulation dit automatique, deux périodes de test ont été réalisées. Dans un premier temps, le facteur de déclenchement a été fixé à une valeur plus importante que la valeur cible. Ensuite, ces deux valeurs ont été alignées. Les paramètres du système sont :

- *Mode de régulation : Q/P-Ratio automatic (AutoMode),*
- *Point de fonctionnement : Dynamique,*
- *Les valeurs de puissance considérées par le système sont moyennées sur une période de 1min.*

	Test A	Test B
Facteur de déclenchement de l'AutoMode	$Q \geq 20\% * P$	$Q \geq 15\% * P$
Valeur de référence	$Q = 15\% * P$	$Q = 15\% * P$
Heure de début	12h	12h
Heure de fin	17h	7h45
Durée du test	5h - 300 min	19h45 – 1'185 min
Nombres de TRIO actif	10	10 entre 12h et 19h30 1 entre 19h30 et 7h30 10 entre 7h30 et 7h45
Période d'activité	Journée ouvrable	Jour ouvrable
Valeur moyenne demandée aux TRIO	5.22 kvar	5.92 kvar
Erreur relative moyenne en régime établi	32%	23%

Le premier test, dit Test A, est visible sur les Figures 22 et 23. On observe que le système n'atteint pas la valeur cible ($15\% * P$). La régulation étant automatique le système se désenclenche lorsque $Q < 20\% * P$ sans avoir atteint la valeur cible. Ce constat peut s'expliquer d'une part par le délai introduit avec le PID et d'autre part par le mode de régulation automatique qui enclenche le système sur des laps de temps relativement courts. En moyenne le système reste actif 10 min, un délai suffisant pour que la valeur de la puissance réactive mesurée au Masterpact redevienne supérieure à la valeur limite de $20\% * P$, mais sitôt la valeur limite atteinte, le système se coupe. Ce constat, ainsi que les faibles valeurs compensées ($< 10\text{kvar}$), peuvent expliquer la valeur relativement élevée de l'erreur relative moyenne.

Au vu de ce résultat, nous avons procédé au Test B, visible aux Figures 24 et 25, où la valeur limite et cible ont été programmées à la même valeur. Le test B a été réalisé avec une valeur limite plus faible, ce qui maintient le système actif sur une plus longue période de temps et offre de meilleurs résultats. De plus, cet essai s'est déroulé sur une journée presque complète permettant de mesurer la réponse du système sur différentes périodes d'activité.

Tout d'abord, les résultats moyennés sur une période de 15 minutes sont difficiles à analyser pour le Test A étant donné que le système reste actif sur une période de temps plus courte que le quart d'heure. Ensuite, au vu des résultats du Test B, le système parvient à limiter la puissance réactive même s'il rencontre certaines difficultés à s'adapter à la valeur de référence. La valeur de sortie est relativement proche de la référence. Le faible décalage observé pourrait s'expliquer par la forte variation de la charge en journée, cependant les résultats obtenus de nuit présentent une erreur similaire malgré une



consommation de puissance active relativement stable. A priori, le délai introduit par le contrôleur semble être la meilleure explication, mais un contrôleur trop rapide pourrait entraîner une certaine instabilité du système.

En conclusion, le point de fonctionnement évoluant dynamiquement avec la consommation de puissance active du site (*AutoMode*), convient bien pour des périodes de charge stables, telles que la nuit, mais doit être exploité avec prudence en journée. Si un site industriel désire compenser l'ensemble de sa puissance réactive au moyen d'onduleurs, une valeur de référence dynamique est envisageable soit en tenant compte d'une marge de sécurité dans le choix de la valeur du facteur de déclenchement (e.g. maintenir $Q < 40\% * P$, plutôt que $Q < 50\% * P$), soit en implémentant un régulateur plus rapide dans les limites de stabilité de système.

L'objectif, poursuivi à travers cette régulation dynamique, est d'activer le système uniquement lorsque celui-ci est nécessaire afin d'éviter de restreindre la production de puissance active photovoltaïque inutilement. Son mode de fonctionnement vise alors à se rapprocher de celui des batteries de compensation traditionnelles. Cependant pour le rendre plus précis, il faudrait disposer de la valeur de puissance réactive consommée par l'usine. Or actuellement, nous ne disposons que de la valeur mesurée au Masterpact, c'est-à-dire celle incluant déjà la compensation des onduleurs. Ce mécanisme n'a pas pu être testé dans le cadre de cette étude pilote, car la valeur de puissance réactive consommée par l'usine, sans compensation, n'est pas disponible. De plus, le système devrait idéalement également rester actif sur une durée minimale de 15 minutes pour tenir compte des variations de consommation.

