

PRÉVISION ET OPTIMISATION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE NATIONALE PAR L'IA

Imadeddine Bendadouch et Pr. Yacine Yaddaden

Département de mathématiques, informatique et génie · Université du Québec à Rimouski



Une défi énergétique mondial urgent

Pourquoi l'IA est indispensable maintenant

30%

Augmentation de la
demande électrique
mondiale d'ici 2030

52%

Objectif énergies
renouvelables du
Maroc d'ici 2030

80%

des projets IA en
énergie n'atteignent
pas la production
réelle

1.3B

personnes sans accès
fiable à l'électricité
dans le monde



La problématique en 4 points

Ce que les méthodes classiques ne peuvent pas résoudre



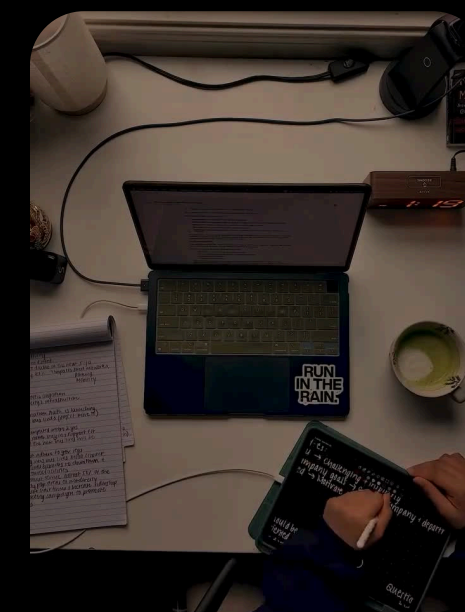
Consommation variable selon l'heure, la saison et le climat et impossible à modéliser linéairement.



Intégration du solaire et de l'éolien crée une instabilité du réseau difficile à anticiper.

ARIMA

ARIMA et régression échouent face aux dépendances temporelles non linéaires dans les données horaires.



80% des modèles IA restent académiques, jamais déployés en conditions industrielles concrètes.

Notre Vision

Souveraineté énergétique intelligente pour chaque nation

National



Chaque pays supervise, prévoit et optimise sa consommation électrique, sans dépendre de solutions étrangères.

Industrielle



Les usines et infrastructures disposent d'un monitoring continu pour réduire 10–15% des coûts énergétiques.

Universelle



Fonctionne pour tout pays ou industrie disposant de données historiques. développé en Espagne, applicable partout.

Récupération des données

Sources multi-origines pour une prévision robuste

Red Electrica (REE/ESIOS)



Données horaires
consommation et
production électrique ·
Espagne 2021–2025 ·
~55 000 points

