

Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Tunis



Rapport de projet

Étude, dimensionnement et simulation d'un micro-réseau résidentiel photovoltaïque avec stockage par batterie

Réalisé par :

**ZAGHDOUD Dhouha
ZMITRI Saida**

Professeur :

BELHADJ Jamel

Table des matières

1	Contexte général et objectifs du projet	2
1.1	Introduction	2
1.2	Les différentes couches d'un Smart Grid	2
1.2.1	Couche Physique (Physical Layer)	2
1.2.2	Couche de Communication (Communication Layer)	3
1.2.3	Couche de Gestion et Contrôle (Control & Management Layer)	3
1.2.4	Couche Application (Application Layer)	3
1.2.5	Couche Sécurité (Security & Privacy Layer)	4
1.3	Importance de l'approche en couches	4
1.4	Objectif du projet	4
1.4.0.1	Objectif 1 : Dimensionnement du système photovoltaïque	4
1.4.0.2	Objectif 2 : Dimensionnement du système de stockage	5
1.4.0.3	Objectif 3 : Modélisation du micro-réseau	5
1.4.0.4	Objectif 4 : Simulation et analyse	5
1.4.0.5	Objectif 5 : Contribution au Smart Grid	5
1.5	Conclusion	6
2	Matériels et Technologies Utilisés	7
2.1	Introduction	7
2.2	Système Photovoltaïque (PV)	7
2.2.1	Modules photovoltaïques	7
2.2.2	Onduleur solaire	7
2.3	Système de Stockage par Batterie	8
2.3.1	Rôle et justification	8
2.3.2	Référence industrielle utilisée	8
2.3.3	Protocoles de communication batterie	8
2.4	Compteur Intelligent	8
2.4.1	Référence utilisée	8
2.4.2	Fonctions principales	8
2.5	Système de Gestion d'Énergie (EMS)	9
2.5.1	Rôle	9
2.5.2	Référence et protocoles utilisés	9
2.6	Réseau Basse Tension (BT)	9
2.7	Interface Utilisateur	9
2.8	Logiciels et Technologies Utilisés	9
2.8.1	PVSyst	9
2.8.2	MATLAB	10
2.9	Conclusion du Chapitre	10

3	Explication du Code MATLAB et Simulation du Système	11
3.1	Introduction au Code MATLAB	11
3.2	Vue d'Ensemble du Code	11
3.2.1	Génération des Données Météo	11
3.2.2	Configuration du Micro-Réseau	11
3.2.3	Modélisation de la Production Photovoltaïque	12
3.2.4	Consommation Résidentielle	12
3.2.5	Tarification Dynamique	12
3.2.6	Système de Gestion de l'Énergie (EMS) et Optimisation	12
3.2.7	Post-traitement et Résultats	12
3.3	Interprétation des Résultats	12
3.4	Conclusion	13
4	Analyse des Résultats et Interprétation	14
4.1	Introduction	14
4.2	Résumé des Résultats Obtenus	14
4.3	Interprétation des Courbes	14
4.3.1	Production PV vs Consommation	14
4.3.2	Tarification Dynamique	15
4.3.3	Activité Batteries Maisons	16
4.3.4	Activité V2G	16
4.3.5	Import / Export Réseau	17
4.3.6	Stratégie prix / import-export	17
4.3.7	Pic de Puissance Quotidien	18
4.3.8	SOC Batteries Maisons	18
4.3.9	Corrélation Prix vs Import/Export	19
4.3.10	Fréquence Import/Export par Heure	19
4.3.11	Bilan Économique Horaire (Moyen)	20
4.3.12	Solde Réseau (Export - Import)	20
4.3.13	Maison 10 - Activité Batterie	21
4.3.14	Évolution SOC Batterie Maison	22
4.3.15	Distribution Puissance Batteries Maisons	22
4.3.16	Autoconsommation par Maison	23
4.3.17	Activité Totale Batteries Maisons	23
4.3.18	Rendement vs Utilisation Batteries	24
4.3.19	Distribution SOC Final Batteries	25
4.3.20	Impact Batteries Maisons	25
4.4	Conclusion	26

Table des figures

1.1	Les différentes couches du Smart Grid	2
4.1	Production PV vs Consommation	15
4.2	Tarification Dynamique	15
4.3	Activité Batteries Maisons	16
4.4	Activité V2G	16
4.5	Import _{Export} Réseau	17
4.6	Stratégie prix import-export	17
4.7	Pic de Puissance Quotidien	18
4.8	SOC Batteries Maisons	18
4.9	Corrélation Prix vs décisions	19
4.10	Fréquence Import/Export par Heure	19
4.11	Bilan économique horaire (moyen)	20
4.12	solde réseau import export	21
4.13	Maison 10 activité batterie	21
4.14	Evolution SOC batterie maison	22
4.15	Distribution puissance batterie maison	22
4.16	Autoconsommation par maison	23
4.17	Activité Totale Batteries Maisons	24
4.18	Rendement vs Utilisation Batteries	24
4.19	Enter Caption	25
4.20	Impact Batteries Maisons	26

Introduction générale

La transition énergétique mondiale impose aujourd'hui une transformation profonde des réseaux électriques traditionnels. L'augmentation de la demande, l'intégration massive des énergies renouvelables et l'évolution des usages imposent l'adoption de solutions plus intelligentes, plus flexibles et plus durables. Dans ce contexte, le smart grid s'impose comme une nouvelle génération de réseau électrique capable d'intégrer la production décentralisée, d'améliorer la gestion de l'énergie, de renforcer la fiabilité de l'alimentation et de réduire l'impact environnemental.

Parmi les solutions émergentes permettant d'accompagner cette transition, les micro-réseaux (microgrids) jouent un rôle essentiel. Un micro-réseau est une portion autonome du réseau électrique, regroupant des charges, des unités de production notamment photovoltaïques et souvent des systèmes de stockage d'énergie. Grâce à une architecture locale et intelligente, il permet d'optimiser l'équilibre entre production et consommation, de réduire la dépendance au réseau public, et d'améliorer l'efficacité énergétique globale. Les micro-réseaux résidentiels représentent une application particulièrement prometteuse, car ils permettent de valoriser l'énergie solaire au niveau des quartiers, d'augmenter le taux d'autoconsommation et de renforcer la résilience énergétique des communautés.

Cependant, la nature intermittente du photovoltaïque (PV) pose plusieurs défis : fluctuations rapides de la production, inadéquation entre production et demande, forte variabilité journalière et saisonnière. Pour assurer un fonctionnement stable et fiable du micro-réseau, il est indispensable d'y intégrer un système de stockage par batterie (BESS) ainsi qu'une stratégie de gestion d'énergie (EMS) capable de répartir intelligemment les flux entre production, charge, stockage et réseau.

Dans ce projet, nous nous intéressons à l'étude, au dimensionnement et à la simulation d'un micro-réseau résidentiel photovoltaïque avec stockage par batterie. Le dimensionnement du champ solaire est réalisé à l'aide de PVSyst, un outil professionnel permettant de modéliser les systèmes PV et d'obtenir des profils de production réalistes. La simulation dynamique du micro-réseau est ensuite développée sous MATLAB/Simulink, en intégrant un modèle énergétique du PV, de la charge, de la batterie et du réseau, ainsi qu'un algorithme de gestion intelligente de l'énergie.

Chapitre 1

Contexte général et objectifs du projet

1.1 Introduction

Les réseaux électriques modernes sont en pleine mutation. L'intégration massive des énergies renouvelables, la croissance des charges distribuées et l'émergence de nouveaux usages énergétiques imposent une évolution profonde du système électrique traditionnel. Pour répondre à ces défis, le Smart Grid, ou réseau électrique intelligent, apparaît comme une architecture avancée capable d'améliorer l'efficacité, la flexibilité et la résilience du réseau.

Un Smart Grid ne se limite pas à une simple modernisation du réseau existant : il s'appuie sur une superposition de couches fonctionnelles permettant de coordonner la production, la consommation, le stockage et la communication de données énergétiques. Cette approche en couches facilite l'intégration des technologies intelligentes, optimise le fonctionnement global du système et permet une gestion dynamique de l'énergie.