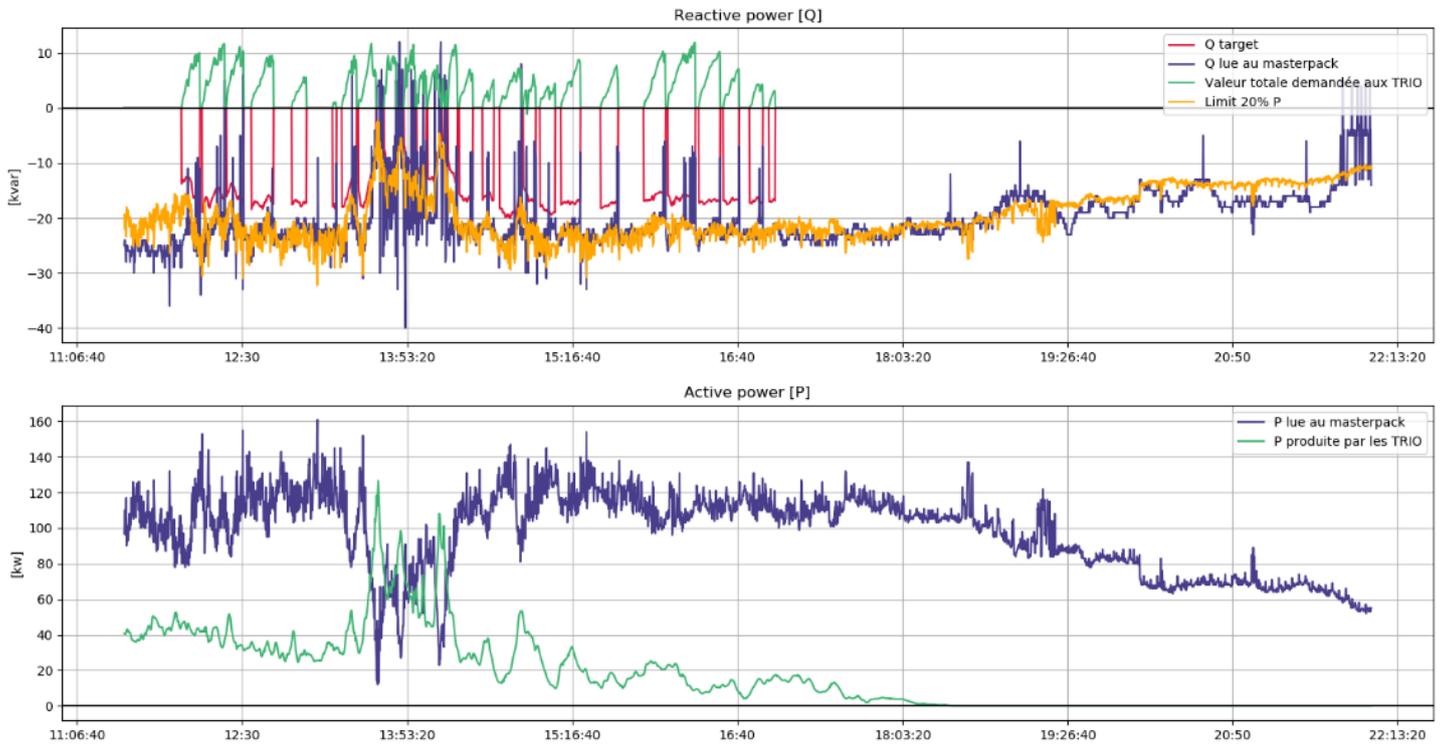


Figure 23 : Test 2A - Compensation automatique avec une valeur cible en ratio de P - Valeurs monitorées en seconde

