

Ecole Nationale Des Sciences Appliquées Béné Mellaï

**Filière** : Transformation Digitale Industrielle

**Module** : Data Driven Optimization

# Rapport projet

# DDO

**Microgrid Intelligent basé sur IA, Simulation & Optimisation**

**Réalisé par :**

- KARDOUDI Souad
- GUESSOUS Ikram

**Encadré par :**

- Pr. EL ALAOUI Mohamed

# Table de matière

I.	Introduction Générale .....	4
II.	Problématique .....	4
III.	Objectifs Principaux du Projet.....	5
IV.	Conception et modélisation de l'application .....	5
1.	Architecture Technique de l'Application.....	5
2.	Fonctionnalités et Modules de l'Application.....	6
3.	Modélisation Mathématique du Micro-Réseau .....	7
3.1.	Hypothèses de Modélisation .....	7
3.2.	Variables du Modèle.....	8
3.3.	Contraintes Fondamentales.....	8
3.4.	Fonction Objectif d'Optimisation .....	9
V.	Présentation des Pages de l'Application .....	10
1.	Page d'Accueil .....	10
2.	Page Configuration .....	12
3.	Page Résultats .....	13
4.	Page Trading P2P .....	15
5.	Page Météo.....	16
6.	Page Batterie .....	18
7.	Page Environnement .....	20
8.	Page Prévisions .....	22
9.	Page Prédictions IA .....	25
10.	Page Optimisation .....	27
11.	Page Historique & Documentation .....	30
VI.	Résultats Attendus.....	32
VII.	Limites et Perspectives d'Amélioration.....	32
1.	Limites.....	32
2.	Perspectives .....	33
VIII.	Conclusion .....	33

# Table de figures

Figure 1: Page d'accueil (1) .....	10
Figure 2: Page d'accueil (2) .....	11
Figure 3: Page d'accueil (3) .....	11
Figure 4 : Page de configuration (1) .....	12
Figure 5 : Page de configuration (2) .....	12
Figure 6 : Page de Résultats (1) .....	13
Figure 7 : Page de Résultats (2) .....	14
Figure 8 : Page de Résultats (3) .....	14
Figure 9: Page de Résultats (4) .....	14
Figure 10 : Page de Trading P2P (1).....	15
Figure 11: Page de Trading P2P (2) .....	16
Figure 12 : Page Météo (1) .....	17
Figure 13 : Page Météo (2) .....	17
Figure 14 : Page Météo (3) .....	18
Figure 15 : Page Batterie (1).....	18
Figure 16: Page Batterie (2).....	19
Figure 17 : Page Batterie (3).....	19
Figure 18 : Page Environnement (1).....	20
Figure 19 : Page Environnement (2).....	21
Figure 20: Page Environnement (3).....	21
Figure 21: Page Prévisions (1) .....	22
Figure 22 : Page Prévisions (2).....	22
Figure 23: Page Prévisions (3) .....	23
Figure 24: Page Prévisions (4).....	23
Figure 25: Page Prévisions (5) .....	24
Figure 26 : Prédiction IA (1) .....	25
Figure 27: Prédiction IA (2) .....	26
Figure 28: Prédiction IA (3) .....	27
Figure 29: Page Optimisation (1) .....	28
Figure 30 : Page optimisation (2).....	29
Figure 31: Page Historique .....	30
Figure 32 : Page Documentation .....	31

# **I. Introduction Générale**

La transition énergétique mondiale impose une évolution rapide vers des systèmes énergétiques intelligents, décentralisés et durables. Les microgrids intelligents constituent une solution stratégique permettant d'intégrer efficacement les énergies renouvelables, le stockage, le contrôle intelligent et les mécanismes d'échange d'énergie.

Dans ce contexte, le projet IKSOU ENERGIES v19.4 consiste en le développement d'une application web interactive basée sur Python et Streamlit, dédiée à la simulation, l'analyse, la prédiction et l'optimisation énergétique d'un micro-réseau multi-bâtiments.

L'application intègre :

- Production photovoltaïque (PV)
- Consommation énergétique et systèmes HVAC
- Stockage par batterie
- Trading énergétique Peer-to-Peer (P2P)
- Indicateurs environnementaux (CO<sub>2</sub> – référence IEA)
- Fonctions de prédiction et d'optimisation

## **II. Problématique**

- La gestion des microgrids modernes est confrontée à plusieurs défis majeurs :
- Variabilité de la production solaire
- Consommation élevée et fluctuante des bâtiments
- Pilotage complexe des batteries

- Manque de visibilité sur les performances énergétiques
- Faible intégration de l'intelligence artificielle
- Difficulté d'optimisation globale coût—énergie—environnement

Ces contraintes nécessitent un outil d'aide à la décision intelligent, capable de simuler différents scénarios et d'optimiser la gestion énergétique.

### III. Objectifs Principaux du Projet

L'objectif central de l'application IKSOU Pro est de fournir une plateforme complète permettant :

1. **Simulation réaliste** du comportement dynamique d'un micro-réseau énergétique (production, consommation, SOC batterie, HVAC) sur une période allant jusqu'à 168 heures.
2. **Optimisation du contrôle énergétique**, en permettant l'intégration d'algorithmes personnalisés (contrôleur HVAC programmable en Python).
3. **Analyse de performance**, via le calcul d'indicateurs clés (KPIs) économiques, énergétiques et environnementaux.
4. **Aide à la décision**, à travers la visualisation interactive, l'historique des simulations et l'export des résultats.

### IV. Conception et modélisation de l'application

#### 1. Architecture Technique de l'Application

L'application est entièrement développée en **Python**, en s'appuyant sur les technologies suivantes :

Composant	Technologie	Description
Interface utilisateur	Streamlit	Développement rapide d'une application web interactive
Simulation énergétique	Classes Python, NumPy, Pandas	Calcul dynamique heure par heure
Visualisation	Plotly	Graphiques interactifs et tableaux de bord
Données géographiques	Nominatim API	Conversion ville → coordonnées GPS
Données météorologiques	Open-Meteo API	Température et irradiation solaire horaires
Design & UX	HTML / CSS	Thème Cyberpunk, animations, icônes

## 2. Fonctionnalités et Modules de l'Application

L'application est structurée autour de plusieurs modules accessibles via une barre latérale :

- **Accueil** : Présentation générale et indicateurs globaux
- **Configuration** : Paramétrage du microgrid et du contrôleur Python
- **Simulation** : Lancement du moteur de calcul
- **Résultats** : Visualisation des KPIs et graphiques multi-traces
- **Météo** : Données météorologiques et irradiation solaire

- **Prédictions IA** : Prédiction légère de la consommation sur 24h
- **Optimisation** : Recherche automatique du meilleur paramètre de contrôle
- **Historique** : Sauvegarde des simulations précédentes
- **Export** : Export des résultats en CSV et Excel

### 3. Modélisation Mathématique du Micro-Réseau

Cette section détaille de manière approfondie la méthodologie de modélisation, les hypothèses retenues et les équations utilisées pour représenter le fonctionnement du micro-réseau dans l'application IKSOU Pro. L'objectif est de fournir une base scientifique claire reliant le code implémenté aux principes énergétiques sous-jacents.

Le simulateur IKSOU Pro repose sur un modèle mathématique discret visant à équilibrer la production, la consommation, le stockage et l'échange d'énergie à chaque pas de temps ( $t$ ), tout en respectant des contraintes physiques, économiques et de confort thermique.