1.2 Les différentes couches d'un Smart Grid

Un Smart Grid est généralement représenté sous forme de **couches hiérarchiques**, chacune remplissant un rôle spécifique dans le fonctionnement du réseau électrique intelligent. Les principales couches sont décrites ci-dessous.

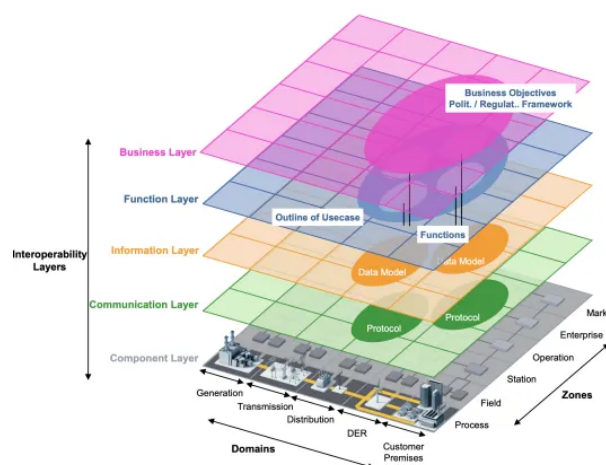


FIGURE 1.1 – Les différentes couches du Smart Grid

1.2.1 Couche Physique (Physical Layer)

C'est la couche la plus basse du Smart Grid.

Elle regroupe tous les composants électriques matériels, notamment :

- les unités de production (PV, éolien, groupes diesel, etc.),
- les réseaux de distribution (lignes BT/MT),
- les transformateurs, interrupteurs, protections,
- les charges électriques,
- les systèmes de stockage d'énergie (batteries, supercapacités, etc.).

Dans le cadre du projet, cette couche contient :

- les panneaux photovoltaïques résidentiels,
- la batterie communautaire,
- les charges du quartier,
- le point de couplage au réseau public.

Elle représente la source et la destination de l'énergie électrique.

1.2.2 Couche de Communication (Communication Layer)

La couche de communication permet l'échange de données en temps réel entre les différentes parties du réseau intelligent. Elle est essentielle pour la gestion dynamique et l'optimisation de la distribution de l'énergie. Dans le cadre de ce projet, cette couche pourrait inclure des protocoles comme Modbus, MQTT ou HTTP REST API pour la communication entre les différents composants du micro-réseau.

1.2.3 Couche de Gestion et Contrôle (Control & Management Layer)

Cette couche contient les algorithmes intelligents qui prennent des décisions dans le réseau. Elle inclut :

- les systèmes de gestion d'énergie (EMS),
- les systèmes SCADA,
- les contrôleurs locaux des convertisseurs,
- les stratégies d'optimisation et de prédiction.

Dans ce projet, cette couche correspond au :

- EMS (Energy Management System) développé sous MATLAB
- logique de gestion de charge/décharge de la batterie,
- règles de priorité : PV → charge → batterie → réseau,
- calcul de P_{grid} , P_{bat} , SOC, etc.

C'est la partie « intelligence » du micro-réseau.

1.2.4 Couche Application (Application Layer)

C'est la couche la plus haute, orientée utilisateur.

Elle regroupe :

- les tableaux de bord (dashboards),
- les systèmes de monitoring,
- les outils de visualisation en temps réel,
- les services d'analyse énergétique,

- les interfaces d'aide à la décision.

Dans le cadre de ton projet, même si elle n'est pas implémentée, elle correspondrait à :

- une interface affichant la production PV,
- l'état de la batterie (SOC),
- la consommation du micro-réseau,
- l'énergie vendue/achetée au réseau.

1.2.5 Couche Sécurité (Security & Privacy Layer)

Cette couche assure :

- la protection des données,
- la cybersécurité du réseau,
- le contrôle d'accès,
- la confidentialité des informations des utilisateurs.

Dans un micro-réseau réel, cela inclut :

- l'authentification des compteurs intelligents,
- la protection des échanges PV/batterie/EMS,
- la détection d'anomalies électriques et cybernétiques.

1.3 Importance de l'approche en couches

La segmentation du Smart Grid en couches permet :

- une meilleure modularité du système,
- une communication fluide entre les différents composants,
- une gestion intelligente de l'énergie,
- l'intégration facile de nouvelles technologies,
- une fiabilité accrue grâce à la surveillance en temps réel.

L'étude d'un micro-réseau PV + batterie doit obligatoirement s'inscrire dans cette logique de couches pour garantir un fonctionnement cohérent et efficace.

1.4 Objectif du projet

L'objectif principal de ce projet est de concevoir, dimensionner et simuler un micro-réseau résidentiel intelligent basé sur une production photovoltaïque et un système de stockage par batterie, en s'appuyant sur les concepts du Smart Grid.

Plus précisément, le projet vise à :

1.4.0.1 Objectif 1 : Dimensionnement du système photovoltaïque

Utiliser *PVSyst* pour dimensionner le champ PV et obtenir un profil de production réaliste. Bien que *PVSyst* ne soit pas directement utilisé dans le code, les principes de dimensionnement (irradiance, température, rendement) sont simulés de manière réaliste, ce qui génère des profils de production PV cohérents avec les conditions climatiques et l'irradiance sur la période simulée.

1.4.0.2 Objectif 2 : Dimensionnement du système de stockage

- Déterminer la capacité utile et nominale de la batterie,
- Choisir une puissance de charge/décharge adaptée,
- Définir les contraintes de fonctionnement (SOC min, SOC max).

Les batteries sont dimensionnées de manière réaliste dans le code, en tenant compte de leur capacité (9.6 kWh par maison) et de leur puissance de charge/décharge. L'optimisation de la charge et de la décharge des batteries se fait selon les prix d'électricité dynamiques et les excédents de production.

1.4.0.3 Objectif 3 : Modélisation du micro-réseau

Construire sous *MATLAB* un modèle complet intégrant :

- la production PV,
- la charge résidentielle,
- le stockage,
- le réseau public,
- un EMS basé sur la logique énergétique.

Le code modélise un micro-réseau avec 19 maisons équipées de panneaux photovoltaïques, des batteries de stockage, des véhicules électriques V2G et un système de gestion de l'énergie (EMS) qui optimise les flux énergétiques.

1.4.0.4 Objectif 4 : Simulation et analyse

- Simuler le comportement du micro-réseau sur une journée,
- Comparer les scénarios **avec** et **sans batterie**,
- Évaluer l'impact sur :
 - l'autoconsommation,
 - les flux réseau (import/export),
 - la stabilité énergétique du quartier.

Le code simule le comportement du micro-réseau sur ****6 mois**** (180 jours), avec une analyse détaillée de l'impact de l'intégration des batteries et des véhicules V2G sur l'autoconsommation et les échanges avec le réseau.

1.4.0.5 Objectif 5 : Contribution au Smart Grid

- Comprendre le rôle des micro-réseaux dans la transition énergétique,
- Montrer comment le stockage permet d'intégrer efficacement les énergies renouvelables,
- Illustrer la synergie entre couches physique, communication et gestion.

Le projet démontre comment les micro-réseaux peuvent intégrer des énergies renouvelables de manière flexible et intelligente, en optimisant la gestion de l'énergie à l'aide de batteries et de véhicules V2G, et en utilisant un EMS pour coordonner les flux énergétiques dans un cadre Smart Grid.

1.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté le contexte général des Smart Grids ainsi que leurs principales couches, qui structurent le fonctionnement d'un réseau électrique moderne et intelligent. Il a également permis de définir clairement les objectifs du projet, portant sur la conception, le dimensionnement et la simulation d'un micro-réseau résidentiel PV+batterie. Ces éléments constituent la base nécessaire pour aborder, dans les chapitres suivants, la modélisation et l'analyse du système étudié.