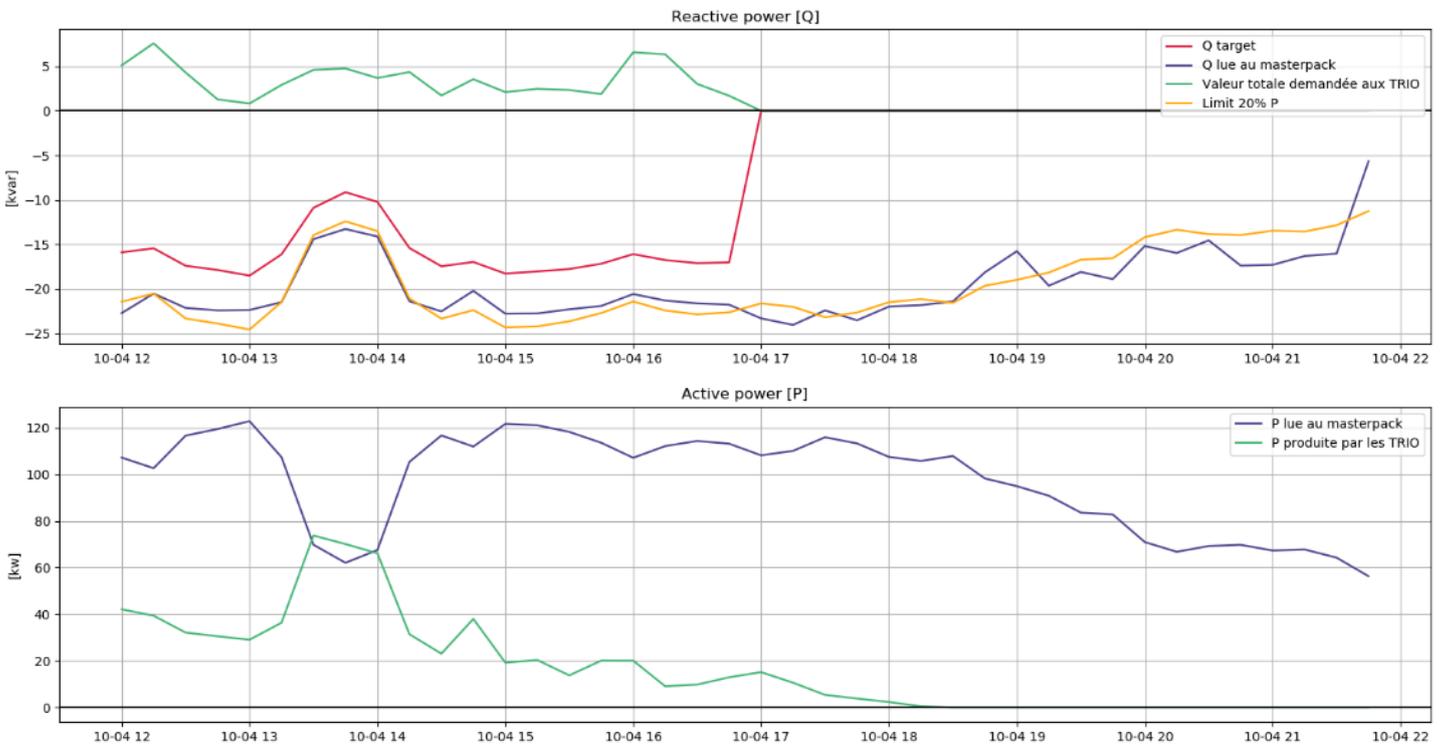


Figure 24 : Test 2A - Compensation automatique avec une valeur cible en ratio de P - Valeurs moyennées sur 15min

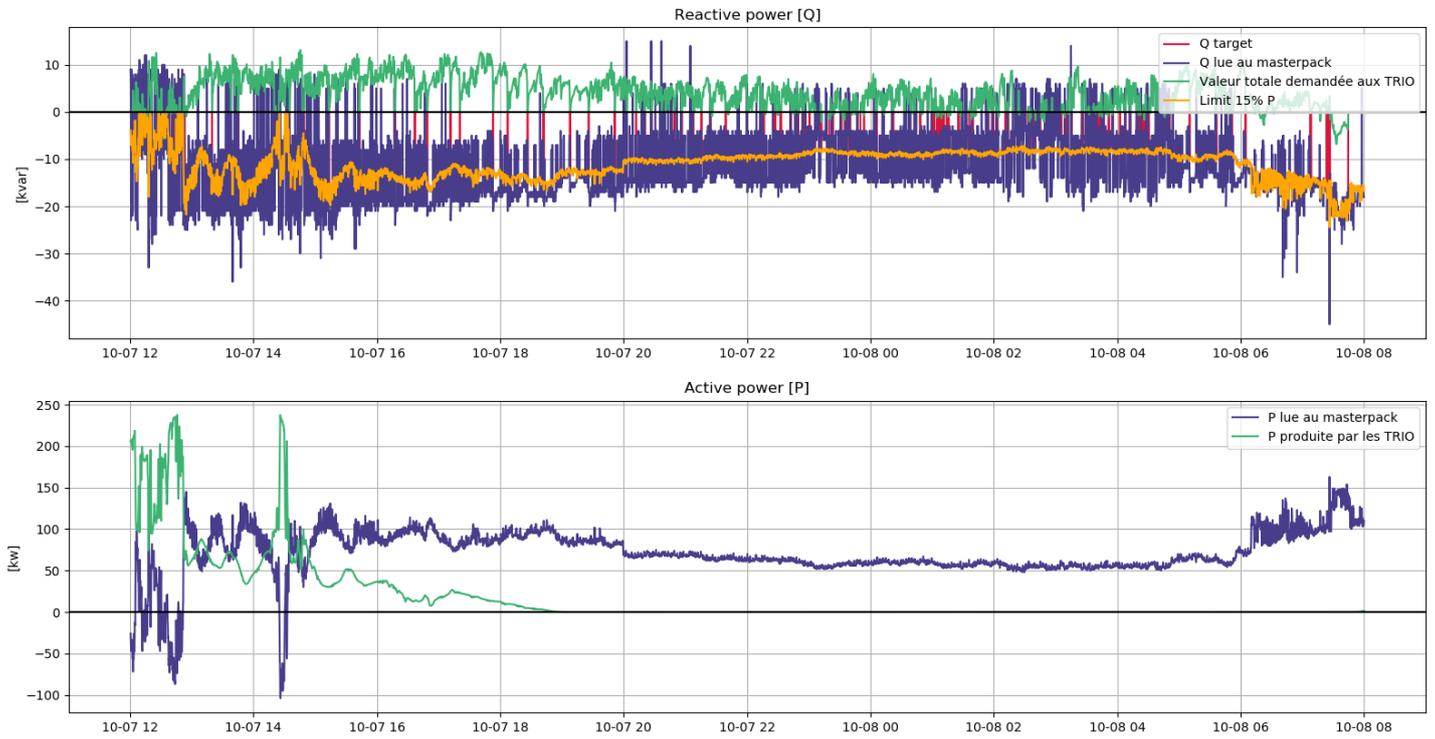


Figure 26: Test 2B - Compensation automatique avec une valeur cible en ratio de P - Valeurs monitorées en seconde