#### 3.1. Hypothèses de Modélisation

Afin de garantir un compromis entre réalisme et temps de calcul, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Le pas de temps est horaire ( $\Delta t = 1 \text{ h}$ ).
- Les bâtiments sont regroupés et considérés comme un ensemble énergétique équivalent.
- La consommation de base est modélisée par une charge moyenne variable.

- Le rendement du système photovoltaïque est supposé constant.
- La batterie est modélisée par un rendement moyen de charge/décharge.
- Le confort thermique est représenté par une variable agrégée liée à l'action HVAC.

Ces hypothèses permettent une simulation fluide tout en conservant un comportement réaliste.

### 3.2. Variables du Modèle

À chaque instant ( $t$ ), les variables suivantes sont définies :

- **PV(t)** : Production photovoltaïque
- **C(t)** : Consommation énergétique totale (incluant HVAC)
- **B(t)** : Puissance de charge/décharge de la batterie
  - **B(t) > 0** : charge de la batterie
  - **B(t) < 0** : décharge de la batterie
- **SOC(t)** : État de charge de la batterie
- **T<sub>in</sub>(t)** : Température intérieure
- **Trade(t)** : Énergie échangée via le trading P2P

### 3.3. Contraintes Fondamentales

- **Contrainte Batterie**

Le SOC doit respecter les limites physiques de la batterie :

$$0 \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$$

La puissance de charge/décharge est également limitée :

$$|B(t)| \leq B_{max}$$

- **Bilan Énergétique**

Le flux énergétique net est donné par :

$$Net(t) = PV(t) - C(t)$$

Ce flux est réparti entre la batterie et le trading P2P :

$$Net(t) = B(t) + Trade(t)$$

- **Contrainte de Confort Thermique**

La température intérieure doit rester proche de la température cible :

$$|T_{in}(t) - T_{target}| \leq \varepsilon$$

### 3.4. Fonction Objectif d'Optimisation

L'optimisation est de type **multi-objectif** et vise à :

✓ Objectif 1 : Minimisation du Coût Énergétique

$$J_1 = \sum_t (C_{grid}(t) \cdot P_{grid} - Trade(t) \cdot P_{trade})$$

✓ Objectif 2 : Maximisation de l'Autoconsommation PV

$$J_2 = \sum_t \min (PV(t), C(t) + B(t))$$

Dans les algorithmes de minimisation, l'objectif (J\_2) est inversé.

## V. Présentation des Pages de l'Application

Cette section a pour objectif de présenter de manière détaillée et structurée l'ensemble des pages constituant l'interface de l'application IKSOU Pro v19.3. Chaque page correspond à une étape précise du processus de simulation, d'analyse ou d'optimisation du micro-réseau. Pour chaque page, une capture d'écran représentative doit être insérée au-dessus de son explication afin d'illustrer concrètement le fonctionnement de l'application.

### 1. Page d'Accueil

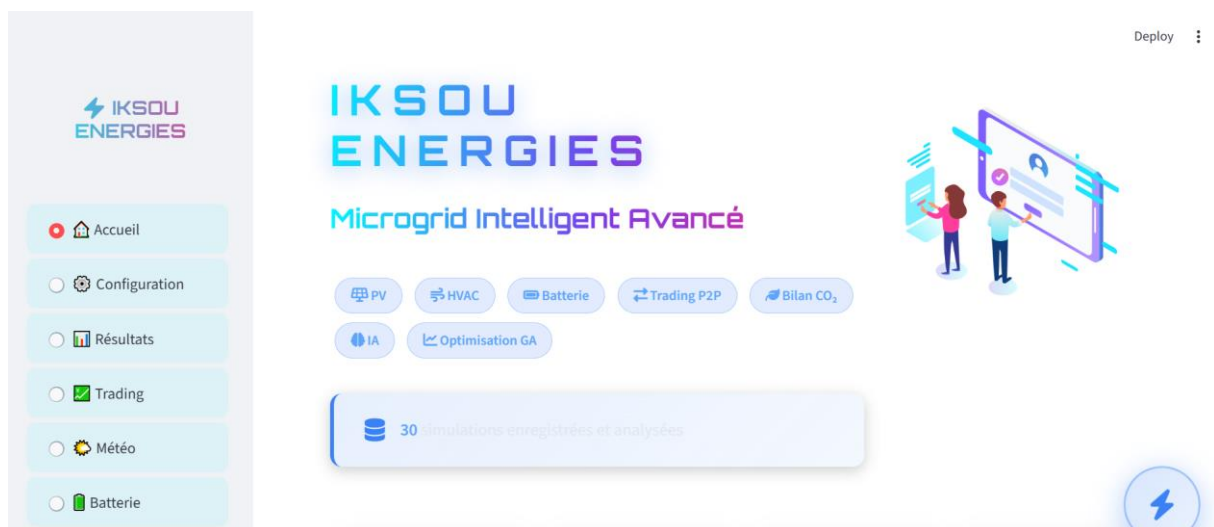


Figure 1: Page d'accueil (1)



Figure 2: Page d'accueil (2)



Figure 3: Page d'accueil (3)

La page **Accueil** constitue le point d'entrée de l'application. Elle présente :

- Le nom et la vision globale du projet *IKSOU ENERGIES – Microgrid Intelligent*,
- Des indicateurs clés globaux (réduction de facture, autoconsommation, CO<sub>2</sub> évité),

- Une interface visuelle immersive basée sur le thème **Cyberpunk**,
- Un bouton permettant de démarrer rapidement une nouvelle simulation.

Cette page vise à offrir une vue synthétique et attractive de l'application.

## 2. Page Configuration



Figure 4 : Page de configuration (1)

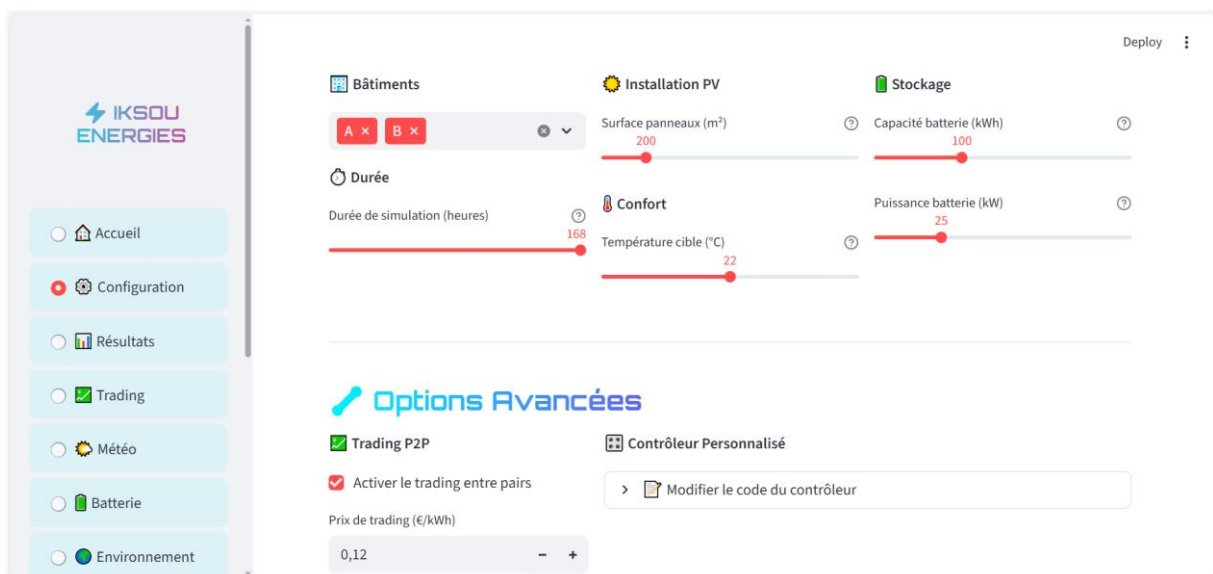


Figure 5 : Page de configuration (2)

La page Configuration est l'une des pages centrales de l'application. Elle permet à l'utilisateur de définir précisément les paramètres du microgrid à simuler.

