

Table des matières

DONNÉE DU TRAVAIL DE DIPLÔME	1
INTRODUCTION	1
OBJECTIFS	2
MICROGRID	3
INTRODUCTION	3
APPLICATIONS.....	4
AVANTAGES	4
DÉFIS.....	4
BUTS.....	4
GRID CODES	7
INTRODUCTION	7
SUISSE (TRANSMISSION CODE ET DISTRIBUTION CODE)	7
ALLEMAGNE (DIRECTIVE VDE 4105).....	10
ÉLÉMENTS DU MICROGRID DU GRIDLAB	12
SCHÉMA DE PRINCIPE.....	12
QUARTIER DE CONSOMMATEURS (DISTRICT)	13
STOCKAGE (BATTERIES)	16
PRODUCTION HYDRAULIQUE (DISPATCHING).....	18
PRODUCTION SOLAIRE (SOLARMAX)	23
SYSTÈME DE COMMUNICATION (CLOUD.IO)	24
SYSTÈME DE CONTRÔLE	27
PRINCIPE DE BASE	27
FONCTIONNEMENT EN PARALLÈLE	27
THREADS	28
DIAGRAMMES	28
CONNEXION ÉLECTRIQUE	32
SCHÉMA DE COMMUNICATION	33
SCÉNARIOS	34
SURVOL DES ÉTAPES.....	34
CONSIGNES FIXES (ÉTAPE 1).....	35
RÉGLAGE VAR-VOLT (ÉTAPE 2).....	35
COURBE DE CHARGE (ÉTAPE 3)	37
ILOTAGE (ÉTAPE 4)	39
RÉGULATION	41
PRINCIPE.....	41
VAR/VOLT.....	43
WATT / HERTZ.....	43
WATT / VOLT	44
SUIVI COURBE DE CHARGE	45
DISPATCHING	47
FONCTION D'OPTIMISATION.....	49

RÉSULTATS	51
CONSIGNE FIXES (ETAPE 1).....	51
RÉGLAGE VAR-VOLT (ETAPE 2).....	65
COURBE DE CHARGE (ETAPE 3).....	68
ILOTAGE (ETAPE 4).....	70
AMÉLIORATIONS	71
COMMUNICATION	71
RÉGULATION	71
ILOTAGE.....	71
PROGRAMMATION	71
CONCLUSION	72
REMERCIEMENTS	73
BIBLIOGRAPHIE	74
TABLE DE FIGURES	75

Donnée du travail de diplôme

HES-SO Valais

SYND	ETE	TEVI
X	X	X

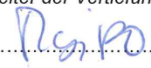

Données du travail de diplôme
Aufgabenstellung der Bachelorarbeit

FO 1.2.02.07.CB

haj/11/01/2016

Filière / Studiengang ETE	Année académique / Studienjahr 2016/2017	No TD / Nr. DA sg/2017/85
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiant / Student René-Marc Rebord Professeur / Dozent Dominique Gabioud	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes)	

Titre / Titel Conception et déploiement d'un microgrid dans le GridLab
Description / Beschreibung Un microgrid est défini comme « un groupe de charges et d'installations de production décentralisée avec des limites électriques clairement définies, qui agit comme une entité contrôlable unique et peut fonctionner soit en mode connecté au réseau électrique, soit en îlotage ». Le GridLab avec ses composantes Dispatching et District possède l'ensemble des équipements nécessaires pour construire un microgrid. Pour qu'un microgrid puisse y être concrètement déployé, il s'agit de raccorder l'ensemble des équipements au même environnement informatique, puis de déployer un premier système de contrôle simple, lequel pourra ensuite être complété par la suite pour prendre en compte des scénarios plus complexes. Le projet consiste à : <ul style="list-style-type: none"> • effectuer une revue de l'état de l'art sur la recherche et les projets pilote dans le domaine des microgrids, • concevoir un microgrid pour le GridLab avec les aspects électriques et commande / régulation, et • déployer une version élémentaire de ce microgrid avec un système de contrôle commande simple. Objectifs / Ziele <ul style="list-style-type: none"> – Faire une synthèse de l'état de l'art dans le domaine des microgrids. – Concevoir les aspects électriques et de commande / régulation d'un microgrid pour le GridLab. – Réaliser dans le GridLab, tester, valider et documenter une version simple du microgrid.

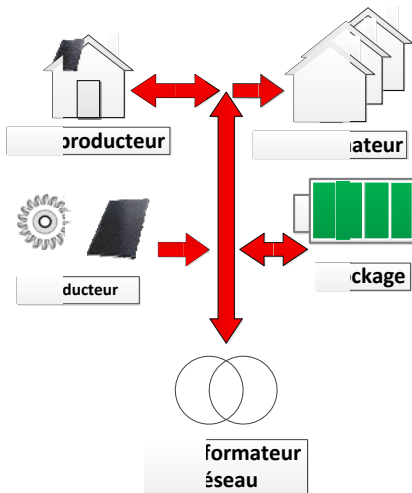
Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Responsable de l'orientation / filière Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:  ¹ Etudiant / Student : 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 15.05.2017 Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation 08 – 09.06.2017 Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 18.08.2017 / 12h00 Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: 30.08 – 31.08 – 01.09.2017 Défense orale / Mündliche Verfechtung: Semaine 36 / Woche 36
---	--

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.

Rapport reçu le / Schlussbericht erhalten am Visa du secrétariat / Visum des Sekretariats

Conception d'un microgrid dans le GridLab

Diplômant/e René-Marc Rebord



Objectif du projet

Un microgrid combinant différentes sources d'énergie renouvelables, un système de stockage et un quartier de consommateurs est à mettre en place dans le GridLab.

Une première version d'un contrôleur gérant le microgrid doit être développée.

Méthodes | Expériences | Résultats

Le microgrid est composé d'un quartier de consommateurs avec trois maisons émulées par des convertisseurs électroniques de puissance programmables, des groupes de production hydraulique, une installation photovoltaïque, un système de stockage composé de trois batteries et un contrôleur gérant les différents appareils du microgrid.

Les principales fonctions développées par le contrôleur sont l'assignation de consignes fixes, le suivi d'un programme et le fonctionnement en îlotage. Une régulation locale de certains éléments a également été implémentée.

Pour réaliser ces différentes fonctions, une communication entre les différents appareils et le contrôleur a été implémentée. La communication permet de transmettre les consignes aux appareils et de recevoir les mesures effectuées.

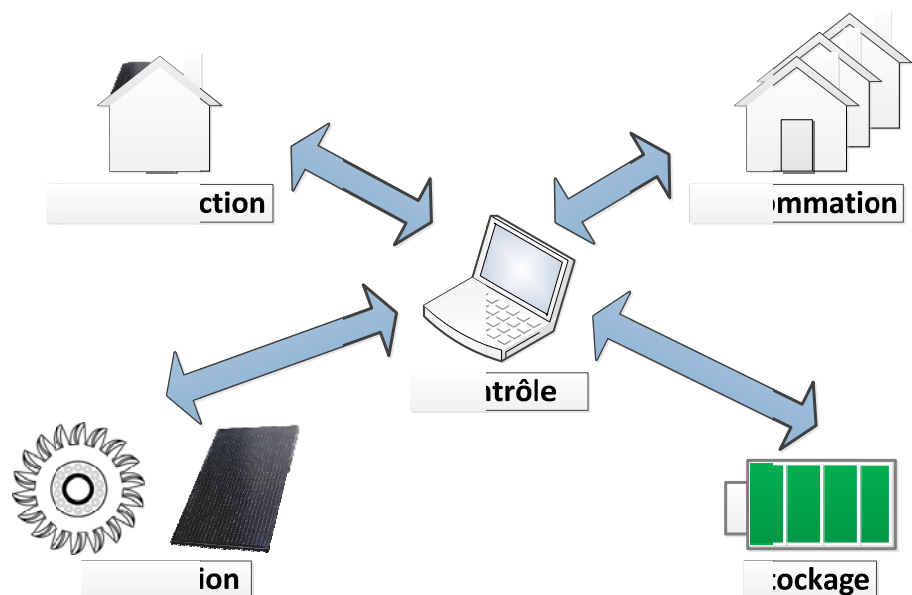
La difficulté de la gestion d'un microgrid est liée au temps de réponse des différents systèmes physiques. Lorsque le système fonctionne en îlotage, le microgrid doit avoir une inertie et une rapidité de contrôle suffisamment rapide pour pouvoir être stable.

Travail de diplôme
 | édition 2017 |

Filière
 Energie et techniques
 environnementales

Domaine d'application
 Smart Grid

Professeur responsable
 Dominique Gabioud
 dominique.gabioud@hevs.ch



Introduction

La HES-SO Valais dispose dans ses locaux de Sion, « un laboratoire pour les énergies renouvelables, le stockage et le smart grid nommé « GridLab » est utilisé pour la formation et la recherche. Le GridLab traite de la production, du transport et de la distribution d'énergie renouvelable. » (HEVS)

Plusieurs types de production renouvelable sont implémentées, l'hydraulique, l'éolien et le solaire. Des lignes électriques enterrées ou aériennes sont présentes soit sous la forme de segments de câbles soit sous la forme de modèles équivalents basés sur des éléments RLC discrets. La distribution d'énergie est quant à elle traitée avec l'utilisation de quartiers de consommateurs/producteurs dont chaque maison est modélisée par une source quatre quadrants programmable.

Le GridLab possède tous les attributs nécessaires à la mise en place d'un « microgrid ». Un microgrid est défini comme « un groupe de charges et d'installations de production décentralisée avec des limites électriques clairement définies, qui agit comme une entité contrôlable unique et peut fonctionner soit en mode connecté au réseau électrique, soit en îlotage ». (Donnée TD)

Les buts d'un microgrid sont divers, l'îlotage permet d'alimenter en électricité des zones isolées géographiquement ou d'assurer la disponibilité de l'alimentation électrique même dans le cas d'une panne du réseau de distribution. La communication et le contrôle mis en place permettent de gérer le réseau pour effectuer certains scénarios. Les exemples de scénarios sont multiples, par exemple, l'optimisation de l'autoconsommation du microgrid, le suivi d'un programme prédéfini, la diminution du transfert d'énergie entre le réseau de distribution et le microgrid.

Le contrôle d'un microgrid s'effectue avec trois niveaux. Pour le premier niveau, le contrôleur local des appareils assure la stabilité électrique, le deuxième niveau adapte les consommations et les productions des divers composants pour compenser les déviations d'un programme établi à l'avance, le troisième niveau optimise le programme du microgrid pour réduire les coûts de fonctionnement. (Mahmoud, 2017)

Au début du projet, les éléments du microgrid sont fonctionnels dans le GridLab, d'un point de vue électrique. Ils ont certes chacun une interface de communication, mais ils ne sont pas intégrés dans un environnement informatique homogène. Le premier défi consiste à permettre à un contrôleur de microgrid de monitorer et de commander chaque élément. Sur cette base, quelques scénarios seront développés.

Les résultats de ce travail de Bachelor peuvent être réutilisés pour tous types d'applications dans le GridLab : laboratoires pour les étudiants ou des travaux de recherches.

Objectifs

Le projet de microgrid est divisé en trois parties : la connexion électrique entre les différents composants, la communication entre ceux-ci et le contrôle global des appareils.

L'objectif de la communication est de permettre au contrôleur de microgrid d'accéder aux composants du microgrid d'une manière uniforme, quels que soient les protocoles de communication spécifiques aux appareils.

Chaque composant électrique du réseau devra être interconnecté électriquement. Lors des différents scénarios, cette interconnexion doit pouvoir être modifiée très facilement pour adapter la typologie du réseau en fonction des besoins. Le microgrid doit fonctionner lorsque l'un des éléments est hors service. De plus, un élément non prévu lors de la conception du microgrid doit pouvoir être ajouté facilement.

Le contrôleur global pilote tout le système en fonction des scénarios, la complexité varie en fonction de l'application voulue. Une régulation complexe permet d'optimiser différents paramètres électriques et économiques. Les paramètres électriques sont essentiels pour le bon fonctionnement du réseau. Les facteurs économiques varient en fonction des scénarios.

Le système de contrôle est découpé en partie simple, lors de la mise en place d'une nouvelle application ou d'un scénario l'adaptation est facile et rapide. Cette manière de faire est idéale, chaque composant peut être utilisé ou non sans affecter le bon fonctionnement du microgrid.

Microgrid

Introduction

Un microgrid est défini comme « un groupe de charges et d'installations de production décentralisée avec des limites électriques clairement définies, qui agit comme une entité contrôlable unique et peut fonctionner soit en mode connecté au réseau électrique, soit en îlotage ». (Donnée TD)

Un microgrid est composé de :

- sources d'énergies renouvelables (solaire, éolienne, biomasse)
- sources d'énergies fossiles qui assurent la stabilité du réseau (génératrice diesel)
- système de stockage d'énergie (batteries, stockage hydrogène ou mécanique)
- réseau de distribution
- contrôleur intelligent

(Smartgrids-cre)

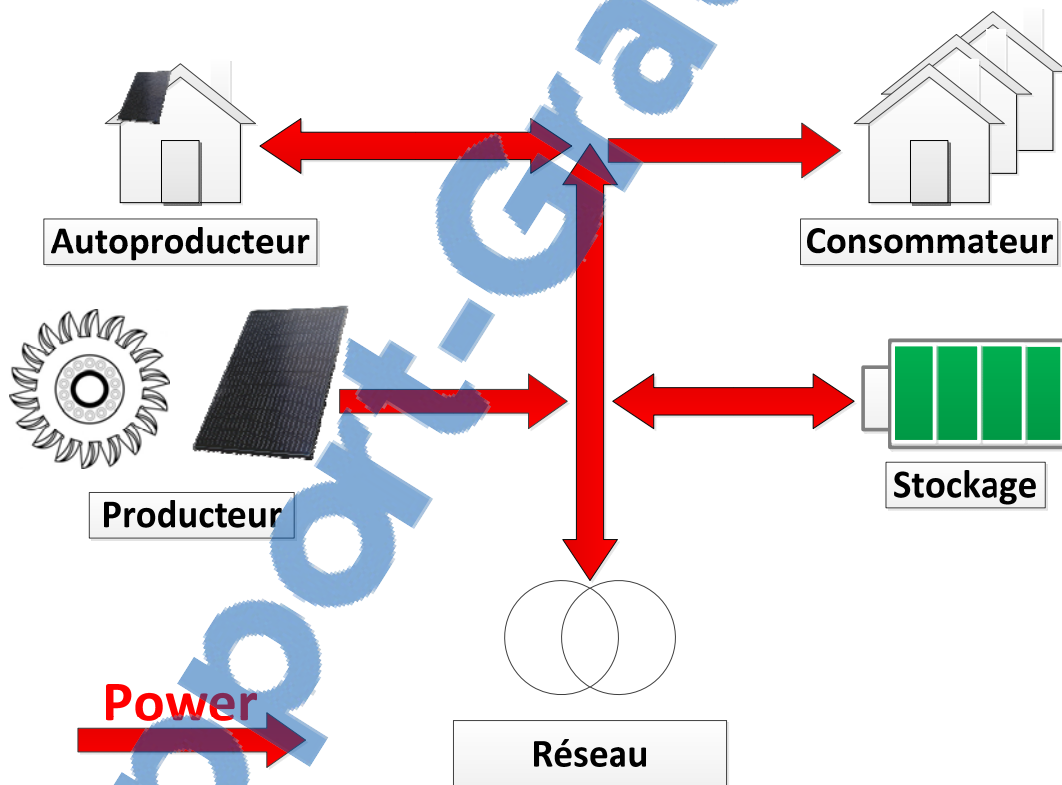


Figure 1 : Principe de base d'un microgrid

Applications

Les microgrids ont plusieurs applications différentes, réparties en 5 grandes catégories.

- Zones industrielles : les industries ont une grande consommation d'énergie, le microgrid regroupe plusieurs entreprises n'ayant pas le même profil. Le but est d'optimiser la gestion énergétique pour avoir un bilan plus neutre vis-à-vis du réseau.
- Campus (universitaire ou d'entreprise): l'efficacité énergétique de ces grands consommateurs est un enjeu important et réalisé avec la mise en place d'un microgrid.
- Zones isolées: ces réseaux peuvent être temporairement coupés du réseau, les microgrids permettent d'exploiter les énergies renouvelables et de diminuer l'utilisation des groupes diesel polluants et coûteux. De plus, la sécurité d'approvisionnement est grandement améliorée.
- Ecoquartiers : permet à un ensemble de consommateurs individuels de se rassembler et de diminuer leur charge de pointe.
- Zones sécuritaires (base militaire, hôpital) : avec ses propres moyens de production et de stockage, le microgrid garantit une autonomie énergétique durant les coupures de courant sur le réseau.

Avantages

- côté technique : gestion optimisée de la production d'électricité renouvelable, sécurisation de l'approvisionnement en énergie.
- côté économique, possibilité de se positionner sur les marchés de l'énergie, sortir de la captivité ou se positionner sur le marché du réglage, réduction du coût d'acheminement de l'énergie.
- côté sociétal, projet local facilitant les initiatives de partenaires locaux entre eux, réseau plus sûr et fiable.
- côté environnemental, meilleures intégrations des énergies renouvelables sur les réseaux et réduction de l'utilisation des génératrices diesel sur les réseaux isolés.

Défis

- en mode d'îlotage : maintien de la stabilité du microgrid (tension et fréquence), maintien de la stabilité du réseau de distribution lors de la synchronisation.
- modèle économique liant l'autoproduction et l'autoconsommation du microgrid.
- faire face aux capacités et aux prix des technologies de stockage.
- régler les problèmes de législation sur l'utilisation du réseau électrique.
- gestion et régulation de l'ensemble du microgrid.

(Smartgrids-cre)

Buts

Les buts des microgrids sont multiples.

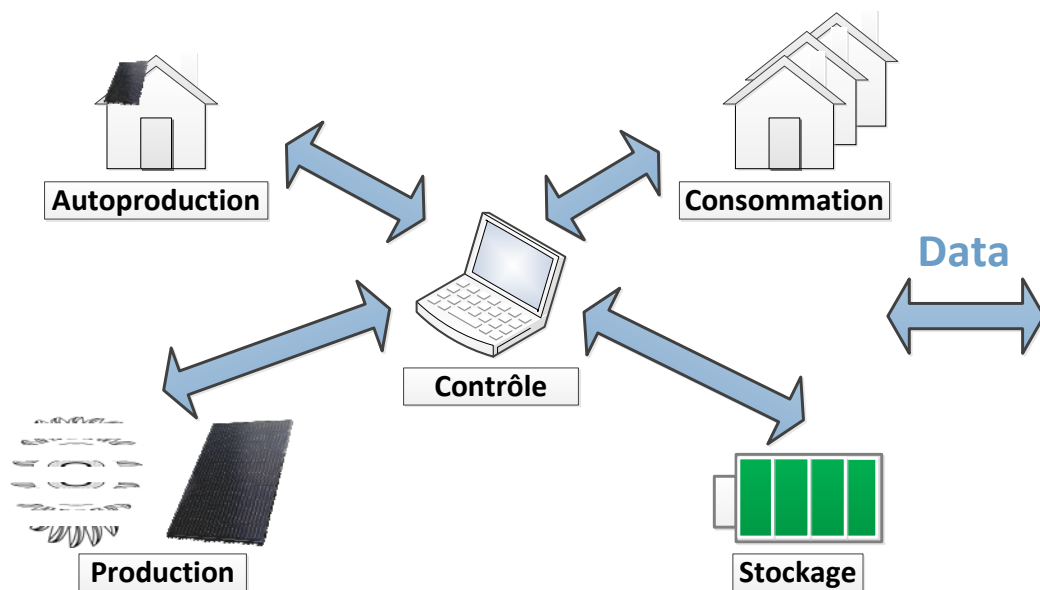


Figure 2 : Schéma de principe d'un microgrid

Le principe de base d'un microgrid ne change pas en fonction des applications. Les différents composants du réseau sont les mêmes : autoproducteurs, consommateurs, producteurs et les systèmes de stockage. De plus, un système de contrôle gère les différents composants en fonction de l'application du microgrid.

Îlotage :

L'application de base d'un microgrid est l'îlotage, cette fonctionnalité permet d'être totalement autonome et déconnecté du réseau de distribution. L'îlotage est principalement utilisé dans des régions isolées.

Des villages complets peuvent être alimentés ou alors des stations de recherche, par exemple une station de recherche scientifique en Antarctique fonctionnant indépendamment.

Actuellement, beaucoup de génératrices diesel sont installées pour subvenir aux besoins énergétiques des sites isolés. Ces génératrices sont très fiables et peuvent produire de l'énergie selon les besoins. La production photovoltaïque remplace au fur et à mesure ces génératrices, mais ce type de production n'est pas contrôlable et cela représente un défi de gestion. L'avantage avec ce type d'énergie est la réduction des coûts et de la pollution.

Protection d'approvisionnement :

Certains sites ne peuvent se permettre de ne plus être approvisionnés en électricité, des raisons sécuritaires en sont la cause. Les bases militaires doivent être sécurisées énergétiquement, en cas de conflit armé les réseaux électriques sont ciblés. La capacité de production doit permettre de subvenir aux besoins totaux de la base.

Le type de production est variable selon la localisation des sites, pour ces applications l'aspect environnemental et financier n'a que très peu d'importance.

Gestion énergétique :

Une des propriétés d'un microgrid est le fait d'avoir des limites électriques clairement définies avec le réseau de distribution. Le but est de visualiser et de gérer au mieux le flux d'énergie entre le réseau électrique et le microgrid.

Dans certaines situations l'électricité produite localement est moins chère que l'électricité achetée au distributeur, car le distributeur facture le transport de cette énergie et cette énergie est taxée. En réduisant au maximum l'énergie soutirée du réseau, les coûts pourront être réduits.

Pour augmenter l'autoconsommation du microgrid, le système de contrôle va optimiser l'exploitation du système de stockage. Par exemple, la charge et la décharge des batteries devront être gérées intelligemment en fonction des prévisions de consommation et de production.

La tarification de l'énergie varie en fonction du fournisseur et du type d'approvisionnement. Certains contrats de fourniture sont basés sur des courbes de charge envoyées préalablement aux fournisseurs 24 heures en avance. L'opérateur du microgrid planifie sa production et sa consommation et l'envoi à son fournisseur pour que celui-ci puisse acheter l'énergie nécessaire ou planifier sa production du lendemain. Lorsque l'exploitant du microgrid ne respecte pas son profil, il doit payer des pénalités, c'est pourquoi un système de gestion qui peut adapter le flux de puissance instantané à la courbe de charge prévue permet de réduire les coûts.

(Smartgrids-cre)

Grid Codes

Introduction

Certaines normes doivent être respectées, elles sont fixées par le Distribution Code et le Transmission Code pour la Suisse. Ces normes limitent l'impact des producteurs sur le réseau électrique et définissent la qualité de l'énergie à fournir au client. Dans chaque pays, des spécificités apparaissent.

Le Grid Codes permet de tirer certaines analogies entre la gestion d'un réseau électrique et d'un microgrid. Les notions de réglage primaire, secondaire et tertiaire sont adaptées à l'échelle d'un microgrid en îlotage. Le pilotage des puissances actives est aussi utilisé lors de l'îlotage.

Suisse (Transmission Code et Distribution Code)

Plage de tension :

La norme européenne EN50160, qui a le statut de norme suisse, stipule que la tension fournie au client final doit être comprise entre la tension nominale ± 10 [%]. Hors de ces limites, des appareils électriques peuvent être endommagés ou ne pas fonctionner.

Plage de fréquence :

Les unités de production demeurent branchées sur le réseau au minimum dans une plage de fréquences de 47.5 [Hz] à 51.5 [Hz] et participent au maintien de la fréquence.

Les unités de production décentralisées qui injectent dans le réseau moyenne tension ou le réseau basse tension doivent présenter les caractéristiques énoncées à la Figure 3 : Réduction de puissance en cas de surfréquence.

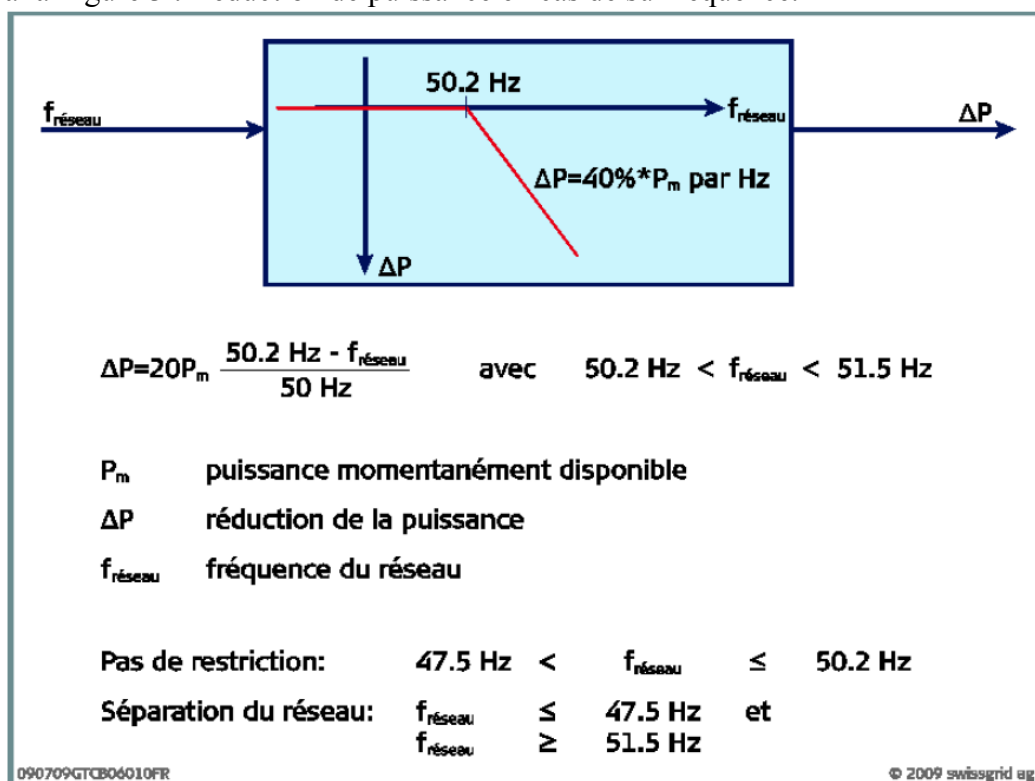


Figure 3 : Réduction de puissance en cas de surfréquence (Suisse)

Les unités de production doivent être conçues de façon à pouvoir être exploitées de manière stable dans les limites fixées de tension et de fréquence prévues par le GRD.

Les valeurs limites pour lesquelles un dépassement doit automatiquement entraîner le déclenchement de l'unité de production du réseau, ainsi que d'éventuelles temporisations doivent être réglées par contrat.

Puissance réactive :

Les unités de production doivent être entièrement aptes à fonctionner dans une plage de tension de 90 [%] à 100 [%] de la tension d'exploitation nominale aux points de raccordement dans le réseau de transport.

Les unités de production doivent pouvoir être exploitées de manière durable au minimum dans la plage suivante : facteur de puissance $\cos \varphi_+ = 0.925$ surexcité jusqu'à $\cos \varphi_- = 0,950$ sous-excité.

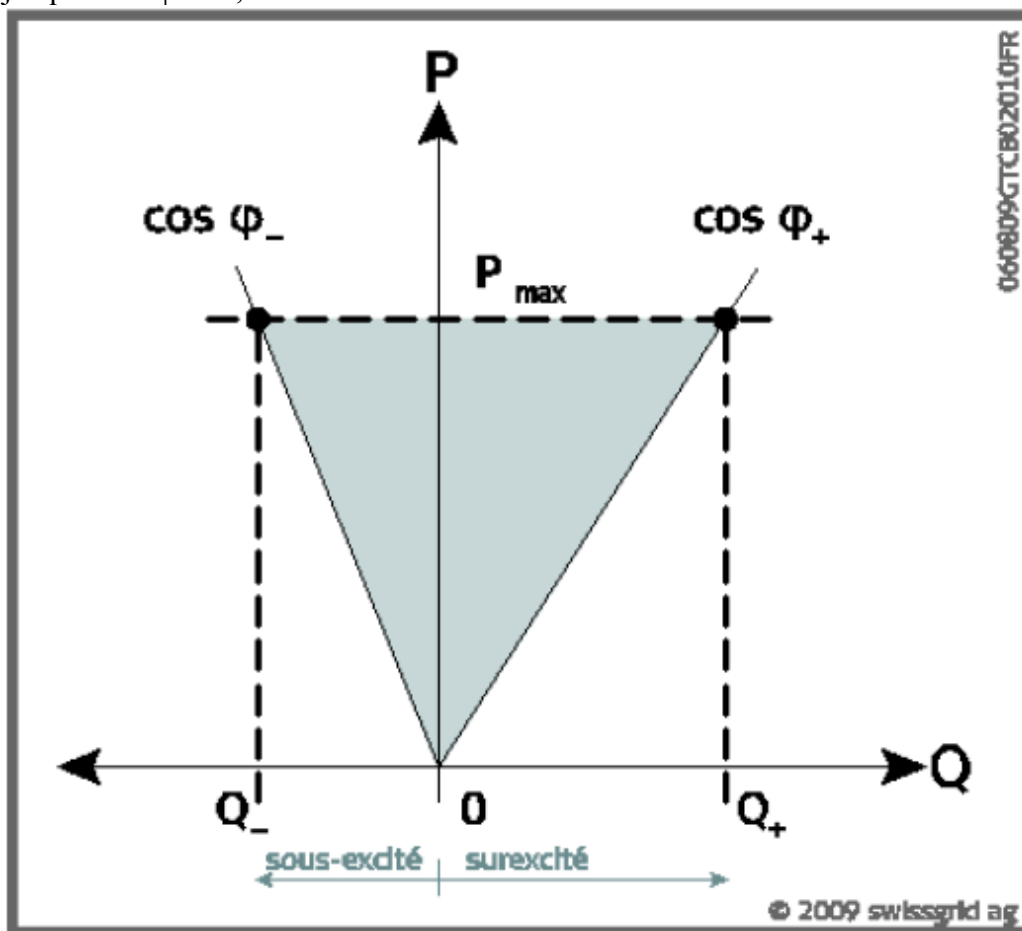


Figure 4 : Puissance réactive limite pour les unités de production (Suisse)

Cette limite de puissance réactive doit être fournie lorsque la charge active est maximale (Pmax).