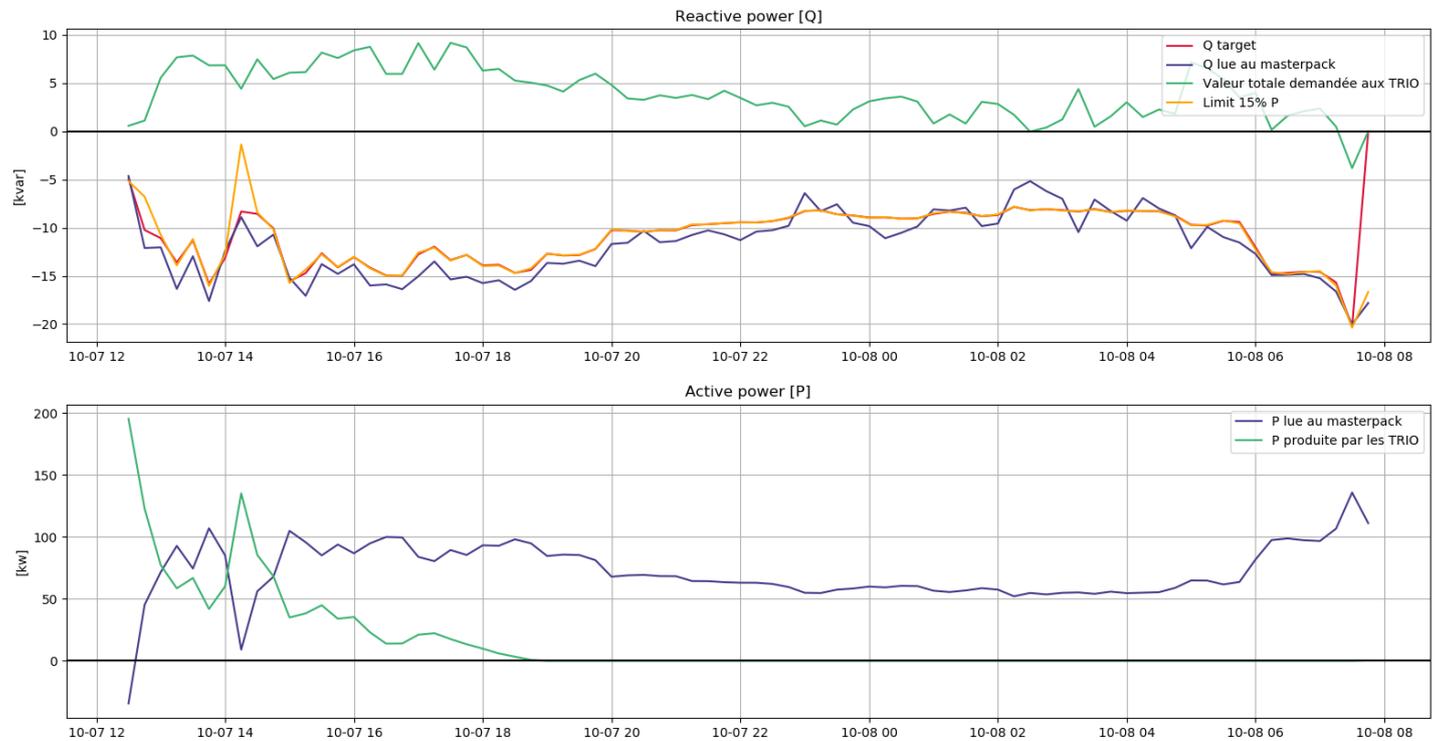


Figure 25 : Test 2B - Compensation automatique avec une valeur cible en ratio de P - Valeurs moyennées sur 15min



3. Test 3 : Service réseau

Lors des tests précédents, le système a montré sa capacité à compensation la puissance réactive des installations du site pilote. A présent, l'objectif est d'évaluer sa capacité à fournir une quantité de puissance réactive plus importante pour, par exemple, aider au maintien de la tension à travers les services réseau. Tenant compte des limites physiques des onduleurs présentées précédemment, une compensation capacitive de 200 kvar a été évaluée.