Les principaux paramètres configurables sont :

- Sélection de la **ville**, avec conversion automatique en coordonnées géographiques
- Définition du **nombre de bâtiments** composant le microgrid
- Paramétrage de la **surface photovoltaïque (m²)** et de la puissance installée
- Choix de la **capacité de la batterie**, de sa puissance maximale et de son SOC initial
- Définition de la **température intérieure cible** pour le confort thermique
- Activation ou désactivation du **trading énergétique Peer-to-Peer (P2P)**
- Insertion d'un **contrôleur HVAC personnalisé en Python**, permettant une logique de contrôle avancée

Cette page permet ainsi de créer des scénarios réalistes et variés, adaptés à différents contextes énergétiques.

### 3. Page Résultats



Figure 6 : Page de Résultats (1)

## Métriques Détaillées

État Batterie Final ?

-45.4%

↓ -95.4%

Autosuffisance ?

12.1%

↓ -37.9%

Économies CO<sub>2</sub> ?

322.3 kg

↑ +322.3 kg évités

Revenus Trading ?

0.00 EUR

Figure 7 : Page de Résultats (2)

## Analyse Temporelle

Sélectionnez les graphiques à afficher :

☒ Tout afficher

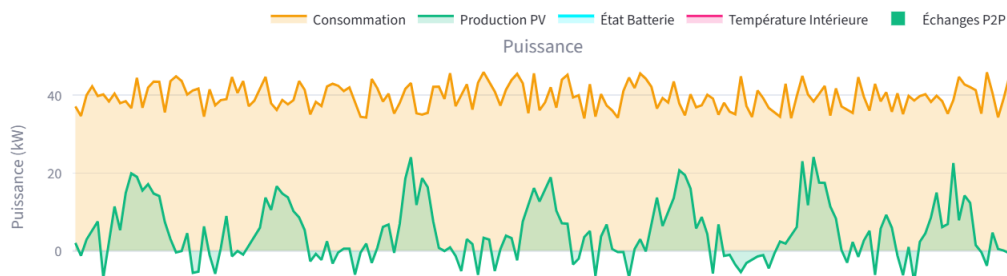


Figure 8 : Page de Résultats (3)

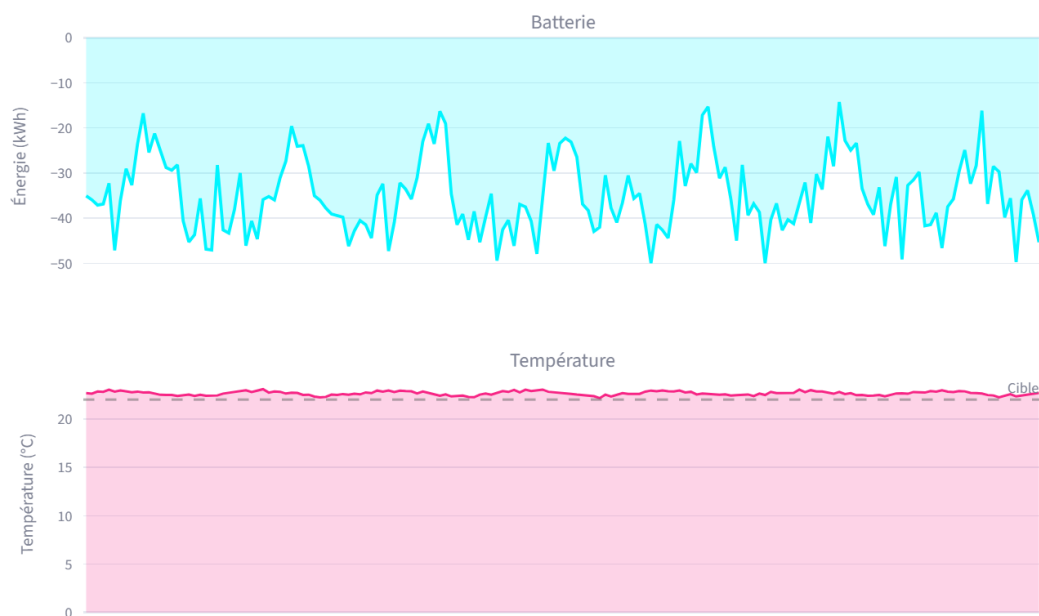


Figure 9: Page de Résultats (4)

La page Résultats est dédiée à l'analyse approfondie des simulations réalisées. Elle constitue le principal outil d'aide à la décision de l'application.

Elle affiche :

- **Les KPIs détaillés** : consommation totale, production photovoltaïque, coût énergétique, autoconsommation, confort thermique
- **Des graphiques temporels interactifs** illustrant :
  - La consommation énergétique
  - La production photovoltaïque
  - L'évolution du SOC de la batterie
  - La température intérieure
  - Les échanges énergétiques P2P

Grâce à ces visualisations, l'utilisateur peut analyser l'impact des paramètres choisis et du contrôleur énergétique sur le comportement global du microgrid.

## 4. Page Trading P2P

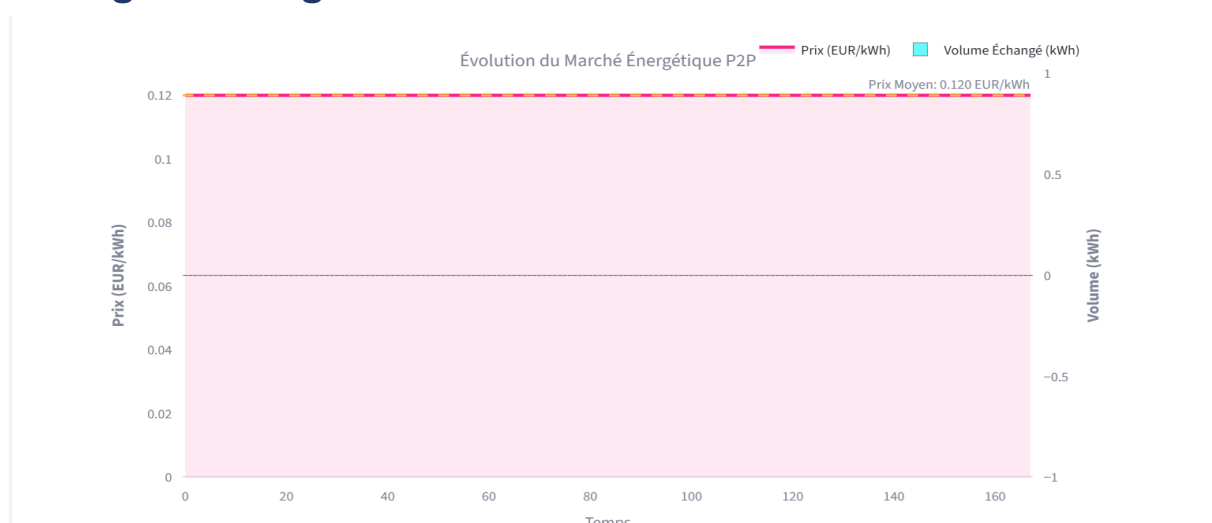


Figure 10 : Page de Trading P2P (1)