Le balayage de la puissance réactive doit s'effectuer en quelques minutes à charge active maximale.

Puissance active :

Les unités de production doivent pouvoir être exploitées dans les limites des valeurs de tension (au sein de la plage délimitée) et de fréquence de réseau indiquées sur la figure suivante.

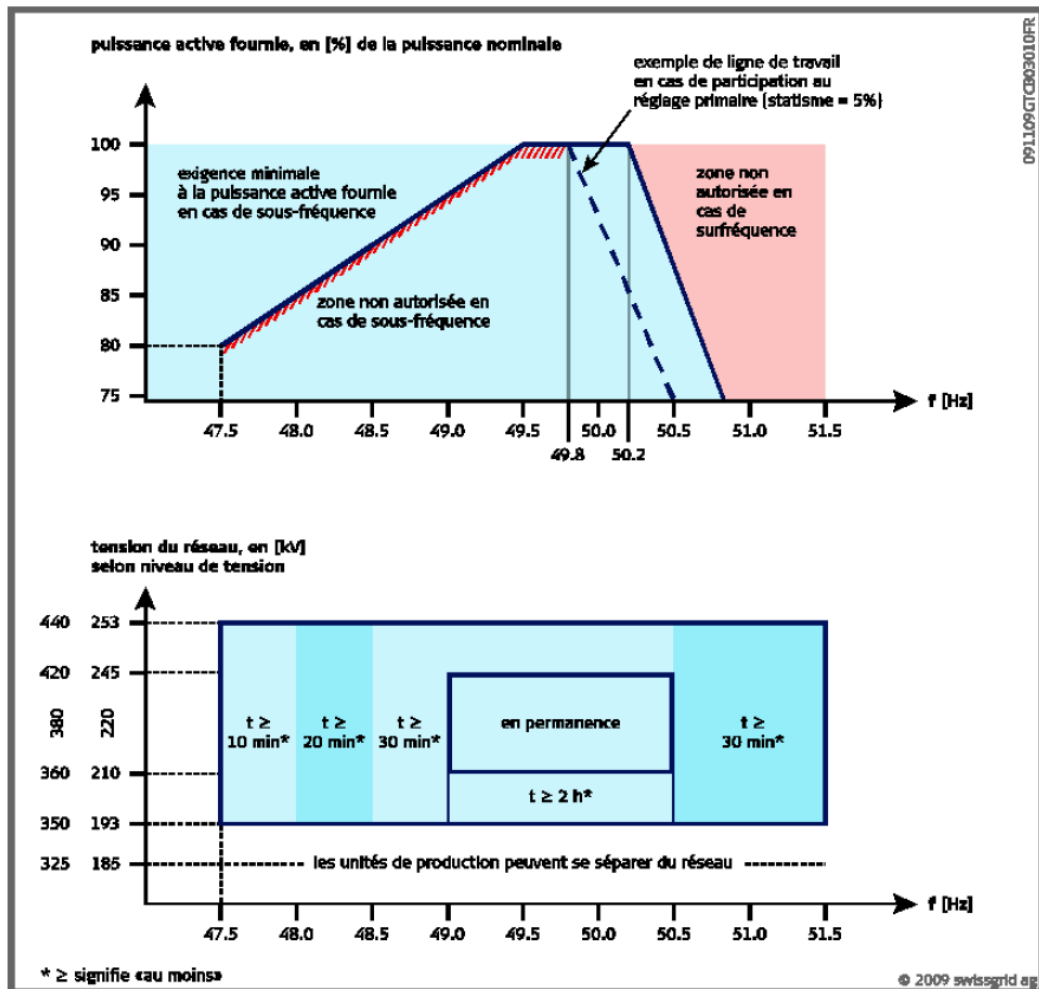


Figure 5 : Limite de fonctionnement des centrales de production (Suisse)

(DC, 2014) (TC, 2013)

Allemagne (Directive VDE 4105)

En Allemagne d'autres règles s'appliquent actuellement, ces règles ont été édictées lorsque la problématique liée aux grands nombres d'installations photovoltaïques sont apparues.

Réduction de la puissance active en cas de surfréquence :

Cette exigence a des répercussions sur son rendement, mais elles sont négligeables. D'après les anciennes directives, les installations photovoltaïques devaient jusqu'à présent se déconnecter en cas de hausse de la fréquence du réseau. La coupure simultanée de nombreuse installation peut engendrer des problèmes de stabilité sur le réseau européen (« problème des 50,2 [Hz] »).

Pour contrer ce problème, la puissance va être réduite progressivement en fonction de la puissance. La plage de fréquence admise s'étend de 47,5 à 51,5 [Hz]. A partir de 50,2 [Hz] la puissance active diminue progressivement.

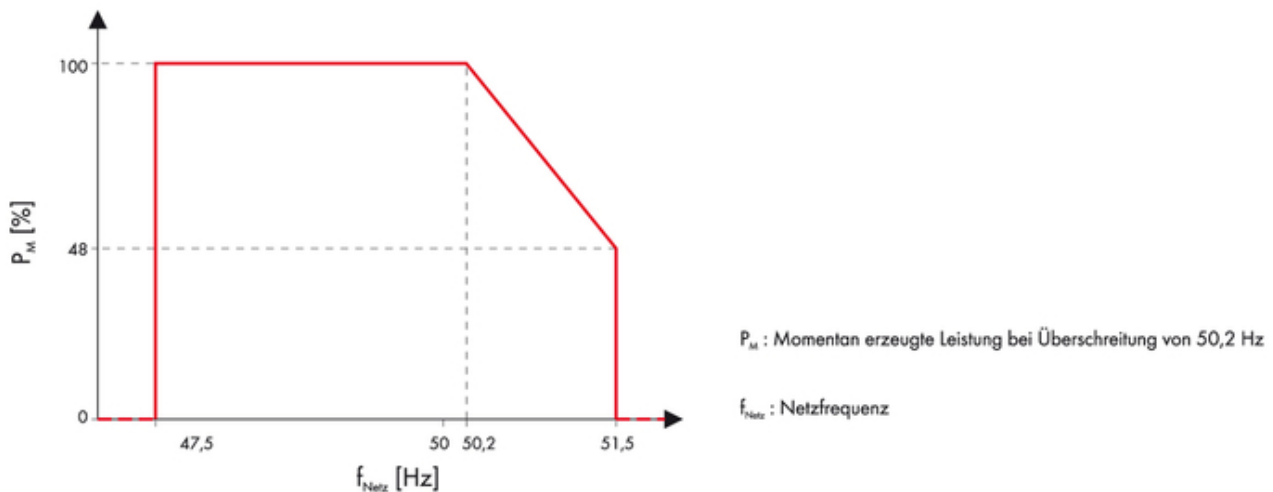


Figure 6 : Limitation de puissance en fonction de la fréquence (Allemagne)

Critère de raccordement et charge déséquilibrée admise :

La puissance limite d'injection avec des onduleurs monophasés est de 4,6 [kVA] par phase. La puissance nominale maximale d'une installation utilisant des onduleurs monophasés est donc de 13,8 [kVA]. Pour raccorder des installations de plus grande puissance, il est recommandé d'utiliser des appareils triphasés.

Limites de déconnexion :

Limites	Valeurs
protection contre la baisse de tension ($U <$)	184 [V]
protection contre la hausse de tension ($U >$)	253 [V]
protection contre la baisse de fréquence ($f <$)	47,5 [Hz]
protection contre la hausse de fréquence ($f >$)	51,5 [Hz]

Figure 7 : Limites de déconnexion (Allemagne)

Limites de remise en marche :

Limites	Valeurs
tension comprise entre	195,5 et 253 [V]
fréquence comprise entre	47,5 et 50,05 [Hz]

Figure 8 : Limites de remise en marche (Allemagne)

Mise à disposition de la puissance réactive :

A partir, d'une puissance d'installation apparente de 3,68 [kVA], la directive exige que les onduleurs soient en mesure d'injecter avec des facteurs de déphasages de 0,95 (inductif) à 0,95 (capacitif). Si la puissance de l'installation dépasse 13,8 [kVA], des facteurs de déphasage atteignant jusqu'à 0,90 doivent être possibles.

Ces facteurs doivent être atteints lorsque la production est à son maximum. Le $\cos \phi$ varie en fonction de la puissance actuelle de l'installation comme indiquée à la Figure 9 : Facteur puissance réactive en fonction de la puissance active (Allemagne).

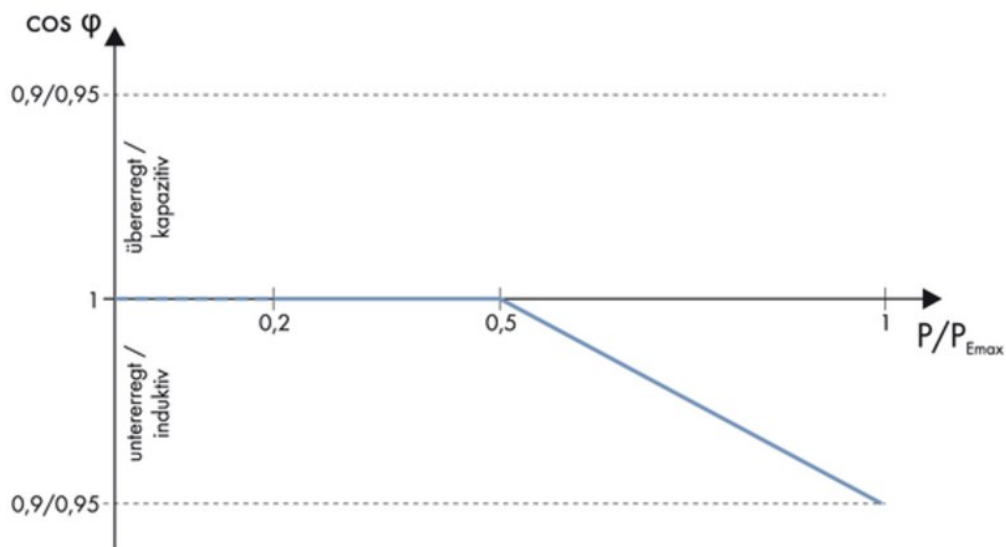


Figure 9 : Facteur puissance réactive en fonction de la puissance active (Allemagne)

(SMA)

Éléments du microgrid du GridLab

Schéma de principe

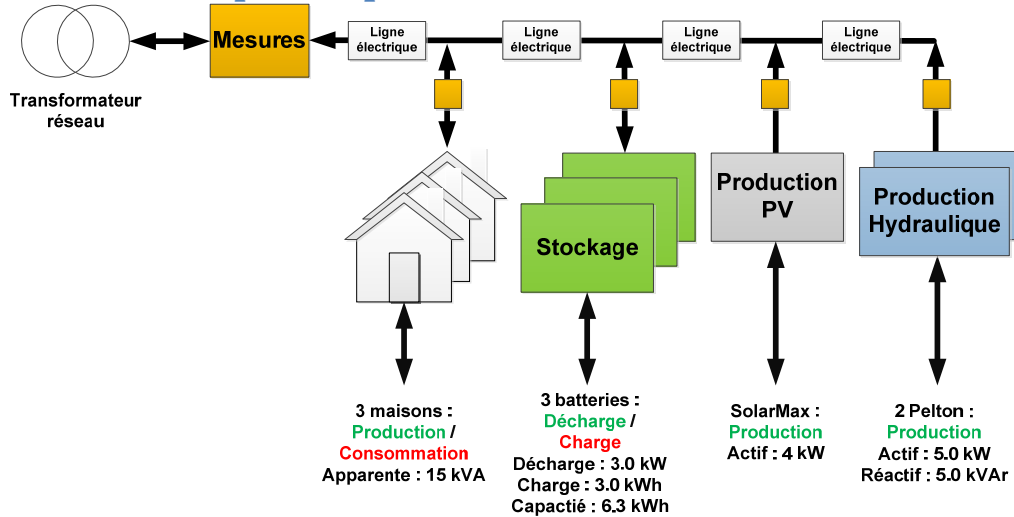


Figure 10 : Schéma de principe du microgrid

Voici un schéma basique regroupant les différents éléments du microgrid déployé dans le GridLab. Tout d'abord, un transformateur permet de connecter le réseau de distribution à notre microgrid. Derrière ce transformateur, un appareil de mesure permet de mesurer la puissance globale transitant entre le microgrid et le réseau de distribution, ainsi que d'autres paramètres électriques

Les 3 maisons sont des « autoproducteurs », elles peuvent produire de l'énergie avec des petites installations photovoltaïques et consommer jusqu'à 15 [kVA].

Le stockage est réalisé avec 3 batteries (une par phase). Ces batteries ont une capacité nominale de 6,3 [kWh] et la puissance maximale de charge/décharge est fixée à 3 [kW] dans notre microgrid.

La production PV est fournie par l'installation réelle implémentée sur le toit du GridLab. Cette installation peut produire jusqu'à 4 [kWp].

Deux génératrices de 5 [kW] sont utilisées pour produire de l'énergie hydraulique. Ces génératrices peuvent produire de la puissance active et réactive.

Des impédances représentent des lignes électriques pour reproduire le comportement réel d'un réseau de distribution. Ces lignes sont implémentées entre chaque maison.

Quartier de consommateurs (District)

Le GridLab est constitué d'une partie District. Le District représente des quartiers avec des caractéristiques réelles. La différence entre ces quartiers réside dans les impédances correspondant aux lignes électriques. Des lignes aériennes et enterrées sont ainsi représentées.

L'utilisation de ligne différente peut mettre en évidence certains problèmes liés à la topologie du réseau électrique.

Lors de ce projet, le poste A est utilisé. (District A = Poste 1)

Valeurs mesurées sur les impédances fabriquées dans le laboratoire					Valeurs estimées		
Poste	RL	XL	L	Rapport (R/X)	Type de transport	Longueur approximative correspondante	Section de câble
1	150 mΩ	141.4 mΩ	450 μH	1.1	Aérien	500 m	95 mm ² / Alu
2	130 mΩ	40.8 mΩ	130 μH	3.4	Enterré	500 m	95 mm ² / Alu
3	160 mΩ	144.5 mΩ	460 μH	1.1	Aérien	500 m	95 mm ² / Alu
4	Pas encore réalisé				Aérien	500 m	95 mm ² / Alu

Figure 11 : Caractéristiques des postes du District

Les appareils qui composent tous les Districts sont identiques. Un compensateur sériel, inutilisé dans notre microgrid, peut réguler la tension à la sortie du transformateur de quartier. Des consommateurs-producteurs sont répartis tout au long de la ligne électrique. Chaque segment de lignes correspond environ à 500 [m] réels, caractérisé par une résistance et une inductance.

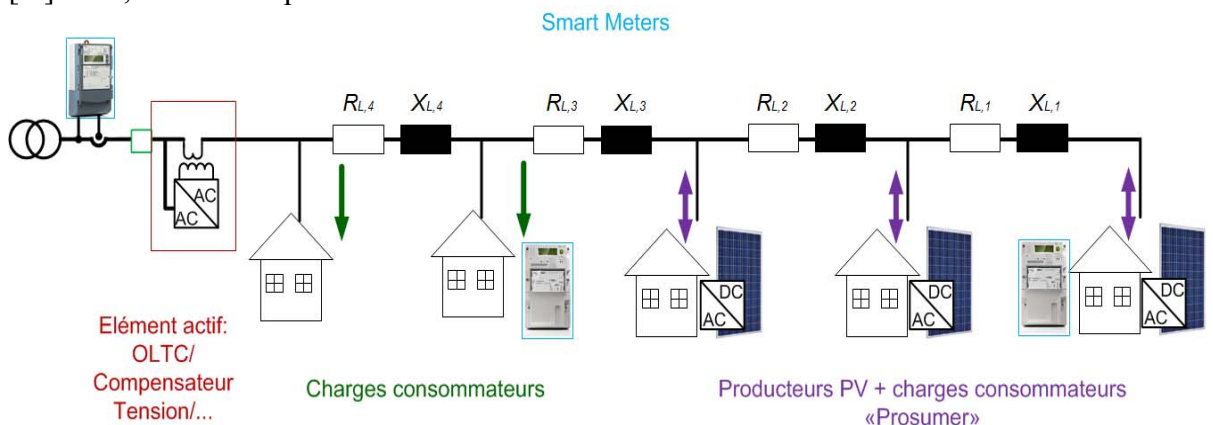


Figure 12 : Composants d'un quartier

Lignes :

Les valeurs physiques des lignes varient en fonction du poste. Ces valeurs de lignes influencent la variation de tension sur la ligne en fonction des puissances consommées et produites sur le quartier. La tension ne doit pas dépasser la valeur fixée par la norme EN 50160, ce seuil correspond à 10 [%] de la valeur nominale. Avec les caractéristiques de ces postes, ce seuil est rapidement atteint.

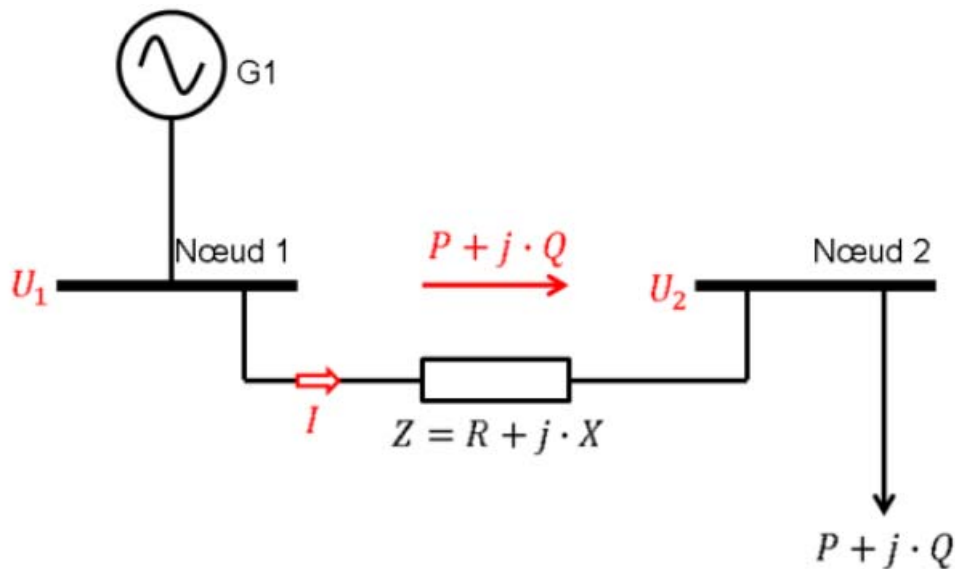


Figure 13 : Chute et augmentation de tension sur une ligne

Lorsqu'une puissance circule dans la ligne électrique, elle induit une chute ou une augmentation de tension. Une consommation sur la ligne induit une chute de tension et une production induit une augmentation de tension.

Avec $\underline{U}_1 = U_1 = \underline{U}_1^*$ (phase 0° de référence) On obtient:

$$\underline{U}_2 = \underbrace{U_1 - \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_1}}_{\text{Module de la partie réel}} - \underbrace{j \cdot \frac{P \cdot X - Q \cdot R}{U_1}}_{\text{Module de la partie imaginaire}}$$

Figure 14 : Calcul chute et augmentation de tension sur une ligne

Cette équation permet de calculer la tension sur un nœud en fonction des puissances circulantes. La puissance active est liée à la production et la consommation tout au long de la ligne. La puissance réactive influence aussi cette variation de tension.

Structure du District :

Structure des différents groupes du District

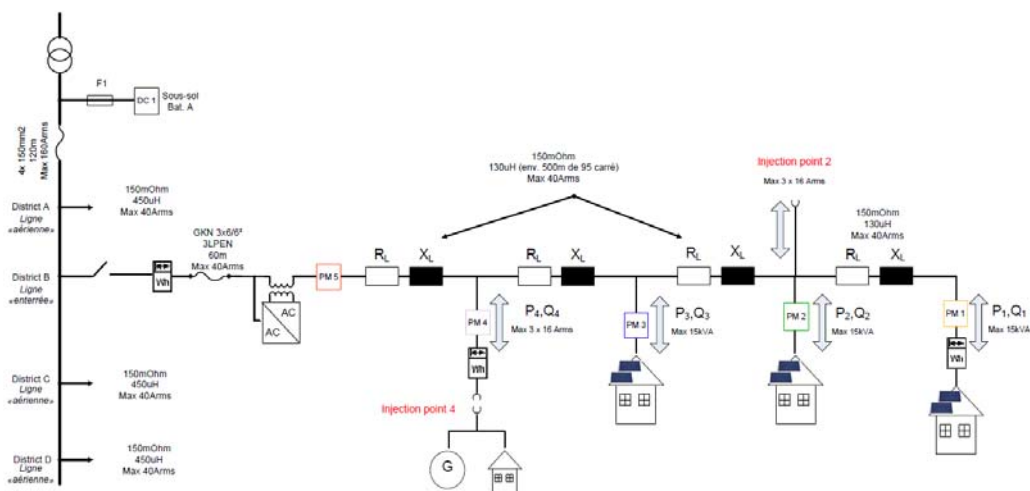


Figure 15 : Structure du District

La structure du District A est presque identique à celle du B présentée à la figure 15, la différence réside dans la ligne placée avant le compensateur sériel, cette ligne n'est pas présente dans le District A.

Trois maisons représentent des consommateurs-producteurs. Actuellement la production de ces maisons représente une production photovoltaïque. Plusieurs scénarios peuvent être réalisés en modifiant le type de production et sa quantité.

Deux points d'injections sont placés aux nœuds deux et quatre, ces points permettent de connecter plusieurs appareils, soit des charges ou alors des producteurs supplémentaires.

Un point de mesures est placé sur chaque nœud et un en entrée du quartier.

Consommateurs et producteurs :

Les trois maisons, consommateurs-producteurs, sont implémentées avec des drives ABB (ACS800). Ces drives peuvent être pilotés avec des consignes de puissance active et réactive. Les ACS800 sont capables d'émuler une consommation d'un foyer et une production solaire, cette fonctionnalité permet de réaliser n'importe quel type de profil.

La limite de puissance est de 15 [kVA] par maison. Cette limite est largement supérieure aux besoins du microgrid.

Les drives communiquent avec un protocole Modbus TCP/IP.

Avec Modbus TCP/IP les consignes de puissance active et réactive sont envoyées directement au drive ACS800.

Mesure :

Les appareils de mesures sont identiques aux différents points de mesures. Les mesures sont effectuées avec des SICAM-T. Ces appareils sont très performants et permettent de mesurer tous les paramètres nécessaires à la gestion du microgrid.

Les paramètres utiles sont la tension moyenne des trois phases, le courant sur chaque phase, les puissances (active, réactive, apparente) et la fréquence.

Les SICAM communiquent avec un protocole Modbus TCP/IP.

Compensateur sériel :

Le compensateur placé au début de la ligne n'est pas utilisé dans le microgrid. Cet élément permet de régler la tension pour éviter les dépassements fixés par la norme. Il faut prendre en compte que cet élément est déjà implémenté et qu'il peut être utilisé en cas de nécessité ou pour ajouter une fonctionnalité au microgrid.

Contraintes :

L'utilisation du District engendre différentes contraintes importantes.

Le courant circulant dans les lignes électriques est limité à 40 [A]. Ce courant est atteint très rapidement avec l'utilisation particulière du District lors de la mise en place du microgrid.

Le courant sur les points d'injection est limité à 16 [Arms] par phase. Les points d'injection sont utilisés pour connecter des batteries, une production solaire et des génératrices hydroélectriques. Ces appareils ont une puissance faible et ne permettent pas d'atteindre un courant aussi élevé.

La puissance des consommateurs-producteurs se limite à 15 [kVA] cette limite est nettement supérieure aux besoins du microgrid.

Stockage (Batteries)

Principe :

Notre système est triphasé, trois batteries sont installées ce qui permet de stocker l'énergie transitant sur les 3 phases.

Les batteries sont connectées électriquement à des onduleurs Xtender. Ceux-ci, contrôlent la puissance d'injection et de charge, ces puissances sont limitées par le système de gestion interne de la batterie (BMS : Battery Monitoring System) qui permet de préserver l'intégrité de la batterie et apporte un aspect sécuritaire important.

Les onduleurs transforment le courant continu des batteries en courant alternatif pour permettre une connexion avec le réseau électrique.

Ces onduleurs sont pilotables ce qui permet par exemple de commander la charge ou la décharge de la batterie.

Schéma de principe :

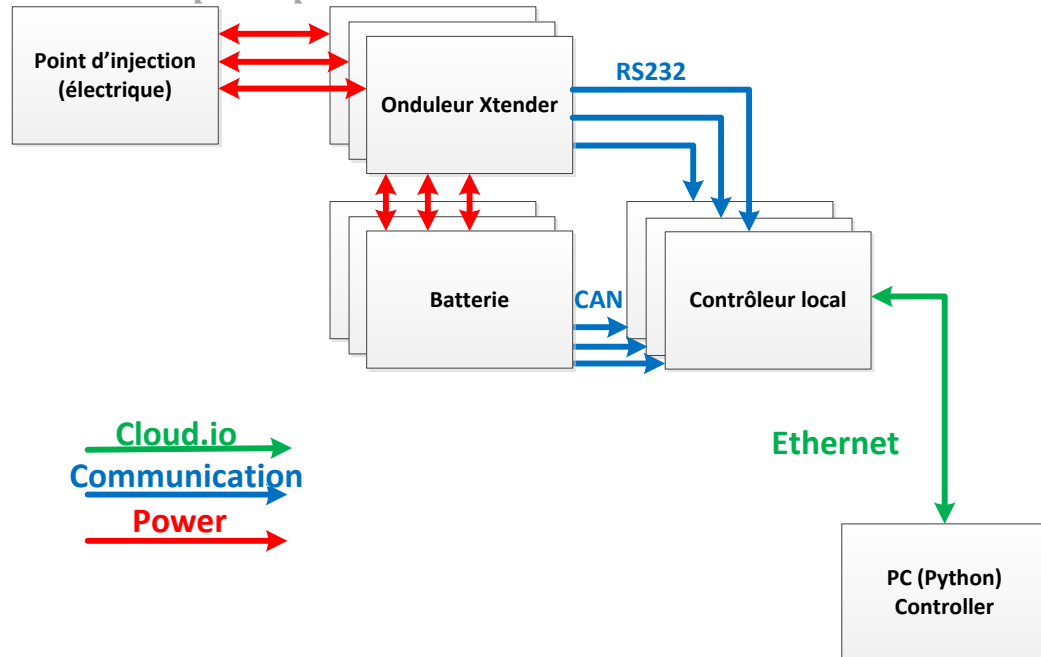


Figure 16 : Schéma batteries

Le réseau électrique est connecté avec trois onduleurs qui effectuent la transformation AC/DC.

Les onduleurs communiquent avec un protocole RS232, les batteries utilisent un protocole CAN, le tout est connecté à un contrôleur local.

Le contrôleur local implémenté fait l'intermédiaire entre les appareils physiques et le contrôleur principal du microgrid.

De plus, un système interne à la batterie permet de limiter le fonctionnement de la batterie pour éviter les risques lors de l'utilisation ou son usure trop rapide.

Communication :

Le système de gestion interne des batteries mesure les paramètres importants (SOC : état de charge, tension et courant) et limite la charge et la décharge pour protéger la batterie d'une mauvaise utilisation.

Les onduleurs Xtender mesurent les paramètres importants (courant, tension, puissance, fréquence) et pilotent les batteries en fonction des consignes reçues depuis le contrôleur local.

Les consignes d'utilisation sont envoyées directement du contrôleur de notre microgrid, puis transmises au contrôleur local. Les mesures effectuées par le BMS et les onduleurs sont redirigées vers le contrôleur central.