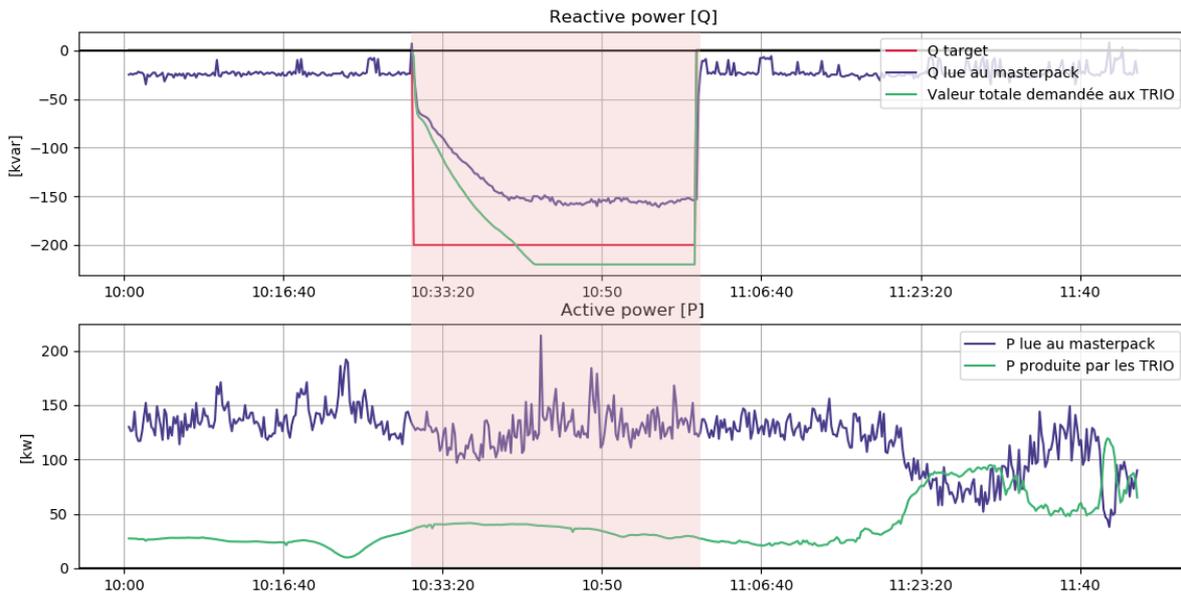


Figure 27 : Test 3 - Compensation maximale

Dans les 10 minutes suivant l'activation, la puissance réactive mesurée au Masterpack atteint -150 kvar alors qu'elle était initialement à -25 kvar. La valeur demandée aux TRIO continue d'augmenter jusqu'à atteindre la capacité limite permise par le PID, 220 kvar, 12 minutes après l'activation. Le système va continuer de maintenir les onduleurs au maximum de leur capacité pour tenter d'atteindre la valeur cible (-200 kvar), cependant on constate que la puissance réactive au Masterpack stagne à -150 kvar. En raison des limites physiques des onduleurs, le système ne parvient pas à atteindre la valeur cible, mais la puissance réactive au Masterpack est maintenue et stabilisée.

Pour solliciter les onduleurs au maximum de leur capacité, la quantité maximale de puissance active que ces derniers peuvent produire est réduite.

$$P_{\max} = \sqrt{(S^2 - Q^2)} = \sqrt{(261^2 - 200^2)} = 168 \text{ kW}$$

On peut constater que lors de ce test, la puissance active fournie par les onduleurs n'a pas été restreinte par cette limite physique et par conséquent il n'y a eu aucun impact sur la production photovoltaïque. Cependant au vu des résultats, nous pouvons en conclure que le système rencontre certaines difficultés à atteindre les valeurs limites³. Bien que ces observations impactent la quantité de puissance réactive qui peut être mise à disposition dans le cadre de services réseau, ce constat doit cependant être nuancé par le fait que des onduleurs plus récents permettent aujourd'hui de compenser de plus importantes quantités de puissance réactive.

Finalement, indépendamment de la quantité de puissance réactive que peuvent fournir les onduleurs, le régulateur tel que paramétré (i.e. facteurs proportionnel et intégral) est actuellement trop lent pour pouvoir répondre aux exigences des services système.

³ Des tests similaires impliquant un nombre réduit de TRIO ont montré que les onduleurs étaient bien capables d'atteindre leur valeur limite individuellement.



4.3 Analyse économique

Afin de comparer les deux alternatives disponibles pour la compensation de puissance réactive, nous en avons estimé les coûts moyens suivants.

	Onduleurs PV Base	Onduleurs PV Option compensation	Armoire de compensation
Coût d'installation	85 CHF / kW	Intégré De 0,5 kvar/kW à 1 kvar/kW	90 CHF / kvar
Coût régulateur + coûts annexes (comptage, électricien, ...)		11'300 CHF + 3'700 CHF	inclus
Maintenance	1'000 CHF / an / 100 kW	Pas de surcoût supplémentaire	1'000 CHF / an ⁴
Durée de vie moyenne	15 ans	-	>30 ans
Surcoût pour surdimensionner de 20%		+ 5 / 10%	+ 15 %

Ces valeurs moyennées permettent de donner un ordre de grandeur, mais elles sont à utiliser avec prudence comme chaque installation est différente et peut entraîner des variations de prix plus ou moins significatives. C'est pour ces raisons qu'aucune analyse économique fine n'est réalisée dans le cadre de cette étude. Sur base des valeurs moyennes fournies, un tableau comparatif pour différentes valeurs de puissance réactive à compenser a été réalisé. Le tableau ci-dessous montre qu'a priori, un industriel équipé d'une installation photovoltaïque aura toujours un intérêt financier à utiliser les onduleurs pour la compensation de puissance réactive si le banc de compensation est à remplacer ou non existant. Selon les coûts annexes, cela peut être rentable de remplacer une batterie de compensation existante par les onduleurs si leur capacité de compensation est suffisante.

⁴ La maintenance nécessite une 1^{ère} visite après 3 ans, puis ensuite elle a lieu tous les 2 ans. Il faut compter entre 600 et 1'000 CHF pour la maintenance d'une installation, auquel il faut ajouter 1'200 CHF en moyenne tous les 2 ans pour changer les condensateurs qui ont une durée de vie de 10 ans. Cette moyenne de 1'000 CHF/an inclut donc la maintenance et le renouvellement potentiel des condensateurs. [Source : Trielec].



Compensation réactive souhaitée		Compensation avec onduleurs PV	Bancs de compensation
100 kvar	<i>Investissement</i>	Régulateur : 15'000 CHF Surdimensionnement 5% de la puissance nominale: 550 CHF	9'000 CHF
	<i>Exploitation</i>	-	1'000 CHF / an
	Total sur 15 ans	15'550 CHF	24'000 CHF
150 kvar	<i>Investissement</i>	Régulateur : 15'000 CHF Surdimensionnement 5% de la puissance nominale: 830 CHF	13'500 CHF
	<i>Exploitation</i>	-	1'000 CHF / an
	Total sur 15 ans	15'830 CHF	28'500 CHF
200 kvar	<i>Investissement</i>	Régulateur : 15'000 CHF Surdimensionnement 5% de la puissance nominale: 1'100 CHF	18'000 CHF
	<i>Exploitation</i>	-	1'000 CHF / an
	Total sur 15 ans	16'100 CHF	33'000 CHF

A l'avenir, l'objectif est de standardiser le régulateur afin de pouvoir l'implémenter au sein des onduleurs de manière standard et ainsi proposer une solution sans frais additionnel aux industriels. La compensation de puissance réactive au moyen des onduleurs PV deviendrait alors une alternative particulièrement attractive par rapport aux solutions traditionnelles.