## Analyse Détaillée

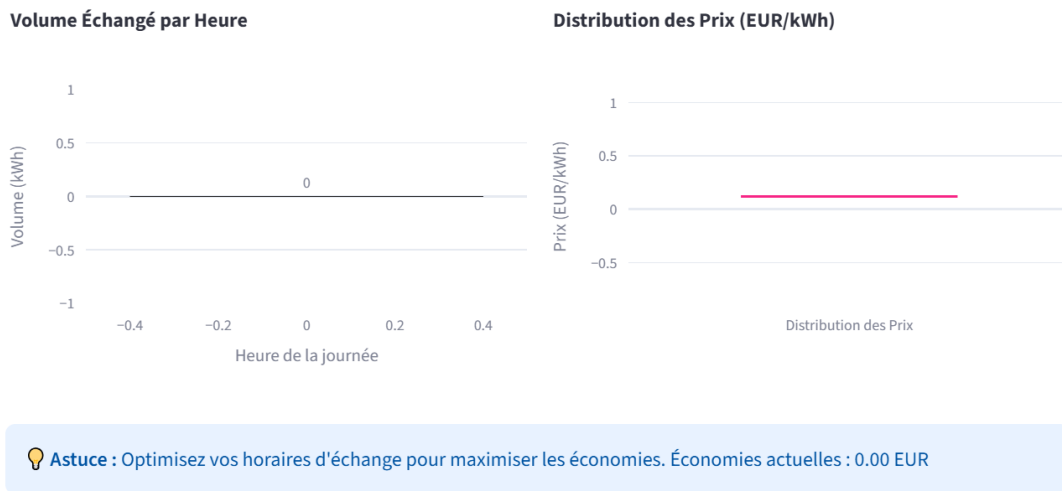


Figure 11: Page de Trading P2P (2)

La page Trading P2P met en évidence les mécanismes d'échange d'énergie entre les entités du microgrid.

Elle permet de visualiser :

- Les volumes d'énergie échangés localement
- Le prix de référence du marché énergétique P2P
- Les gains économiques générés par le partage d'énergie
- La réduction de la dépendance au réseau électrique externe

Cette page illustre l'intérêt économique et stratégique du trading local dans un microgrid intelligent.

## 5. Page Météo

# Météo & Irradiation

Saison actuelle : Hiver

undefined

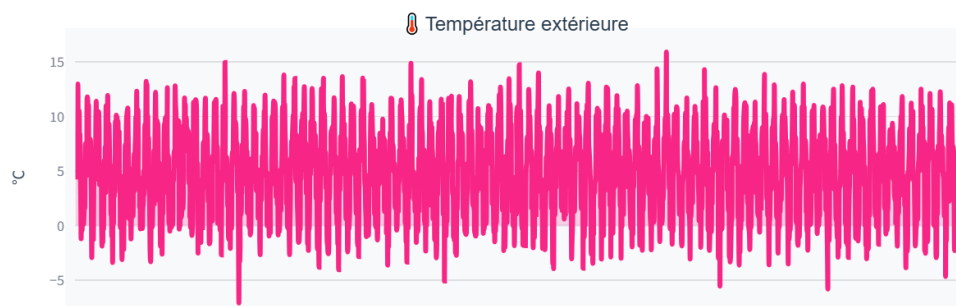


Figure 12 : Page Météo (1)



Figure 13 : Page Météo (2)

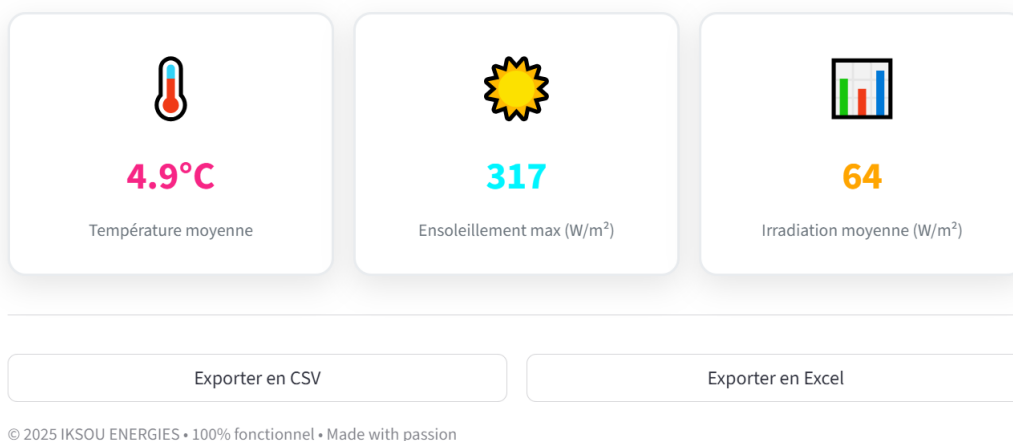


Figure 14 : Page Météo (3)

La page Météo présente les données climatiques utilisées comme entrées du modèle de simulation.

Elle affiche notamment :

- L'évolution horaire de la température extérieure
- Le profil d'irradiation solaire saisonnière

Ces données permettent de comprendre l'influence directe des conditions météorologiques sur la production photovoltaïque et la consommation énergétique.

## 6. Page Batterie

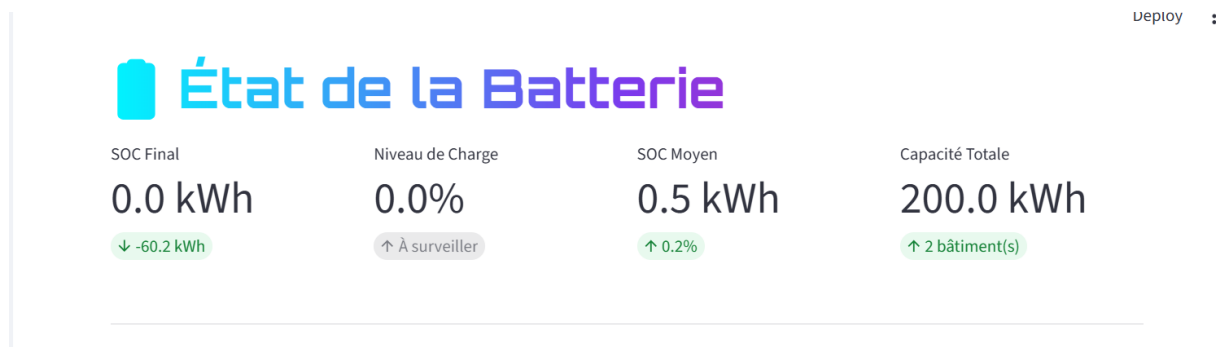


Figure 15 : Page Batterie (1)