ONEE / SRM, Maroc

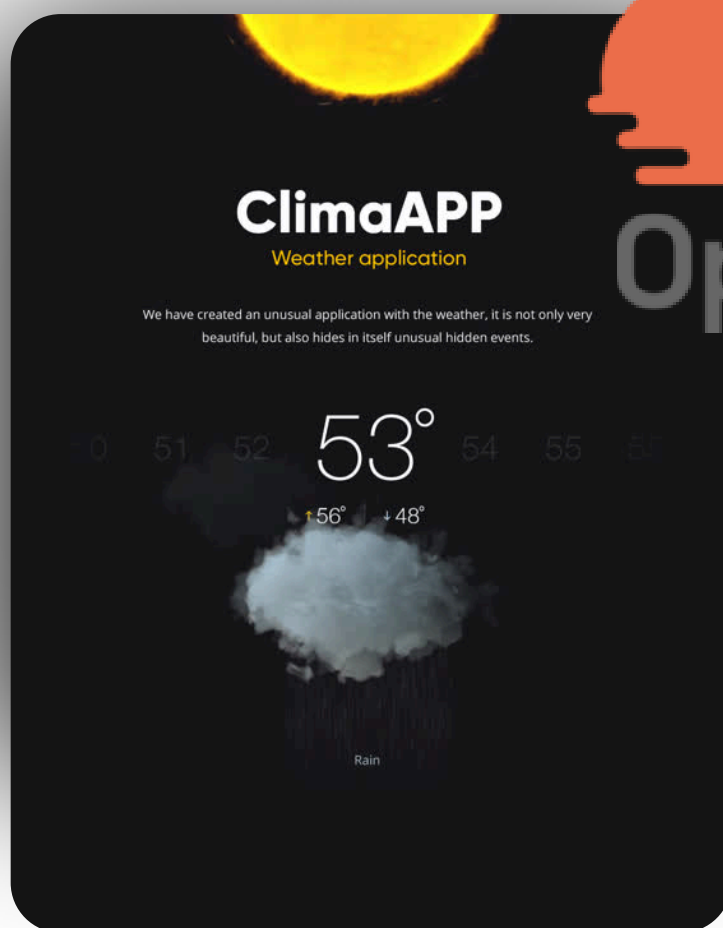


Extension prévue ·
Réseau marocain ·
Partenariat UM6P ·
Objectif 52% EnR

Récupération des données

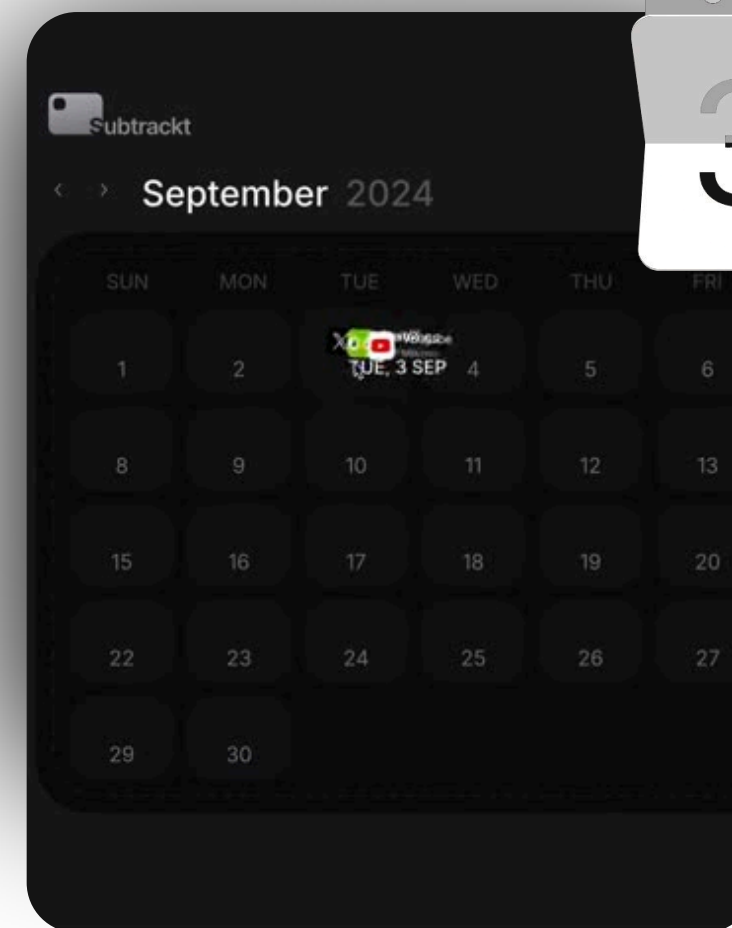
Sources multi-origines pour une prévision robuste

OpenWeather API



Température · Humidité
· Vent · Nébulosité ·
Synchronisation
horaire

Calendrier & Jours fériés



Calendrier

Variables temporelles
construites · Heure ·
Jour · Saison ·
Encodage cyclique

Split temporel : Train 2021 → 2023 · Validation 2024 · Test 2025 == Aucun data leakage

Ingénierie des caractéristiques

La vraie clé de la performance → ce que le modèle voit réellement

Variables temporelles

- Heure, jour, mois, saison
- Jours fériés espagnols
- Encodage cyclique (sin/cos)

Lags historiques

- Lag-1h, Lag-24h (hier)
- Lag-48h, Lag-168h (semaine)
- Capture dépendances passées