Batteries :

Les batteries sont des Apollion Cube de Leclanché.

Caractéristiques principales : Apollion Cube 15 S

Caractéristiques :	Valeurs :
Communication protocol	CAN / SMA
Cell technology	Li-Ion
Energy content	6,3 kWh
Nominal voltage	55,5 V
End of charge voltage	61,5 V
End of charge discharge	41,0 V
Charge current (Nominal, Peak)	80 A, 150 A (1 sec.)
Discharge current (Nominal, Peak)	80 A, 300 A (1 sec.)
Number of full cycles	5'000
Expected lifetime	Up to 20 years
Weight	100 kg

Figure 17 : Caractéristiques principales de la batterie

(Leclanche)



Figure 18 : Batterie Apollion Cube

Onduleurs :

Les onduleurs sont des XTM 4000-48 de Studer.

Caractéristiques principales : XTM 4000-48

Caractéristiques	Valeurs
Puissance continue	3500 VA
Puissance 30 min.	4000 VA
Puissance 5 sec.	10500 VA
Tension AC	150-265 Vac
Tension batterie nominale	48 V
Plage tension d'entrée	38-68 V
Courant de charge maximale	50 A

Figure 19 : Caractéristiques principales de l'onduleur

(Studer)



Figure 20: Onduleur XTM 4000-48

Contraintes :

La contrainte principale de ce système de stockage est l'influence du BMS interne à la batterie Apollion. La puissance de consigne ne peut pas être respectée à tout moment, mais ce système de gestion essaie d'atteindre cette consigne tout en respectant les contraintes de charge et de décharge protégeant la batterie.

Le système de stockage est vu comme une boîte noire par le microgrid. Des consignes de puissance sont transmises et les mesures sont reçues. Les paramètres et le comportement de cette « boîte noire » ne peuvent pas être modifiés.

Production hydraulique (Dispatching)

Le Dispatching permet d'émuler des groupes de production hydraulique. Deux groupes de production représentent des turbines Pelton de 33 [MW] et deux groupes représentent des turbines Francis de 17 [MW]. Ces productions sont réalisées avec une échelle de 1 :5000 au sein du Gridlab. La puissance de production nominale est de 20 [kW].

Pour émuler une production hydroélectrique, un variateur de fréquence est utilisé pour piloter un moteur qui fournit de l'énergie électrique.

En plus des quatre turbines, une production éolienne et solaire est utilisable. Les deux turbines Pelton sont les seules productions utilisées actuellement. Les différents groupes produisent de l'énergie et l'injectent directement sur le réseau électrique, l'énergie produite est mesurée en sortie de chaque groupe.

Composition d'un groupe :

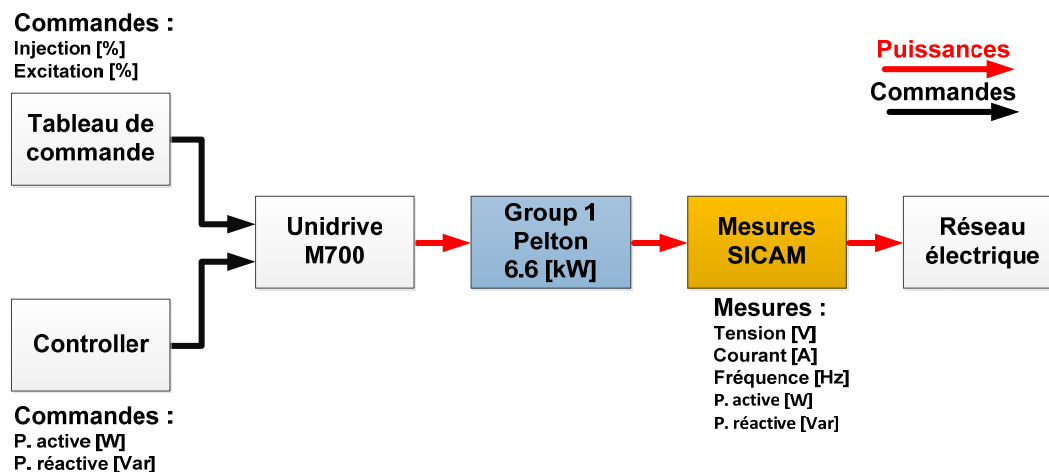


Figure 21 : Schéma de principe d'un groupe

Chaque groupe possède son propre tableau de commande manuel, utilisé pour démarrer le moteur et l'emmener au point de fonctionnement qui permet de le synchroniser au réseau. L'injection permet de varier la vitesse du moteur pour atteindre les 1500 [RPM] qui correspond à 50 [Hz]. L'excitation permet d'ajuster la tension sur le moteur pour atteindre les 400 [V] nécessaire à la synchronisation.

Lorsque la synchronisation est faite, le contrôleur peut prendre le relais pour le pilotage du Dispatching. Les consignes sont directement en puissance, l'utilisation de régulateur PI implémenté dans les drives permet d'utiliser des consignes de puissance pour varier le niveau d'injection et d'excitation.

Actuellement, l'utilisation du contrôleur pour synchroniser les groupes n'est pas possible à cause de la connexion physique des drives et des synchronoscopes. Il faut donc utiliser le tableau de commande manuelle pour la synchronisation.

Les drives (Unidrive M700) reçoivent des consignes et sont utilisés commander le moteur pour qu'il produise un couple semblables au couple d'une turbine. Les drives ont plusieurs modes de fonctionnement, le premier est une régulation en couple et le deuxième est une régulation en vitesse.

La régulation en couple est utilisée pour le fonctionnement normal du moteur, le réglage en vitesse est implémenté lors de l'ilotage. Un groupe est contrôlé en vitesse pour stabiliser le 50 [Hz] et les autres groupes sont en mode couple pour atteindre la puissance de production voulue.

Schéma de principe :

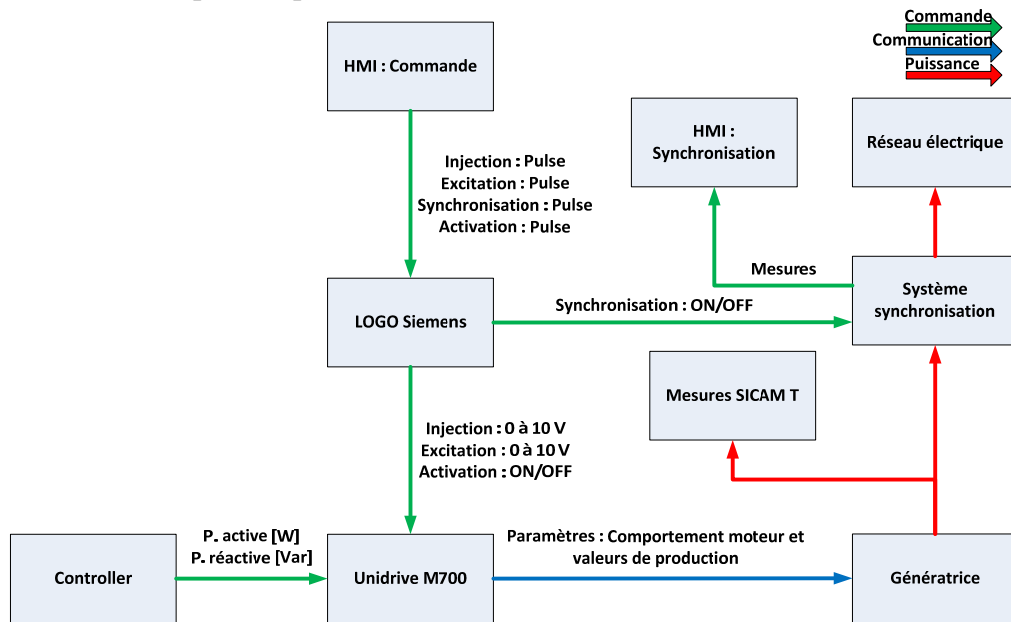


Figure 22 : Schéma de principe complet Dispatching

L'HMI (Interface Homme Machine) agit sur le pourcentage d'injection, le pourcentage d'excitation, l'activation de la génératrice et sur la synchronisation au réseau.

Le tableau de commande est connecté à un automate programmable du type LOGO. L'automate reçoit des pulses lorsque les boutons de l'HMI sont actionnés par un utilisateur. Ces impulsions sont ensuite transformées en signaux 0-10 [V].

Un système de synchronisation lié à un HMI permet de visualiser la fréquence actuelle du moteur, le déphasage et la tension à ces bornes, cette visualisation est essentielle pour savoir à quel moment l'utilisateur peut synchroniser la génératrice au réseau électrique.

Lorsque le système est synchronisé, l'influence de l'HMI sur la génératrice est désactivée, le contrôleur prend la main et transmet des consignes de puissance au drive.

En sortie du moteur, une mesure de production est implémentée pour contrôler le bon comportement du moteur en fonction des consignes.

Variateur de fréquence :

Le variateur est un Unidrive M700 qui peut prendre des mesures et recevoir des consignes qui permettent de varier les points de fonctionnements du moteur.

(Automation)



Figure 23: Unidrive M700

La communication avec les drives s'effectue via Modbus TCP/IP.

La liste des paramètres et des registres utilisés pour piloter le drive est abordée en annexe.

Mesure :

Les appareils de mesures sont identiques aux différents points de mesures. Les mesures sont effectuées avec des SICAM-T. Ces appareils permettent de mesurer tous les paramètres nécessaires au Microgrid.

Les paramètres utiles sont la tension moyenne des trois phases, le courant sur chaque phase, les puissances (active, réactive, apparente) et la fréquence.

Les SICAM communiquent avec un protocole Modbus TCP/IP.

Les paramètres et les numéros de registres sont décrits dans les annexes : Unidrive M700.

Tableaux de commandes :

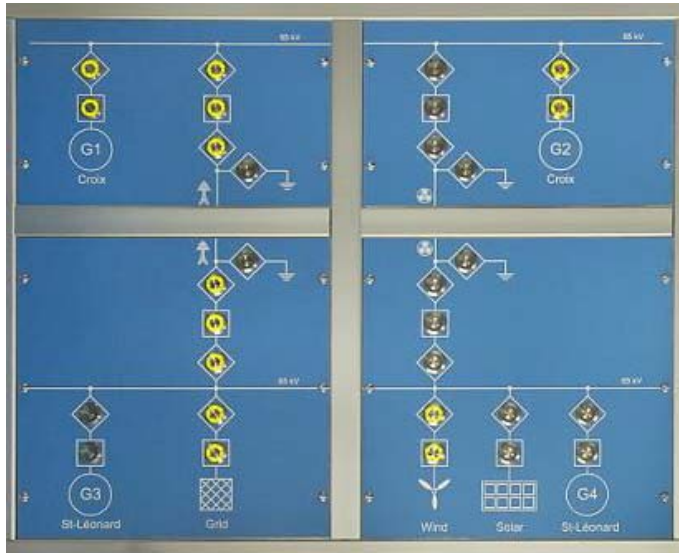


Figure 24 : Schéma de connections du poste 65 [kV]

Ce tableau de commande permet de connecter et de déconnecter les différents groupes de production. Lorsque les groupes sont connectés avec le réseau électrique il faut encore les démarrer manuellement et effectuer la synchronisation. Le choix entre une ligne aérienne et enterrée est possible avec la sélection des différents disjoncteurs.

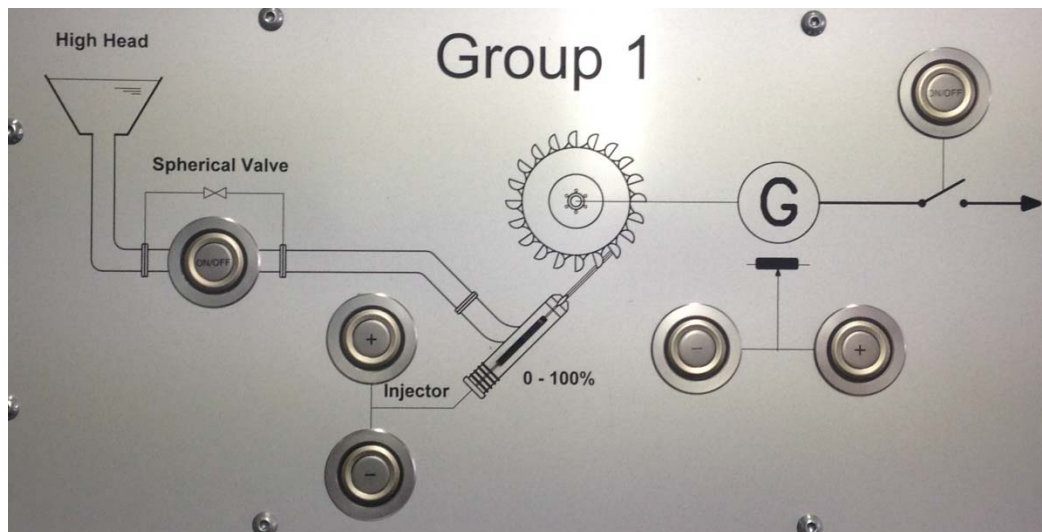


Figure 25 : Tableau de commandes du groupe 1

Le bouton « Spherical Valve » permet d'ouvrir ou de fermer l'arrivée d'eau, dans le Gridlab la génératrice est connectée à un drive Emerson qui permet de simuler l'arrivée d'eau.

Les deux boutons « Injector » permettent d'augmenter ou de diminuer l'injection d'eau à l'entrée de la génératrice.

Les deux boutons situés en bas à droite du tableau de commande permettent de régler l'excitation sur le moteur.

Le bouton situé à droite du tableau est utilisé pour synchroniser la génératrice au réseau lorsque les paramètres de synchronisation sont respectés.

Production solaire (SolarMax)

Une production photovoltaïque est installée sur le toit, cette production peut atteindre les 4 [kWp]. L'utilisation de cette production dans le microgrid est importante, elle permet d'appréhender la gestion d'une production qui n'est pas contrôlable et qui est difficilement prévisible.

L'onduleur SolarMax est connecté au système de communication cloud.iO. La valeur de production instantanée et l'énergie produite sont récupérées.

Une prévision météorologique permet d'anticiper avec une marge d'erreur la production solaire lors de la journée suivante. Cette anticipation est utilisée dans certaines fonctions du microgrid, l'implémentation d'une centrale photovoltaïque réelle est extrêmement importante pour la gestion du microgrid.



Figure 26 : Onduleur SolarMax

(SolarMax)

Système de communication (cloud.iO)

Ce système offre une infrastructure de monitoring et de contrôle pour un grand nombre d'appareils.

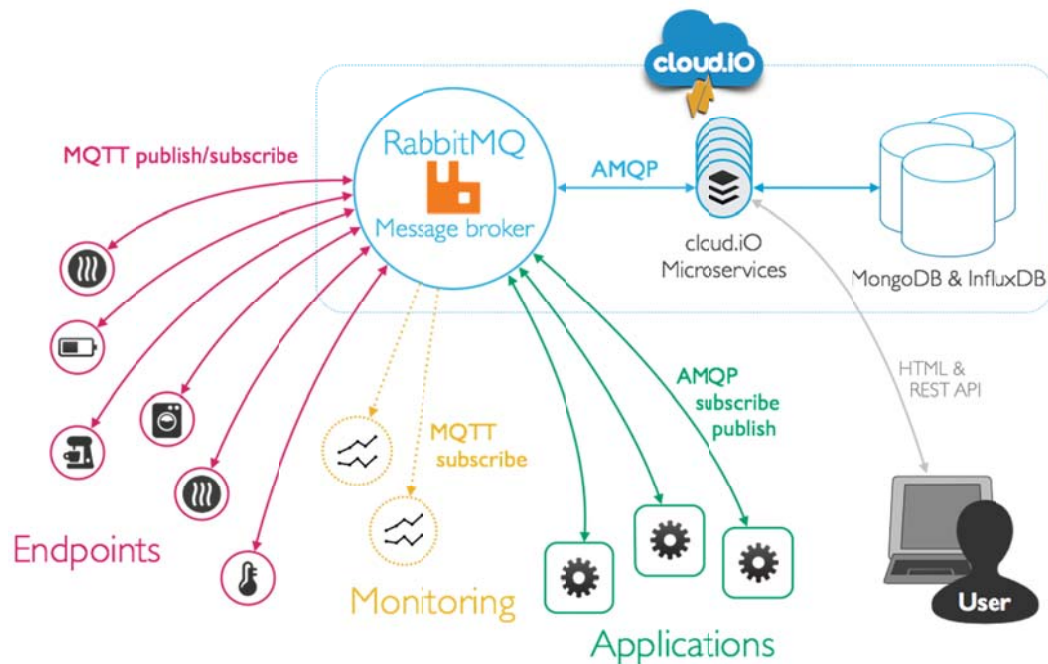


Figure 27 : Schéma cloud.iO

Le système cloud.iO est développé à la HES-SO VS, c'est un projet en cours de développement et de test. (cloud.iO)

Le but est de connecter tous types d'appareils à un service de gestion centralisé. Dans le Gridlab tous les éléments utilisent le système cloud.iO pour communiquer avec le contrôleur, c'est-à-dire le SolarMax, le District, le Dispatching et le système de stockage.

Un protocole de communication Ethernet est implémenté entre ces différents terminaux et le serveur cloud.iO.

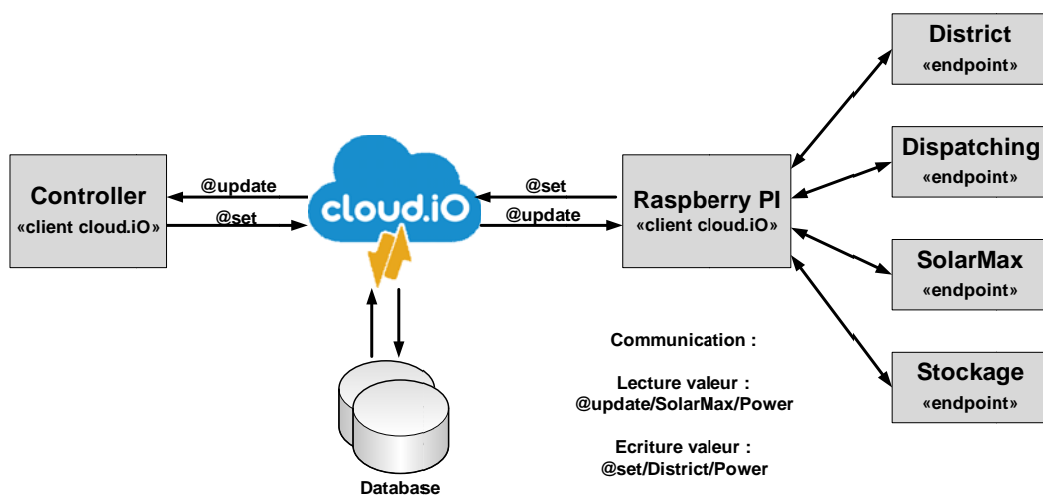


Figure 28 : Principe cloud.iO

Avec la figure 29, la compréhension du système cloud.iO est facilitée.

Il y a deux types d'appareils qui communiquent avec cloud.iO, le premier est le contrôleur qui envoie des consignes de pilotage et reçoit des mesures des différents appareils, le deuxième est un Raspberry Pi qui reçoit des valeurs de consignes pour les transmettre aux terminaux, le Raspberry réceptionne aussi des mesures provenant des différents terminaux et les retransmet au système cloud.iO.

Une passerelle (dans notre cas implémentée sur Raspberry Pi) est nécessaire pour effectuer la communication entre cloud.iO et les terminaux, le pilotage des terminaux est variable en fonction de l'appareil, par exemple le District utilise un protocole Modbus TCP/IP, de plus chaque appareil a des paramètres différents. Comme chaque appareil est unique, il faut implémenter un protocole pour avoir une interopérabilité. Le principe général de cette interopérabilité est l'établissement d'un modèle XML.

Ce fichier de configuration XML permet de faire le lien entre les noms cloud.iO logiques et les paramètres physiques d'adressage (adresse IP, registre Modbus, etc.)

```
<endpoint name="device2-01" district="a" interval="10"> <!-- district_A -->
  <option name="drive" host="153.109.14.46" port="502"/>
  <option name="sicam" host="153.109.14.47" port="502"/>
  <node name="sicam1" type="sicam" address="11" associate="drive1">
    <object name="MeasuredValues" start="40201" end="40251">
      <attribute name="U1" address="40201" type="float"/>
    </object>
  </node>
</endpoint>
```

Figure 29 : Exemple de modèle XML

Le modèle complet de la nomenclature du cloud.iO dans le GridLab est placé en annexe.

Voici un exemple de configuration, le device2-01 (cloud.iO) correspond au district A du GridLab. Ce district est composé d'un drive et d'un SICAM, avec une adresse IP et un numéro de port fixe pour la communication. Ces appareils communiquent avec un protocole Modbus, la suite du fichier fait le lien entre un paramètre cloud.iO et son numéro de registre. Chaque terminal a un modèle XML spécifique.

Des bases de données permettent de stocker les mesures effectuées par les terminaux et de les récupérer pour effectuer de la visualisation ou de l'analyse de données.

La communication entre le cloud.iO et les clients est faite avec un protocole spécifique qui contient un chiffrement et une authentification, des commandes @set permettent d'envoyer des consignes et les commandes @update sont utilisées lors de la réception des mesures.

Le protocole de communication cloud.iO utilise un type de message appelé MQTT, qui contient un « message Topic » et un « corps de message ».

Exemple de « Message Topic »	@set/device2-01/nodes/drive1/objects/SetPoints/attributes/P'
Contenu du « corps de message »	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Type de variable ▪ Valeur ▪ Timestamp

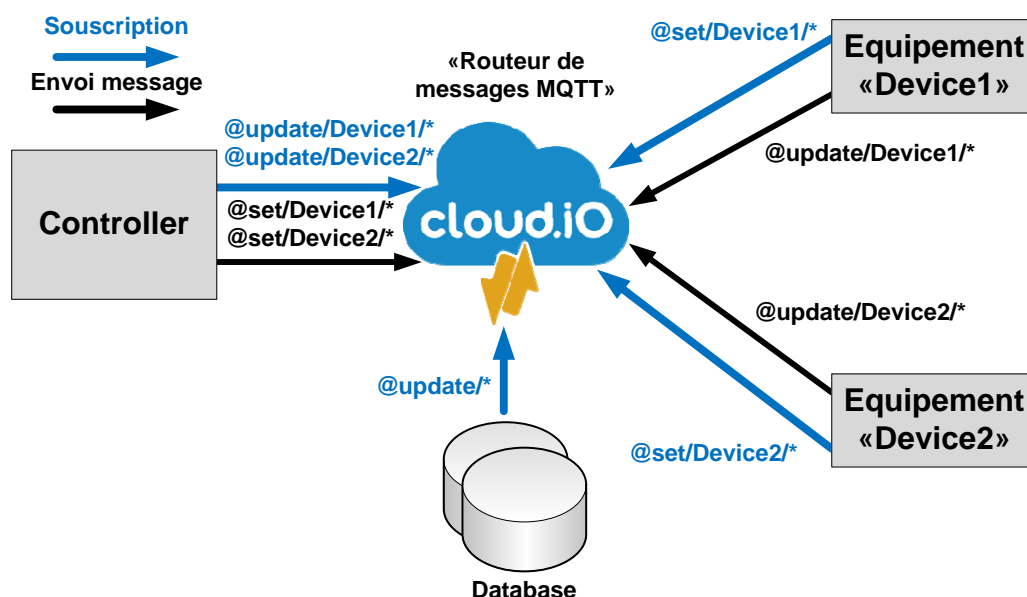


Figure 30 : Principe des messages MQTT

Le contrôleur se souscrit à différents Topics. Dans notre exemple, il se souscrit à tous les messages envoyés par le Device 1 et 2. Le Device 1 et 2 se souscrivent à toutes les consignes envoyées depuis le contrôleur. La base de données se souscrit à tous les messages MQTT dont le topic commence par @update.

Depuis le contrôleur, une valeur de puissance doit être transmise au District, la commande suivante est utilisée :

'@set/device2-01/nodes/drive1/objects/SetPoints/attributes/P'

Pour recevoir des mesures, le client doit se souscrire aux paramètres qu'il souhaite recevoir, lorsque la souscription est faite, les mesures sont transmises toutes les 10 secondes, la commande pour une mesure de puissance sur le District est la suivante :

'@update/device2-01/nodes/sicam1/objects/MeasuredValues/attributes/P'

Une liste complète des paramètres de lecture et d'écriture cloud.iO est placée en annexe.

(cloud.iO)

Systeme de controle

Principe de base

Le principe de base du controleur est de faire tourner en parallele plusieurs programmes gerant chacun une fonctionnalite specifique du programme global.

Le microgrid est decompose en 4 elements principaux, le District, le Dispatching, le SolarMax et les batteries.

Chaque element doit avoir un fichier de programmation associe, ce fichier va recuperer les mesures de l'appareil physique et recevoir des consignes provenant du controleur.

Le controleur est le fichier de base du programme, celui-ci recupere les mesures des differents elements, les analyses et renvoie des consignes pour ajuster le comportement du systeme.

Fonctionnement en parallele

La gestion de chaque appareil doit se faire d'une maniere independante des autres et en parallele, cette facon de faire permet de desactiver un appareil tres facilement du microgrid tout en laissant les autres composants en parfait etat de marche.

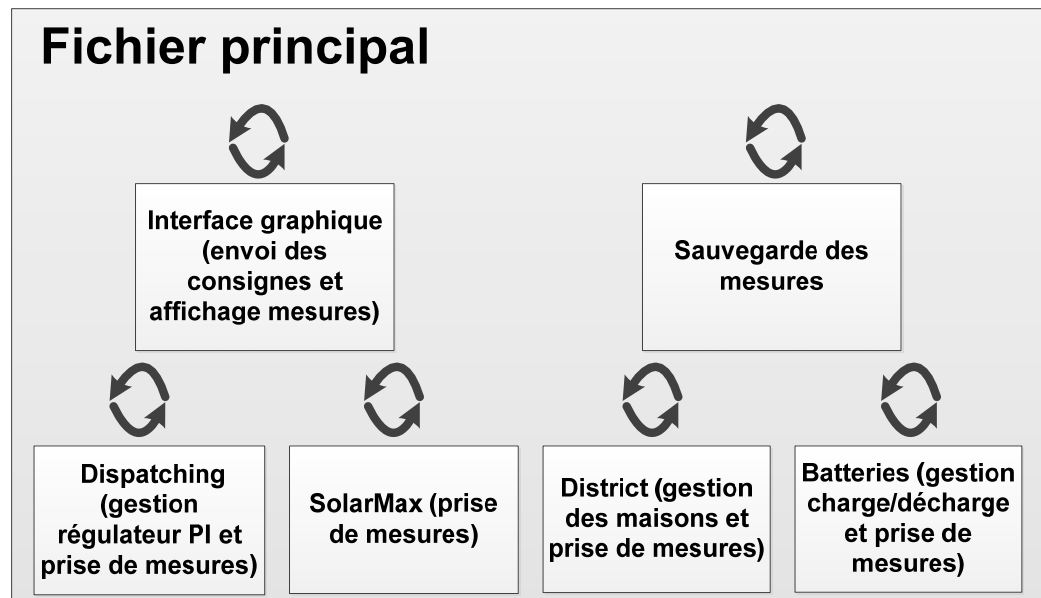


Figure 31 : Principe de programmation en parallele

Chaque appareil est gere individuellement par un programme, celui-ci fonctionne de maniere asynchrone par rapport aux autres programmes.

Pour realiser cette fonctionnalite, l'utilisation des threads est necessaire. Les threads permettent d'executer plusieurs activites en pseudo parallele dans un programme.

Threads

Le langage Python supporte le concept de threads. Chaque thread est basé sur l'utilisation d'une boucle « while » infinie, un « sleep » permet de gérer le temps entre chaque itération.

Le fichier principal lance les threads, chaque thread gérant une partie spécifique du système.