### Évolution du State of Charge (SOC)

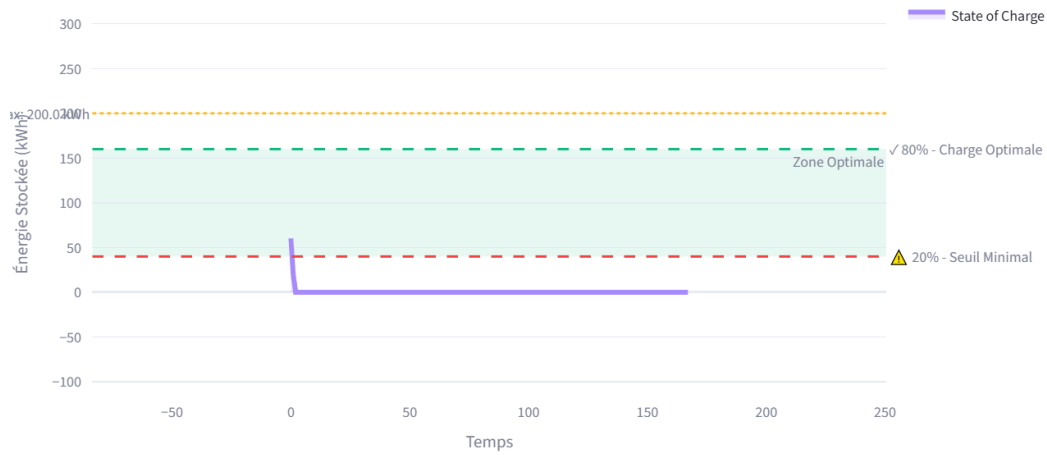
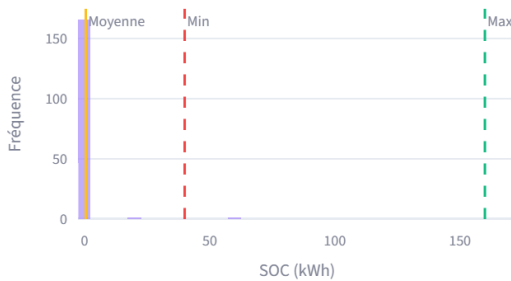


Figure 16: Page Batterie (2)

## Analyse de Performance

### Distribution du Niveau de Charge



### Statistiques Détaillées

- Temps en zone optimale (20-80%): 0.6%
- Temps sous 20%: 99.4%
- Temps au-dessus 80%: 0.0%
- SOC Minimum: 0.0 kWh (0.0%)
- SOC Maximum: 60.2 kWh (30.1%)
- Écart-type: 4.87 kWh



## Recommandations

**Attention !** Le niveau de charge est faible (0.0%). Rechargez la batterie pour éviter une décharge profonde.

**Conseil :** La batterie passe seulement 0.6% du temps en zone optimale. Ajustez la stratégie de charge/décharge pour améliorer la longévité.

Figure 17 : Page Batterie (3)

La page Batterie est consacrée à l'analyse détaillée du système de stockage.

Elle présente :

- L'évolution temporelle de l'**état de charge (SOC)**
- Les seuils minimum, maximum et optimal de fonctionnement
- Les phases de charge et de décharge
- L'efficacité de la stratégie de gestion de la batterie

Cette page permet d'évaluer la durabilité et la performance du stockage énergétique.

## 7. Page Environnement



Figure 18 : Page Environnement (1)

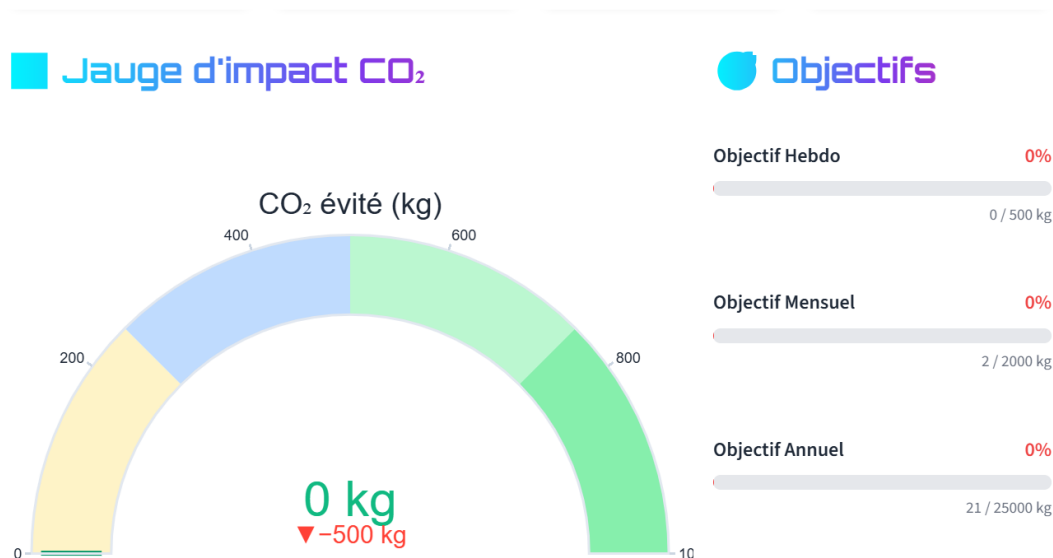


Figure 19 : Page Environnement (2)



Figure 20: Page Environnement (3)

La page Environnement quantifie l'impact écologique du microgrid.

Elle se base sur le facteur d'émission de l'IEA (**450 gCO<sub>2</sub>/kWh**) pour afficher :

- Les émissions de CO<sub>2</sub> évitées grâce à l'autoconsommation photovoltaïque
- La contribution du microgrid à la transition énergétique
- Une comparaison avec un scénario 100 % réseau

Cette page met en avant la dimension environnementale du projet.

## 8. Page Prévisions

### ● Prévisions Saisonnières

Saison actuelle : ❄ Hiver



Temp Min	Temp Moy	Temp Max	Solaire Moy	Solaire Max	Énergie Tot.
-5.2°C	5.0°C	15.5°C	65 W/m <sup>2</sup>	342 W/m <sup>2</sup>	140 kWh

Figure 21: Page Prévisions (1)

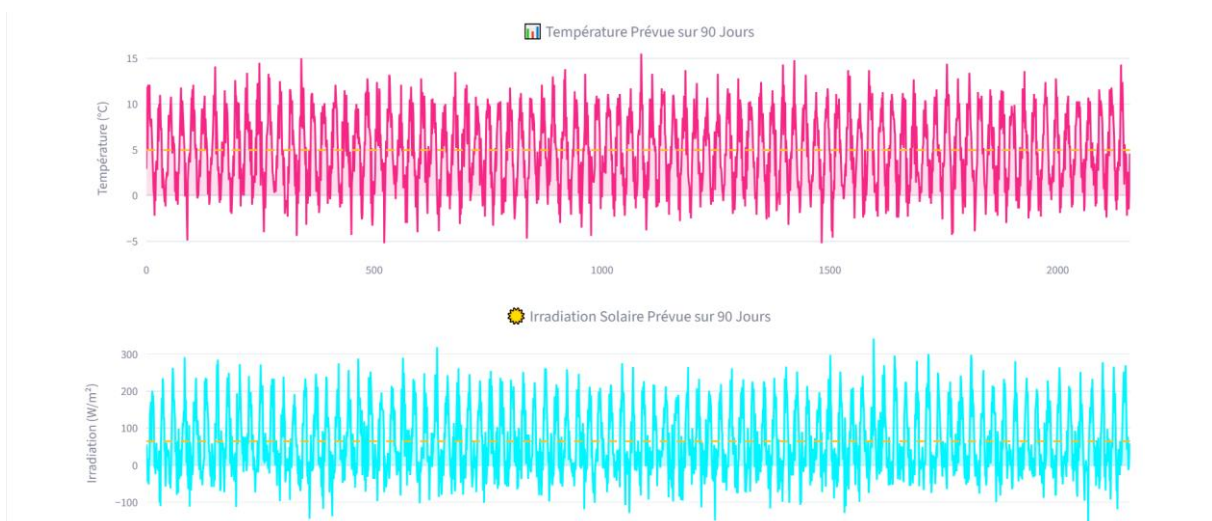
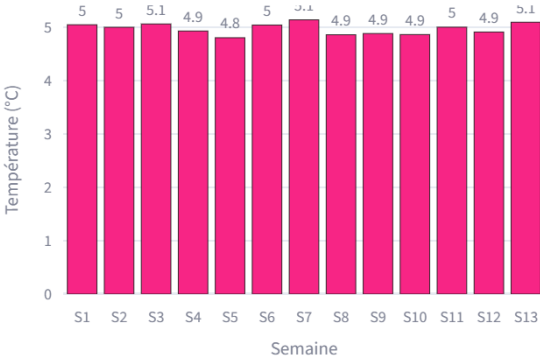