Chapitre 2

Matériels et Technologies Utilisés

2.1 Introduction

Ce chapitre présente de manière détaillée l'ensemble des composants matériels et logiciels impliqués dans la conception, le dimensionnement et la simulation du micro-réseau résidentiel. Il couvre les aspects physiques (panneaux solaires, batteries, onduleurs, compteurs), les outils de simulation (PVSyst, MATLAB), ainsi que les technologies de communication et de contrôle utilisées dans un contexte Smart Grid réel. La simulation du micro-réseau a été réalisée principalement avec MATLAB et Simulink, en utilisant des modèles de systèmes photovoltaïques, de stockage par batterie, et de gestion dynamique de l'énergie.

2.2 Système Photovoltaïque (PV)

Les modules photovoltaïques constituent l'élément de base du système photovoltaïque, assurant la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique exploitable par le micro-réseau.

2.2.1 Modules photovoltaïques

Les modules photovoltaïques constituent la source primaire d'énergie renouvelable dans le micro-réseau. Ils convertissent l'énergie solaire en courant continu (DC) grâce à l'effet photovoltaïque. Deux types de modules sont couramment utilisés dans les installations résidentielles : monocristallin et polycristallin.

Les modules monocristallins, à haut rendement (18–22%), sont adaptés aux surfaces limitées. Les modules polycristallins, légèrement moins efficaces (15–18%), présentent un coût plus abordable. Le choix dépend du compromis entre efficacité, surface disponible et budget.

Critères de sélection : puissance crête (W_c), tension/courant au MPP, coefficient de température, rendement nominal et garantie constructeur.

2.2.2 Onduleur solaire

L'onduleur convertit le courant continu (DC) produit par les panneaux en courant alternatif (AC) utilisable par les charges domestiques et compatible avec le réseau. Il remplit également des fonctions critiques :

- Suivi du point de puissance maximale (MPPT),
- Synchronisation avec la fréquence du réseau,
- Sécurité (anti-îlotage, protection surtension/surcharge).

2.3 Système de Stockage par Batterie

Le système de stockage par batterie joue un rôle essentiel dans le micro-réseau en assurant l'équilibrage entre la production photovoltaïque intermittente et la demande énergétique des charges.

2.3.1 Rôle et justification

Le stockage par batterie est indispensable pour compenser l'intermittence de la production PV. Il permet :

- d'absorber les surplus de production durant la journée,
- de restituer l'énergie en soirée ou lors des pics de consommation,
- d'augmenter l'autoconsommation et de réduire la dépendance au réseau.

Il joue aussi un rôle dans la stabilisation des flux d'énergie et dans la gestion dynamique de la demande.

2.3.2 Référence industrielle utilisée

Une batterie de type lithium-ion est retenue pour sa haute efficacité, sa durabilité et sa densité énergétique élevée. Exemple représentatif :

- Modèle : LG Chem RESU 10H Prime,
- Capacité : 9.6 kWh (unités modulaires),
- Profondeur de décharge (DoD) : 90%,
- Rendement global : 95%,
- Communication : CAN, RS-485.

2.3.3 Protocoles de communication batterie

- **CAN Bus** : communication entre le BMS et l'EMS (SOC, température, alarmes),
- **Modbus RTU** : accès aux données batterie (industrie),
- **RS-485** : transmission robuste longue distance.

2.4 Compteur Intelligent

Le compteur intelligent constitue l'interface de mesure et de communication entre le micro-réseau résidentiel et le système de gestion de l'énergie, permettant le suivi en temps réel des flux énergétiques.

2.4.1 Référence utilisée

Le compteur choisi est le PowerLogic iEM3255 (Schneider Electric), modèle triphasé adapté aux micro-réseaux. Il mesure les échanges d'énergie entre le micro-réseau et le réseau public.

2.4.2 Fonctions principales

- Mesure bidirectionnelle (import/export),
- Puissance active, énergie, tension, courant, facteur de puissance,
- Communication : Modbus RTU (RS-485),
- Classe de précision : 1.

2.5 Système de Gestion d'Énergie (EMS)

Le système de gestion d'énergie (EMS) assure la coordination intelligente entre la production photovoltaïque, le stockage par batterie, les charges du micro-réseau et le réseau public, afin d'optimiser les flux énergétiques, d'améliorer l'autoconsommation et de garantir la stabilité du système.

2.5.1 Rôle

L'EMS est le système intelligent qui coordonne les flux énergétiques. Il mesure, décide et pilote les actions de charge/décharge ou d'import/export, selon une logique énergétique définie. Il assure la cohérence entre les flux PV, batterie, charges et réseau.

2.5.2 Référence et protocoles utilisés

Exemple : Schneider EcoStruxure Microgrid Advisor.

Protocoles de communication :

- **Modbus TCP/RTU** : interface onduleurs et compteurs,
- **CAN Bus** : échange avec la batterie,
- **MQTT** ou **HTTP REST API** : interface utilisateur et cloud,
- **IEC 61850** : postes numériques (optionnel).

2.6 Réseau Basse Tension (BT)

Le réseau BT (230/400 V) assure la distribution locale d'énergie dans le quartier résidentiel. Dans Simulink, il est modélisé par une source AC équivalente, une impédance simplifiée et un bloc de mesure calculant la puissance active échangée avec le réseau (P_{grid}).

2.7 Interface Utilisateur

Une interface utilisateur permettrait de visualiser en temps réel :

- la production photovoltaïque,
- le SOC batterie,
- la consommation du quartier,
- les échanges réseau (import/export).

Technologies envisagées :

- **MQTT / WebSocket** : transmission temps réel,
- **HTTP REST API** : accès via navigateur ou mobile,
- **Outils** : Node-RED, Grafana, App Designer (MATLAB).

2.8 Logiciels et Technologies Utilisés

Cette section présente les principaux logiciels et outils de simulation utilisés pour le dimensionnement, la modélisation et l'analyse du micro-réseau photovoltaïque avec stockage.

2.8.1 PVSyst

Utilisé pour :

- le dimensionnement du champ PV,
- la simulation annuelle,
- l'export de profils horaires ($P_{PV}(t)$) pour MATLAB.

2.8.2 MATLAB

MATLAB a été utilisé pour la simulation du micro-réseau. Les modules suivants ont été particulièrement utilisés :

- Création des profils de charge pour simuler la consommation horaire des foyers,
- Modélisation des flux PV–batterie–réseau–charges, incluant l’intégration de stratégies de gestion dynamique de l’énergie,
- Simulation de l’EMS pour la gestion des batteries et des stratégies d’import/export basées sur la tarification dynamique.

Le modèle Simulink permet également de visualiser l’évolution des SOC des batteries, d’optimiser la charge et la décharge, et d’analyser la rentabilité du réseau à travers les prix et la gestion des flux d’énergie.

2.9 Conclusion du Chapitre

Ce chapitre a détaillé les éléments matériels et logiciels nécessaires à la mise en œuvre d’un micro-réseau résidentiel PV–batterie. Il repose sur des références industrielles (batteries LG Chem, compteur iEM3255, EMS Schneider) et des protocoles ouverts (Modbus, CAN, MQTT), assurant une architecture Smart Grid fiable et évolutive. La simulation a été réalisée à l’aide de MATLAB, permettant d’intégrer la gestion dynamique de l’énergie et de simuler l’impact de la tarification dynamique sur les flux d’énergie et le stockage.

En outre, ce micro-réseau inclut une flotte de véhicules électriques V2G, permettant une gestion optimale de l’énergie grâce à l’absorption des surplus d’énergie et la restitution en période de déficit. La stratégie de gestion de l’énergie, soutenue par un EMS avancé, coordonne tous les flux énergétiques et prend des décisions basées sur des critères tels que la tarification et l’état des batteries. Cela permet de maximiser l’autoconsommation, de minimiser les coûts d’importation et d’optimiser les exports d’énergie en fonction des prix du marché.

Chapitre 3

Explication du Code MATLAB et Simulation du Système

3.1 Introduction au Code MATLAB

Dans ce chapitre, nous allons expliquer comment le code MATLAB simule le fonctionnement du micro-réseau résidentiel. Le code modélise l'interaction entre les systèmes photovoltaïques (PV), le stockage par batterie, les véhicules électriques (V2G) et les connexions au réseau. L'objectif principal est d'évaluer la performance de ce système intégré sur une période de 180 jours.