Concernant le site pilote, celui-ci est actuellement équipé d'une batterie de condensateur de 720 kvar. Etant donné que les onduleurs installés ne permettent pas de compenser une telle quantité de puissance réactive et que l'extension de l'usine n'a pas entraîné d'augmentation de consommation de puissance réactive, les onduleurs ne sont actuellement pas utilisés pour la compensation.



5 Résultats et commentaire

5.1 Temps de réaction

Les tests réalisés sur le site pilote⁵ ont montré que la réactivité du système est fortement dépendante du régulateur implémenté. Actuellement, le PID implémenté a un temps mort minimal estimé à 50 secondes.

- L'acquisition des données en temps réel au point de mesure s'effectue toutes les 5 secondes, cependant comme la valeur bouge beaucoup ces données sont moyennées sur 30 secondes,
- L'envoi de la consigne des automates vers les TRIO, en modbus RTU, se fait environ toutes les 20 secondes. Ce délai pourrait être réduit au mieux de quelques secondes.

En pratique, le temps de réaction minimal accessible est de 20 secondes, correspondant au délai de connexion entre les automates et les TRIO en modbus RTU. Ce délai est du même ordre de grandeur que celui des armoires de compensation qui ont un temps de réaction de l'ordre de 15 secondes.

Pour des raisons de sécurité, indépendantes de ce temps mort, la valeur demandée aux TRIO en sortie du PID évolue progressivement à une vitesse dépendante de la valeur cible désirée. Ce délai vise, d'une part, à se prévenir des fluctuations importantes mesurées au Masterpact, qui pourraient entraîner des changements de consigne brusques pour l'onduleur et rendre le système instable. D'autre part, un système trop rapide avec des pics de puissance fluctuants pourrait impacter négativement le réseau et entraîner une instabilité de la tension.

Le temps de réaction de l'onduleur peut être adapté en fonction des besoins du site industriel. Dans le cas étudié, un temps d'établissement de l'ordre de 5 minutes a été jugé suffisant. Les essais ont été réalisés sur des périodes de temps relativement courtes, par conséquent le délai de réaction du PID est clairement visible. L'objectif final de ce système est une exploitation permanente, c'est-à-dire un système actif en continu, où l'impact du temps d'établissement deviendrait alors négligeable.

5.2 Compensation effective

Les tests réalisés ont démontré la capacité du système à compenser la puissance réactive, mais ils ont également mis en évidence la nécessité d'accéder à certaines mesures, en particulier pour de la compensation dynamique. Avec les données disponibles sur le site pilote, il semble préférable d'exploiter un tel système en mode continu afin d'équilibrer la puissance réactive et la maintenir à une valeur cible. L'impact sur la production solaire est, dans le cadre de cette étude négligeable, mais peut être limité dans d'autres situations soit par un surdimensionnement des onduleurs, soit en bridant la compensation de puissance réactive des onduleurs si on estime que la production puissance PV est plus importante que la génération de puissance réactive.

5.3 Résultats de jour et de nuit

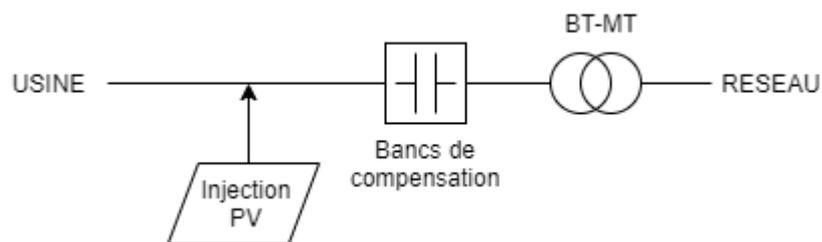
La principale différence observée entre les essais réalisés de jour et de nuit réside dans la stabilité de la consommation active. De nuit, la consommation est connue et stable. De plus, les onduleurs ne produisant aucune puissance active, ils peuvent être exploités sans risque de limiter cette dernière. Les résultats du *test 2B*, réalisé en partie de nuit, montrent que le système fonctionne bien même en mode dynamique. Dans le cas du site pilote, 9 des 10 onduleurs sont éteints la nuit pour éviter leur consommation de veille, estimée à maximum 8 W/onduleur. Dans le cas d'une exploitation nocturne des onduleurs pour une compensation de la puissance réactive, cette consommation est jugée négligeable.



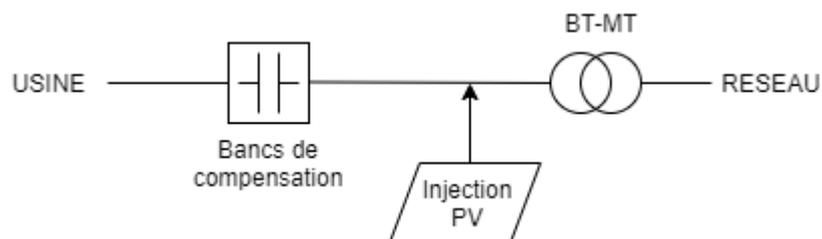
5.4 Limite de l'étude

Lors des tests réalisés dans le cadre de cette étude pilote, aucune batterie de condensateur n'était susceptible d'impacter la compensation des onduleurs. Cependant une compensation hybride, composée d'une batterie de condensateurs et d'une compensation via les onduleurs, pourrait être envisagée. Dans cette situation, les contraintes suivantes doivent être prises en compte :

- Si le point d'injection des onduleurs est localisé avant le banc de condensateurs, il faut éviter que les onduleurs ne compensent le déphasage déjà équilibré par la batterie de condensateurs



- Si le point d'injection est localisé après le banc de condensateurs, il faut éviter que l'armoire de compensation ne compense le déphasage en respectant l'équation $Q < 50\% * P$ sans tenir compte de la production photovoltaïque. Cette situation est celle que pourrait rencontrer Camille Bloch si la compensation réactive avec les onduleurs se faisait depuis la station CB1.