Statistiques glissantes

- Moyenne 24h et 7 jours
- Écart-type glissant
- Min / Max locaux

Météo & Interactions

- Température × heure
- Humidité, vent, nébulosité
- Température² non linéaire

Architecture technique → Pipeline IA

Du données brutes à la décision énergétique en temps réel

1 Collecte
Donnée
s
REE . Météo . Calendrier

2 Prétraitement
& Nettoyage
Normalisation . Shift temporel

3 Feature
Engineering
Lags . Stats . Interactions

4 Modèle
XGBoost
2000 arbres . lr=0.03

5 Prévisio
n
Énergie
 $R^2=0.9867$. MAPE=1.30%

Echelle National

Tableau de bord gouvernemental
Supervision réseau · Planification EnR

Echelle Industrielle

Dashboard usine temps réel
Alertes pics · Optimisation 10-15% coûts

Comparaison de 7 modèles IA

Deux familles une gagnante claire

Machine Learning

XGBOOST

MAE 349 MW . MAPE 1.30% . R² 0.9867

LightGBM

MAE 369 MW . MAPE 1.37% . R² 0.9854

Deep Learning

LSTM

MAE 916 MW . MAPE 3.36%

BiLSTM

MAE 867 MW . MAPE 3.17%

GRU

MAE 681 MW . MAPE 2.49%

Transformer

MAE 741 MW . MAPE 2.75%

CNN-LSTM

MAE 841 MW . MAPE 3.06%

XGBoost est 2.4× plus précis que LSTM sur des données tabulaires enrichies

Résultats → Performances XGBoost

98.7%

Score R²
Corrélation
quasi-parfaite

1.30%

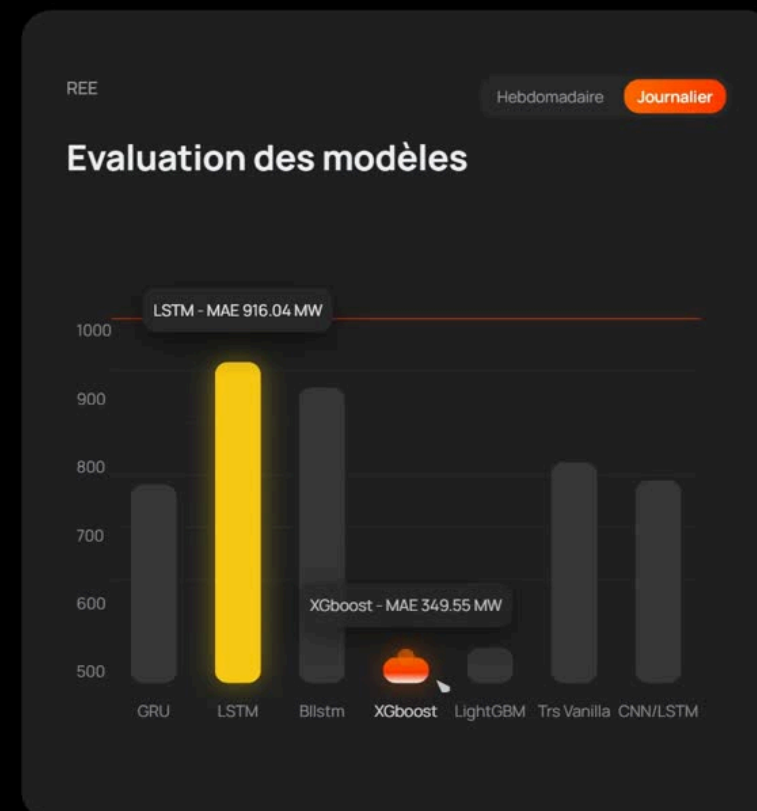
MAPE
Erreur < 2% →
niveau industriel

350

MAE (MW)
vs 916 MW pour
LSTM

488

RMSE (MW)
vs 1216 MW pour
LSTM

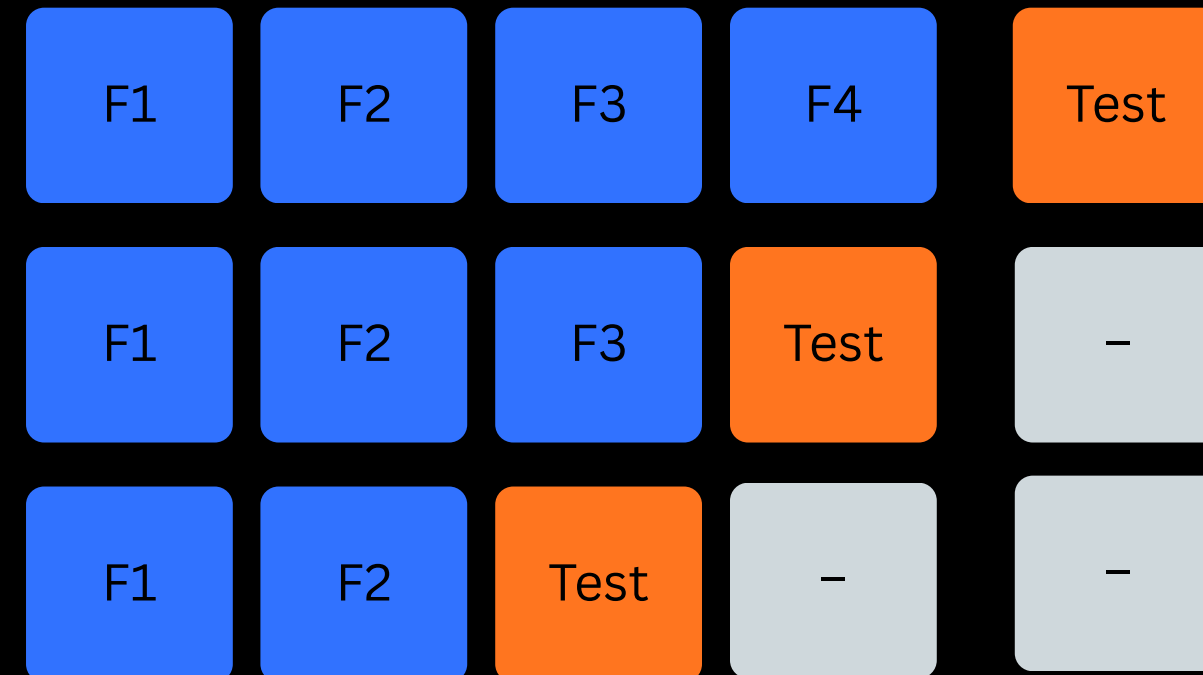


XGBoost → Hyperparamètres & Validation

Rigueur technique pour des résultats reproductibles

<p>2 000</p> <p>n-estimators</p>	<p>0.03</p> <p>learning_rate</p>	<p>8</p> <p>max_depth</p>
<p>0.1</p> <p>reg_alpha (L1)</p>	<p>0.85</p> <p>subsample</p>	<p>1.0</p> <p>reg_lambda (L2)</p>