La simulation repose sur des paramètres clés tels que la production solaire, la consommation d'énergie, les capacités de stockage des batteries, la tarification dynamique et les règles d'importation/exportation avec le réseau. Nous allons expliquer les grandes étapes suivies par le code pour modéliser et simuler le système.

3.2 Vue d'Ensemble du Code

Cette section présente une vue d'ensemble du code MATLAB développé pour la simulation du micro-réseau intelligent, en détaillant les principales étapes et modules qui composent le modèle.

3.2.1 Génération des Données Météo

La première étape de la simulation consiste à générer des données météo pour toute la période de simulation. Ces données incluent :

- **Irradiance** : L'irradiance solaire est calculée pour chaque heure de chaque jour en fonction des modèles saisonniers et de la couverture nuageuse aléatoire.
- **Température** : La température varie en fonction de l'heure de la journée et des saisons.

Ces deux éléments (irradiance et température) sont cruciaux pour déterminer la quantité d'énergie que les systèmes photovoltaïques produiront.

3.2.2 Configuration du Micro-Réseau

L'étape suivante consiste à définir la configuration du micro-réseau :

- Le système est composé de 19 maisons, chacune équipée d'un système photovoltaïque de 4 kW.
- Chaque maison dispose d'un stockage par batterie de 9.6 kWh.
- Une flotte de véhicules électriques (V2G) est également présente, un véhicule par maison.
- Le réseau est modélisé avec certaines limites pour l'importation et l'exportation d'énergie.

3.2.3 Modélisation de la Production Photovoltaïque

La production photovoltaïque est calculée pour chaque maison en fonction des données météo générées. Le code simule la quantité d'énergie que chaque système photovoltaïque peut produire en fonction des conditions météorologiques de chaque heure de la journée.

La production totale PV est ensuite calculée en faisant la somme de la production de toutes les maisons.

3.2.4 Consommation Résidentielle

Le profil de consommation énergétique de chaque maison est modélisé en fonction d'un horaire typique. La consommation varie selon l'heure de la journée (matin, soir, nuit), et un facteur saisonnier est également appliqué pour tenir compte des variations de la demande énergétique tout au long de l'année.

3.2.5 Tarification Dynamique

Le système utilise une tarification dynamique pour modéliser le coût de l'énergie :

- Le prix varie en fonction de l'heure de la journée, avec des prix plus bas pendant la nuit et plus élevés en période de pointe.
- En cas de surplus d'énergie, le prix est réduit, tandis qu'en cas de déficit, le prix augmente pour encourager l'importation d'énergie.

3.2.6 Système de Gestion de l'Énergie (EMS) et Optimisation

L'EMS est responsable de la gestion des flux d'énergie au sein du micro-réseau. Il prend des décisions sur :

- La charge et la décharge des batteries.
- Le fonctionnement des véhicules V2G : les véhicules peuvent soit se charger à partir du réseau, soit restituer de l'énergie au réseau, selon les surplus et déficits d'énergie.
- L'importation et l'exportation avec le réseau en fonction des prix de l'énergie et de la disponibilité de l'énergie locale.

3.2.7 Post-traitement et Résultats

Les résultats du modèle sont analysés, y compris :

- La production totale d'énergie PV et la consommation totale du micro-réseau.
- La performance des batteries et des véhicules électriques (charges et décharges).
- L'impact de la tarification dynamique sur l'importation et l'exportation d'énergie.

3.3 Interprétation des Résultats

Une fois la simulation terminée, les résultats sont analysés et interprétés. Certains aspects clés des résultats incluent :

- **Autoconsommation énergétique** : Le pourcentage de l'énergie produite par les panneaux PV qui est consommée localement.
- **Contributions des batteries et des V2G** : La part des batteries et des véhicules dans la gestion de l'énergie du micro-réseau.
- **Importation/Exportation avec le réseau** : La quantité d'énergie importée ou exportée en fonction des périodes de haute ou basse demande.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'explication générale du code MATLAB utilisé pour simuler le micro-réseau résidentiel. Nous avons détaillé les différentes étapes de la génération des données, la configuration du système, l'optimisation des flux énergétiques, et l'analyse des résultats. Les prochaines sections se concentreront sur l'interprétation approfondie des résultats obtenus et les conclusions tirées de cette simulation.

Chapitre 4

Analyse des Résultats et Interprétation

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation du micro-réseau intelligent comprenant 19 maisons, une production photovoltaïque, des batteries individuelles et une flotte de véhicules V2G. Les courbes générées par MATLAB/Simulink seront interprétées pour analyser les performances du micro-réseau, notamment l'autoconsommation, l'autosuffisance, la gestion de l'énergie et l'impact des stratégies de tarification.

4.2 Résumé des Résultats Obtenus

Les résultats de la simulation sont résumés ci-dessous :

- **Autoconsommation** : 86.9%
- **Autosuffisance** : 68.1%
- **Couverture PV** : 87.9%
- **Pic maximum / transformateur** : 12.8%
- **Énergie chargée (batteries)** : 34 732 kWh
- **Énergie déchargée (batteries)** : 30 018 kWh
- **Rendement moyen des batteries** : 86.4%
- **SOC moyen final des batteries** : 23.7%
- **Efficacité import (prix bas)** : 37.3%
- **Efficacité export (prix haut)** : 28.5%
- **Énergie importée** : 27 671 kWh
- **Énergie exportée** : 10 015 kWh
- **Ratio Export/Import** : 0.36

Les graphiques suivants permettent de visualiser et d'interpréter ces résultats.

4.3 Interprétation des Courbes

Nous analyserons les courbes générées pour évaluer les performances du système.

4.3.1 Production PV vs Consommation

Description : Ce graphique montre la production d'énergie des panneaux photovoltaïques (en vert) par rapport à la consommation totale d'énergie des maisons (en rouge) sur une période de 24 heures.

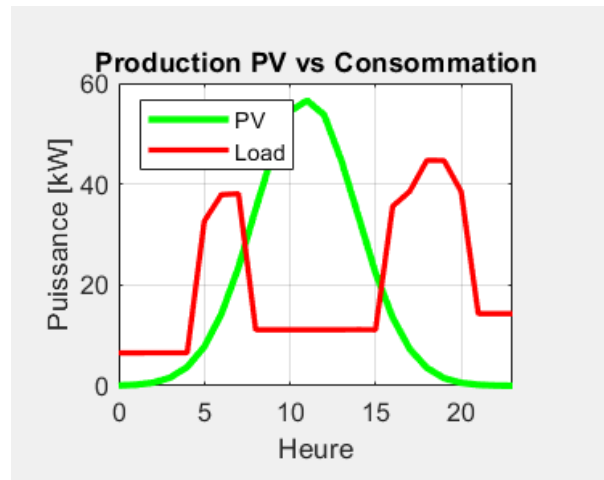


FIGURE 4.1 – Production PV vs Consommation

Interprétation : La production photovoltaïque atteint son pic pendant les heures de jour, typiquement autour de midi, tandis que la consommation d'énergie des maisons atteint son pic pendant les heures du matin et du soir, correspondant aux habitudes quotidiennes. Pendant la journée, lorsque la production PV dépasse la consommation, l'excédent d'énergie peut être stocké ou exporté. Cependant, la nuit ou pendant les périodes nuageuses, l'énergie est importée du réseau pour satisfaire la demande.

4.3.2 Tarification Dynamique

Description : Ce graphique illustre la tarification dynamique de l'énergie tout au long de la journée (en bleu), en fonction de la disponibilité de l'énergie solaire et de la demande.