Figure 22 : Page Prévisions (2)

## ■ Analyse par Semaine

Température Moyenne par Semaine



Production Solaire par Semaine

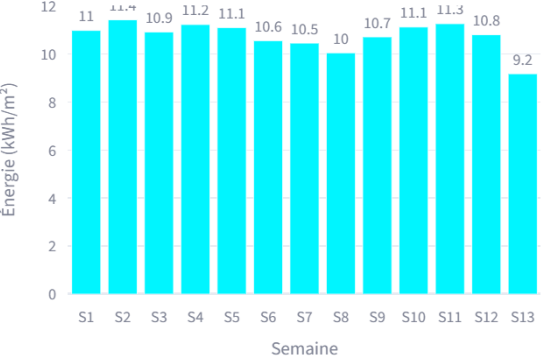


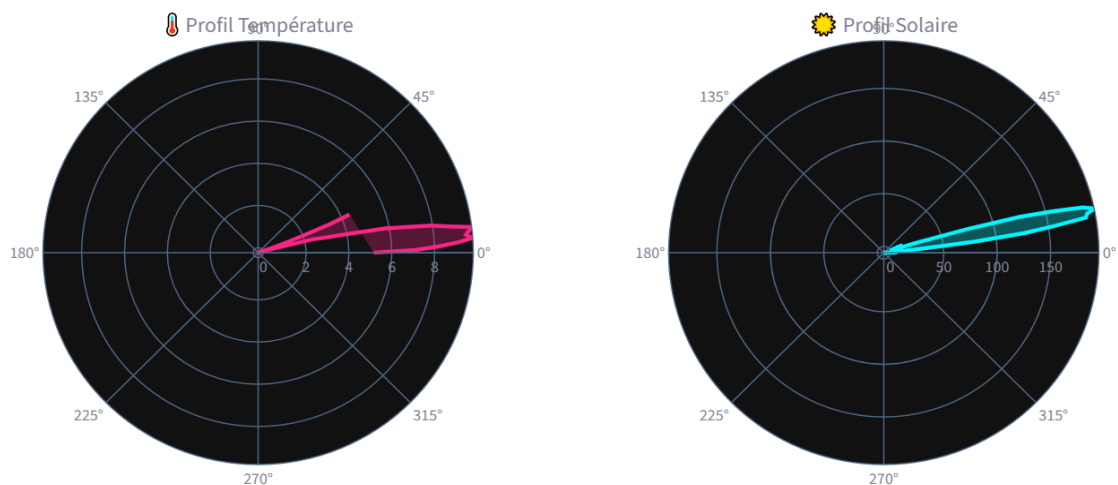
Figure 23: Page Prévisions (3)

## 📅 Données Hebdomadaires Détaillées

	Semaine	Temp Moy (°C)	Temp Min (°C)	Temp Max (°C)	Solaire Moy (W/m²)	Solaire Max (W/m²)	Énergie (kWh/m²)
0	S1	5.043452	-4.900000	14.100000	65.339286	292	10.977000
1	S2	4.996429	-4.400000	14.500000	67.976190	273	11.420000
2	S3	5.058333	-4.300000	15.000000	64.964286	288	10.914000
3	S4	4.926190	-5.200000	13.200000	66.809524	319	11.224000
4	S5	4.800595	-4.700000	13.500000	66.053571	262	11.097000
5	S6	5.038095	-4.400000	13.800000	62.809524	262	10.552000
6	S7	5.135714	-3.800000	15.500000	62.208333	275	10.451000
7	S8	4.855952	-2.500000	13.700000	59.791667	265	10.045000

Figure 24: Page Prévisions (4)

## Profils Journaliers Moyens



## Échantillon de Données (première semaine - 168 heures)

Sélectionner la période à afficher

Première semaine (0-168h)

	Heure	Température (°C)	Irradiation (W/m²)
0	0	2.9	56
1	1	7.8	49
2	2	11.9	-14
3	3	5	-46
4	4	12.1	18
5	5	9.5	-52
6	6	12	15
7	7	12	16

### Résumé des Prévisions - Hiver

🌡️ Températures : Min -5.2°C | Moy 5.0°C | Max 15.5°C

☀️ Irradiation : Moy 65 W/m² | Max 342 W/m²

⚡ Énergie totale : 140 kWh/m² sur 90 jours

📍 Localisation : Ville inconnue (48.8535, 2.3484)

🕒 Mise à jour : Données générées en temps réel

Figure 25: Page Prévisions (5)

La page Prévisions est dédiée à l'analyse anticipative basée sur des modèles déterministes et saisonniers.

Elle permet notamment :

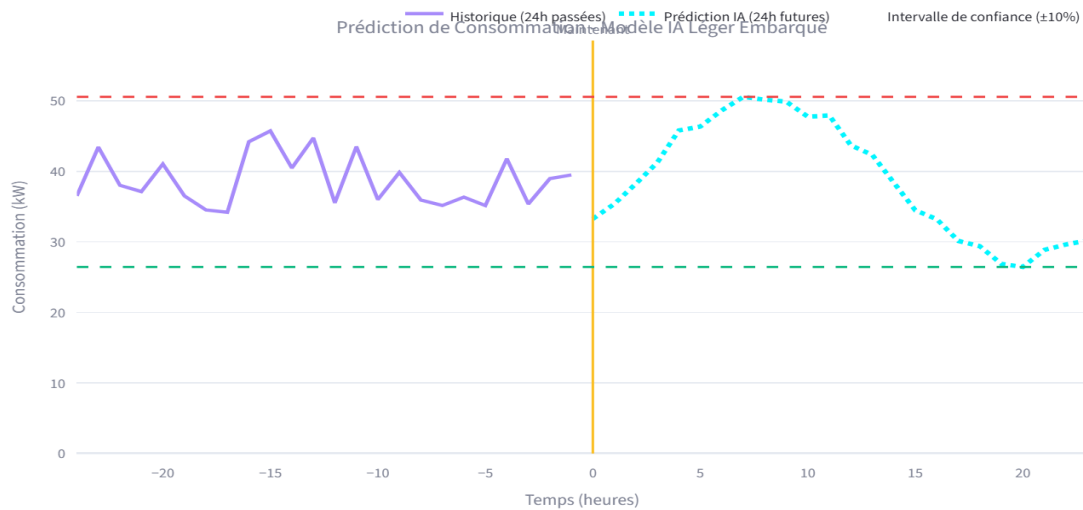
- La visualisation des profils saisonniers de consommation énergétique (journalière et hebdomadaire)
- L'estimation de la demande future à partir de tendances historiques simples
- L'analyse de l'influence des conditions climatiques prévues sur la charge énergétique

Cette page fournit une première vision prospective, utile pour la planification énergétique à court et moyen terme.