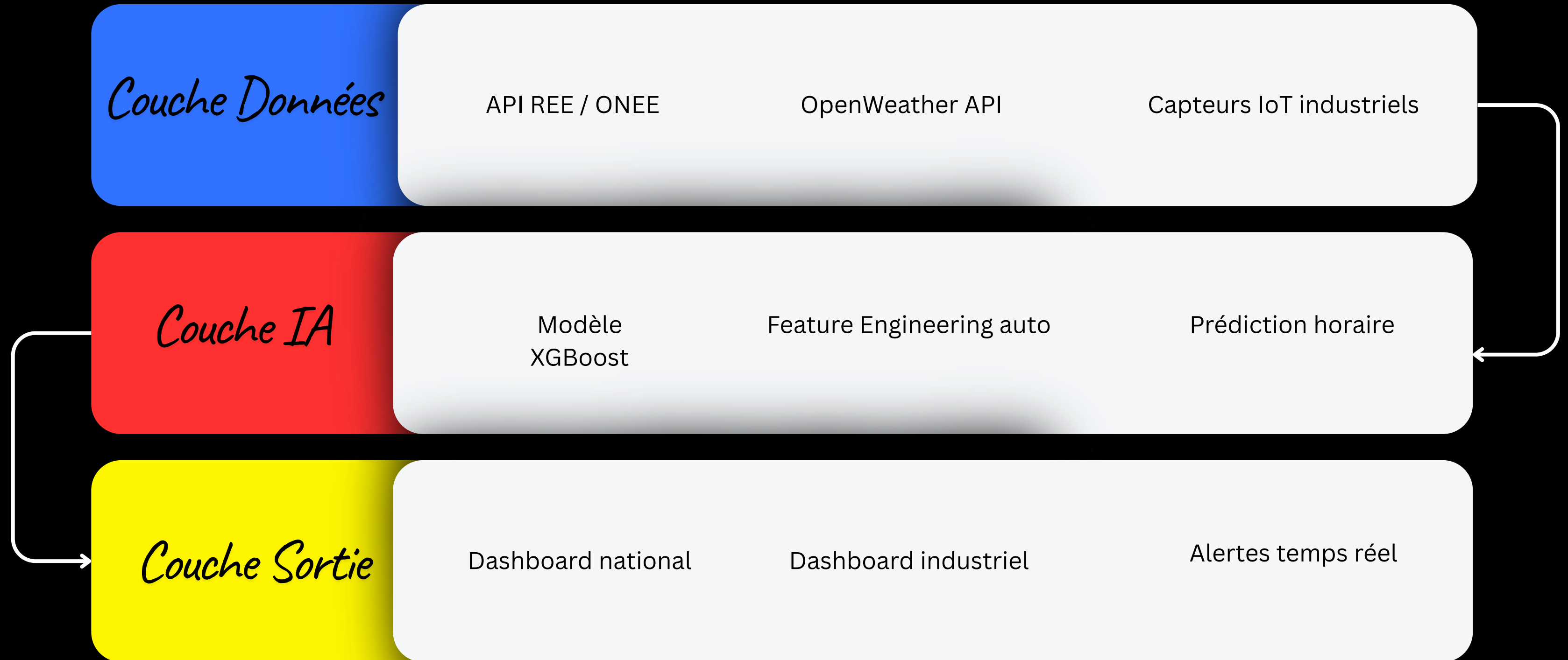
Validation temporelle – Time-Series Split



Le fold Test est toujours dans le futur, garantit l'absence de data leakage

Architecture de déploiement

Du modèle IA à la décision en temps réel



Déploiement Cloud ou On-Premise · Mise à jour automatique · Monitoring 24/7

Pourquoi ce projet = Futur des Nations

La souveraineté énergétique par l'intelligence artificielle

Indépendance technologique

Chaque nation déploie sa propre solution IA sans dépendre de fournisseurs étrangers coûteux et fermés.

Transition verte accélérée

L'IA facilite l'intégration de 52% d'EnR (objectif Maroc 2030) en gérant l'intermittence solaire et éolien.

Contrôle national du réseau

Les gouvernements anticipent les pics, planifient les EnR et évitent les blackouts avant qu'ils surviennent.

Données = ressource stratégique

Comme le pétrole hier, les données énergétiques nationales sont la ressource stratégique du XXIe siècle.

Application universelle : Tout pays, tout secteur

Développé sur l'Espagne · Applicable partout dans le monde

Principe fondateur : si un pays ou une industrie dispose de données historiques → le système fonctionne.