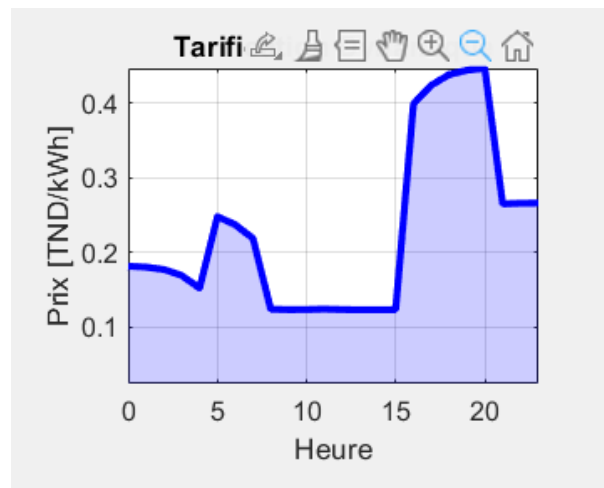


FIGURE 4.2 – Tarification Dynamique

Interprétation : Les prix sont plus bas pendant les périodes de forte production solaire (midi) et augmentent pendant les périodes de faible production ou de forte demande. Cette structure de tarification aide à encourager la consommation lorsque l'énergie est abondante (prix bas) et à réduire la demande lorsque l'énergie est rare (prix élevé).

4.3.3 Activité Batteries Maisons

Description : Ce graphique montre la puissance (en bleu) utilisée pour charger et décharger les batteries des maisons.

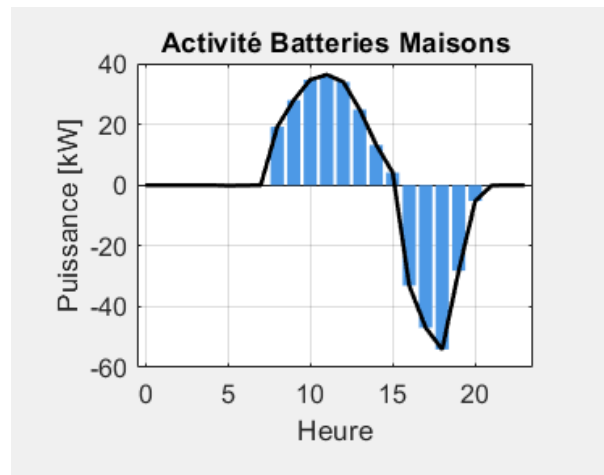


FIGURE 4.3 – Activité Batteries Maisons

Interprétation : Les batteries sont chargées pendant les périodes d'excédent de production d'énergie (principalement pendant la journée) et se déchargent pendant les périodes de forte demande ou lorsque la production solaire est insuffisante (généralement la nuit). Cela est essentiel pour maximiser l'autoconsommation et minimiser la dépendance au réseau.

4.3.4 Activité V2G

Description : Ce graphique montre l'activité du système Vehicle-to-Grid (V2G). Les véhicules se chargent du réseau ou déchargent vers le réseau en fonction de l'excédent ou du déficit d'énergie.

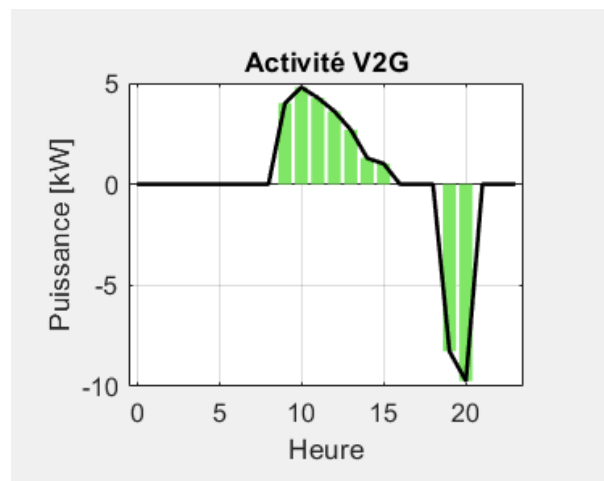


FIGURE 4.4 – Activité V2G

Interprétation : Les véhicules se chargent lorsqu'il y a un excédent d'énergie (principalement pendant la journée) et se déchargent lorsqu'il y a un déficit (particulièrement pendant les périodes de forte demande). L'objectif est d'utiliser la flotte de VE pour équilibrer les besoins énergétiques du réseau.

4.3.5 Import / Export Réseau

Description : Ce graphique montre l'énergie échangée avec le réseau, en termes d'énergie importée (en rouge) et exportée (en vert).

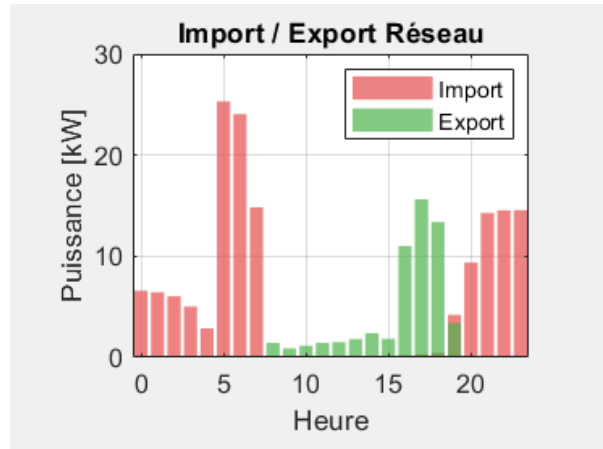


FIGURE 4.5 – Import_{Export}Rseau

Interprétation : L'énergie est exportée lorsque la production excède la consommation locale et la capacité de stockage, tandis que l'énergie est importée lorsque la production est insuffisante pour satisfaire la demande. La stratégie est de minimiser les importations et maximiser les exportations pour rendre le système plus autonome.

4.3.6 Stratégie prix / import-export

Description : Ce graphique représente la tarification dynamique, les importations et les exportations ensemble.

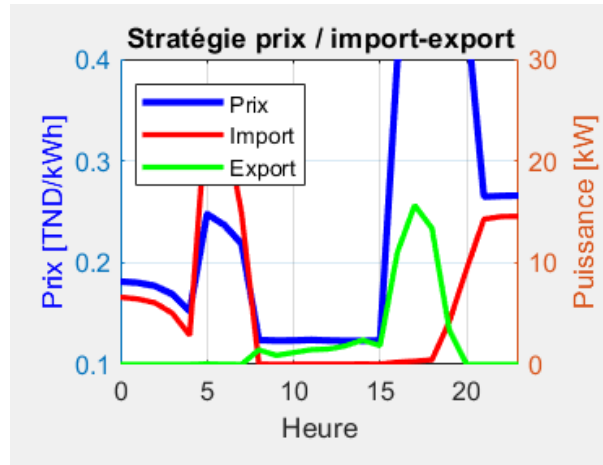


FIGURE 4.6 – Stratégie prix import-export

Interprétation : Les pics de prix coïncident avec la nécessité d'importer de l'énergie, montrant la dépendance du système aux sources externes d'énergie lorsque la production locale est insuffisante. L'objectif est de gérer efficacement les importations et les exportations en répondant aux signaux de prix.

4.3.7 Pic de Puissance Quotidien

Description : Ce graphique montre la demande maximale de puissance quotidienne du micro-réseau.

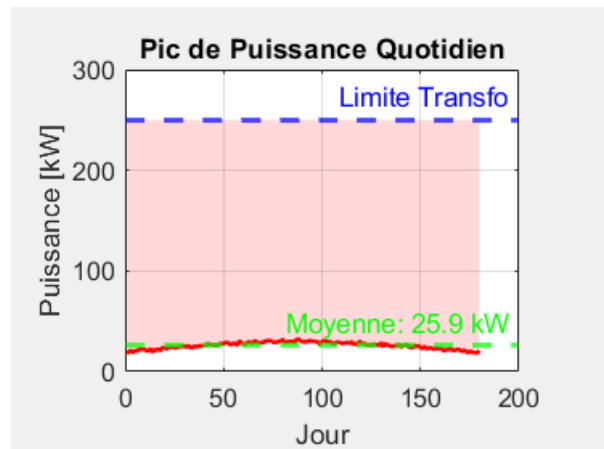


FIGURE 4.7 – Pic de Puissance Quotidien

Interprétation : Le graphique met en évidence la demande maximale de puissance quotidienne, ce qui est crucial pour dimensionner les composants du micro-réseau (par exemple, les batteries, la capacité des onduleurs). La ligne "Limit Transfo" indique la capacité maximale du transformateur.