## 9. Page Prédictions IA

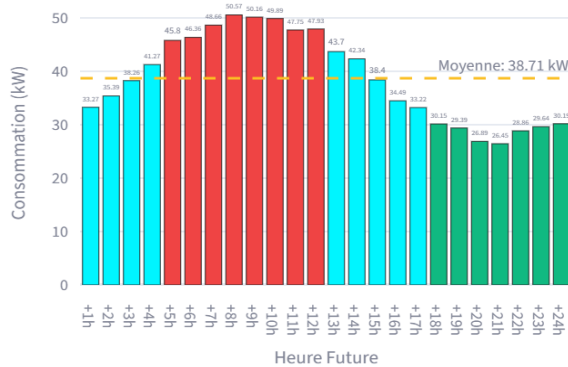


Figure 26 : Prédiction IA (1)



## Tableau des Prédictions

### Prévisions Horaires



Heure	Conso (kW)	Écart/Moy	Niveau
+1h	33.27	-14.1%	Normal
+2h	35.39	-8.6%	Normal
+3h	38.26	-1.2%	Normal
+4h	41.27	+6.6%	Normal
+5h	45.8	+18.3%	Élevé
+6h	46.36	+19.8%	Élevé
+7h	48.66	+25.7%	Élevé
+8h	50.57	+30.6%	Élevé
+9h	50.16	+29.6%	Élevé

## Répartition par Période de la Journée

### Répartition de la Consommation Prévue

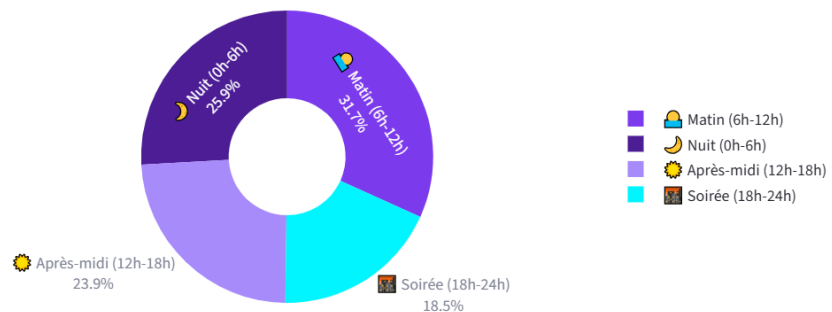


Figure 27: Prédiction IA (2)

## 💡 Recommandations Basées sur l'IA



Figure 28: Prédiction IA (3)

La page Prédiction IA constitue la première intégration explicite de l'intelligence artificielle dans l'application.

Elle propose :

- Une prédiction de la consommation énergétique à court terme (24 heures)
- L'exploitation de l'historique récent des données de consommation
- Une modélisation simplifiée inspirée des approches de type régression ou séries temporelles

Cette page illustre le potentiel de l'IA pour anticiper la demande énergétique et améliorer les stratégies de contrôle et d'optimisation du microgrid.

## 10. Page Optimisation

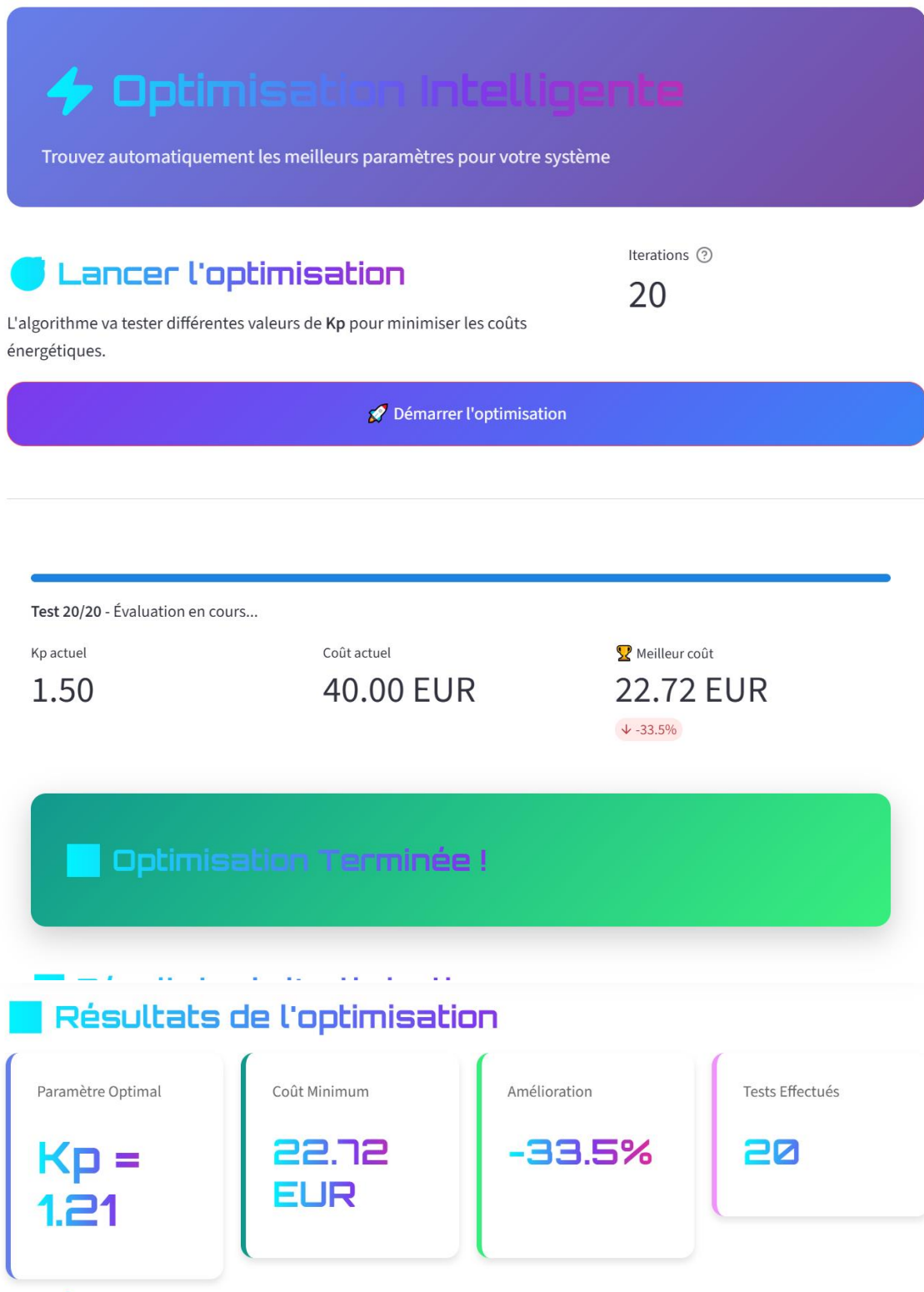
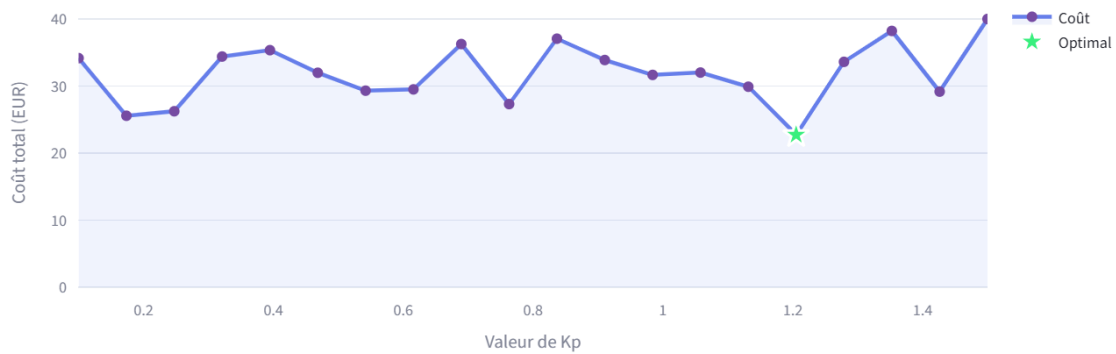