La majorité des tests ont été réalisés avec des valeurs de puissance réactive négative, c'est-à-dire capacitive, afin d'éviter tout impact sur la facturation. Le GRD du site pilote ne facture, en effet, que la puissance réactive inductive. Cependant, des tests effectués avec des valeurs de puissance réactive positive, c'est-à-dire inductive, ont montré des résultats équivalents.



6 Conclusions et résumé

L'étude réalisée montre que les onduleurs photovoltaïques présentent un réel potentiel pour la compensation d'énergie réactive. Cette compensation est caractérisée par le contrôleur PID qui commande ces onduleurs et régule ainsi la vitesse et la précision de cette compensation au gré des besoins.

La compensation de puissance réactive est une problématique qui impacte essentiellement les sites industriels et le transport d'électricité à moyenne et haute tension. Au cours de cette étude, nous avons concentré nos travaux sur le premier public cible au travers d'un site pilote représentatif de ces industries. Dans ces entreprises, la puissance réactive induite par les équipements est en général régulée au moyen de bancs de condensateur. Hormis le coût financier qu'ils engendrent, ces derniers présentent peu d'inconvénients s'ils sont bien dimensionnés. De par leur conception et comme montré au cours de cette étude, les onduleurs photovoltaïques peuvent fournir un résultat similaire aux batteries de condensateur tout en apportant des fonctionnalités supplémentaires.

Premièrement, les onduleurs ont l'avantage d'offrir une plus large plage de flexibilité que les bancs traditionnels. Avec un réglage adapté, les onduleurs peuvent compenser n'importe quelle valeur continue au sein de leur gamme de fonctionnements. Ensuite, ils peuvent être activés également en dehors des heures de fonctionnement de l'usine puisqu'ils peuvent produire de la puissance réactive indépendamment de la production solaire. Ainsi ils sont capables par exemple d'agir la nuit pour fournir des services réseau. Finalement, ils offrent le choix entre une compensation fixe ou dynamique. Dans le premier cas, ils permettent une compensation d'appui, suite par exemple à une extension d'usine, alors que dans le second ils peuvent répondre à une demande précise, telle que le respect d'un ratio dynamique de puissances.

Malgré ces fonctionnalités additionnelles, la compensation de puissance réactive au moyen d'onduleurs PV reste complémentaire aux bancs de compensation et ne s'adapte qu'à certains sites particuliers comme illustrés sur la Figure 28. En effet, un site non équipé de panneaux photovoltaïques n'aurait aucun intérêt à compenser sa puissance réactive au moyen d'onduleurs, ces derniers étant bien plus encombrants. A contrario, un site équipé de panneaux photovoltaïques peut envisager de compenser sa puissance réactive au moyen d'onduleurs photovoltaïques. Dans le cas d'une compensation totale, au détriment des batteries de compensation, il est conseillé de réaliser une étude technico-économique afin de surdimensionner les onduleurs si nécessaire. Pour une compensation partielle, l'entreprise peut tirer profit des avantages ci-dessous :

- En installant des panneaux PV, l'industriel réduit la quantité d'énergie active soutirée du réseau. De ce fait, il réduit la quantité de puissance réactive qu'il peut soutirer du réseau, car la majorité des GRDs facturent la puissance réactive lorsque celle-ci est supérieure à 50% de la puissance active soutirée, soit $Q > 50\% * P$. Si la puissance soutirée P tend vers 0, alors la puissance réactive Q non facturée tend également vers 0. Les bancs de condensateur existants peuvent ainsi s'avérer insuffisants dans le cas d'une grosse autoconsommation photovoltaïque. Dès lors, plutôt que d'augmenter le nombre de condensateurs, les onduleurs peuvent être utilisés pour réduire la puissance réactive en conséquence sans frais supplémentaires,
- La maintenance des onduleurs photovoltaïques se fait annuellement pour l'installation PV et est par conséquent indépendante de l'exploitation ou non des onduleurs pour la compensation réactive. L'utilisation des onduleurs en lieu et place des batteries de condensateur permet dans ce cas d'économiser sur les coûts de maintenance des bancs de condensateur,



- L'exploitation des onduleurs comme moyen de compensation a l'avantage d'offrir une compensation dynamique. Celle-ci peut être fixe ou variable comme présentée au sein de cette étude et peut surtout s'adapter à une potentielle évolution de la production du site industriel sans induire de coût supplémentaire,
- Enfin, si des fournisseurs intègrent à l'avenir le régulateur au sein de leurs onduleurs, ce service deviendrait alors standard et accessible sans frais, dans les limites de capacité des onduleurs.