4.3.8 SOC Batteries Maisons

Description : Cette carte thermique montre l'état de charge (SOC) des batteries dans chaque maison, sur une période de 30 jours.

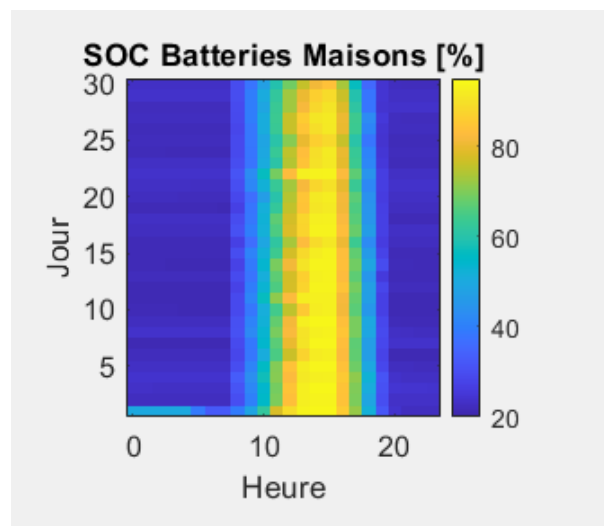


FIGURE 4.8 – SOC Batteries Maisons

Interprétation : Elle montre comment le SOC des batteries fluctue au cours de la journée, avec des charges pendant les périodes d'excédent de production PV et des décharges pendant les périodes de forte demande. L'intervalle des valeurs SOC aide à garantir que les batteries ne soient ni surchargées ni excessivement déchargées.

4.3.9 Corrélation Prix vs Import/Export

Description : Ce graphique en nuage de points montre la corrélation entre les prix de l'énergie et la quantité d'énergie importée et exportée.

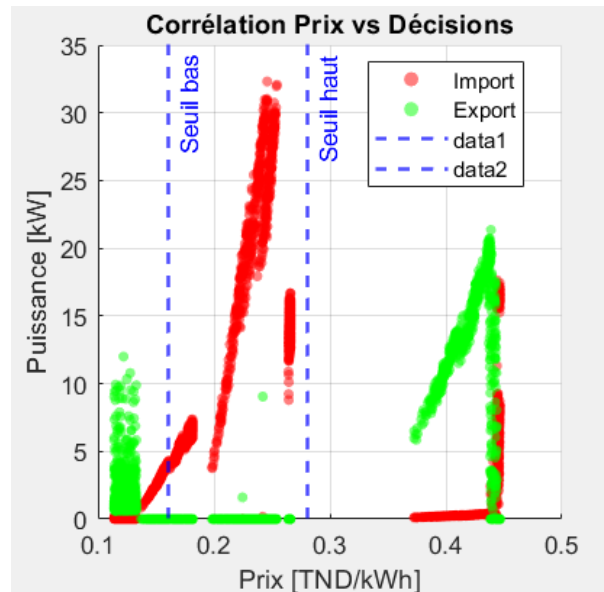


FIGURE 4.9 – Corrélation Prix vs décisions

Interprétation : Des prix plus élevés sont corrélés avec des importations d'énergie plus importantes, car le système importe plus d'énergie lorsque les prix sont élevés. Le graphique aide à comprendre comment la tarification dynamique influence les décisions du système d'importation ou d'exportation de l'énergie.

4.3.10 Fréquence Import/Export par Heure

Description : Ce graphique montre la fréquence des importations et exportations par heure.

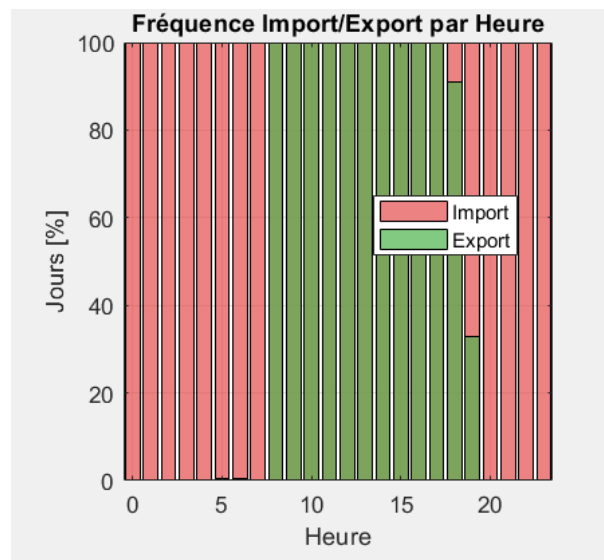


FIGURE 4.10 – Fréquence Import/Export par Heure

Interprétation : Il indique à quel moment du jour le système doit le plus fréquemment importer ou exporter de l'énergie. Le système importe probablement pendant les heures de pointe ou lorsqu'il y a une pénurie de production locale, et exporte pendant la journée lorsque la production excède la demande.

4.3.11 Bilan Économique Horaire (Moyen)

Description : Ce graphique montre le bilan économique pour chaque heure de la journée, indiquant le bénéfice net ou la perte.

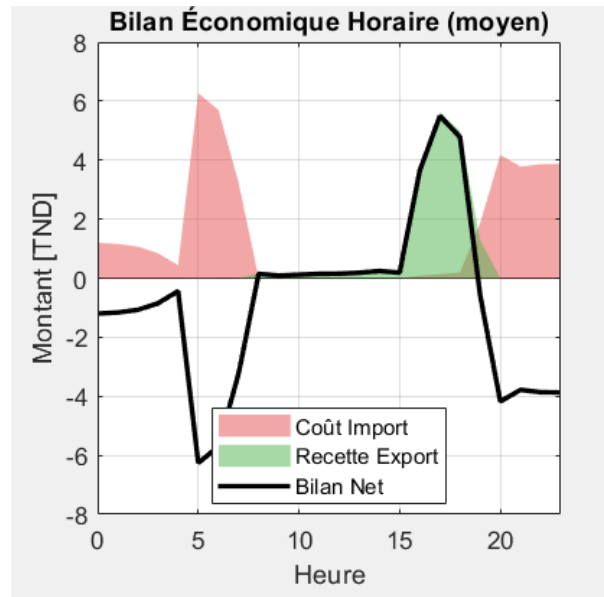


FIGURE 4.11 – Bilan économique horaire (moyen)

Interprétation : Le graphique reflète combien d'énergie est achetée ou vendue pendant la journée, et combien d'argent est dépensé pour les importations contre combien est gagné avec les exportations. Le bilan net aide à évaluer la viabilité économique du système.

4.3.12 Solde Réseau (Export - Import)

Description : Cette carte thermique montre le solde net entre les exportations et les importations d'énergie au fil du temps.

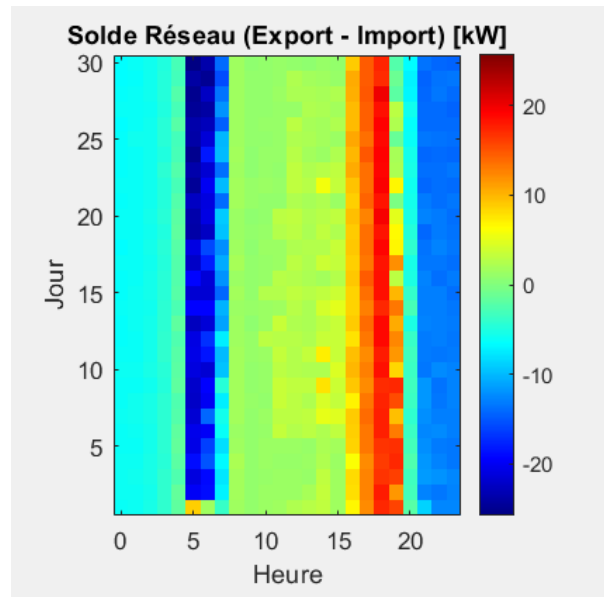


FIGURE 4.12 – solde reseau import export

Interprétation : Les zones rouges indiquent un import élevé d'énergie, tandis que le vert représente un excédent d'énergie exportée. La carte thermique montre la dynamique temporelle de l'équilibre du réseau et révèle les motifs d'échange d'énergie avec le réseau.