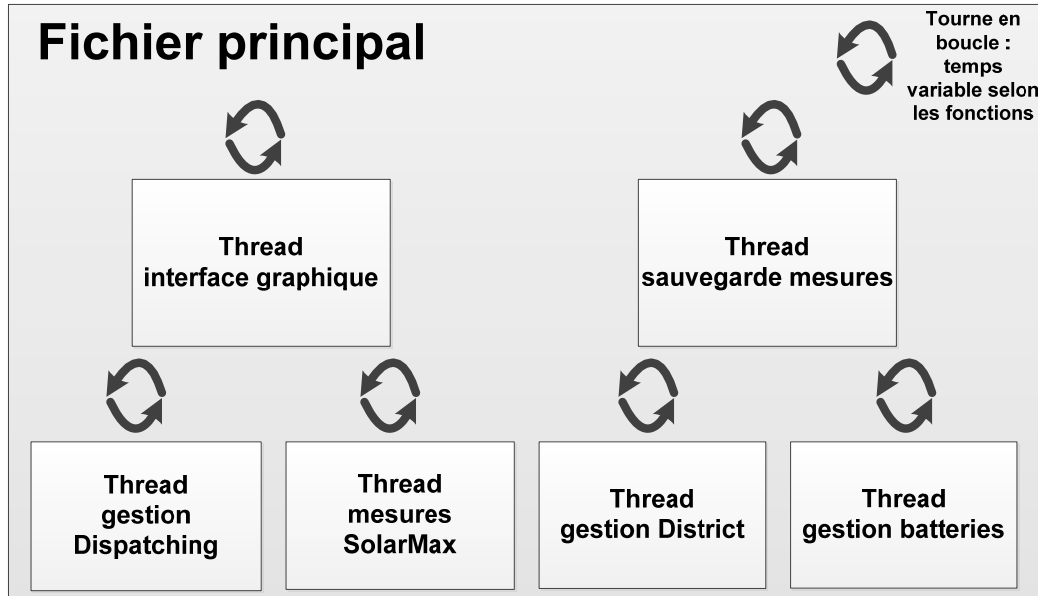


Figure 32 : Principe de base du contrôleur

Tous les threads tournent en parallèle avec un temps de répétition variable selon leur fonctionnalité. Par exemple, les mesures du District sont effectuées chaque 10 secondes et la gestion du Dispatching doit être faite chaque seconde pour avoir un bon contrôle sur la génératrice.

Diagrammes

Diagramme de classe

Les threads tournent en parallèle, certaines informations doivent être échangées entre ces différents fichiers. Pour effectuer cet échange, toutes les valeurs sont stockées dans des objets informatiques, ces objets sont mis à jour de façon asynchrone. Les threads vont donc mettre à jour certains paramètres des objets et récupérer d'autres paramètres pour les réutiliser.

Les objets représentent virtuellement les éléments du microgrid. Un objet microgrid est composé d'un District, d'un Dispatching, de trois batteries et d'un SolarMax. L'objet District est lui-même composé de 3 drives (maison pilotable) et de 5 points de mesures. Le Dispatching est composé de 4 drives (génératrice hydraulique) et de 4 points de mesures.

Diagramme de séquence

Les informations doivent être stockées dans les objets de manière asynchrone, car la constante de temps des différents threads est différente. Le diagramme de séquence décrit précisément l'interaction entre le contrôleur et un objet.

Le schéma ci-dessous représente le principe du transfert d'information entre les différents objets.

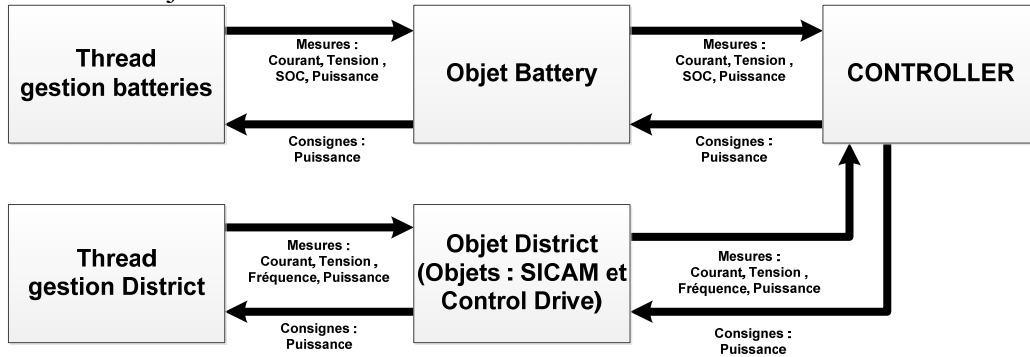


Figure 33 : Interactions entre les objets

Cette interaction schématise simplement le lien entre différents composants du GridLab. Toutes les consignes ou les mesures sont stockées dans les objets informatiques et mis à jour.

Diagramme de classe

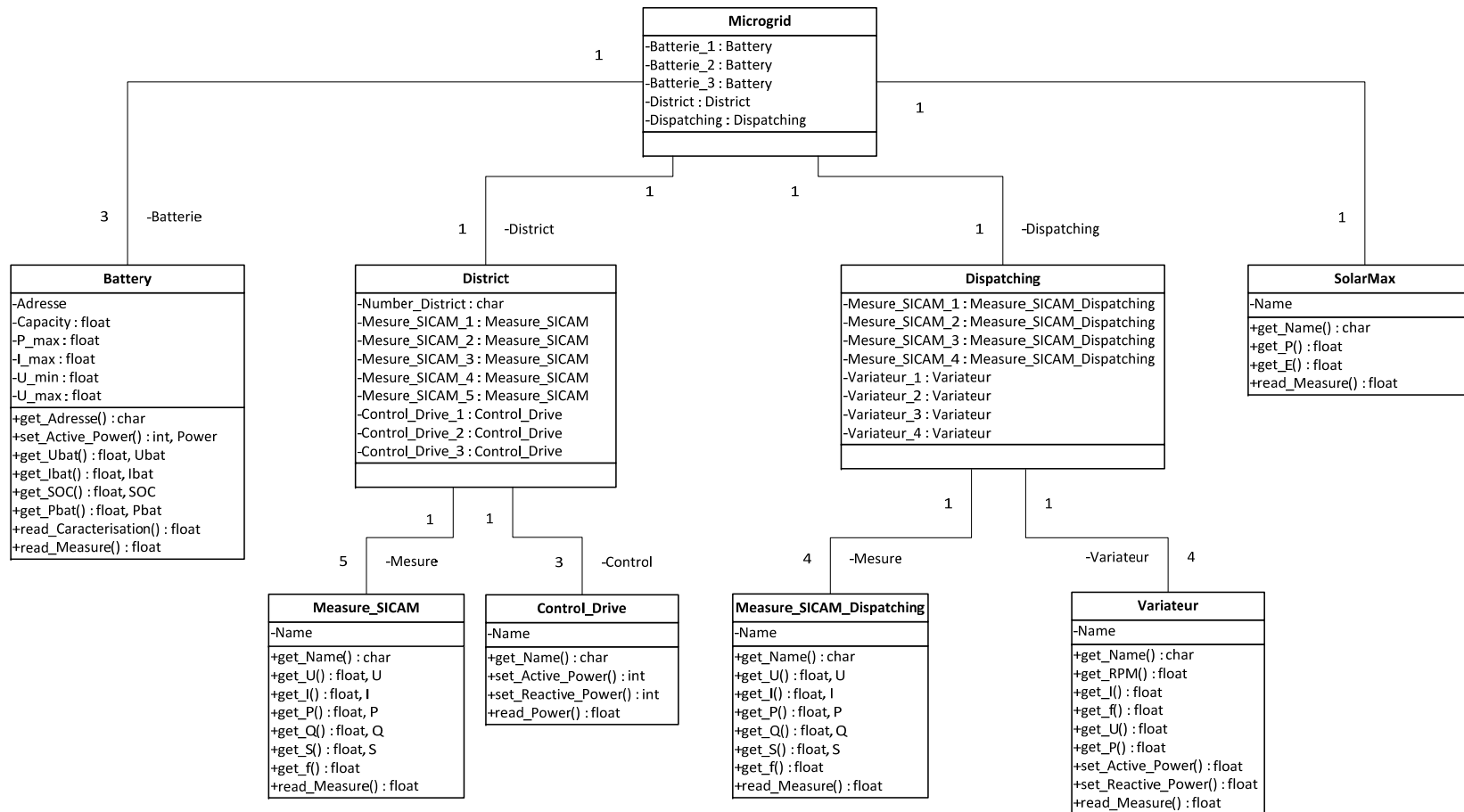


Figure 34 : Diagramme de classes

Diagramme de séquence

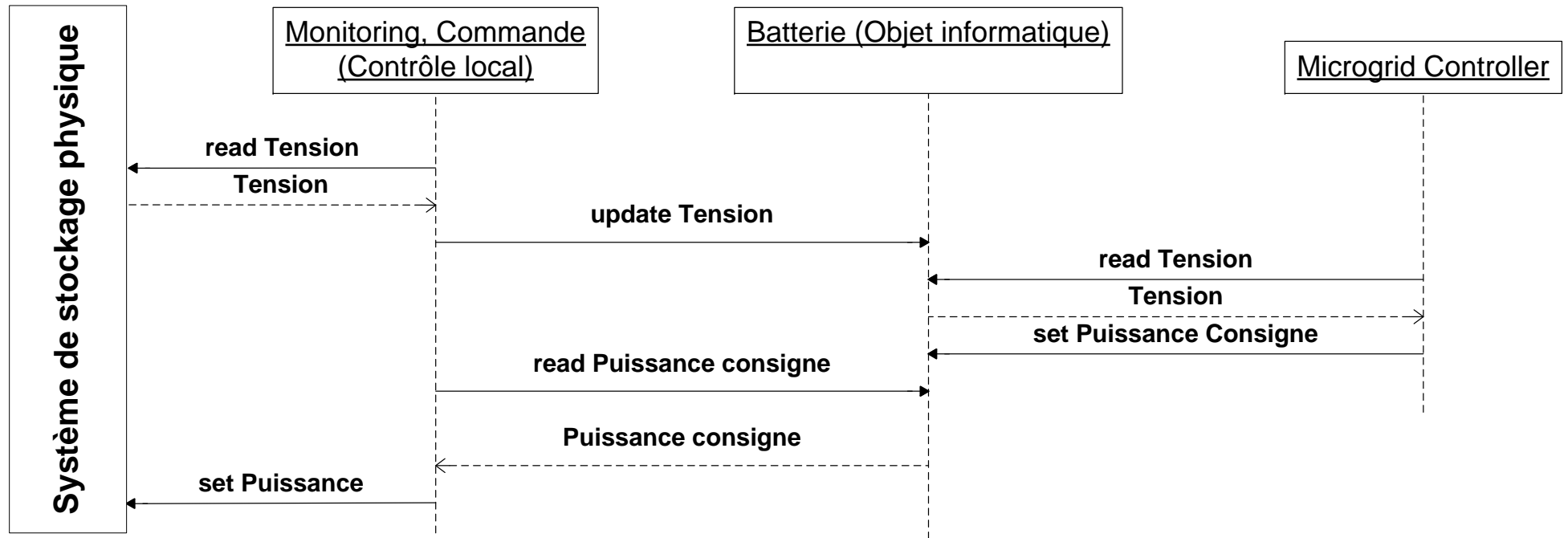


Figure 35 : Diagramme de séquence (Batterie)

Ce diagramme représente un exemple de communication entre le « Microgrid Controller » et le système de stockage composé de batteries.

Connexion électrique

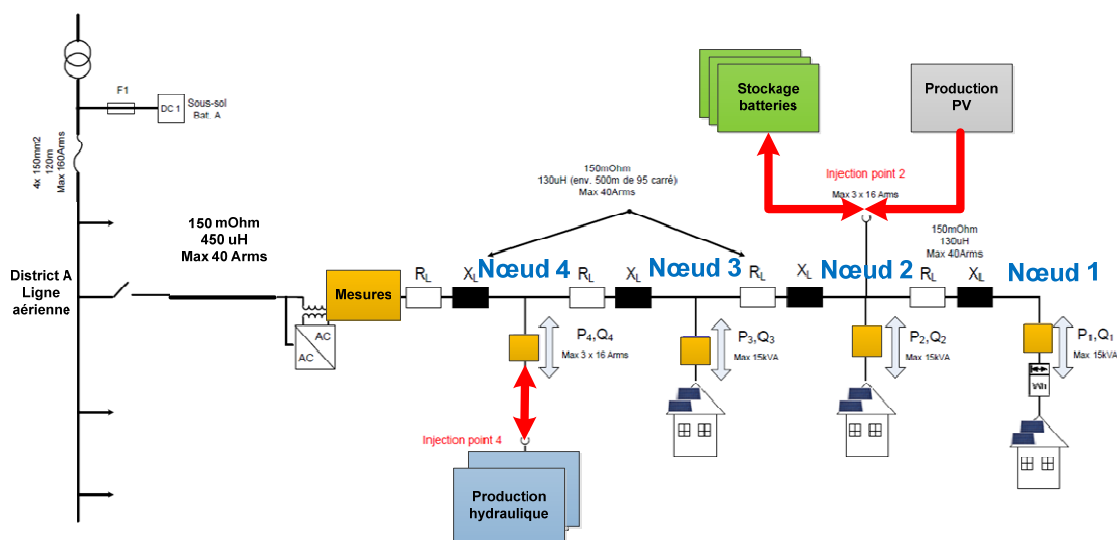


Figure 36 : Schéma électrique

La base du microgrid est de réutiliser un District déjà implémenté. Chaque District possède deux points d'injection qui permettent de connecter des appareils supplémentaires.

La production hydraulique, composée de deux turbines, injecte de l'énergie sur le nœud 4.

La production PV injecte de l'énergie sur le nœud 2, l'onduleur SolarMax est directement connecté à ce point.

Pour finir le placement, du stockage est stratégique, idéalement il est placé au plus proche de la production pour éviter les pertes lors du stockage d'énergie, c'est pourquoi les batteries sont aussi connectées sur le point d'injection 2.

Les rectangles orange représentent les SICAM, ces SICAM mesurent les paramètres électriques importants de notre réseau, ils sont placés à chaque point important.

Des mesures supplémentaires sont installées, chaque production hydraulique possède un SICAM individuel, les batteries possèdent chaque une un système de mesure et la production PV est mesuré avec l'aide de l'onduleur SolarMax.

Schéma de communication

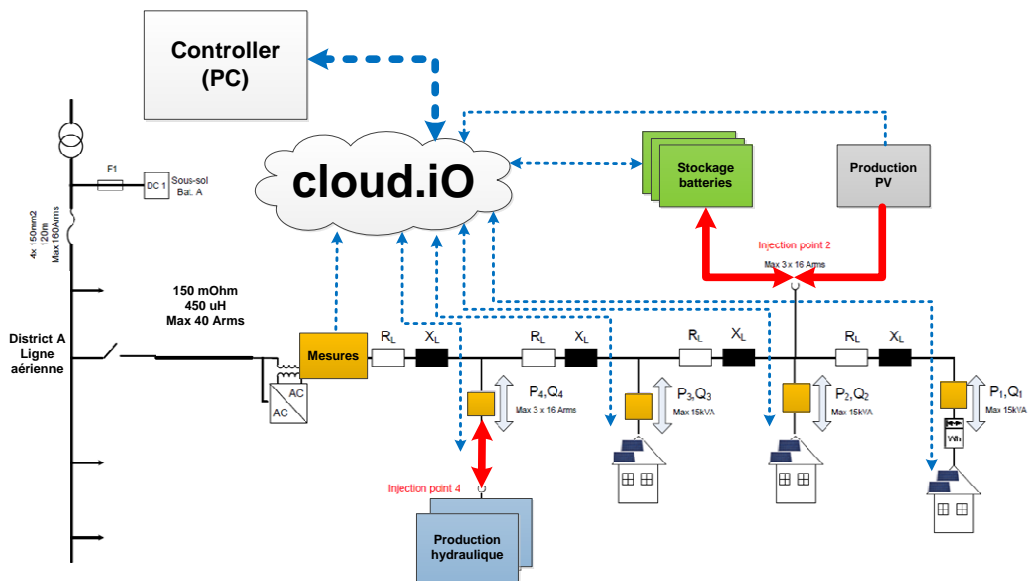


Figure 37 : Schéma de communication

Chaque élément du microgrid communique directement avec le système cloud.iO.

Le contrôleur reçoit les mesures des différents appareils, ensuite un algorithme permet de calculer les consignes de puissance à envoyer pour obtenir le comportement voulu sur le microgrid.

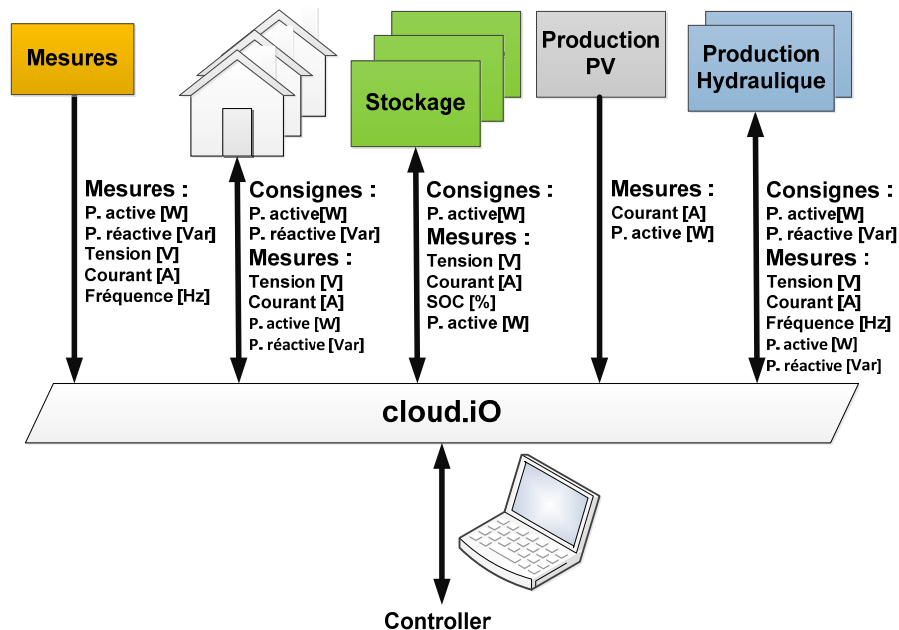


Figure 38 : Schéma de contrôle

Le schéma ci-dessus détaille les paramètres lus et écrits sur les différents éléments du microgrid.

Scénarios

Le déroulement du travail de Bachelor se fait par une succession d'étapes. Chaque étape ajoute une composante pour finalement atteindre le but du travail, qui est l'implémentation d'un microgrid fonctionnant en îlotage.

Survol des étapes

Consignes fixes (Etape 1)

- Valeurs de consignes fixes pour la puissance active et réactive de chaque élément.
- Sert principalement à tester la communication avec les différents éléments.
- Prise en considération du temps de réponse des appareils et de leurs limites électriques.
- Mise en place d'une interface homme-machine pour choisir des consignes et visualiser les mesures.

Réglage de tension avec la puissance réactive (Etape 2)

- Pilotage du quartier de consommateur et de la production hydraulique pour contrôler la puissance réactive fournie.
- Caractéristique locale Var-Volt.
- Développement d'autre régulation du type Watt-Volt et Watt-Hertz nécessaire pour l'îlotage.
- Mise en place d'une fonction d'optimisation régulant la puissance réactive tout en optimisant d'autres paramètres comme le courant.

Suivi d'une courbe de charge (Etape 3)

- Création d'un profil de puissance pour chaque élément.
- Prévision météorologique pour anticiper la production solaire.
- Agrégation des profils de production et de consommation pour créer la courbe de charge.
- Variation aléatoire des consignes de puissance pour obtenir un écart entre la courbe de charge et le profil instantané.
- Régulation pour diminuer l'écart entre la courbe de charge et le profil instantané.
- Réglage effectué avec une fonction d'optimisation, contrôle des batteries et du groupe de production hydraulique.

Îlotage (Etape 4)

- Mise en place d'un groupe de production hydraulique en mode vitesse (régulation pour atteindre le 50 [Hz])
- Deuxième groupe hydraulique en mode couple pour produire de l'énergie.
- Connexion physique entre tous les éléments pour tester la stabilité du réseau.
- Mesurer l'inertie des génératrices hydrauliques et leur temps de réponse.
- Utilisation des batteries pour assister les groupes hydrauliques dans le maintien du réseau.

Consignes fixes (Etape 1)

Principe

L'étape 1 du projet permet principalement de tester la communication entre les différents éléments physiques et la supervision. Le but est d'envoyer des consignes fixes aux différents appareils et de mesurer leur comportement.

Une HMI (interface homme-machine) permet de visualiser en temps réel les mesures des différents éléments constituant le microgrid. Cette interface envoie des consignes de puissance active et réactive aux différentes maisons qui sont pilotables, une consigne de puissance active et réactive pour la production hydraulique et une consigne de puissance active aux batteries.

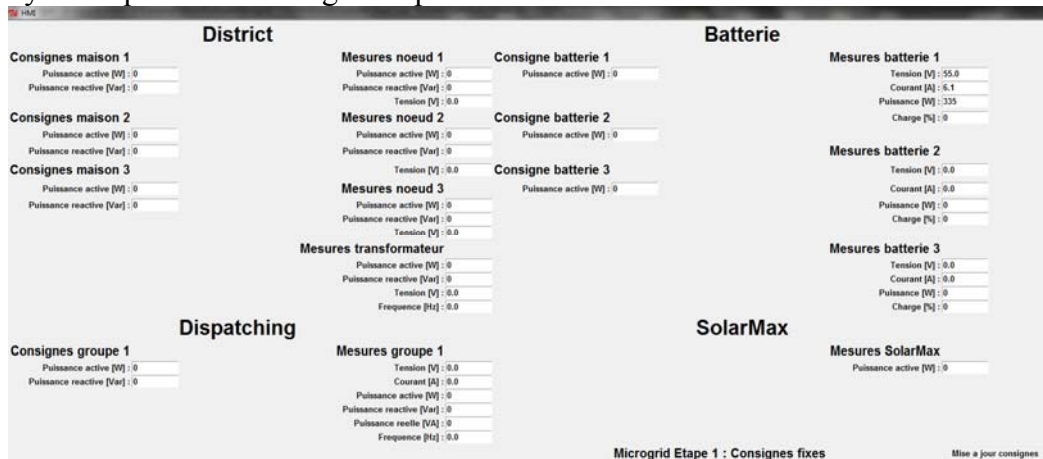


Figure 39 : Interface Etape 1

Les consignes sont fixées par l'utilisateur, chaque appareil électrique peut être contrôlé séparément.

L'utilisateur fournit les valeurs sans se préoccuper des valeurs limites, la limitation s'effectue avec la régulation locale des appareils, cependant le courant transitant dans les lignes électriques doit être pris en compte.

Les mesures s'actualisent toutes les 10 secondes avec le système de communication cloud.iO. Ce temps d'actualisation peut être varié en fonction de l'application.

Réglage Var-Volt (Etape 2)

Principe

L'étape 2 du projet consiste principalement à réaliser la régulation locale des différents appareils.

Il y a plusieurs types de régulation différente, une régulation permet de réduire la variation de tension sur les lignes électriques. Lorsque la tension est trop éloignée de sa valeur nominale, une puissance réactive capacitive ou inductive peut être produite par certains appareils pour réduire cet écart (Var-Volt).

Cette régulation n'est pas réalisable avec tous les appareils dans notre microgrid les maisons et le Dispatching peuvent injecter du réactif.

La puissance active peut aussi être utilisée pour limiter la variation de tension. Lorsque la production ou la consommation en bout de ligne est trop importante, la batterie utilise ce principe en autorisant sa charge ou sa décharge (Watt-Volt).

Cette régulation permet de réduire les pics de production et de consommation, c'est dans ces deux cas de figure, principalement, que les problèmes de tension apparaissent sur les réseaux électriques.

La régulation de puissance active permet aussi au microgrid de fonctionner en mode îlotage. La batterie et les génératrices hydrauliques permettent d'ajuster la

puissance produite et la puissance consommée sur le réseau isolé pour stabiliser la fréquence du réseau (Watt-Hertz).

Lorsque la puissance consommée est trop grande, en flottage, la génératrice va ralentir et la fréquence va diminuer, si cette fréquence atteint un seuil critique les appareils connectés vont se déconnecter et le réseau isoler va tomber. Lorsque la fréquence est trop grande le même problème survient.

Réalisation

Une régulation Var-Volt est implémentée dans le microgrid, cette régulation agit sur les trois maisons et sur les génératrices hydrauliques.

Les maisons sont émuloées avec des drives qui peuvent varier la puissance réactive, pour une installation réelle il y aura un onduleur. Certains onduleurs peuvent produire de la puissance réactive jusqu'à une certaine valeur, limitée par le cos phi. Pour notre application une limite de cos phi variant de -0.8 à 0.8 [rad] est appliquée.

Les groupes hydrauliques peuvent fournir de la puissance réactive en variant le niveau d'excitation du moteur.

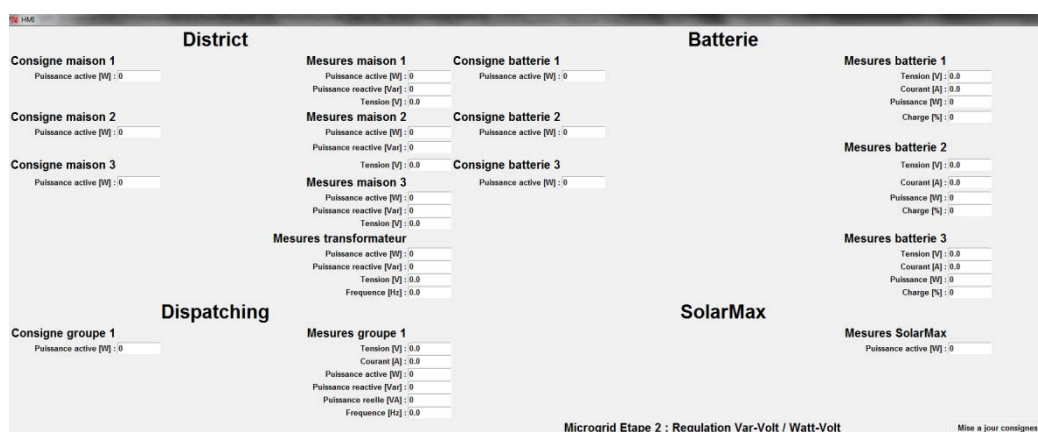


Figure 40 : Interface Etape 2

L'interface est semblable à celui de l'Etape 1, seulement les consignes de puissance réactive sont supprimées. Ces puissances sont calculées par un algorithme d'optimisation qui permet de varier les puissances réactives du District et du Dispatching pour diminuer l'écart de tension entre la valeur nominale du réseau électrique et la valeur actuelle des différents nœuds du microgrid. C'est la régulation Var-Volt.

Cependant, l'utilisation du Gridlab a certaines contraintes, le réglage local ne peut pas être programmé dans les appareils, pour un onduleur le réglage local est implémenter dans l'appareil, dans le Gridlab plusieurs projets sont menés en parallèle et contraignent son utilisation.

Pour contrer ce problème, la régulation est implémentée dans le système de gestion du microgrid, les consignes de puissances envoyées aux terminaux sont directement optimisées, mais idéalement la régulation doit être faite localement.

Courbe de charge (Etape 3)

Principe

L'étape 3 du projet consiste à réaliser une régulation secondaire du microgrid.

Cette régulation est active au niveau du système de contrôle, le principe est d'adapter toutes les productions et les consommations du microgrid pour correspondre à un profil de charge précédemment envoyé au fournisseur d'électricité.

Cet ajustement permet de diminuer les pénalités à payer au fournisseur lors du non-respect des courbes de charges.

La puissance instantanée transitant par le réseau est mesurée, l'écart entre cette puissance et le profil de charge est calculé. Ensuite des valeurs d'ajustement sont envoyées aux appareils pour limiter au maximum ces écarts.

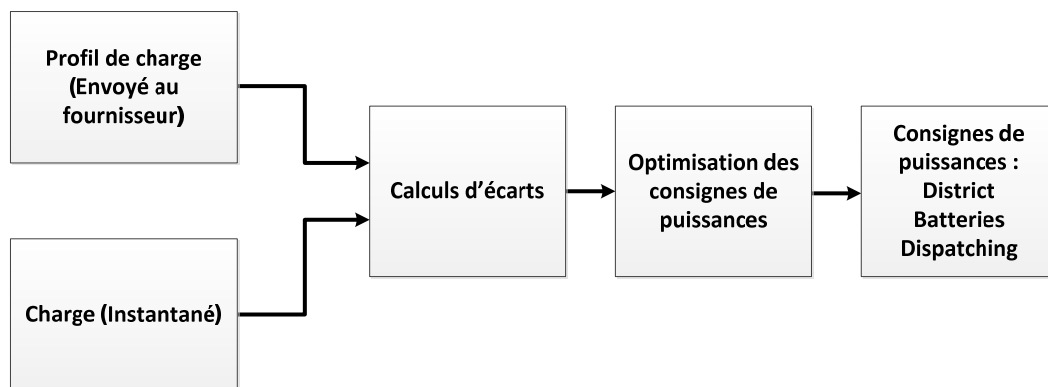


Figure 41 : Schéma de principe de l'étape 3

Un profil est envoyé au fournisseur 24 heures en avance, ce profil est calculé avec une estimation des productions et des consommations, cette estimation peut être calculée de plusieurs façons différentes en fonction des données possédées et du type d'appareils électriques utilisés. De plus, des prévisions météorologiques sont récoltées pour anticiper la production photovoltaïque du microgrid.

Lorsque le microgrid est actif, une mesure avant le transformateur permet de faire le bilan entre le profil prévu et le profil de charge réel. Lorsque l'écart est mesuré, un algorithme d'optimisation ajuste les valeurs de production pour ajuster la charge au profil précédemment prévu.