Espagne

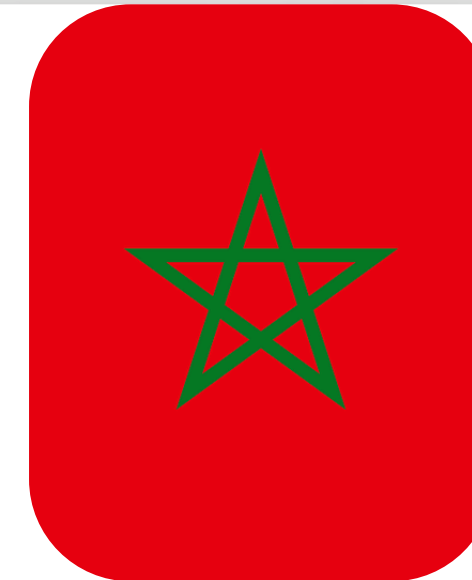
Données REE/ESIOS ·
Phase de validation ✓ ·
Résultats prouvés.



Validé

Maroc

ONEE · Partenariat
UM6P · Objectif
national 52% EnR 2030



En cours

Québec/ Canada

Hydro-Québec ·
Réseau
hydroélectrique · Fort
potentiel



Cible

Afrique & Maghreb

Marchés émergents ·
Besoins critiques · Fort
potentiel de croissance



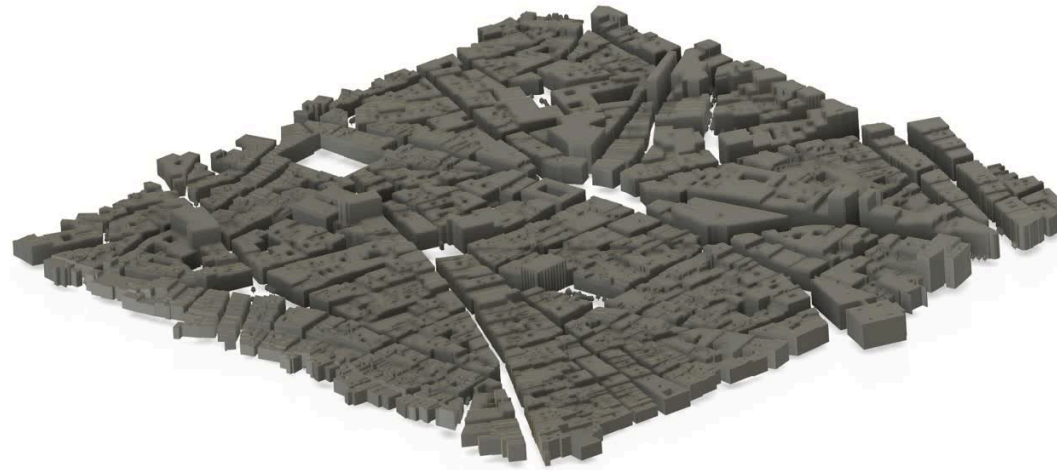
Vision

Modèle économique avec Plateforme SaaS

Revenus récurrents · Deux marchés · Impact mondial

Principe fondateur : si un pays ou une industrie dispose de données historiques → le système fonctionne.

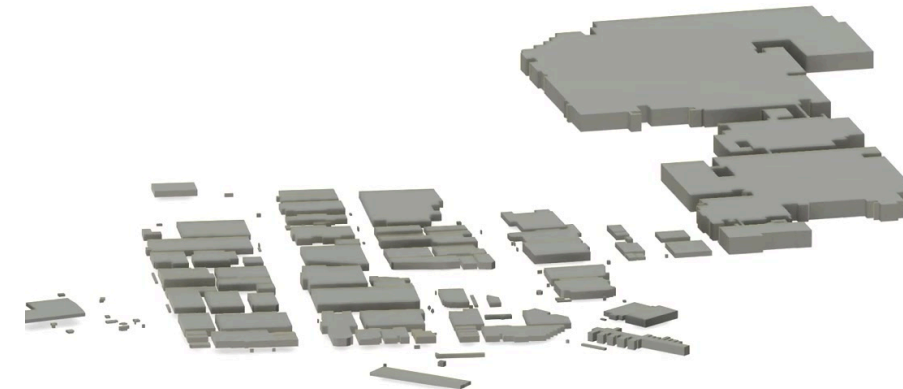
Opérateurs nationaux



Abonnement annuel :
50K–200K €/an

Industrie & Usines

- Cimenteries, sidérurgie
- Agroalimentaire
- Data centers
- Infrastructures publiques



Abonnement annuel :
10K–50K €/an

Modèle SaaS = revenus récurrents · Scalable · Faible coût marginal par nouveau client

Ce qui rend ce projet vraiment innovant

3 originalités uniques combinées

Principe fondateur : si un pays ou une industrie dispose de données historiques → le système fonctionne.