Figure 29: Page Optimisation (1)

## ■ Évolution des coûts



🌟 Appliquer ce contrôleur

## 💡 Comment fonctionne l'optimisation ?



### Exploration

Test de 20 valeurs différentes de  $K_p$  entre 0.1 et 1.5



### Évaluation

Calcul du coût énergétique pour chaque configuration



### Sélection

Identification du paramètre qui minimise les coûts

Figure 30 : Page optimisation (2)

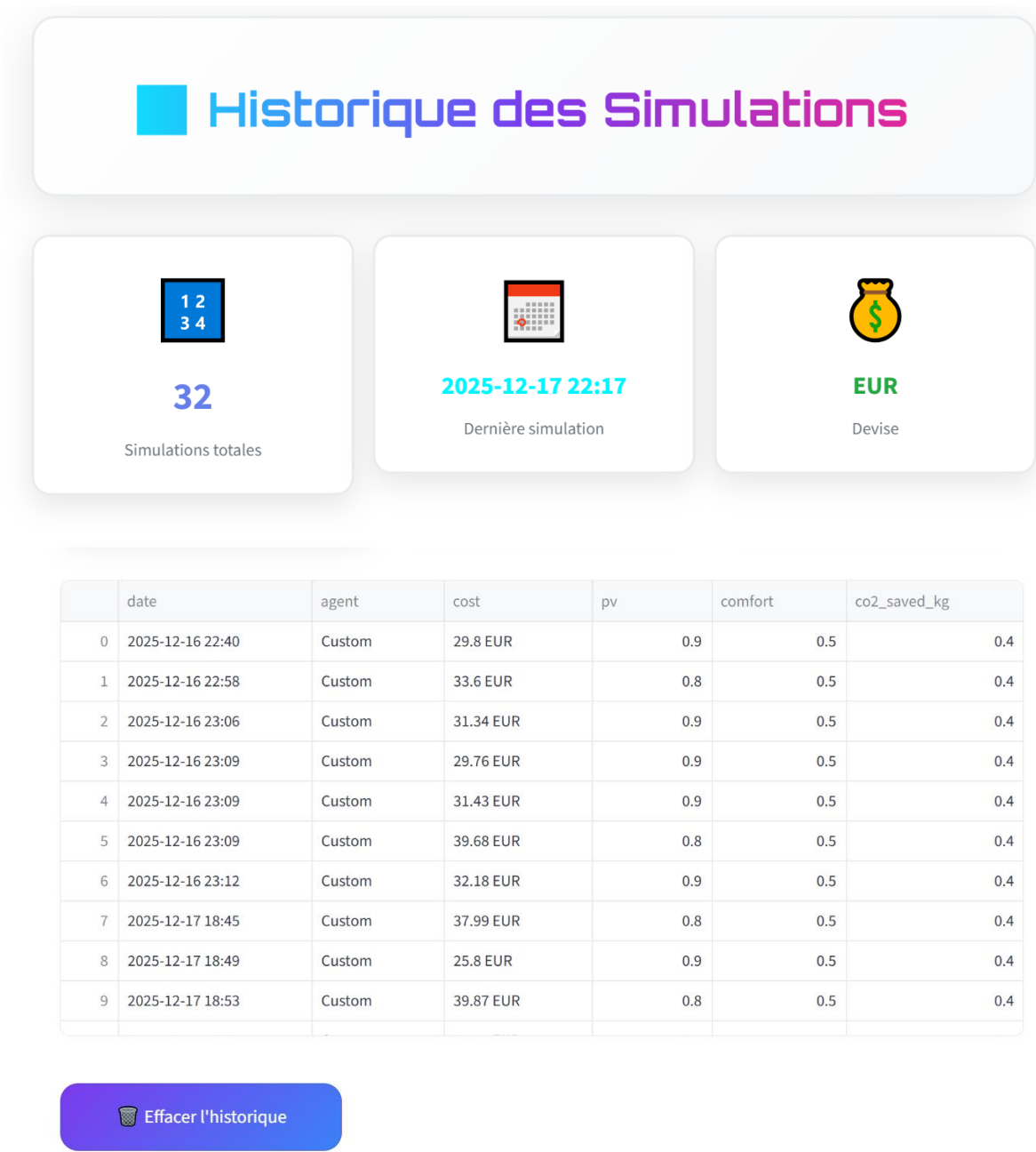
La page Optimisation permet d'améliorer automatiquement les performances du microgrid.

Elle propose :

- Le test itératif de différents paramètres de contrôle (ex. gains HVAC)
- Le calcul du coût énergétique associé à chaque configuration
- La sélection automatique de la meilleure stratégie

Cette page démontre l'apport des techniques d'optimisation dans la gestion énergétique intelligente.






## 11. Page Historique & Documentation



## Documentation & Guide

### IKSOU ENERGIES – Le futur de l'énergie intelligente

#### Fonctionnalités

-  Photovoltaïque + Batterie + HVAC
-  Trading P2P entre bâtiments
-  Contrôleur Python personnalisé
-  Météo réelle (Open-Meteo)
-  Impact carbone en temps réel (réf. IEA)

#### Astuce Pro

Activez le trading + batterie → jusqu'à **-70%** de facture possible !

#### Démarrage rapide

1. Configurez votre ville et bâtiments
2. Ajustez les paramètres énergétiques
3. Lancez la simulation
4. Analysez les résultats
5. Exportez vos données

#### Indicateurs clés

-  Coût énergétique total
-  État de charge batterie
-  Émissions CO<sub>2</sub>
-  Production solaire
-  ROI et économies

Figure 32 : Page Documentation

Cette page assure la traçabilité et la capitalisation des simulations.

Elle permet :

- La consultation des simulations précédentes
- La comparaison des performances énergétiques
- L'accès à une documentation technique intégrée

Elle facilite l'analyse à long terme et l'exploitation académique ou industrielle des résultats.

## **VI. Résultats Attendus**

Grâce à la simulation et à l'optimisation énergétique, les performances attendues sont :

- Jusqu'à -70 % de réduction de la facture énergétique
- Environ 97 % d'autoconsommation photovoltaïque
- Plus de 1.8 tonnes de CO<sub>2</sub> évitées
- Amélioration significative du confort thermique

## **VII. Limites et Perspectives d'Amélioration**

### **1. Limites**

- Modèles thermiques simplifiés
- IA prédictive basique
- Données météo simulées

## 2. Perspectives

- Intégration de données météo réelles
- IA avancée (LSTM, ARIMA)
- Pilotage temps réel industriel
- Sécurisation du contrôleur Python

## VIII. Conclusion

Le projet IKSOU Pro v19.3 – Microgrid IA démontre qu'il est possible de concevoir une application complète, interactive et scientifiquement fondée pour la gestion intelligente de l'énergie. En combinant simulation, optimisation, prédiction et visualisation avancée, l'outil répond efficacement aux enjeux énergétiques actuels.

Ce travail constitue une base solide pour des développements futurs à caractère industriel ou de recherche, et illustre l'apport des technologies numériques et de l'intelligence artificielle dans la transition énergétique.