Réalisation

Les consignes de puissance sont fixées avec l'utilisation de fichier csv. Toutes les minutes des nouvelles valeurs de consommation et de production sont mises à jour. L'utilisation de fichier csv remplace les commandes manuelles faites avec l'HMI. Les consignes sont envoyées aux maisons et au Dispatching, la batterie est exclusivement utilisée pour le réglage et le SolarMax produit de l'énergie selon l'ensoleillement actuel.

Les turbines sont pilotées avec une consigne de puissance fixée à 3200 [W], ce qui correspond à environ 80 [%] de la puissance nominale. Le Dispatching est ensuite utilisé pour participer au réglage secondaire, lorsque la production est trop grande les turbines vont réduire leur puissance de fonctionnement jusqu'à atteindre 2400 [W]. Lorsque la consommation est trop importante, la puissance produite par l'installation hydraulique pourra atteindre les 4000 [W].

La production photovoltaïque réelle permet d'avoir une production non contrôlable, cette caractéristique permet d'étudier certaines problématiques visibles lors du contrôle d'un réseau électrique. Cette production photovoltaïque sera estimée 24 heures en avance grâce aux prévisions météorologiques.

La batterie sert seulement à réguler le Microgrid, la puissance de charge et de décharge peut varier de 2000 à -2000 [W].

Principe de régulation

Le principe est relativement simple pour le moment, il y a plusieurs possibilités de réaliser cette fonction de régulation, elles varient selon le microgrid et selon les envies du gestionnaire.

Une courbe de charge est envoyée au fournisseur d'énergie, dans notre cas ce profil est l'addition de la production photovoltaïque des maisons, de la consommation des trois maisons, la production hydraulique fixée à 3200 [W] (cette valeur peut être variée selon les certains critères, par exemple si l'on veut maximiser la production il ne faut pas utiliser le Dispatching comme système de régulation), la production du SolarMax fixé par les prévisions météorologiques.

Des puissances en temps réelles sont fixées pour obtenir un écart entre la courbe de charge prévue et la puissance transitant sur le réseau. Les puissances de consignes envoyées aux maisons correspondent à la courbe de charge prévue, mais ajuster avec un « random » variant de 0.9 à 1.1 pour obtenir un écart aléatoire, de plus la production photovoltaïque est mesurée en temps réel et diffère de la production prévue.

Ces variations sont ensuite compensées avec la mise en place d'une régulation utilisant le Dispatching et les batteries.

L'algorithme de régulation utilise une fonction d'optimisation, le premier critère d'optimisation est l'écart entre la courbe de charge prévue et la courbe actuelle, cet écart doit être minimisé. Les autres critères sont adaptés selon l'utilisation du microgrid.

Contraintes

Les contraintes sont liées tout d'abord au temps de réponse des systèmes, la variation de puissance est plus rapide en utilisant le Dispatching par rapport aux batteries. Mais pour cette fonction, la vitesse de réponse n'est pas primordiale puisque la puissance de référence varie toutes les 15 minutes. Une constante de temps de l'ordre de la dizaine de secondes est suffisante.

L'usure de la batterie est à prendre en compte, lorsque le stockage est trop utilisé, ces propriétés sont affectées. Il faut donc utiliser les batteries intelligemment et de manière limitée.

L'état de charge du système de stockage est très important, la régulation ne peut pas s'effectuer lorsque la batterie est vide ou pleine, cette contrainte doit être intégrée dans la fonction d'optimisation.

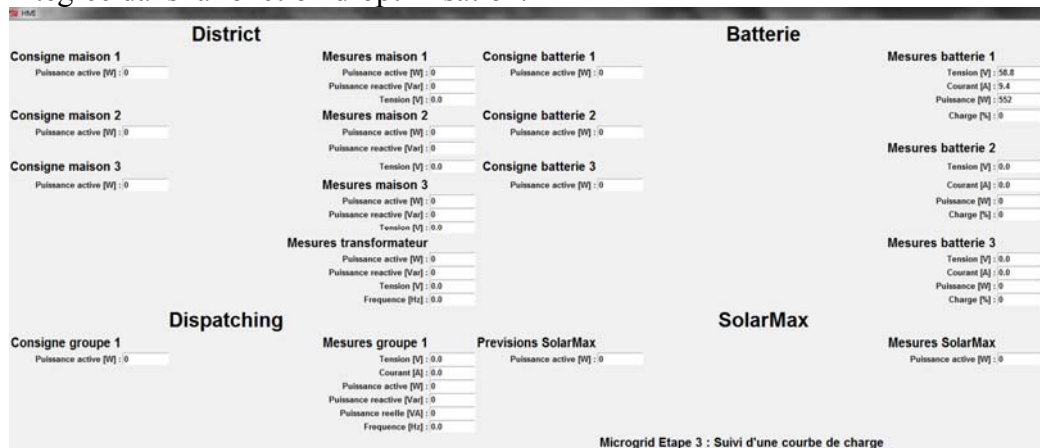


Figure 42 : Interface Etape 3

L'HMI reçoit les consignes depuis un fichier csv et les affiche, la prévision de production solaire est aussi présente.

Ilotage (Etape 4)

L'étape 4 du projet consiste à réaliser un microgrid isolé du réseau électrique. Cet îlotage n'est actuellement pas fait, l'étude et la manière de faire sont décrites dans cette partie.

Pour réaliser l'îlotage, le Microgrid doit être relativement stable, c'est-à-dire que la variation des puissances ne peut être élevée et rapide. Si ces variations sont grandes, la génératrice n'aura pas l'inertie suffisante pour garantir la stabilité du système. Une consommation de puissance trop élevée va engendrer une baisse de fréquence, cette fréquence doit rester dans une plage restreinte qui est décrite dans la partie Grid Codes.

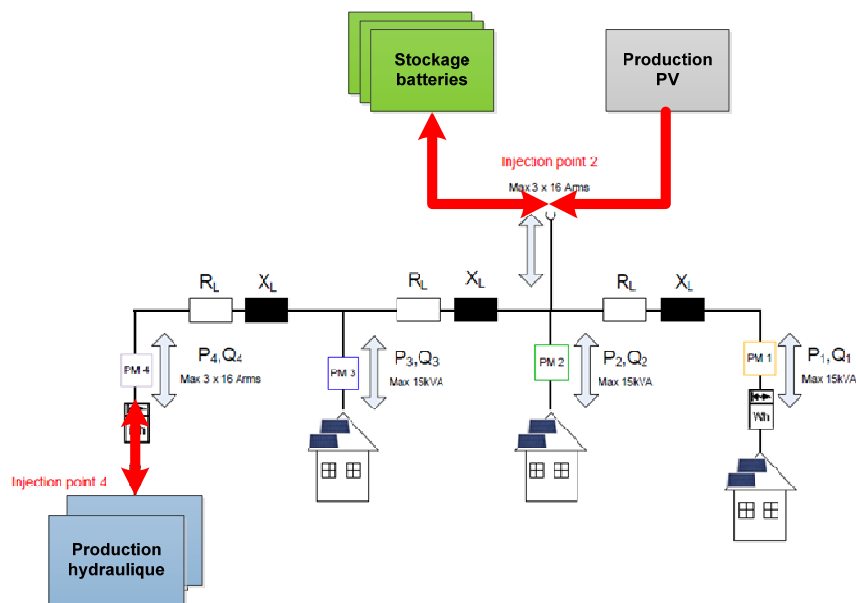


Figure 43 : Schéma de l'étape 4

Réalisation

Les constantes de temps des différents systèmes doivent être mesurées précisément, le temps de réponse est extrêmement important lors de l'îlotage. L'inertie de la génératrice doit aussi être mesurée, plus l'inertie est grande plus la fonctionnalité et la qualité du microgrid seront élevées.

La première étape consiste à générer les 50 [Hz] avec la production hydraulique, pour ce faire une charge passive est utilisée. La charge passive permet de réaliser les essais de la génératrice en mode vitesse.

Une charge active est ensuite ajoutée à la génératrice et la charge passive, cette charge varie lentement pour observer le changement de fréquence sur le réseau. Ce changement de fréquence permet de caractériser l'inertie du moteur hydraulique.

L'étape suivante est l'implémentation de la batterie, cet élément est essentiel en cas de surproduction sur le réseau, le stockage absorbe la puissance supplémentaire et la réinjecte lorsque la consommation est trop importante. Les tests avec la batterie vont permettre de déterminer sa constante de temps, ce temps est essentiel, si l'inertie du moteur et le temps de réponse de la batterie ne sont pas complémentaires la stabilité du réseau n'est pas atteignable.

Le système doit être rapide, avec une quantité d'énergie en stock suffisante.

Principe de régulation

La génératrice pilotée en vitesse est régulée directement par l'Unidrive M700, ce drive possède un mode vitesse, ce mode permet de maintenir une fréquence de 50 [Hz]. La génératrice n'est donc pas pilotée par notre système de gestion.

La génératrice fonctionnant en mode couple est contrôlée par l'algorithme en python comme dans les étapes précédentes.

La batterie est quant à elle pilotée pour adapter les niveaux de consommations et de production des différents appareils physiques présents dans le microgrid.

Régulation

Principe

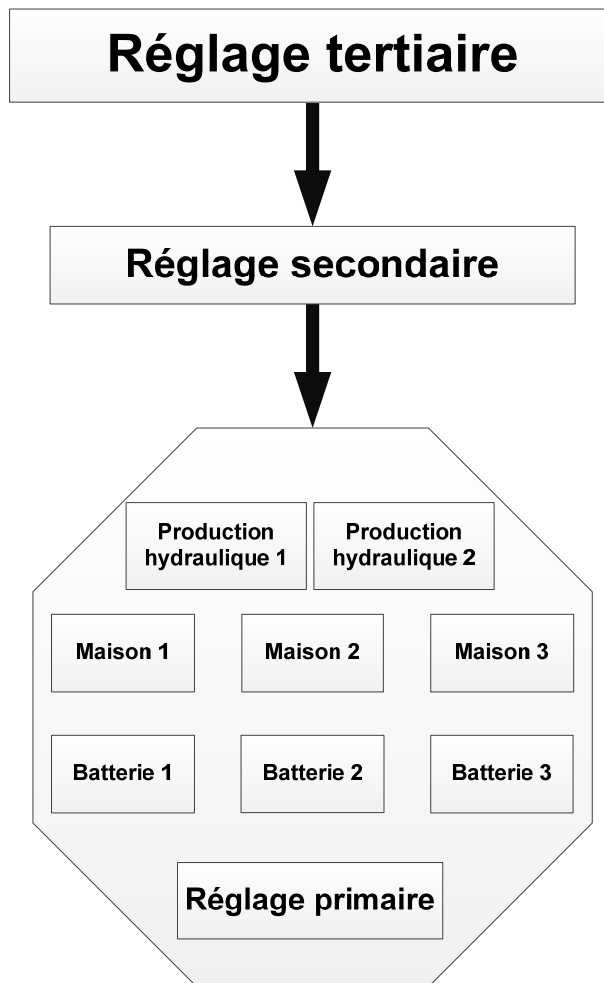


Figure 44 : Niveaux de régulation

Trois niveaux de régulation distincts sont généralement utilisés pour gérer un microgrid.

Le réglage primaire correspond à la gestion locale des appareils. Le contrôle local est par exemple le pilotage de la puissance réactive injectée en fonction de la tension sur une ligne. Ce pilotage est réalisé sans communication, l'appareil est programmé et fonctionne parfaitement sans pilotage.

Pour les onduleurs, un réglage local qui injecte de la puissance réactive en fonction de la tension est souvent utilisé. Ce comportement caractéristique est appelé var-volt.

Une autre régulation fréquemment utilisée est l'adaptation de la puissance active en fonction de la fréquence du réseau. Cette caractéristique s'appelle watt-hertz.

Une troisième régulation peut être implémentée, il s'agit de l'adaptation de la puissance active pour réduire les problèmes de tension. En cas de surproduction, la tension sur la ligne peut augmenter, alors une régulation est mise en place pour réduire la production et ainsi réduire les problèmes de tension. Cette caractéristique s'appelle Watt-Volt.

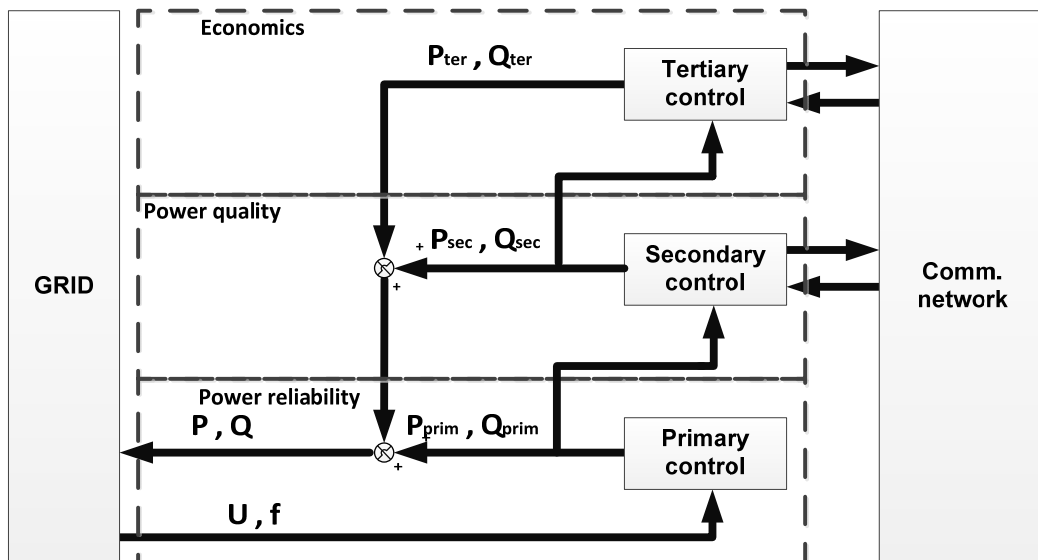


Figure 45 : Principe de régulation d'un microgrid

La régulation s'effectue en 3 étapes successives.

La première est locale et règle la fréquence et la tension pour stabiliser la qualité de l'électricité.

La deuxième règle la puissance active et réactive transitant entre le microgrid et le réseau pour s'adapter à la courbe de charge. Ce niveau de régulation est connecté au contrôleur.

La troisième optimise les valeurs de puissance active et réactive pour diminuer les coûts d'électricité et optimiser plusieurs paramètres qui peuvent être important en fonction des utilisations du microgrid.

Chaque niveau de réglage doit récupérer les valeurs des étages situés en aval, le niveau local est prioritaire, car il détermine le bon fonctionnement du réseau électrique. Les autres niveaux sont simplement utilisés pour l'optimisation.

Var/Volt

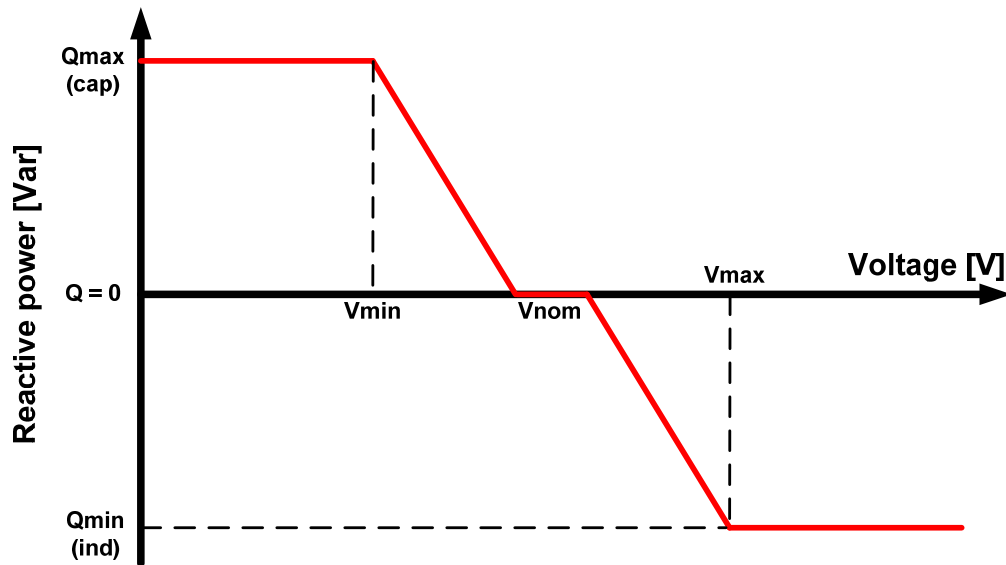


Figure 46 : Caractéristiques var-volt

Pour régler la tension aux différents nœuds du réseau, il existe plusieurs alternatives. La première est l'utilisation de la caractéristique de réglage var/volt. Sur la figure 47, de la puissance réactive capacitive est injectée lorsque la tension est trop basse. Si la tension augmente fortement, la puissance réactive injectée est inductive.

La deuxième possibilité est l'utilisation d'un algorithme d'optimisation, cette possibilité est plus optimale pour notre utilisation. L'optimisation permet de prendre en compte plusieurs paramètres importants. Les valeurs de puissances produites et consommées sont mesurées avec les SICAM, ces valeurs sont utilisées comme paramètres d'entrées de l'algorithme d'optimisation. En sortie de l'algorithme une consigne de puissance réactive est calculée, l'optimisation de cette puissance dépend de plusieurs paramètres comme, le niveau de tension, le courant par phase, les pertes, le coût d'injection du réactif, etc.

Watt / Hertz

La régulation de la fréquence avec la puissance active est un élément essentiel lors de l'îlotage, cette régulation doit être rapide et précise pour éviter l'effondrement du réseau.

La fréquence est créée avec la génératrice de 6.6 [kW], l'inertie de ce moteur est relativement faible ce qui peut engendrer des problèmes très rapidement. Plus l'inertie de la génératrice est faible plus la régulation doit être parfaite.

Pour influencer la puissance active du réseau, le système de stockage est utilisé, de plus une deuxième turbine hydraulique est utilisée. L'utilisation de ces deux appareils est nécessaire pour avoir la réserve en puissance suffisante et un temps de réponse suffisamment rapide, le système de stockage est trop lent pour effectuer lui seul ce réglage Watt/Hertz.

Watt / Volt

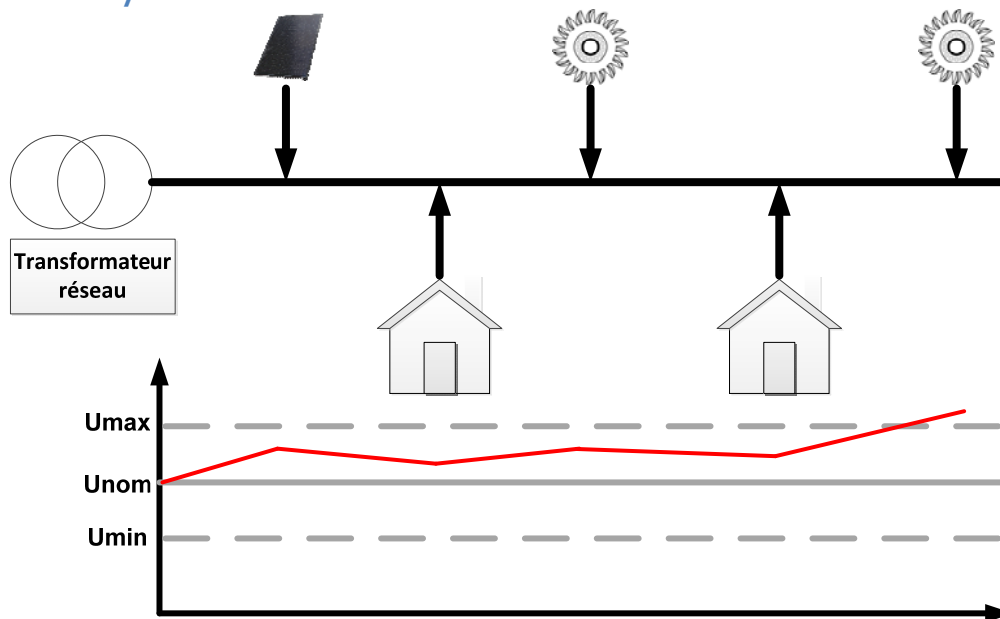


Figure 47 : Augmentation de la tension avec la production

Lorsque la puissance produite ou consommée sur une ligne électrique est trop importante, la tension peut varier fortement. Durant la journée, la production est généralement compensée par la consommation, cette compensation limite les problèmes de tension. Le problème survient lors des pics de production ou alors de consommation, à midi quand les productions photovoltaïques fonctionnent à leur puissance crête des problèmes apparaissent.

Une solution relativement efficace pour contrer cette problématique est la régulation Watt/Volt. Le but est de compenser la surproduction en consommant de l'énergie au moment opportun, la consommation peut soit se faire avec un déplacement des charges ou avec des batteries.

Le déplacement de charge peut par exemple être l'activation des boilers pour stocker de l'eau chaude tout en diminuant le surplus de production en milieu de journée.

L'utilisation des batteries part du même principe, la charge des batteries en milieu de journée réduit le pic de production et lorsque la consommation est importante en soirée la batterie réinjecte l'énergie stockée.

Le principe de régulation est semblable à la régulation Watt/Volt, le plus optimale est d'utiliser un algorithme d'optimisation, l'optimisation permet de prendre en compte plusieurs paramètres comme, l'écart de tension, le courant, le coût du stockage, etc.

Suivi courbe de charge

Les gestionnaires de réseau électrique doivent envoyer chaque jour une courbe de charge à leur fournisseur d'énergie, cette courbe de charge est calculée 24 heures en avance et elle est sous la forme d'une puissance consommée au quart d'heure. Lorsque le gestionnaire ne respecte pas cette courbe de charge, c'est-à-dire que la puissance consommée ou produite au quart d'heure est trop grande ou trop petite le gestionnaire est pénalisé financièrement.

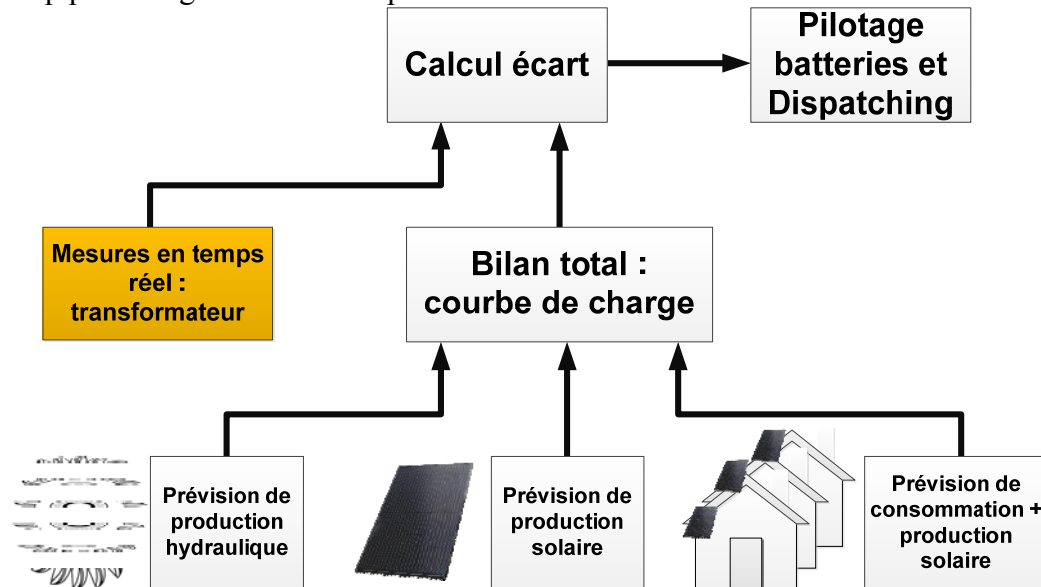


Figure 48 : Principe du suivi d'une courbe de charge

Pour respecter la courbe de charge, les prévisions doivent être les plus précises possibles.

La production hydraulique peut varier selon le type d'installation, les périodes d'entretien, les précipitations et les aspects météorologiques de la région. Cette production peut être anticipée de façon relativement précise.

La production solaire est calculée avec les prévisions météorologiques fournies par meteosuisse. Ces prévisions fournissent des données d'ensoleillement par heure à Sion, c'est-à-dire des $[W/m^2]$ à chaque heure. Cette valeur d'ensoleillement doit encore être adaptée au lieu de la production photovoltaïque et à la puissance crête de l'installation. Un facteur d'adaptation est calculé avec l'observation de l'écart entre les courbes d'ensoleillement et de production, pour notre installation le facteur est d'environ 3.

Exemple : A midi l'ensoleillement est de $1000 [W/m^2]$ et la production est d'environ $3000 [W]$.

La consommation des ménages est prévisible avec l'analyse des dernières consommations et des prévisions météorologiques notamment la température, cette analyse doit être faite au cas par cas. Pour notre première version de suivi d'une courbe de charge, la consommation des ménages est fixée avec une courbe de consommation typique. La production solaire des différentes maisons est basée sur une courbe de production idéale.

Lorsque toutes les consommations et productions du microgrid sont calculées, ces valeurs sont agrégées pour obtenir une valeur de puissance transitant entre le microgrid et le réseau électrique tous les quarts d'heure.

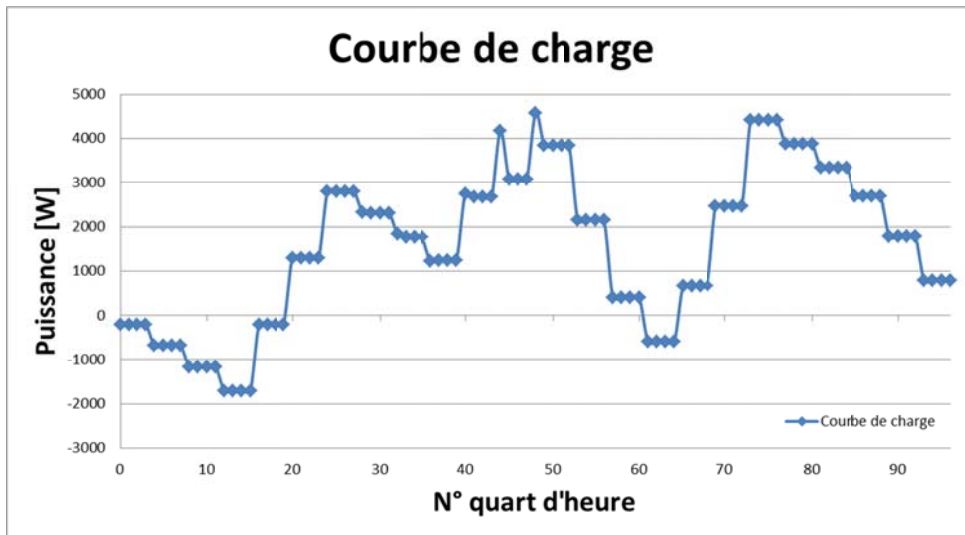


Figure 49 : Exemple courbe de charge

Actuellement, la puissance est calculée toutes les heures et non pas au quart d'heure, cependant le principe est inchangé.

La courbe de charge varie de 5000 à - 2000 [W] c'est-à-dire qu'à certain moment de la journée la production est supérieure à la consommation, cette énergie est réinjectée sur le réseau.

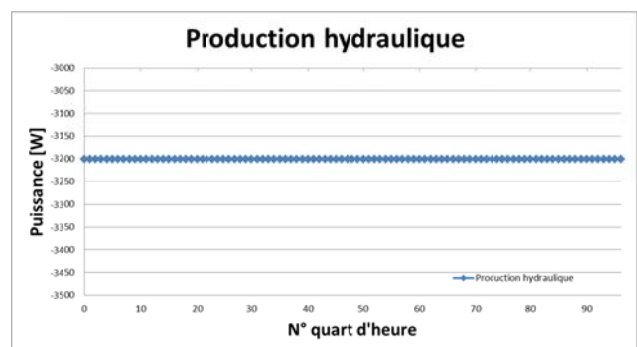
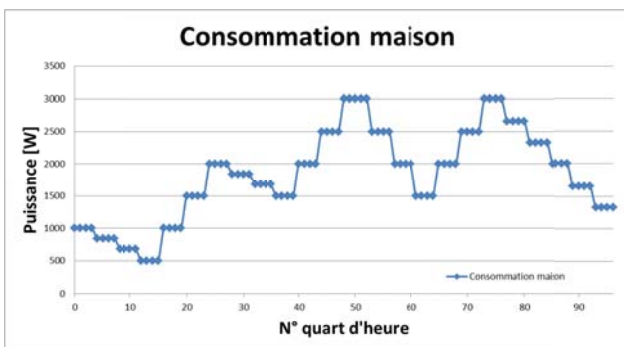


Figure 50 + Figure 51 : Profil de consommation et production hydraulique

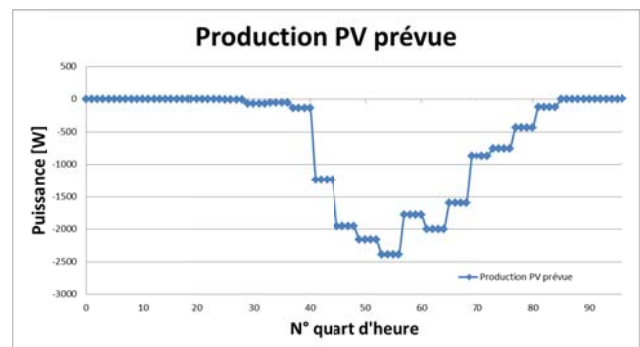
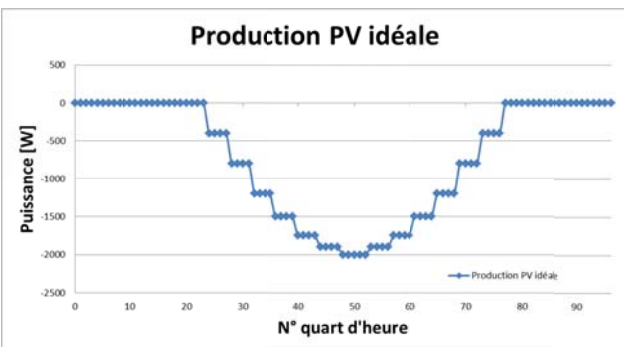


Figure 52 + Figure 53 : Profil de production solaire idéale et prévue

La consommation des maisons est estimée et identique pour les 3 maisons, il y a un pic de consommation le matin, à midi et le soir.