1 Double échelle simultanée

Aucun système existant n'adresse à la fois la prévision nationale ET l'optimisation industrielle dans une seule plateforme unifiée.

2 Universalité sans re-développement

Architecture générique adaptable à n'importe quel pays avec ses données — pas de développement sur mesure pour chaque client.

3 Comparaison exhaustive 7 modèles

La majorité des projets utilisent 1-2 modèles. Notre approche compare 7 architectures (ML + DL) avec validation chronologique rigoureuse.

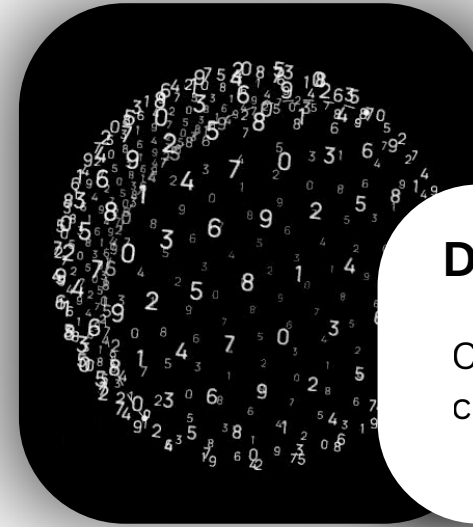
Perspectives & Extensions futures

Ce que ce projet ouvre comme possibilités



Extension réseau marocain

Adaptation ONEE · Objectif 52% EnR 2030 ·
Pilote prévu 2026



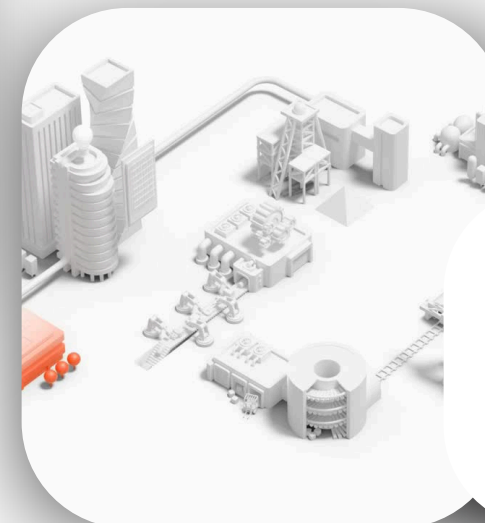
Déploiement IoT temps réel

Capteurs industriels · Monitoring
continu · Alertes automatiques



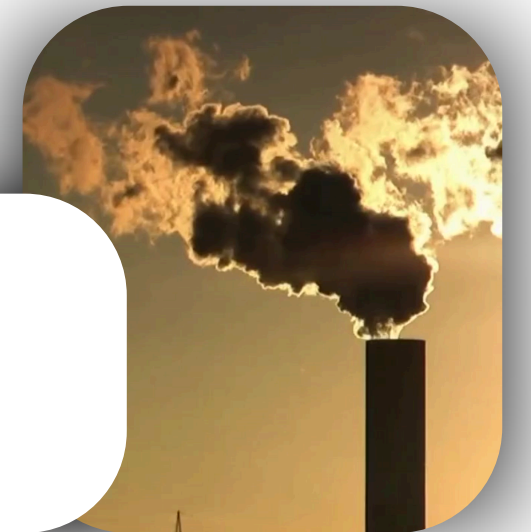
IA générative

Scénarios synthétiques ·
Enrichissement données limitées



Multi-sites industriels

Coordination usines · Load balancing
intelligent inter-sites



Marchés carbone

Couplage prix CO₂ · Optimisation coût-
émission simultanée

Merci
POUR VOTRE ATTENTION