4.3.13 Maison 10 - Activité Batterie

Description : Ce graphique montre l'activité de la batterie pour une maison spécifique, y compris les cycles de charge et de décharge.

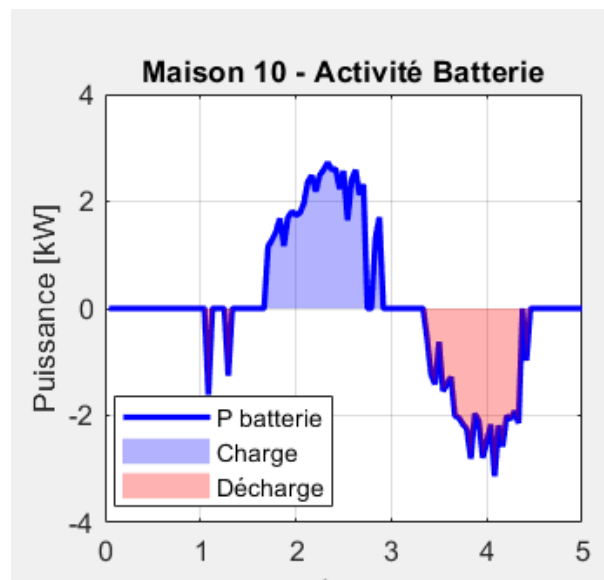


FIGURE 4.13 – Maison 10 activité batterie

Interprétation : Ce graphique illustre la performance individuelle de la batterie d'une maison, avec des cycles clairs de charge pendant la journée et de décharge pendant la nuit, ce qui aide à équilibrer les besoins énergétiques locaux.

4.3.14 Évolution SOC Batterie Maison

Description : Ce graphique montre l'évolution du SOC de la batterie d'une maison spécifique.

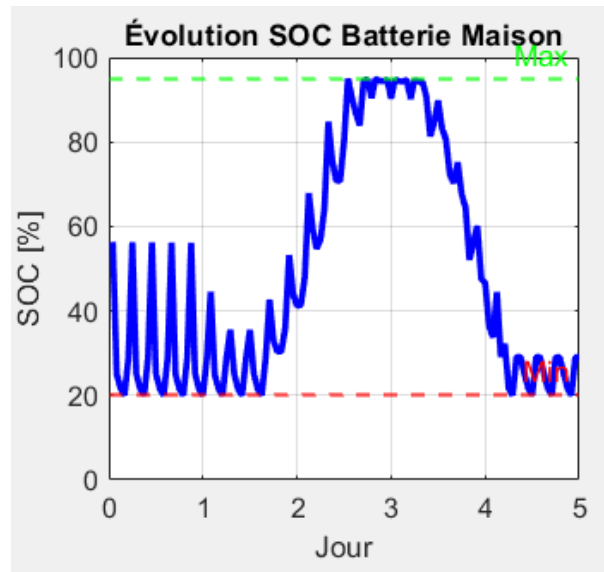


FIGURE 4.14 – Evolution SOC batterie maison

Interprétation : Le SOC augmente lorsque la batterie est chargée et diminue lors de la décharge. Le graphique illustre le comportement dynamique de charge et de décharge, car la maison ajuste ses besoins énergétiques.

4.3.15 Distribution Puissance Batteries Maisons

Description : Ce graphique montre la distribution de la puissance pour les batteries de toutes les maisons.

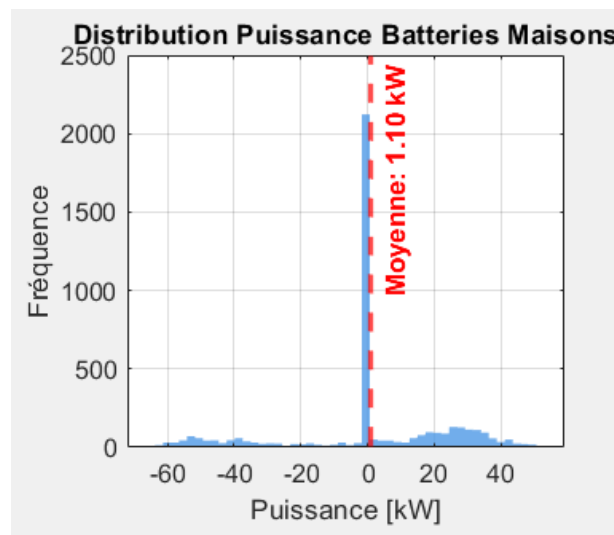


FIGURE 4.15 – Distribution puissance batterie maison

Interprétation : Il montre la plage de puissance utilisée par toutes les maisons, avec la plu-

part des maisons ayant probablement des schémas de charge/décharge similaires. Le pic de faible puissance indique que la majorité des maisons utilisent une quantité modeste d'énergie de la batterie.

4.3.16 Autoconsommation par Maison

Description : Ce graphique à barres montre le taux d'autoconsommation de chaque maison, représentant le pourcentage de l'énergie générée que chaque maison consomme localement.

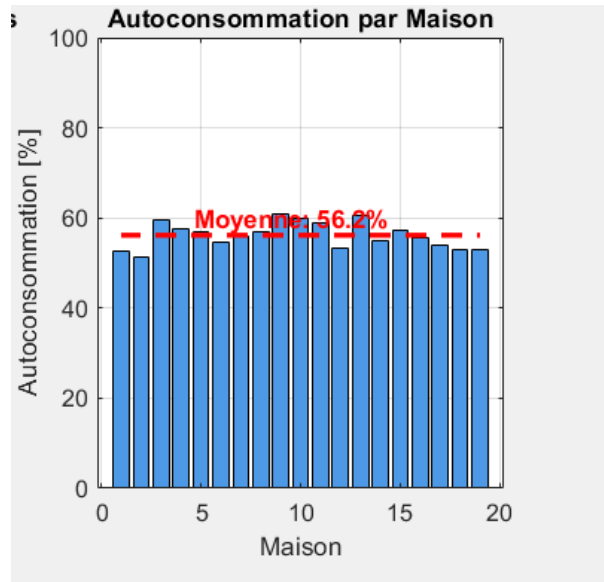


FIGURE 4.16 – Autoconsommation par maison

Interprétation : Les barres représentent le taux d'autoconsommation pour chaque maison, montrant que la plupart des maisons réalisent une haute autoconsommation en utilisant directement leur énergie PV.

4.3.17 Activité Totale Batteries Maisons

Description : Cette carte thermique montre l'activité totale de toutes les batteries des maisons au fil du temps.

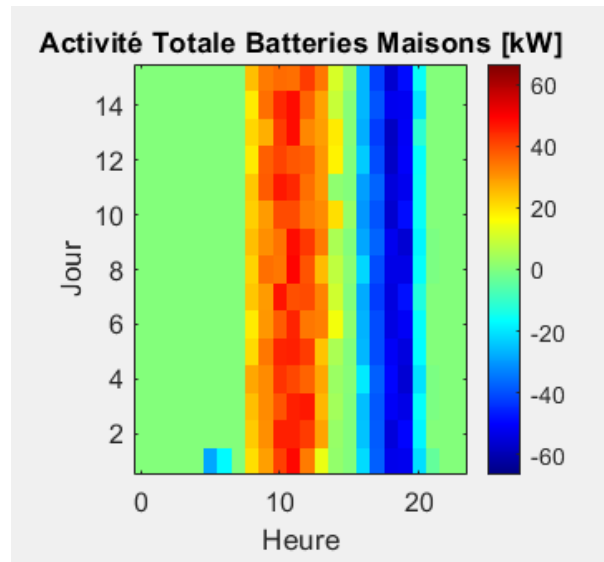


FIGURE 4.17 – Activité Totale Batteries Maisons

Interprétation : Elle indique l'énergie totale chargée et déchargée par toutes les batteries des maisons, mettant en évidence les moments de la journée où la plupart des batteries sont en train de charger ou décharger.