Les industriels peuvent tirer de nombreux avantages à l'utilisation des onduleurs pour la compensation de puissance réactive. Cependant il est important, d'une part, de bien proportionner la puissance nominale de l'onduleur afin de ne pas limiter la puissance active produite. D'autre part, le dimensionnement du régulateur est particulièrement important afin de répondre au mieux aux exigences de réactivité du site, particulièrement en termes de réactivité et de contrôle.

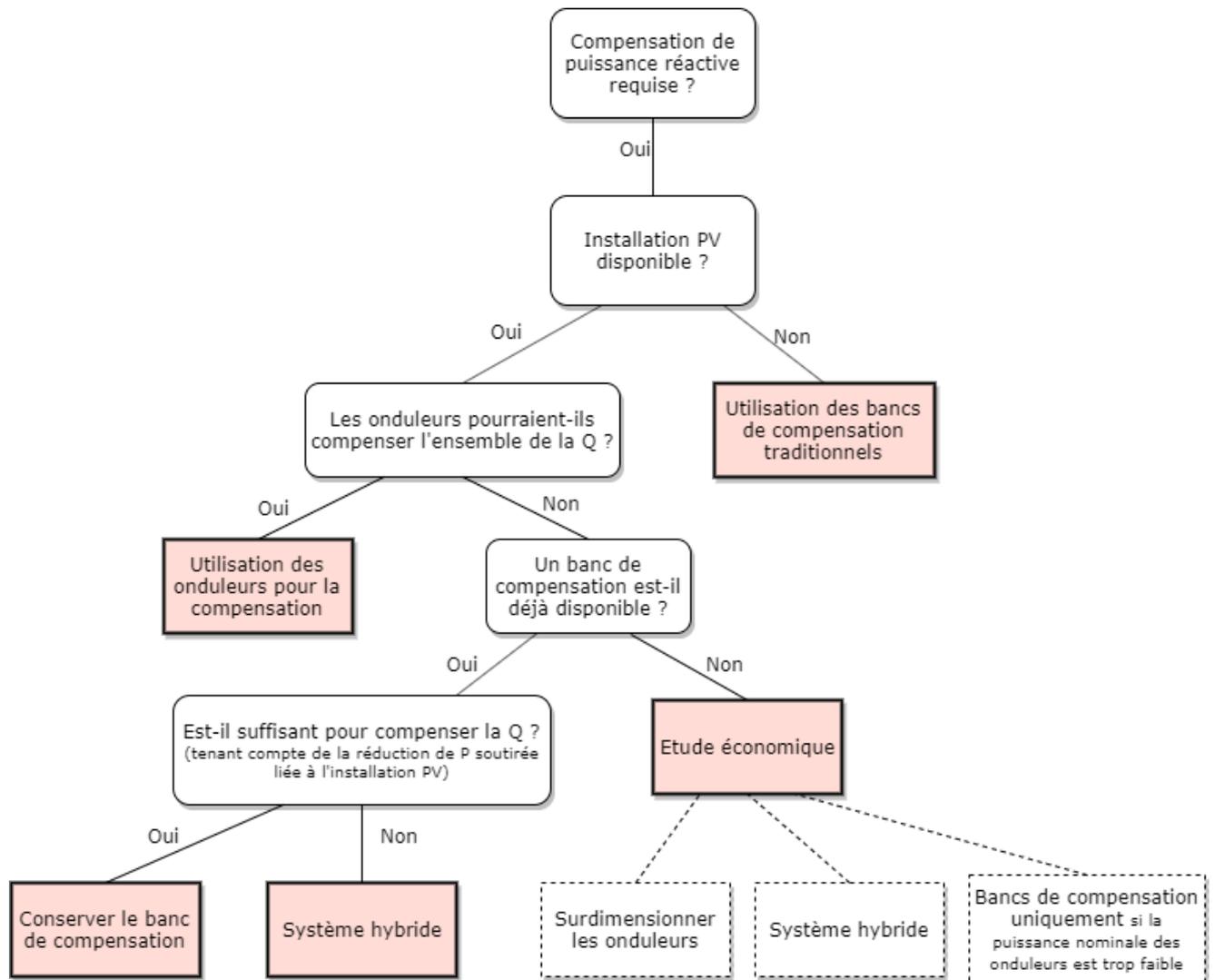


Figure 28 : Raisonnement itératif d'aide à la décision



La deuxième cible concernée par la compensation de puissance réactive est le réseau de transport de l'électricité. Swissgrid, le gestionnaire du réseau de transport suisse, a mis en place un service réseau, '*Maintien de la tension*', pour encourager les consommateurs à fournir de la puissance réactive en fonction des besoins. Le contrôle continu des onduleurs et leur capacité à produire et consommer de la puissance réactive peuvent permettre de participer à ce service. Dans cette optique, il est alors intéressant d'envisager de surdimensionner les onduleurs pour éviter un impact sur la production solaire active en plein été et d'implémenter un régulateur particulièrement réactif. Un tel service doit se faire en partenariat avec le GRD.

Il convient également de préciser que suite à la libéralisation prévue du marché de l'électricité, de nouveaux compteurs pourraient être disponibles prochainement. Ils seraient équipés d'un télérelevé en moyenne tension, ce qui permettrait d'accéder aux données réelles du GRD et de compenser au point de mesure principal. Cependant ces compteurs, à l'heure actuelle, n'ont pas encore été certifiés par METAS.

En conclusion, la mise en place de tel compteur et l'intégration de régulateur standard au sein des onduleurs permettrait de rendre cette solution de compensation particulièrement attractive pour les industriels et d'augmenter le potentiel d'aide aux services système.