La production hydraulique est actuellement fixée à 3200 [W] c'est-à-dire environ 80 [%] de la production nominale possible, cette production est stable durant la journée, ce scénario peut être modifié. Comme la génératrice fonctionne à 80 [%] elle peut soit augmenter sa production ou alors la diminuer en cas de besoin.

La production solaire idéale est estimée avec une courbe caractéristique, cette estimation est utilisée pour les productions solaires sur les 3 maisons. Pour finir la production solaire prévue est calculée avec les prévisions d'ensoleillement et le facteur vu précédemment, voici une courbe caractéristique pour le 3 août 2017.

Dispatching

La régulation locale des appareils n'est pas envisageable pour le contrôle du District et des batteries à cause de la configuration du GridLab. Pour la partie du Dispatching, la mise en place d'une régulation locale est essentielle pour avoir un temps de réponse faible et une bonne précision.

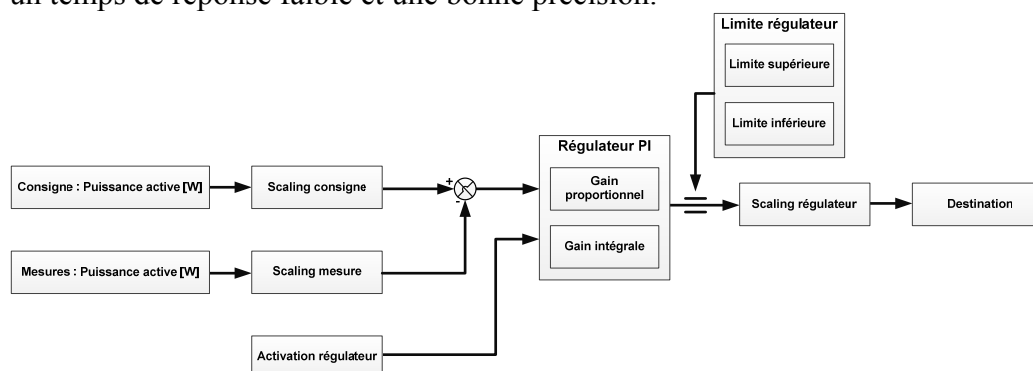


Figure 54 : Schéma de base d'un régulateur PI

La puissance active est variable en changeant la valeur d'injection, cette injection varie de 10 à 100 [%] et la puissance est une valeur en watt. La limite inférieure est fixée à 10 [%], car la machine commence à produire de l'énergie à cette valeur. Pour utiliser une consigne en puissance on utilise un régulateur PI déjà implémenté dans le Drive, les paramètres sont calculés et expliqués en annexe de plus l'utilisation de ce régulateur est détaillée. Le régulateur reçoit en entrée une consigne de puissance active et la mesure actuelle de la puissance, l'erreur actuelle est ensuite réduite avec la variation de l'injection, la sortie du régulateur correspond au signal d'injection qui varie de 10 à 100 [%].

Pour la puissance réactive le principe est le même, la plage de valeur est particulière, l'excitation minimale et maximale varie selon l'injection de la génératrice comme indiqué dans la Figure 56 : Dispatching puissance réactive en fonction de l'excitation ». L'excitation varie de 25 à 75 [%]. La limite inférieure permet d'éviter d'atteindre le seuil de stabilité du moteur qui est franchi lorsque le courant d'injection est trop faible. La limite supérieure est de 75 [%] car la puissance réactive n'augmente plus à partir de ce niveau, cette limitation permet d'éviter certains problèmes lors de la régulation.

Lorsque les valeurs de consignes ne peuvent ne pas être respectées à cause du comportement du moteur le point de fonctionnement le plus proche est atteint.

Les mesures de puissance réactive et active produite instantanément sont envoyées en entrée du PI chaque seconde. Cette constante de temps doit être prise en compte pour le dimensionnement du PI.

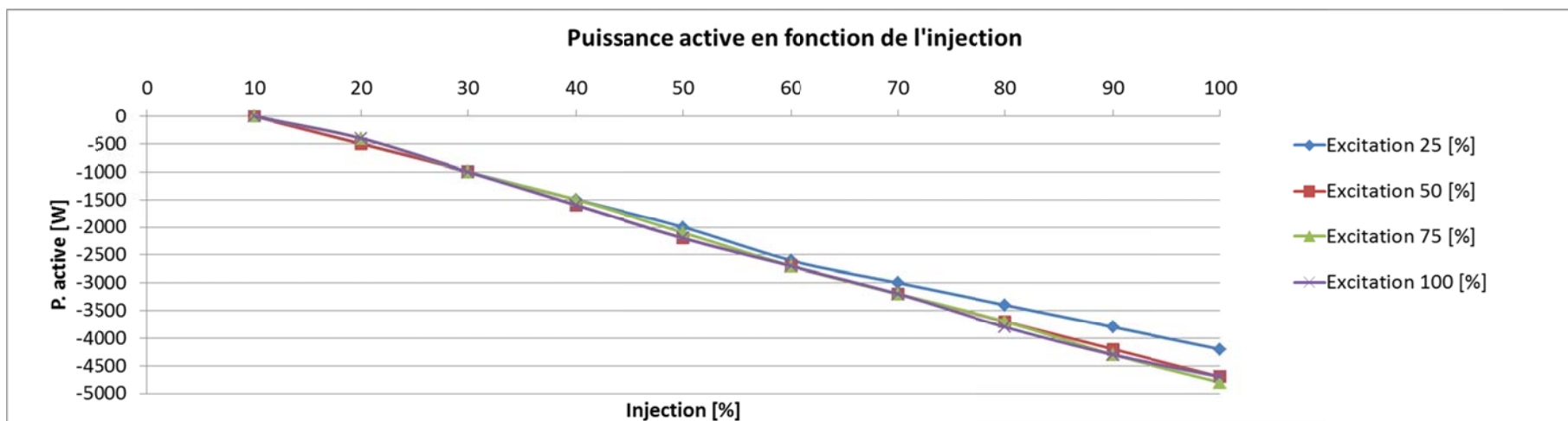


Figure 55 : Dispatching puissance active en fonction de l'injection

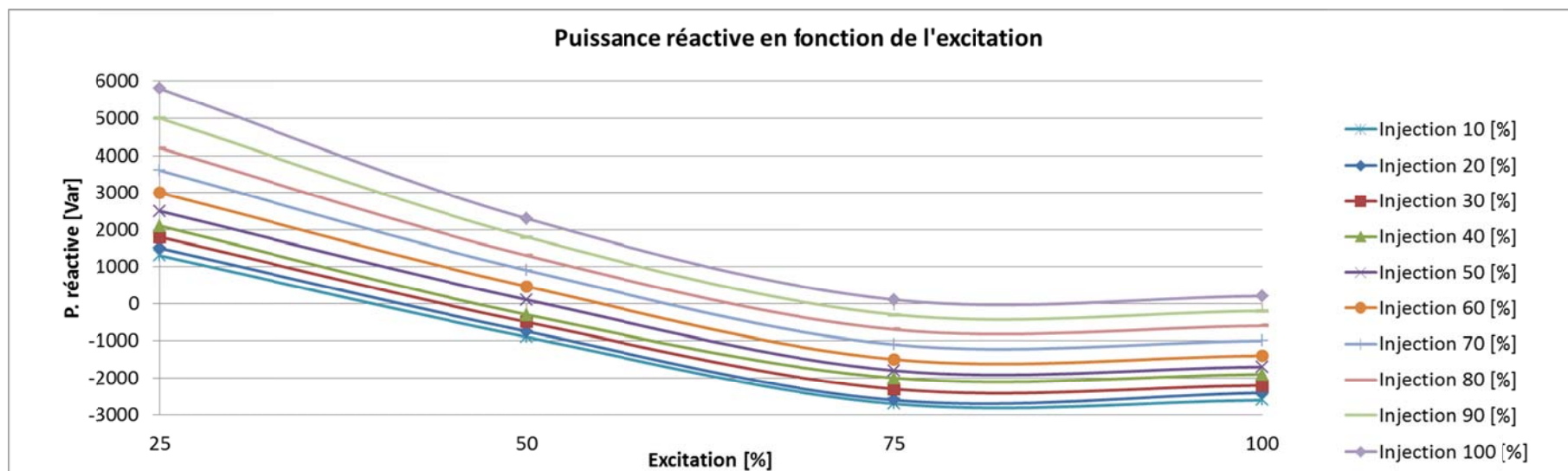


Figure 56 : Dispatching puissance réactive en fonction de l'excitation

Fonction d'optimisation

En python un Interpreter « `scipy.optimize` » permet d'utiliser une fonction d'optimisation appelée « `differential_evolution` ».

La fonction « `differential_evolution` » reçoit comme paramètre une méthode et un tableau de variables.

Le tableau de variable permet de fixer les limites d'utilisation des entrées utilisées dans la fonction d'optimisation.

La méthode utilise des paramètres d'entrée variable et retourne une valeur.

Le principe de la fonction d'optimisation est de varier les différentes entrées de la méthode pour obtenir une variable de sortie la plus petite possible.

Exemple :

Une fonction d'optimisation veut réduire la chute de tension sur une ligne lorsque la puissance consommée sur la ligne est trop élevée.

Cette fonction va chercher le point de fonctionnement optimal en variant les puissances réactives injectées sur la ligne pour obtenir une chute de tension minimale.

La variable de sortie peut être l'addition de plusieurs paramètres comme la tension, le courant, la puissance, etc. De plus, ces paramètres peuvent être pondérés pour obtenir le comportement désiré.

Exemple d'une optimisation de tension :

```
ecart_tension = abs((abs(v_grid) - abs(U_1)))/abs(v_grid)

if ecart_tension > 5:
    cout_tension = ecart_tension
else:
    cout_tension = 0
if ecart_tension > 10:
    cout_tension = 10000

cout_courant = courant_total/3
cout_courant_ligne_1 = courant_ligne_1
cout_courant_ligne_2 = courant_ligne_2
cout_courant_ligne_3 = courant_ligne_3
if courant_total > 40:
    cout_courant = 10000
if courant_ligne_1 > 20:
    cout_courant_ligne_1 = 10000
if courant_ligne_2 > 20:
    cout_courant_ligne_2 = 10000
if courant_ligne_3 > 20:
    cout_courant_ligne_3 = 10000

cout_ecart_1 =
abs(Microgrid.District.Control_Drive_1.read_set_Reactive_Power()-
House_1_Reactive_Power)/10
cout_ecart_2 =
abs(Microgrid.District.Control_Drive_2.read_set_Reactive_Power()-
House_2_Reactive_Power)/10
cout_ecart_3 =
abs(Microgrid.District.Control_Drive_3.read_set_Reactive_Power()-
House_3_Reactive_Power)/10
cout_ecart_4 =
abs(Microgrid.Dispatching.Variateur_1.read_set_Reactive_Power()-
Groupe_1_Reactive_Power)/10

fct_cout = cout_tension \
    + cout_courant + \
    cout_courant_ligne_1 + cout_courant_ligne_2 +
cout_courant_ligne_3 + \
    cout_ecart_1 + cout_ecart_2 + cout_ecart_3 + cout_ecart_4
```

Le premier paramètre pris en compte est l'écart de tension entre le réseau électrique et le nœud à réguler. Si l'écart dépasse un certain seuil, la fonction est fortement pénalisée.

Ensuite, le courant de chaque ligne et le courant global est pris en compte, si le seuil limite est franchi la fonction est pénalisée.

Pour finir, la fonction d'optimisation essaie de limiter les grandes variations de puissance réactive entre chaque itération pour éviter les oscillations.

Résultats

Consigne fixes (Etape 1)

Lors de cette étape, l'objectif principal est l'essai de la communication. Chaque élément du microgrid est d'abord testé séparément. Pour valider le bon fonctionnement du système, des points clés doivent être respectés : la prise de mesure, la réception de consignes, le comportement électrique de l'élément et le temps de réponse.

SolarMax :

Le SolarMax ne peut pas recevoir des valeurs de consignes, les mesures de puissances sont testées et le temps de réponse du système.

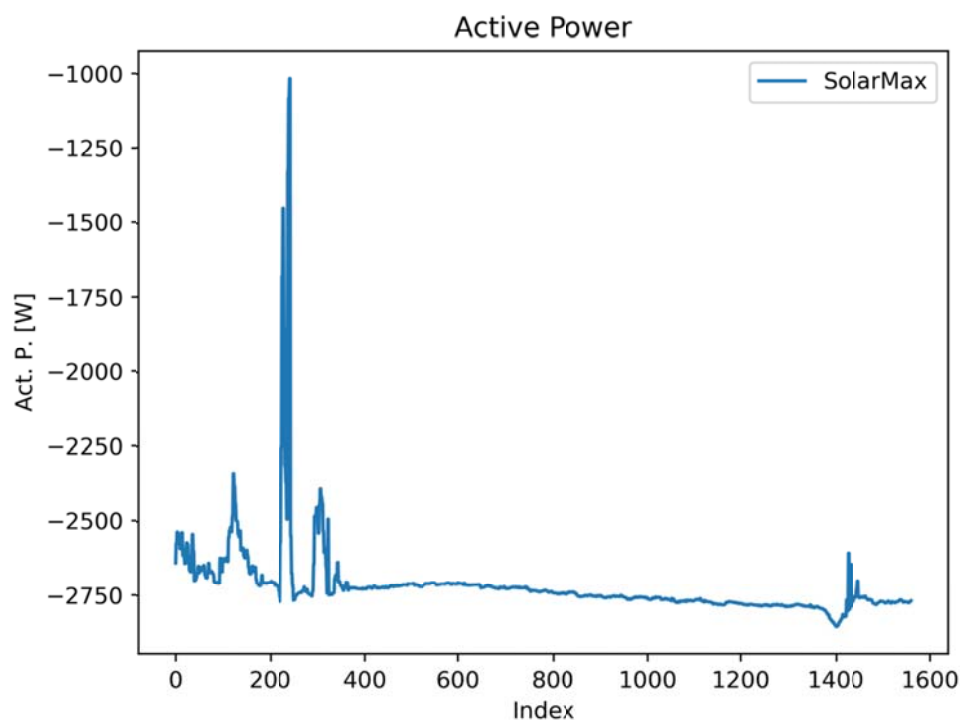


Figure 57 : Graphique des mesures du SolarMax

Cette production a été mesurée lors d'une après-midi ensoleillée. Cette courbe est très intéressante, la production varie de 1000 à 2800 [W] avec une chute très importante de production durant une courte période, cette chute est liée au passage d'un nuage.

Le défi important lors de l'utilisation d'une production solaire est d'anticiper ou de pouvoir compenser la chute de production quand il y a des passages nuageux ou lorsque les prévisions d'ensoleillement sont erronées.

Lors de ce test, les mesures ont été prises toutes les 10 secondes, la communication fonctionne correctement et sans interruption.

Systeme de stockage :

Le stockage est pilotable avec des consignes de puissance active. Pour valider le fonctionnement des batteries la réception des consignes est testée, la prise de mesure, le temps de réponse du système et le comportement électrique du système.

Pour vérifier le bon fonctionnement du système, l'envoi de consignes est fait environ chaque minute en variant de -2000 à 2000 [W].

La première étape consiste à tester la charge de la batterie de 0 à 2000 [W].

Tableau des mesures pour la charge :

Step	Puissance consignes [W]	Puissance mesures [W]	SOC [%]
0 à 40	0	~ 0	88
40 à 60	500	~ 570	89
60 à 80	1000	~ 1250	90
80 à 100	1500	~ 1850	92
100 à 120	2000	~ 2700	94

Figure 58 : Tableau puissance de charge (Batterie)

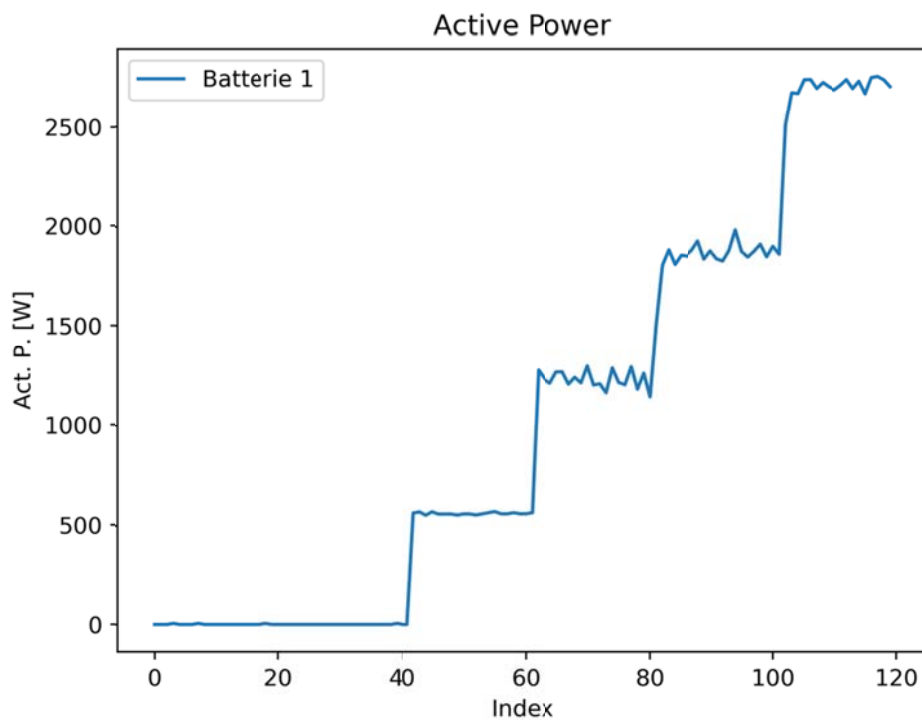


Figure 59 : Graphique puissance de charge (Batterie)

Le comportement du système de stockage suit les valeurs de consigne, il y a cependant un écart entre la puissance de consigne et la puissance mesurée, cet écart est lié à la gestion interne de la batterie qui influence la puissance de charge.

Cet écart varie en fonction de la puissance de consigne et de l'état de charge de la batterie. En effectuant de nombreux tests, cette erreur peut être caractérisée et

diminuer grâce à un algorithme ajustant la puissance de consigne envoyé à la batterie pour obtenir une puissance proche de celle voulue par l'utilisateur.

La deuxième étape du test est de visualiser l'évolution de la puissance lorsque le niveau de charge de la batterie atteint les 100 [%]. Une consigne de puissance de 2000 [W] est fixée jusqu'à la valeur de SOC égal à 100 [%].

Tableau de mesures charge :

Step	Puissance consignes [W]	Puissance mesures [W]	SOC [%]	Voltage [V]
0 à 10	0	~ 0	94	56.7
10 à 20	2000	~ 2700	95	57.6
20 à 30	2000	~ 2650	96	57.9
30 à 40	2000	~ 2650	97	58.0
40 à 50	2000	~ 2700	98	58.2
50 à 60	2000	~ 2750	99	58.3
60 à 70	2000	~ 2750	100	58.4
70 à 400	2000	2750 à 800	100	58.5 à 61.5

Figure 60 : Tableau charge complète (Batterie)

Lorsque l'état de charge atteint les 100 [%], la batterie n'a pas encore atteint sa capacité maximale, la puissance de charge reste stable et la tension de la batterie augmente grandement durant la finalisation de la charge. La limitation de la tension de charge est fixée à 61.5 [V].

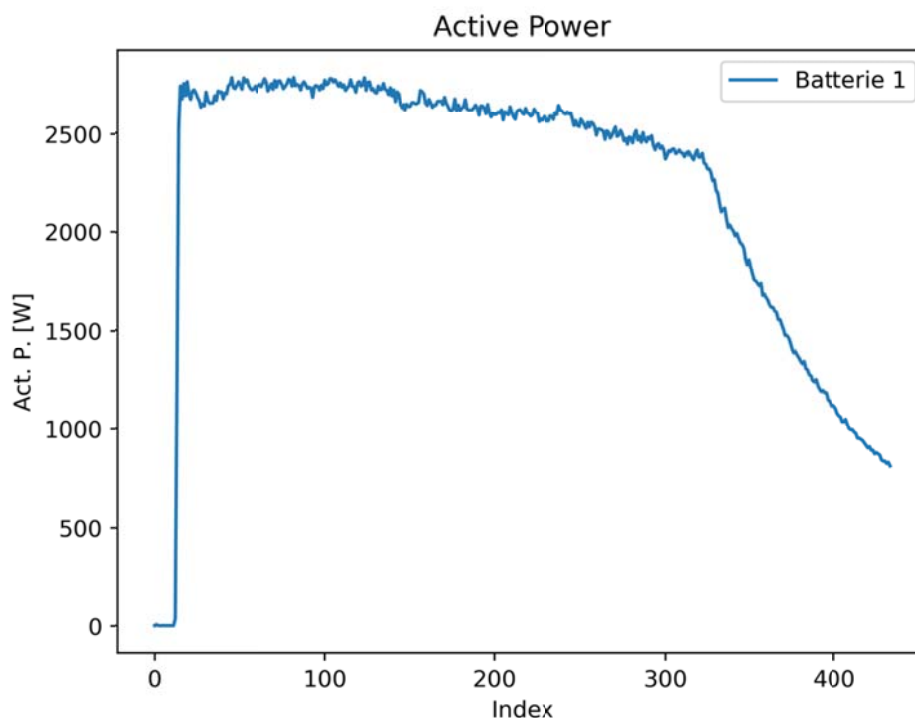


Figure 61 : Graphique charge complète (Batterie)

Lors de cet essai, la puissance de consigne était fixée à 2000 [W]. A l'index 70 le niveau de charge à atteint 100 [%], par la suite la batterie continue de se charger en augmentant sa tension et la puissance de charge diminue au fur et à mesure.

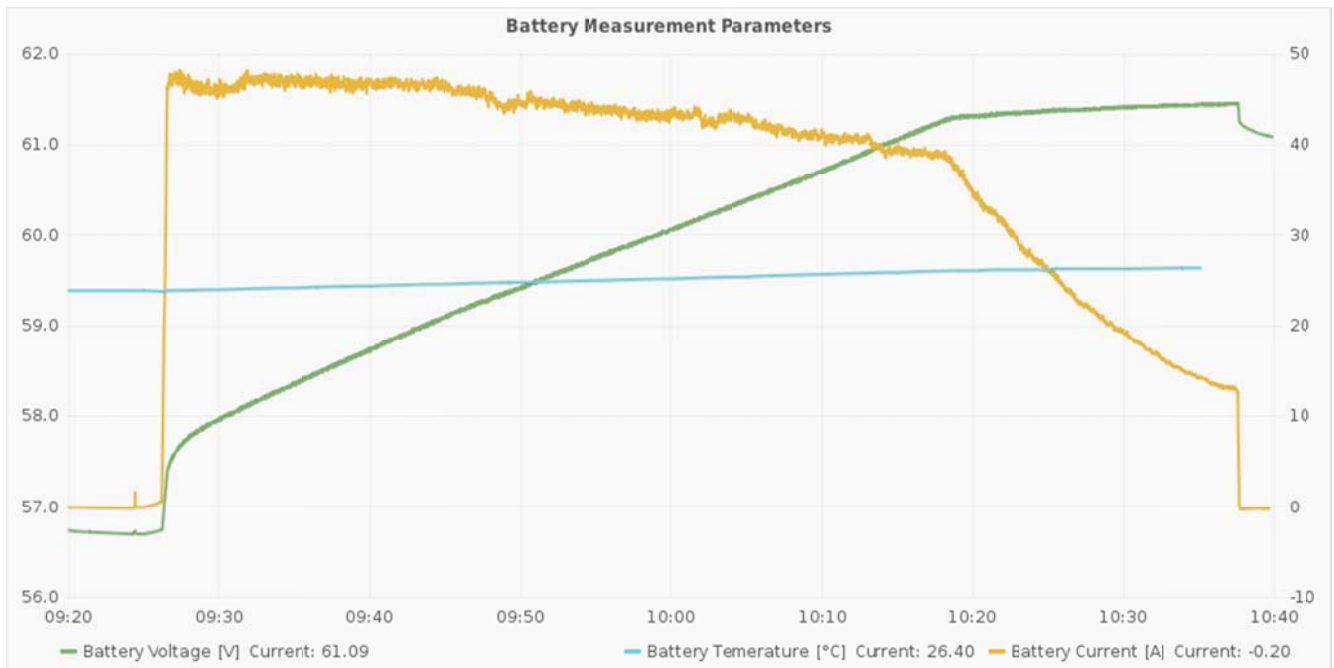


Figure 62 : Graphique Grafana charge complète (Batterie)

Ce graphique montre la variation de tension, de courant et de l'état de charge de la batterie.

Le troisième test consiste à mesurer le comportement de la batterie lors de la décharge. Avec une puissance variant de 0 à -2000 [W].

Tableau de mesures décharge :

Step	Puissance consignes [W]	Puissance mesures [W]	SOC [%]
0 à 10	0	~ 0	100
10 à 30	-500	~ -380	100
30 à 50	-1000	~ -800	99
50 à 70	-1500	~ -1350	97
70 à 90	-2000	~ -1700	96

Figure 63 : Tableau puissance de décharge (Batterie)

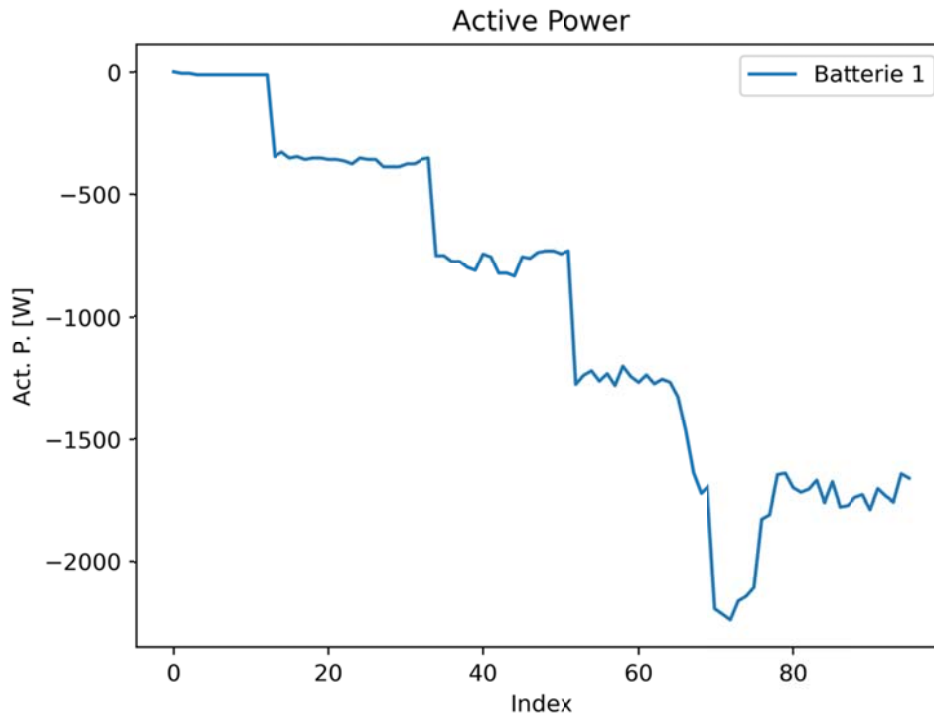


Figure 64 : Graphique puissance de décharge (Batterie)

La puissance de décharge correspond à la puissance de consigne avec un décalage semblable à l'écart expliqué dans le test de charge de la batterie. Vers l'index 70 une erreur provoquée par le « batterie monitoring system » est survenue, la puissance lors de cette erreur est passée de -1700 [W] à -2200 [W].

Pour finir les tests sur les batteries, les puissances limites sont testées pour la charge et la décharge.