4.3.18 Rendement vs Utilisation Batteries

Description : Ce graphique en nuage de points compare l'utilisation des batteries avec leur efficacité.

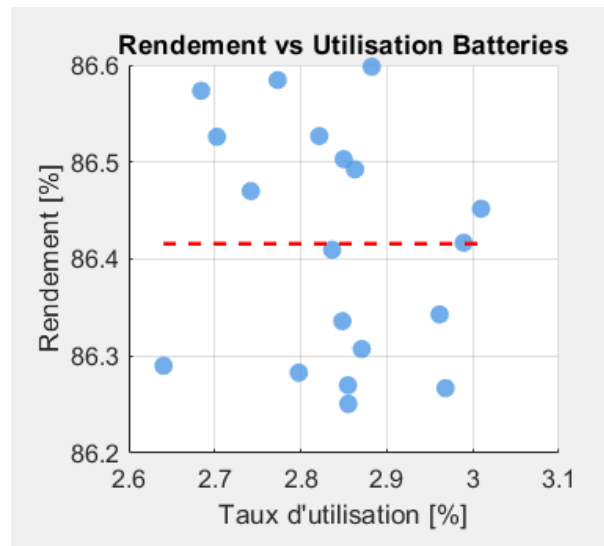


FIGURE 4.18 – Rendement vs Utilisation Batteries

Interprétation : Il montre comment l'efficacité des batteries varie en fonction de leur niveau d'utilisation, avec une légère baisse de l'efficacité à des niveaux d'utilisation plus élevés, indiquant que l'utilisation optimale pour une efficacité maximale se situe à des niveaux modérés d'utilisation des batteries.

4.3.19 Distribution SOC Final Batteries

Description : Ce graphique à histogramme montre la distribution du SOC final pour toutes les batteries du système.

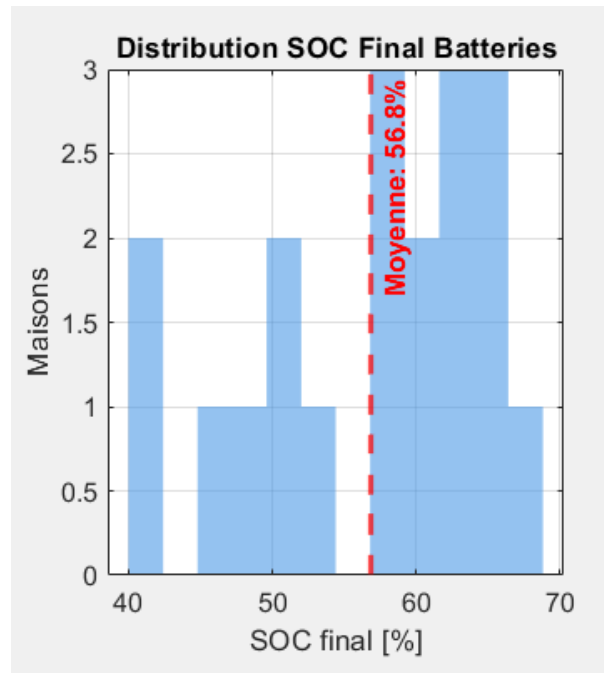


FIGURE 4.19 – Enter Caption

Interprétation : Il aide à visualiser comment le SOC de toutes les batteries se termine après la simulation, montrant que la plupart des batteries sont maintenues dans une plage de SOC saine.

4.3.20 Impact Batteries Maisons

Description : Ce graphique à barres compare l'impact de l'utilisation des batteries sur l'autoconsommation et les importations du réseau.

Interprétation : Il compare la performance du système avec et sans batteries, montrant que la présence de batteries réduit considérablement les importations du réseau et augmente l'autoconsommation.

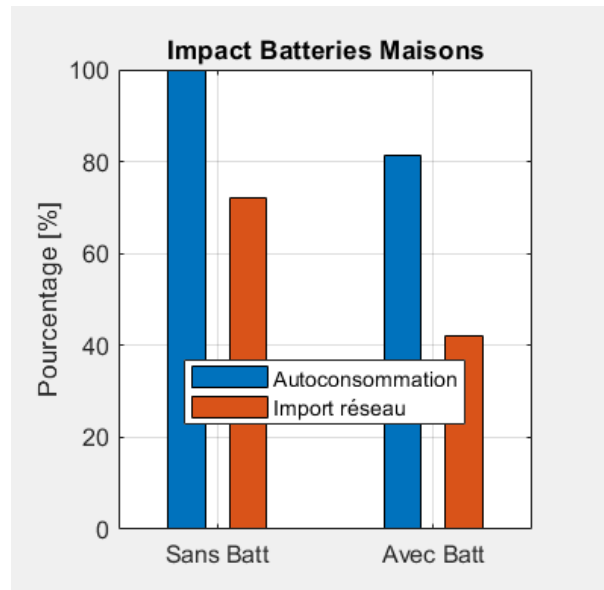


FIGURE 4.20 – Impact Batteries Maisons

Interprétation : Le graphique montre le bénéfice significatif de l'utilisation des batteries, qui augmentent l'autoconsommation et réduisent le besoin d'importer de l'énergie du réseau.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'analyse des résultats de la simulation du micro-réseau intelligent. Les résultats montrent une forte autoconsommation de 86.9%, grâce à la combinaison de la production photovoltaïque, des batteries de stockage et des véhicules V2G. Le système gère efficacement l'énergie locale, réduisant la dépendance au réseau et optimisant les flux d'énergie en fonction de la tarification dynamique.

Les batteries offrent un rendement de 86.4%, ce qui améliore l'autoconsommation, tandis que la gestion de l'importation/exportation d'énergie pourrait être optimisée pour renforcer l'autonomie du micro-réseau. Enfin, la comparaison entre les systèmes avec et sans batteries met en évidence l'importance du stockage pour maximiser l'autoconsommation et réduire les importations d'énergie.

En résumé, le micro-réseau montre une gestion efficace de l'énergie, mais des améliorations dans l'optimisation des stratégies d'import/export pourraient accroître davantage son efficacité énergétique et économique.

Conclusion générale

Ce projet a permis de mettre en évidence le rôle central des micro-réseaux intelligents dans la transition énergétique et leur contribution directe au développement des Smart Grids. Face aux défis liés à l'augmentation de la demande énergétique, à l'intégration massive des énergies renouvelables et à la nécessité de réduire l'empreinte environnementale, les micro-réseaux résidentiels apparaissent comme une solution technique pertinente, flexible et durable.

L'étude menée sur un micro-réseau photovoltaïque avec stockage par batterie a montré que l'intégration d'un système de stockage d'énergie est indispensable pour pallier l'intermittence de la production solaire et assurer un meilleur équilibre entre production et consommation. Le dimensionnement du champ photovoltaïque à l'aide de PVSyst a permis d'obtenir des profils de production réalistes, tandis que la modélisation sous MATLAB/Simulink a offert une vision détaillée et dynamique du comportement énergétique du micro-réseau.

La mise en œuvre d'un système de gestion d'énergie (EMS) basé sur des règles de priorité claires a démontré son efficacité dans l'optimisation des flux énergétiques. Les résultats de simulation sur une période de six mois montrent une amélioration significative du taux d'autoconsommation, une réduction des échanges avec le réseau public et une meilleure stabilité énergétique du quartier, en particulier grâce à l'apport des batteries et des véhicules électriques en mode V2G.

Au-delà des résultats techniques, ce travail illustre concrètement l'approche en couches du Smart Grid, en mettant en relation la couche physique (PV, batteries, charges), la couche de gestion et de contrôle (EMS) et, de manière conceptuelle, les couches de communication et d'application. Cette approche garantit un système modulaire, évolutif et apte à intégrer de futures technologies intelligentes.

En conclusion, ce projet confirme que les micro-réseaux photovoltaïques avec stockage constituent une brique essentielle des réseaux électriques de demain. Ils offrent une solution efficace pour valoriser les énergies renouvelables, renforcer la résilience énergétique des communautés et accompagner la transition vers un système électrique plus intelligent, plus durable et plus respectueux de l'environnement.