Tableau de puissance limite :

Step	Puissance consignes [W]	Puissance mesures [W]
0 à 10	0	~ 0
10 à 20	-1000	~ - 800
20 à 30	-2000	~ - 1700
30 à 50	-3000	~ - 2700
50 à 60	0	~ 0
60 à 70	1000	~ 1200
70 à 80	2000	~ 2400
80 à 100	3000	~ 2900

Figure 65 : Tableau limites de puissance (Batterie)

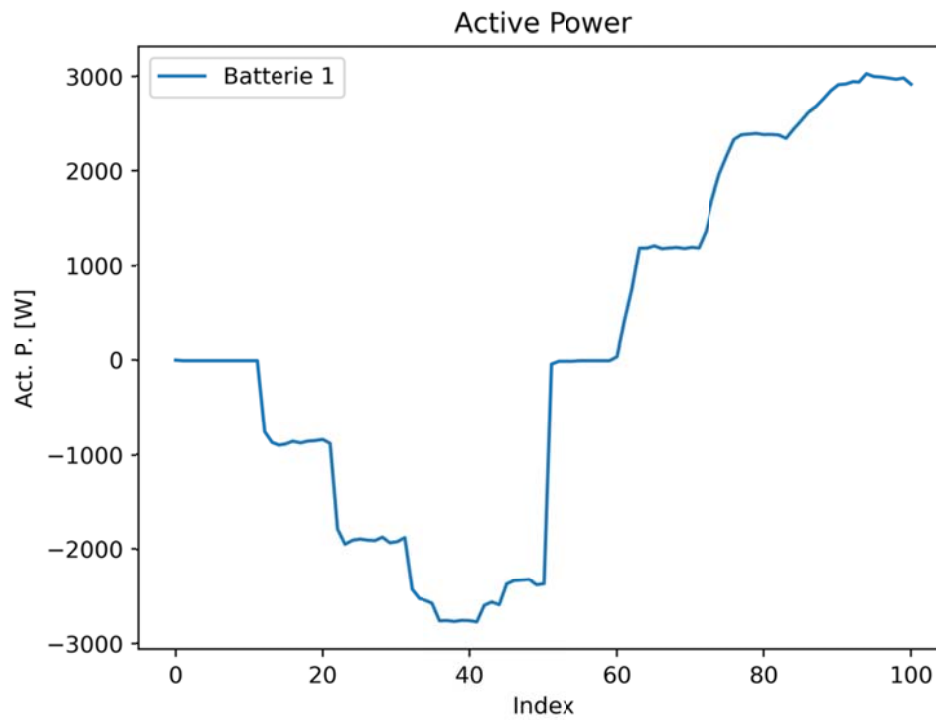


Figure 66 : Graphique limites de puissance (Batterie)

L'essai des limites de puissance indique que la puissance de charge et de décharge atteint les 3000 [W] au maximum. Comme le système de stockage est composé de 3 batteries, la valeur maximale est de 9000 [W]. Cette puissance est suffisante pour le microgrid implémenté au « GridLab ».

District :

Le District est pilotable avec des consignes de puissance active et réactive. Pour valider le fonctionnement des 3 « maisons » la réception des consignes est testée, la prise de mesure, le temps de réponse du système et le comportement électrique du système.

Pour commencer, la puissance active et réactive est testée, de plus une vérification de la tension et du courant circulant sur le District est faite.

Tableau de mesures :

Step	Puissance consignes [W]	Puissance mesures [W]	Puissance consignes [Var]	Puissance mesures [Var]
0 à 20	0	~ 100	0	~ 2000
20 à 40	1000	~ 1025	1000	~ 950
40 à 60	2000	~ 2100	2000	~ 1700
60 à 80	3000	~ 3000	0	~ - 150
80 à 100	6000 (sur une maison)	~ 6000	0	~ - 400

Figure 67 : Tableau de mesures (District)

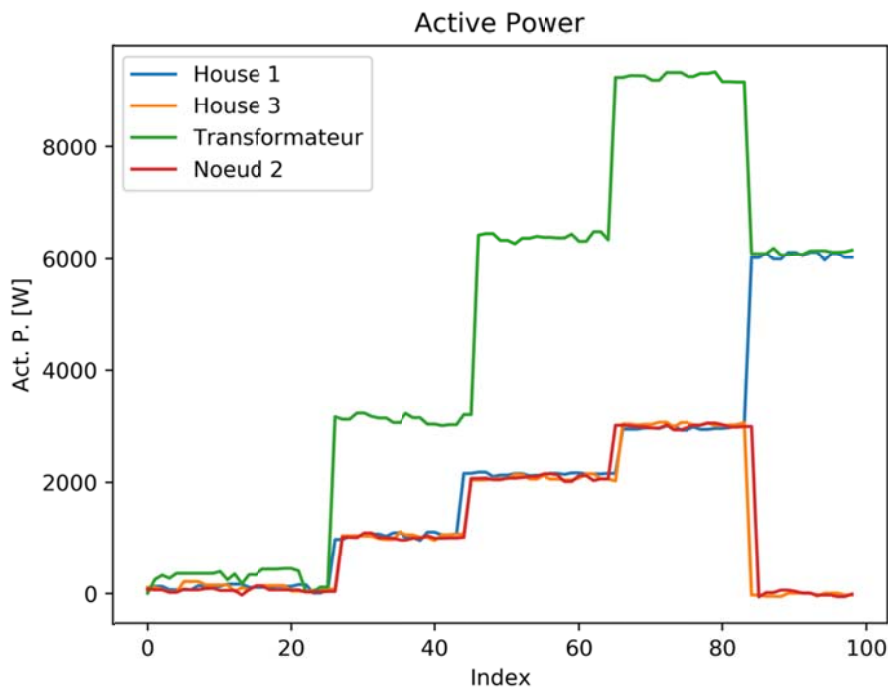


Figure 68 : Graphique puissance active (District)

Ce graphique représente l'évolution de la puissance active sur chaque maison et sur le transformateur. Ces puissances suivent les consignes de la Figure 67 : Tableau de mesures (District). Entre l'index 80 et 100, deux maisons sont désactivées et la maison 1 reçoit une consigne de 6000 [W]. Les mesures correspondent aux valeurs attendues.

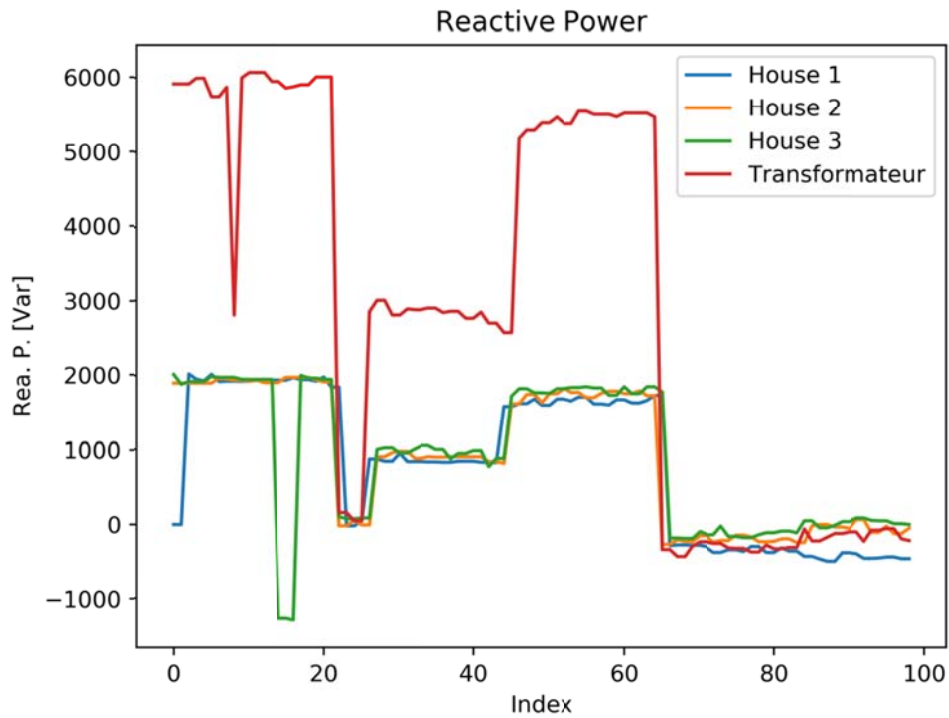


Figure 69 : Graphique puissance réactive (District)

La puissance réactive suit les valeurs de consignes, une problématique apparaît lors de l'allumage du système, une puissance réactive de 2000 [Var] transite sur chaque maison. Lorsque les puissances de consignes sont ajustées, ce problème disparaît, il faut donc y faire attention au démarrage du système.

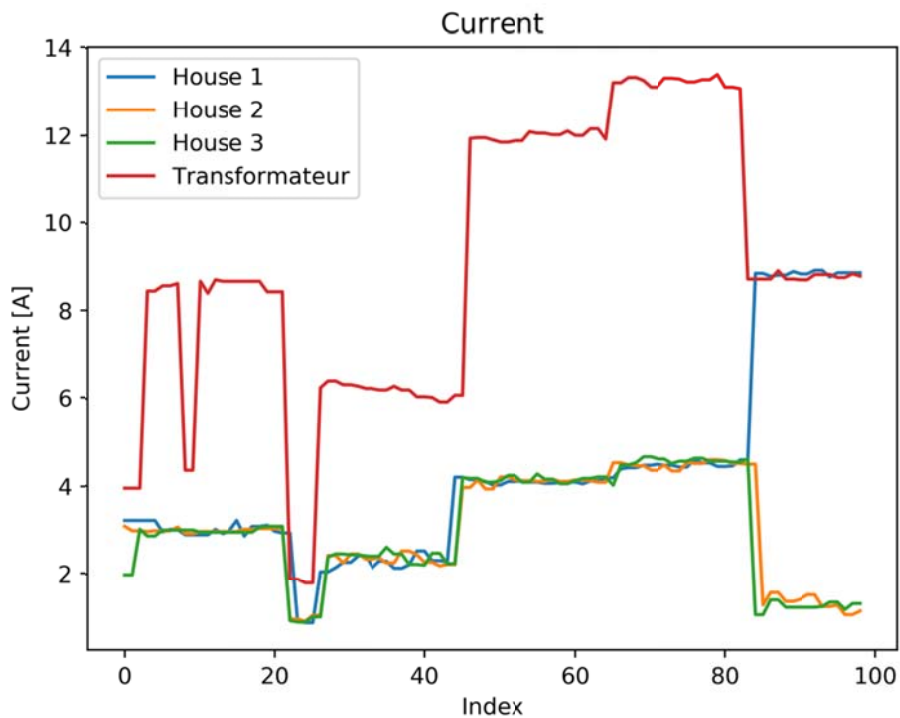


Figure 70 : Graphique variation de courant (District)

L'évolution du courant est semblable aux courbes de puissance, lorsque les 3 maisons consomment 3000 [W] le courant est proche de la limite, ce courant

limite est de 40 [A] par ligne ce qui représente environ 13 [A] par phase. Cette limite de courant est très importante et l'utilisateur doit en être conscient, car actuellement aucune limitation automatique n'est effectuée.

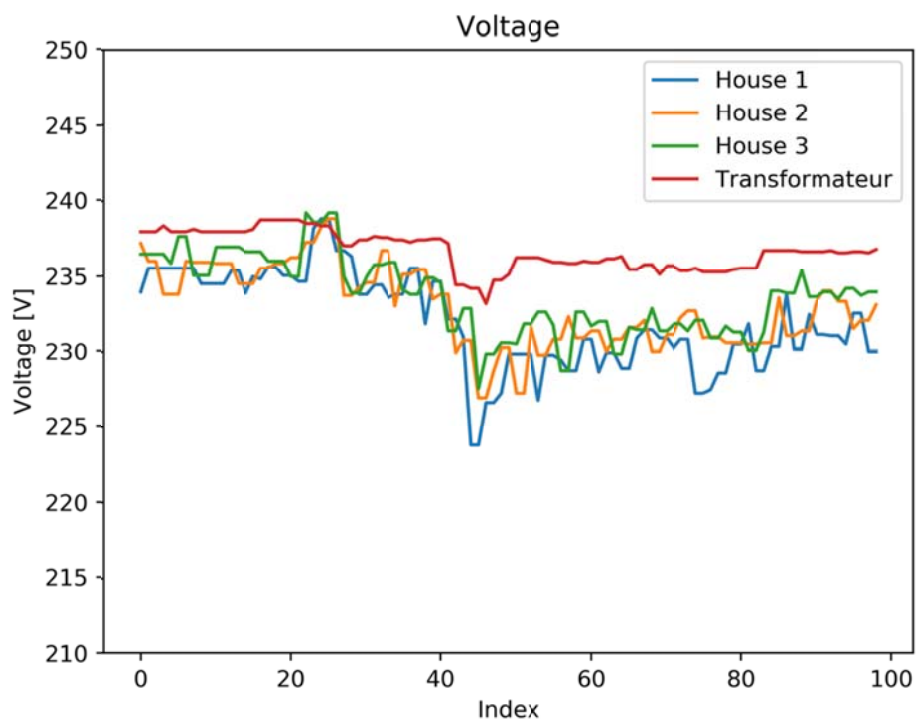


Figure 71 : Graphique variation de tension (District)

Dans les tests de puissance précédents, les maisons étaient des consommatrices d'énergie, c'est pourquoi la tension diminue en fonction de l'éloignement du transformateur de quartier. La tension chute à chaque nœud, des tests plus spécifiques sont réalisés par la suite pour mettre en évidence ce phénomène.

La deuxième partie des tests cherche à illustrer la variation de tension en fonction des puissances produites ou consommées sur chaque nœud.

Tableau de consignes :

Step	Puissance [W] Maison 3	Puissance [W] Maison 2	Puissance [W] Maison 1	Puissance [Var] Maison 3	Puissance [Var] Maison 2	Puissance [Var] Maison 1
0 à 20	0	0	0	0	0	0
20 à 40	1000	1000	1000	0	0	0
40 à 60	2000	2000	2000	0	0	0
60 à 80	3000	3000	3000	0	0	0
80 à 100	0	0	9000	0	0	0
100 à 120	0	0	5000	0	0	3000
120 à 140	0	0	5000	0	0	-3000
140 à 160	0	0	5000	0	0	0

Figure 72 : Tableau de consignes (District)

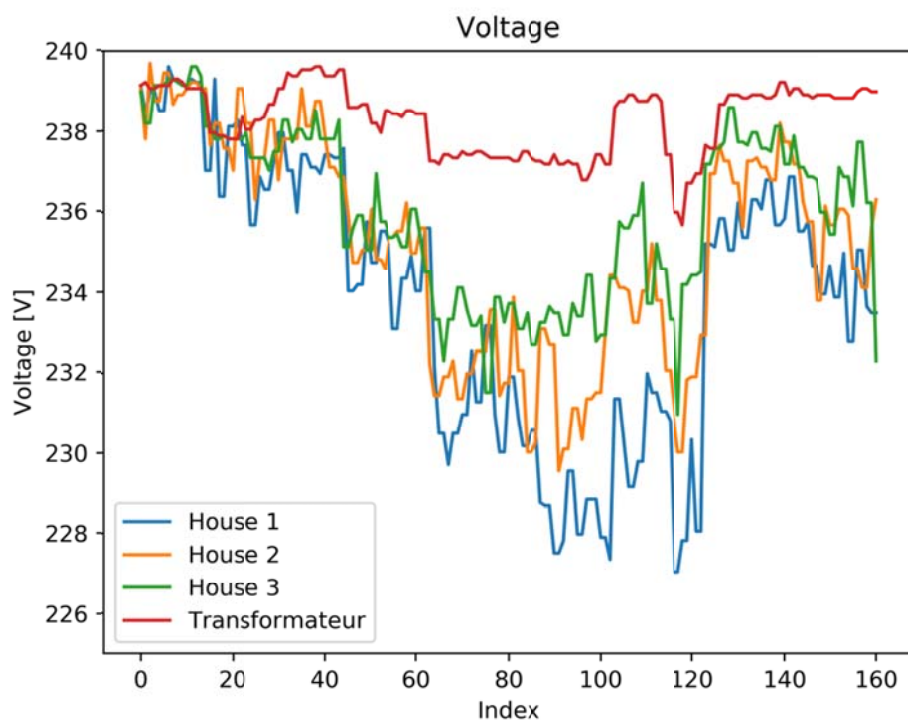


Figure 73 : Graphique test variation de tension (District)

Le premier point à prendre en compte est l'évolution de la tension sur le transformateur (rouge), c'est la tension qui est fournie par le réseau, cette valeur est variable. Tous les tests ont été réalisés en utilisant les maisons comme

consommateurs, c'est pourquoi la tension diminue à chaque nœud. La maison 1 est donc l'emplacement où la chute de tension est la plus élevée.

La chute de tension varie proportionnellement à la puissance active, comme le montre le graphique ci-dessus.

Comme le montre le graphique entre l'index 120 et 140 l'écart de tension diminue grandement lorsque la puissance réactive injectée est négative.

Dispatching :

Le Dispatching est pilotable avec des consignes de puissance active et réactive. Pour valider le fonctionnement de la production hydraulique la réception des consignes est testée, la prise de mesure, le temps de réponse du système et le comportement électrique du système.

Pour commencer, le pilotage de la puissance active et réactive est testé.

Tableau de consignes :

Step	Puissance [W] Group 1
0 à 10	0
10 à 20	0
20 à 30	-500
30 à 40	-1000
40 à 50	-1500
50 à 60	-2000
60 à 70	-2500
70 à 80	-3000
80 à 90	0

Figure 74 : Tableau de consignes puissance active (Dispatching)

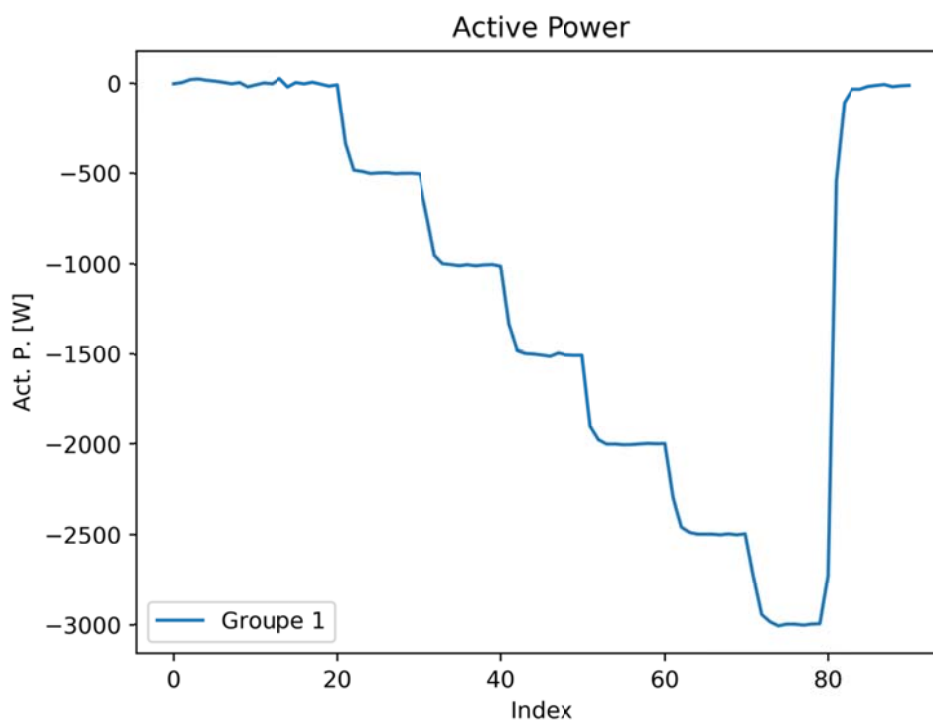


Figure 75 : Graphique puissance active (Dispatching)

La régulation de puissance est très efficace, cette régulation est faite avec l'utilisation d'un régulateur PI implémenté directement dans le drive. Cette manière de faire est rapide et efficace.

Tableau de consignes :

Step	Puissance [Var] Group 1
0 à 10	0
10 à 20	500
20 à 30	1000
30 à 40	1500
40 à 50	2000
50 à 60	2500
60 à 70	3000
70 à 80	3500
80 à 90	0

Figure 76 : Tableau de consignes puissance réactive (Dispatching)

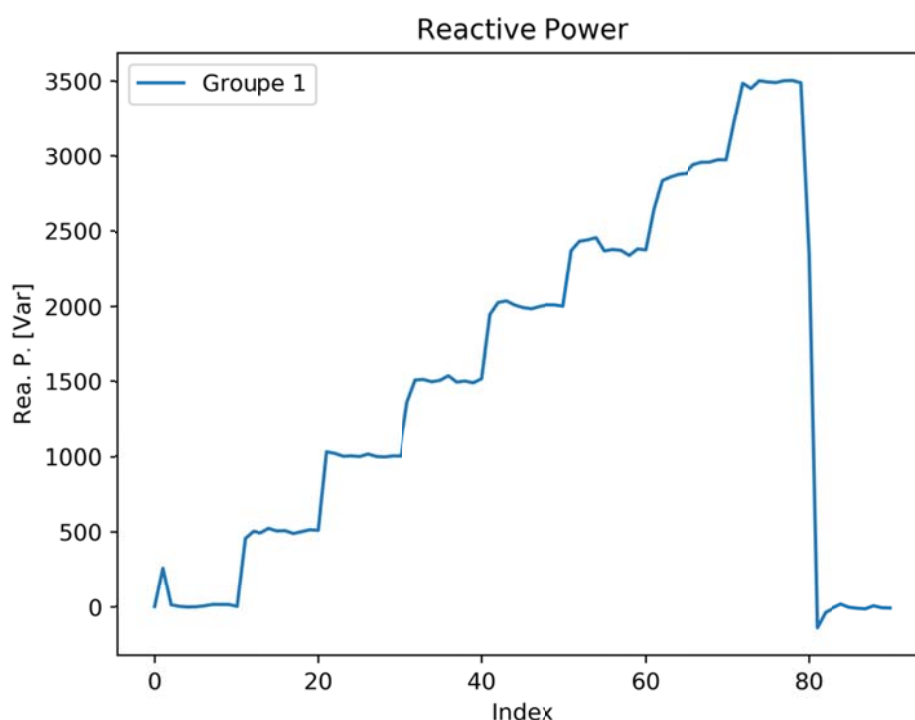


Figure 77 : Graphique puissance réactive (Dispatching)

La régulation de la puissance réactive est moins précise que la régulation de puissance active. Le même système de régulateur PI est utilisé. L'imprécision provient du fait que la puissance réactive que le groupe hydraulique peut fournir dépend directement de la puissance active. Lorsque l'actif varie le niveau d'excitation doit varier pour garder le même niveau de réactif. Comme indiqué sur le graphique de la Figure 56 : Dispatching puissance réactive en fonction de l'excitation.

Le deuxième test du Dispatching consiste à visualiser les limites de puissance réactive en fonction du niveau d'injection comme décrit sur le graphique de la Figure 56 : Dispatching puissance réactive en fonction de l'excitation.

Tableau de consignes :

Step	Puissance [W] Group 1	Puissance [Var] Group 1
0 à 10	0	0
10 à 20	0	10000
20 à 30	0	-10000
30 à 40	-2500	10000
40 à 50	-2500	-10000
50 à 60	0	0

Figure 78 : Tableau de consignes puissance active et réactive (Dispatching)

Les consignes de puissance active sont fixées à 0 et 2500 [W] pour observer la différence de puissance réactive disponible en fonction de la puissance active.

Les consignes de réactif sont fixées à 10000 et -10000 [Var] pour permettre d'atteindre la limite de production du groupe 1.

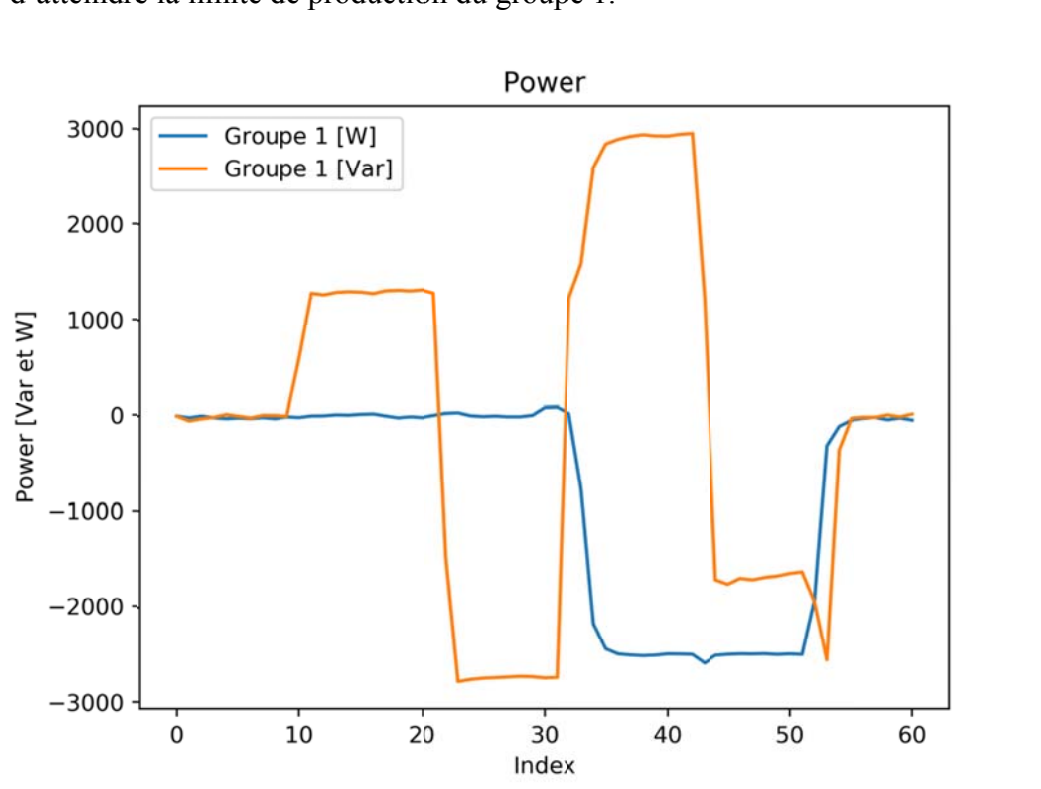


Figure 79 : Graphique puissance active et réactive (Dispatching)

Sur ce graphique on remarque les limitations de puissance réactive en fonction de la puissance active. Lorsque l'actif augmente la limite d'injection de puissance réactive inductive diminue et sa limite capacitive augmente.

District		Batterie		
Consignes maison 1 Puissance active [W] : 0 Puissance reactive [Var] : 0	Mesures noeud 1 Puissance active [W] : 0 Puissance reactive [Var] : 0 Tension [V] : 0.0	Consigne batterie 1 Puissance active [W] : 0	Mesures batterie 1 Tension [V] : 57.6 Courant [A] : 0.0 Puissance [W] : 0 Charge [%] : 0	
Consignes maison 2 Puissance active [W] : 0 Puissance reactive [Var] : 0	Mesures noeud 2 Puissance active [W] : 0 Puissance reactive [Var] : 0 Tension [V] : 0.0	Consigne batterie 2 Puissance active [W] : 0	Mesures batterie 2 Tension [V] : 0.0 Courant [A] : 0.0 Puissance [W] : 0 Charge [%] : 0	
Consignes maison 3 Puissance active [W] : 0 Puissance reactive [Var] : 0	Mesures noeud 3 Puissance active [W] : 0 Puissance reactive [Var] : 0 Tension [V] : 0.0	Consigne batterie 3 Puissance active [W] : 0	Mesures batterie 3 Tension [V] : 0.0 Courant [A] : 0.0 Puissance [W] : 0 Charge [%] : 0	
	Mesures transformateur Puissance active [W] : 0 Puissance reactive [Var] : 0 Tension [V] : 0.0 Frequence [Hz] : 0.0			
Dispatching		SolarMax		
Consignes groupe 1 Puissance active [W] : 0 Puissance reactive [Var] : 0	Mesures groupe 1 Tension [V] : 0.0 Courant [A] : 0.0 Puissance active [W] : 0 Puissance reactive [Var] : 0 Puissance reelle [VA] : 0 Frequence [Hz] : 0.0		Mesures SolarMax Puissance active [W] : -2711	
Microgrid Etape 1 : Consignes fixes Mise a jour consignes				

Figure 80 : HMI

L'interface homme-machine fonctionne parfaitement, les valeurs de consignes permettent de piloter l'ensemble des appareils, les mesures sont mise à jour en fonction du temps d'actualisation des différents composants du microgrid.

Actuellement, les batteries 2 et 3 ne sont pas utilisées, car le système cloud.iO n'y est pas implémenté.

Réglage Var-Volt (Etape 2)

Le réglage Var-Volt est effectué avec l'utilisation des 3 maisons et avec la production hydraulique. Ces appareils permettent de varier la puissance réactive en fonction du niveau de tension sur le microgrid.

Idéalement, le réglage doit être effectué localement dans les appareils sans nécessiter l'utilisation de communication externe. Avec l'utilisation actuelle du GridLab cette implémentation locale n'est pas réalisable, pour pallier à ce problème une fonction d'optimisation est utilisée pour piloter le réglage du réactif directement avec le contrôleur. Cette façon de faire n'est pas optimale mais fonctionne correctement.

Tableau de consignes :

Step	Puissance [W] Maison 3	Puissance [W] Maison 2	Puissance [W] Maison 1	Puissance [W] Batterie	Puissance [W] PV	Puissance [W] Hydraulique
0 à 10	0	0	0	0	-500	0
10 à 20	1000	1000	1000	0	-500	0
20 à 30	2000	2000	2000	0	-500	0
30 à 40	3000	3000	3000	0	-500	0
40 à 55	0	0	9000	0	-500	0
55 à 60	0	0	0	0	-500	0

Figure 81 : Tableau de consignes (Var-Volt)

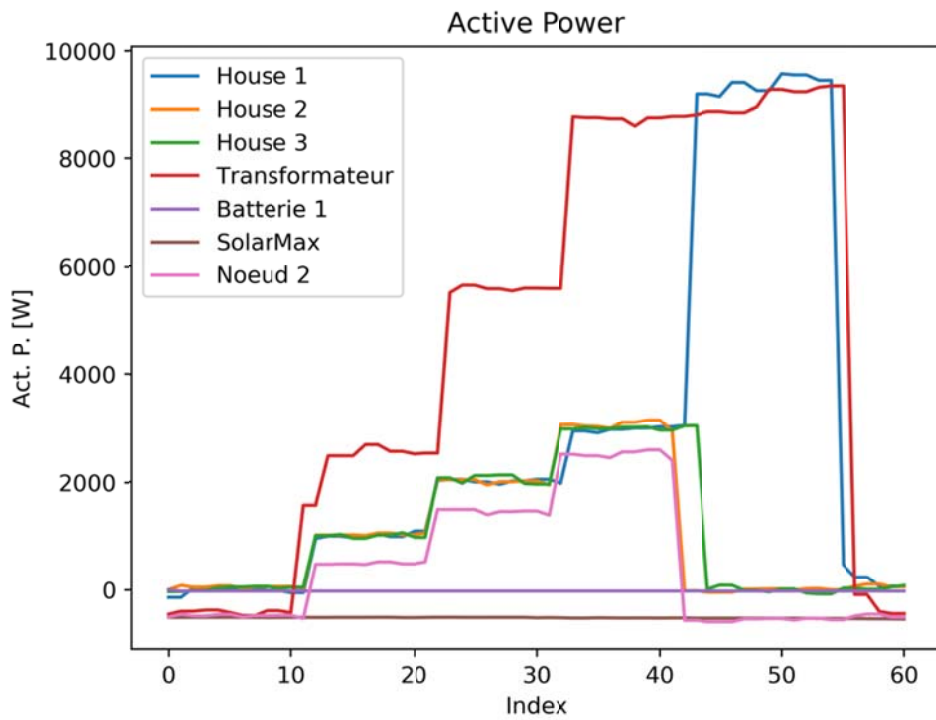


Figure 82 : Graphique puissance active (Var-Volt)

Sur ce graphique, la puissance active des appareils est affichée, cette puissance correspond aux consignes fixées dans le tableau précédent. La courbe rose qui correspond au nœud 2 est l'addition des puissances injectées au nœud 2, ce qui correspond à la puissance des batteries, de l'installation solaire et à la maison 2.

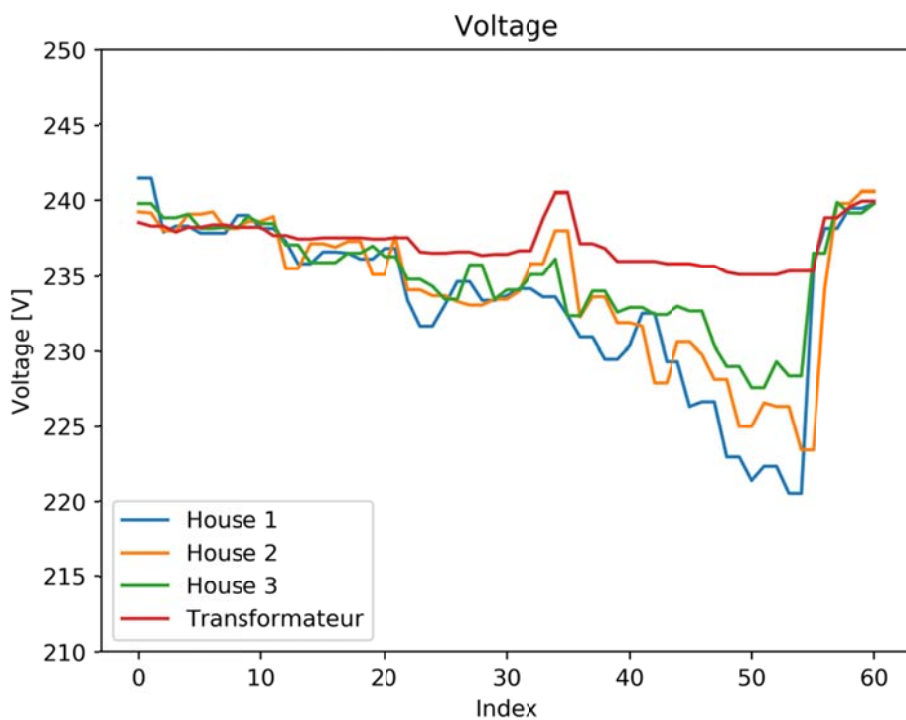


Figure 83 : Graphique tension (Var-Volt)

Voici l'évolution de la tension lors des essais, les consignes précédentes fixes des consommations c'est pourquoi la tension sur la ligne chute. La tension diminue jusqu'à environ 220 [V], cette valeur reste dans les normes, il n'y a donc pas de problème de tension.

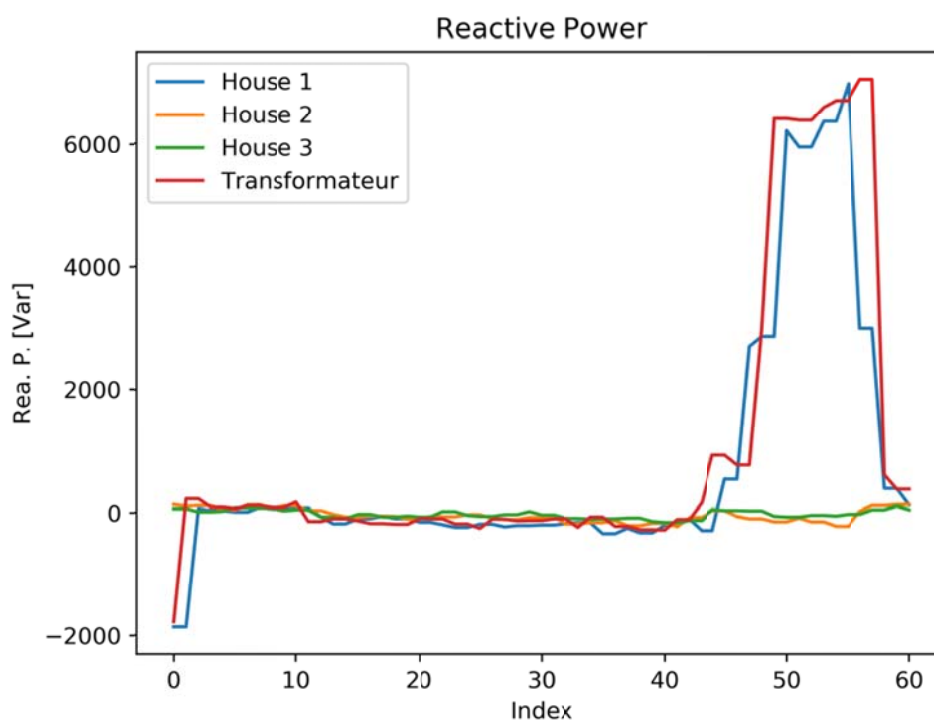


Figure 84 : Graphique puissance réactive (Var-Volt)

Lorsque la tension n'est pas trop éloignée de la valeur nominale, la fonction d'optimisation n'essaie pas de la modifier. Quand le pic de consommation apparaît et que la tension diminue jusqu'à 220 [V], l'optimisation commence à agir et fait varier la puissance réactive pour limiter la chute de tension. Cette variation de puissance réactive est visible entre l'index 40 et 55.

La fonction d'optimisation ne régule pas seulement la tension, elle prend en compte d'autres paramètres comme le courant, les variations de consignes entre chaque step, etc.

Courbe de charge (Etape 3)

Comme vu précédemment dans la partie Régulation : suivi courbe de charge, une courbe de charge est créée avec l'agrégation des différentes productions et des consommations sur le microgrid.

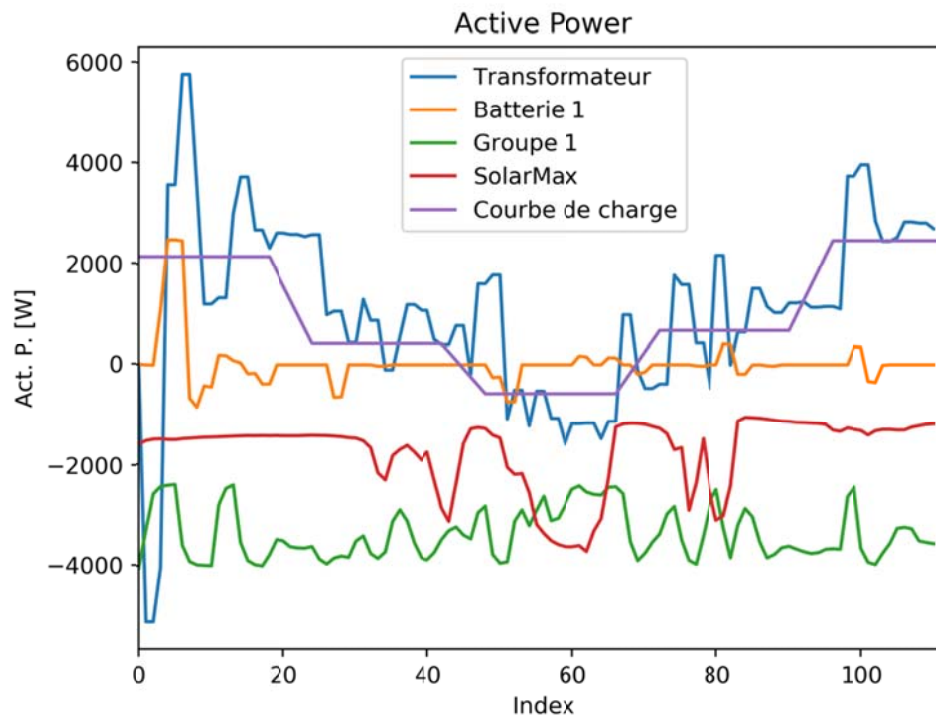


Figure 85 : Graphique puissance active (Courbe de charge)

Sur ce graphique, la courbe de charge (violet) varie en fonction des valeurs du fichier csv correspondant. La courbe bleue correspond à la puissance mesurée par l'appareil de mesure placé derrière le transformateur liant le microgrid au réseau électrique. Cette courbe doit suivre au mieux la courbe de charge pour diminuer au maximum les pénalités facturées par le distributeur d'énergie.

Les différentes puissances des sources de production sont affichées. La courbe rouge correspond à la production photovoltaïque, cette production n'est pas contrôlable, durant les tests plusieurs nuages on fait varier cette production ce qui explique les variations importantes. La courbe verte représente la production hydraulique, la valeur nominale est fixée à 3200 [W] et le contrôleur varie cette puissance entre 2400 et 4000 [W] pour réduire l'écart entre la courbe de charge et la puissance transitant sur le réseau actuellement. Lorsque ces 800 [W] de réglage ne suffisent plus la batterie (courbe orange) prend le relais et assiste la production hydraulique pour ajuster la puissance de production ou de consommation.

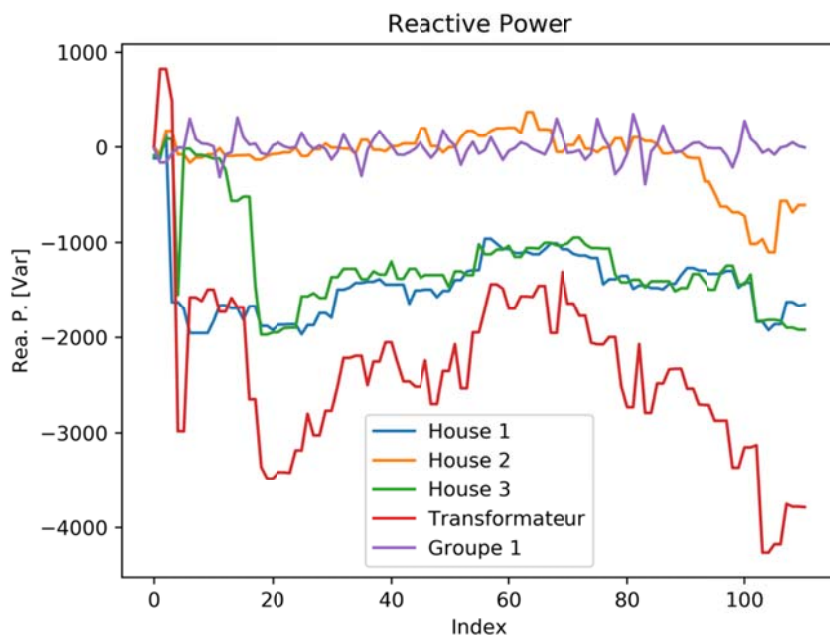


Figure 86 : Graphique puissance réactive (Courbe de charge)

En parallèle de la régulation des puissances actives, la puissance réactive est ajustée à l'aide de la fonction d'optimisation vu précédemment. La régulation de la puissance réactive permet d'atténuer les écarts de tension lorsque la production ou la consommation sont trop importantes.

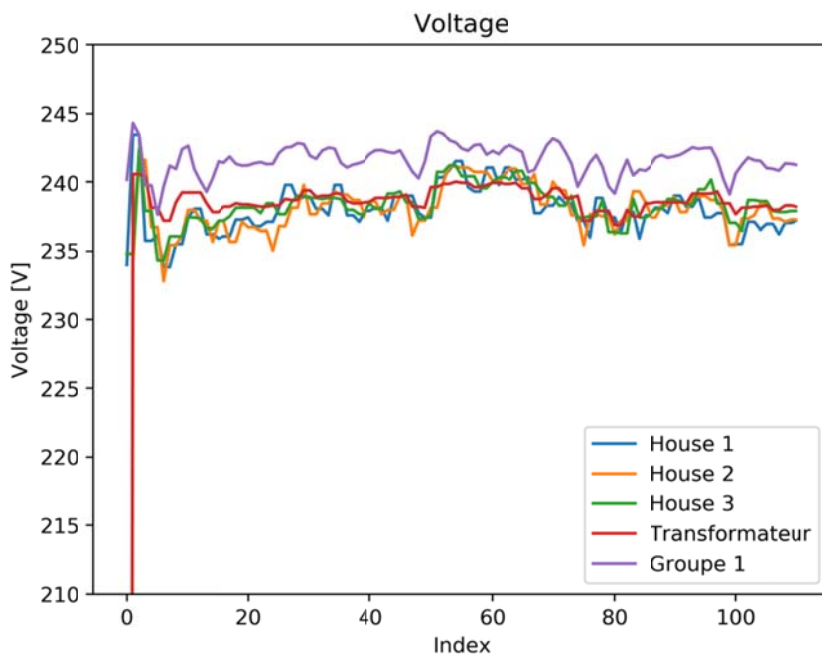


Figure 87 : Graphique tension (Courbe de charge)

Durant les tests précédents, la tension ne varie pas énormément, car les pics de production et de consommation sont faibles.

Ilotage (Etape 4)

L'îlotage n'est actuellement pas fonctionnel, l'implémentation de cette étape doit être réalisée ultérieurement par manque de temps.

Les essais devront être très importants pour réaliser cette fonctionnalité, car la stabilité du réseau doit être validée avec de nombreux essais. Les limites électriques du système doivent être clairement définies, pour ce faire, les essais devront franchir ses limites et provoquer des défaillances sur le réseau en îlotage.

Les contraintes liées à l'inertie des groupes hydrauliques, du temps de réponse des systèmes électriques et de la quantité d'énergie en stock dans le microgrid devront être prises en compte.

Pour réaliser les tests sur l'îlotage, le deuxième groupe hydraulique doit être piloté en vitesse pour fournir le 50 [Hz], de plus un fichier de programmation réalisant le pilotage de tous les systèmes électriques en parallèle doit être réalisé.

Améliorations

Communication

Il y a très peu d'améliorations à apporter au système de communication. Entre chaque composant du microgrid et le contrôleur principal, le protocole est uniformisé.

Actuellement, des Raspberry Pi permettent la communication entre le serveur cloud.iO et les appareils physiques, certains problèmes de stabilité peuvent survenir avec l'utilisation de ses Raspberry. L'utilisation d'un serveur en remplacement des Raspberry serait idéale.

Régulation

La régulation locale n'est pas effectuée directement dans les appareils physiques, mais elle est active dans le contrôleur. Lorsqu'un système de communication apparaît, il faut que la régulation primaire des appareils permette de gérer la fréquence et la tension puisse continuer de se faire.

Les régulations actuelles utilisent une fonction d'optimisation, cette fonction ne peut être implémentée sur les appareils physiques. Pour résoudre ce problème, une caractéristique Var-Volt ou autre doit être utilisé.

Ilotage

Actuellement, l'îlotage n'est pas fonctionnel par manque de temps. Pour mettre en place cette fonctionnalité, plusieurs tests doivent être réalisés. La première étape est l'utilisation d'un groupe hydraulique en mode vitesse, ensuite le pilotage des deux groupes avec l'utilisation de charge passive et pour finir le pilotage des groupes avec une charge active. Pour utiliser une charge active, les groupes hydrauliques doivent posséder une caractéristique Watt-Hertz qui permet d'ajuster leur production en fonction de la fréquence.

Programmation

La principale amélioration à apporter au programme est l'utilisation des threads. Les threads fonctionnent avec une boucle « while » et un « sleep » qui permet de choisir le temps entre chaque répétition de la boucle. L'utilisation d'un « sleep » n'est pas optimale, car un décalage s'introduit à chaque passage dans la boucle. Une fonction python permet de choisir le temps entre chaque répétition d'un thread avec une grande précision, mais elle n'est pas encore implémentée par faute de temps.

Le diagramme d'objet doit être retravaillé pour obtenir une unité entre le nom des différentes méthodes et le nom des différents paramètres.

Conclusion

Les objectifs de la conception et du déploiement d'un microgrid dans le GridLab ont tous été atteints. Cependant, des améliorations et des développements supplémentaires sont nécessaires.

L'état de l'art sur la recherche et les projets pilotes dans le domaine des microgrids permettent de prendre en main les principes fondamentaux de la gestion d'un réseau, des différentes applications d'un microgrid et de ses contraintes.

La conception des aspects électriques et de commande du microgrid est fonctionnelle, tous les appareils sont opérationnels et connectables en cas de besoins. La commande du microgrid est réalisée avec un système de communication identique pour tous les composants ce qui facilite l'interopérabilité.

Plusieurs versions élémentaires d'un microgrid sont implémentées et fonctionnelles, ces versions correspondent à différents scénarios. Actuellement, le scénario le plus complexe permet de suivre automatiquement un programme de consommation et de production prévu.

Ce projet permet d'appréhender les difficultés liées à la gestion des énergies renouvelables, car cette production est aléatoire. Les difficultés rencontrées durant le transport de l'énergie sont aussi appréhendées dans ce travail. Pour finir, les problèmes engendrés par la distribution d'électricité peuvent être pris en main en simulant un quartier de consommateur réel.

Les différents scénarios permettent de commander le microgrid en fonction des envies du gestionnaire de réseau. La commande du système avec les consignes fixes, la régulation locale des appareils, le suivi d'un programme de charge est fonctionnel. L'utilisation du microgrid en îlotage nécessite quelques développements supplémentaires pour être opérationnel.

La régulation est réalisée sur trois niveaux. Le premier niveau, la régulation « local » ajuste le comportement électrique des appareils pour permettre la stabilité du microgrid. Le deuxième niveau ajuste les puissances des appareils qui sont pilotables pour réaliser certains scénarios. Le dernier niveau calcul les paramètres optimaux de fonctionnement du microgrid pour réduire les coûts économiques. Actuellement, le dernier niveau n'est pas implémenté, car les coûts de fonctionnement ne sont pas encore pris en compte.

La gestion et la communication entre les différents appareils composant le microgrid sont entièrement opérationnelles. Le système de pilotage et de communication peut être modifié très facilement pour créer de nouveaux scénarios. Cette adaptabilité permettrait de modifier ce travail pour réaliser des laboratoires pour les étudiants ou des travaux de recherche liés à l'autoconsommation, la gestion d'énergie renouvelable ou d'autres applications.

Remerciements

Je tiens à remercier mon responsable de travail de diplôme Dominique Gabioud pour le suivi et les nombreux conseils apportés durant ce projet.

Yann Maret pour l'aide apportée sur la partie communication et la mise en place de cloud.iO au GridLab.

Thomas Sterren pour l'implémentation de cloud.iO sur le système de stockage et pour son aide liée à la compréhension de ce système.

Line Barras et Didier Blatter pour leur aide et leur explication pour la prise en main des différents appareils du GridLab et la mise en place physique du microgrid.

Date:

.....

Signature:

.....

Bibliographie

- A.Gabbar, H. (2017). *Smart Energy Grid Engineering*. Ontario: Academic Press.
- Automation, C. (s.d.). Récupéré sur <http://www.cpaltd.net/control-techniques-unidrive-m700-4-0kw-m700-03400100a10.html>
- cloud.iO. (s.d.). Récupéré sur <http://cloudio.hevs.ch/>
- DC. (2014).
- Donnée TD. (s.d.). *Données du travail de diplôme*.
- ENEA-consulting. (s.d.). *Urban Microgrids*.
- engie. (s.d.). Récupéré sur <http://www.engie.com/activites/microgrids-energie-decentralisee/>
- ENTSO. (s.d.). *Grid_Code_ENSTO*.
- Fusheng, L. (2016). *Microgrid Technology And Engineering Application*. London: Academic Press.
- GC_Australia. (s.d.). Récupéré sur <http://www.esc.vic.gov.au/wp-content/uploads/esc/66/664fcf23-1071-4a69-8562-abd2cf9e85e3.pdf>
- HEVS. (s.d.). Récupéré sur <https://www.hevs.ch/fr/hes-so-valais-wallis/actualites/gridlab-un-laboratoire-pour-les-energies-renouvelables-le-stockage-et-le-smart-grid-7457>
- Leclanche. (s.d.). Récupéré sur http://www.leclanche.com/fileadmin/user_upload/leclanche_apollioncube.pdf
- M700, U. (2015). *Guide de mise en service*.
- Mahmoud, M. S. (2017). *Microgrid Advanced Control Methods And Renewable Energy System Integration*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Pavanello, D. (s.d.). *Gridlab Dispatching*.
- SICAM. (2013). Siemens.
- SMA. (s.d.). Récupéré sur <http://www.sma.de/fr/partenaires/integration-reseau-de-lenergie-photovoltaique/directive-vde-4105.html>
- Smartgrids-cre. (s.d.). Récupéré sur <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=microgrids>
- SolarMax. (s.d.). Récupéré sur <http://www.solarmax.com/ch/fr/>
- Studer. (s.d.). Récupéré sur <http://www.studer-innotec.com/fr/>
- Studer. (s.d.). Récupéré sur http://www.studer-innotec.com/media/document/0/datasheet_xtender_series_en.pdf
- TC. (2013).

Table de figures

Figure 1 : Principe de base d'un microgrid.....	3
Figure 2 : Schéma de principe d'un microgrid.....	5
Figure 3 : Réduction de puissance en cas de surfréquence (Suisse).....	7
Figure 4 : Puissance réactive limite pour les unités de production (Suisse).....	8
Figure 5 : Limite de fonctionnement des centrales de production (Suisse).....	9
Figure 6 : Limitation de puissance en fonction de la fréquence (Allemagne).....	10
Figure 7 : Limites de déconnexion (Allemagne).....	10
Figure 8 : Limites de remise en marche (Allemagne).....	11
Figure 9 : Facteur puissance réactive en fonction de la puissance active (Allemagne).....	11
Figure 10 : Schéma de principe du microgrid.....	12
Figure 11 : Caractéristiques des postes du District.....	13
Figure 12 : Composants d'un quartier.....	13
Figure 13 : Chute et augmentation de tension sur une ligne.....	14
Figure 14 : Calcul chute et augmentation de tension sur une ligne.....	14
Figure 15 : Structure du District.....	14
Figure 16 : Schéma batteries.....	16
Figure 17 : Caractéristiques principales de la batterie.....	17
Figure 18 : Batterie Apollion Cube.....	17
Figure 19 : Caractéristiques principales de l'onduleur.....	18
Figure 20: Onduleur XTM 4000-48.....	18
Figure 21 : Schéma de principe d'un groupe.....	19
Figure 22 : Schéma de principe complet Dispatching.....	20
Figure 23: Unidrive M700.....	21
Figure 24 : Schéma de connections du poste 65 [kV].....	22
Figure 25 : Tableau de commandes du groupe 1.....	22
Figure 26 : Onduleur SolarMax.....	23
Figure 27 : Schéma cloud.iO.....	24
Figure 28 : Principe cloud.iO.....	24
Figure 29 : Exemple de modèle XML.....	25
Figure 30 : Principe des messages MQTT.....	26
Figure 31 : Principe de programmation en parallèle.....	27
Figure 32 : Principe de base du contrôleur.....	28
Figure 33 : Interactions entre les objets.....	29
Figure 34 : Diagramme de classes.....	30
Figure 35 : Diagramme de séquence (Batterie).....	31
Figure 36 : Schéma électrique.....	32
Figure 37 : Schéma de communication.....	33
Figure 38 : Schéma de contrôle.....	33
Figure 39 : Interface Etape 1.....	35
Figure 40 : Interface Etape 2.....	36
Figure 41 : Schéma de principe de l'étape 3.....	37
Figure 42 : Interface Etape 3.....	39
Figure 43 : Schéma de l'étape 4.....	39
Figure 44 : Niveaux de régulation.....	41
Figure 45 : Principe de régulation d'un microgrid.....	42
Figure 46 : Caractéristiques var-volt.....	43
Figure 47 : Augmentation de la tension avec la production.....	44
Figure 48 : Principe du suivi d'une courbe de charge.....	45

Figure 49 : Exemple courbe de charge.....	46
Figure 50 + Figure 51 : Profil de consommation et production hydraulique.....	46
Figure 52 + Figure 53 : Profil de production solaire idéale et prévue	46
Figure 54 : Schéma de base d'un régulateur PI.....	47
Figure 55 : Dispatching puissance active en fonction de l'injection	48
Figure 56 : Dispatching puissance réactive en fonction de l'excitation.....	48
Figure 57 : Graphique des mesures du SolarMax	51
Figure 58 : Tableau puissance de charge (Batterie).....	52
Figure 59 : Graphique puissance de charge (Batterie).....	52
Figure 60 : Tableau charge complète (Batterie).....	53
Figure 61 : Graphique charge complète (Batterie).....	53
Figure 62 : Graphique Grafana charge complète (Batterie).....	54
Figure 63 : Tableau puissance de décharge (Batterie)	54
Figure 64 : Graphique puissance de décharge (Batterie)	55
Figure 65 : Tableau limites de puissance (Batterie).....	55
Figure 66 : Graphique limites de puissance (Batterie).....	56
Figure 67 : Tableau de mesures (District).....	57
Figure 68 : Graphique puissance active (District).....	57
Figure 69 : Graphique puissance réactive (District)	58
Figure 70 : Graphique variation de courant (District).....	58
Figure 71 : Graphique variation de tension (District)	59
Figure 72 : Tableau de consignes (District)	60
Figure 73 : Graphique test variation de tension (District).....	60
Figure 74 : Tableau de consignes puissance active (Dispatching).....	61
Figure 75 : Graphique puissance active (Dispatching)	61
Figure 76 : Tableau de consignes puissance réactive (Dispatching).....	62
Figure 77 : Graphique puissance réactive (Dispatching)	62
Figure 78 : Tableau de consignes puissance active et réactive (Dispatching)	63
Figure 79 : Graphique puissance active et réactive (Dispatching).....	63
Figure 80 : HMI	64
Figure 81 : Tableau de consignes (Var-Volt).....	65
Figure 82 : Graphique puissance active (Var-Volt)	66
Figure 83 : Graphique tension (Var-Volt).....	66
Figure 84 : Graphique puissance réactive (Var-Volt).....	67
Figure 85 : Graphique puissance active (Courbe de charge)	68
Figure 86 : Graphique puissance réactive (Courbe de charge)	69
Figure 87 : Graphique tension (Courbe de charge).....	69