

RAPPORT D'INTÉGRATION STRATÉGIQUE : PROJET ENERGI-PRO

Système Avancé de Maintenance Prédictive par Intelligence
Artificielle

SOMMAIRE

1. PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE : ENERGITECH	2
1.1. Identité et Vision.....	2
1.2. La Mutation vers l'Industrie 4.0.....	2
2. CONTEXTE ET ENJEUX DU PROJET	2
2.1. Analyse des Coûts de Maintenance	2
2.2. Objectifs Stratégiques	3
3. ARCHITECTURE LOGIQUE DU PROGRAMME	3
3.1. Préparation et Intégrité des Données	3
3.2. Le Moteur d'Analyse (Pipeline)	3
4. ANALYSE DES CAPTEURS ET DÉTECTION DES ANOMALIES	4
4.1. Méthodologie Statistique (Seuils IQR)	4
4.2. Le Phénomène des "Zéro Détections"	5
5. L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : VALIDATION TECHNIQUE	5
5.1. Sélection du Modèle : Le choix de la Classification	5
5.2. Analyse Approfondie des Métriques de Performance	6
6. L'INTERFACE UTILISATEUR : DASHBOARD « ENERGI-PRO ».....	6
6.1. Supervision en Temps Réel.....	7
6.2. Gestion des Alertes et Priorisation	7
6.3. Flexibilité et Recherche (La "Roulette" de filtrage)	8
7. SÉCURITÉ ET INTÉGRITÉ DU SYSTÈME.....	8
7.1. Gestion des Interventions existantes	8
7.2. Pseudonymisation et Traçabilité	9
8. IMPACT ET RECOMMANDATIONS OPÉRATIONNELLES	9
8.1. Gains Attendus	9
8.2. Recommandations de la R&D	9
9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	9

1. PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE : ENERGITECH

1.1. Identité et Vision

EnergiTech est un acteur de premier plan dans le secteur des énergies renouvelables. Forte d'un parc de plusieurs centaines d'éoliennes réparties à travers l'Europe, l'entreprise s'est donné pour mission de fournir une énergie durable tout en optimisant l'efficience de ses infrastructures.

Dans un contexte de transition énergétique accélérée, la compétitivité d'EnergiTech repose sur sa capacité à maintenir un Taux de Disponibilité Opérationnelle (TDO) proche de 100%.

1.2. La Mutation vers l'Industrie 4.0

Consciente que les méthodes de maintenance traditionnelles atteignent leurs limites, EnergiTech a lancé le programme Energi-Pro. Ce projet vise à infuser l'Intelligence Artificielle dans les processus de maintenance pour transformer les données brutes issues des capteurs en décisions stratégiques immédiates.

2. CONTEXTE ET ENJEUX DU PROJET

2.1. Analyse des Coûts de Maintenance

Historiquement, EnergiTech subissait des coûts élevés liés à :

- **La Maintenance Curative** : Interventions d'urgence suite à une panne réelle, entraînant des frais logistiques (grues, navettes) et des pertes de production massives.
- **La Maintenance Préventive Systématique** : Interventions planifiées à intervalles fixes, changeant parfois des pièces

encore parfaitement fonctionnelles, générant un gaspillage de ressources.

2.2. Objectifs Stratégiques

Le programme Energi-Pro doit répondre à trois impératifs :

1. **Anticipation** : Identifier les signes précurseurs de panne 7 jours avant l'incident.
2. **Fiabilité** : Garantir que les alertes émises par l'IA sont fondées (minimiser les faux positifs).
3. **Pilotage** : Offrir aux chefs d'équipe une interface claire pour prioriser les interventions.

3. ARCHITECTURE LOGIQUE DU PROGRAMME

Le programme est conçu comme un pipeline automatisé, garantissant que chaque donnée subit un traitement rigoureux avant d'être affichée.

3.1. Préparation et Intégrité des Données

La première étape consiste à extraire les données des capteurs SCADA. Le système procède à un tri chronologique par identifiant de turbine. Cette étape est vitale car elle permet de reconstruire la "signature thermique et vibratoire" unique de chaque éolienne.

3.2. Le Moteur d'Analyse (Pipeline)

Le programme suit une séquence logique en trois temps :

1. **Conformité** : Vérification des performances du modèle IA actuel.

2. Détection : Analyse statistique des anomalies de capteurs.

3. Inférence : Calcul probabiliste du risque de panne via l'IA.

```
● zakiarhl@MacBook-Pro-de-Zakaria scripts % python3 ./main.py
--- DÉMARRAGE DU PIPELINE IA ENERGI-TECH ---

0. Préparation des données (Tri et Sauvegarde)...
Fichier trié créé : energiTech_par_turbine.csv
✓ Tri et préparation des données TERMINEE.

1. Évaluation des performances du Modèle A (pour le rapport de conformité)...
✓ Données et modèle chargés.
✓ Métriques d'évaluation enregistrées pour l'affichage Streamlit.
✓ Évaluation du modèle TERMINEE.

2. Exécution de l'Inférence Batch et Détection d'Anomalies (Génération du CSV et des Statistiques)...
✓ Données chargées : energiTech_par_turbine.csv
✓ Modèle de classification chargé : model_classification.pkl
✓ Colonnes de prédiction ajoutées (précision maximale conservée).
✓ Statistiques de détection brute enregistrées dans detection_stats.json.

✓ Fichier de résultats final généré : anomalies_non_gerees_final.csv
✓ Inférence Batch TERMINEE. Fichiers de résultats mis à jour dans le dossier 'results/'.

--- PIPELINE PRÊT ---
3. Lancement de l'interface Streamlit...
Exécutez cette commande dans votre terminal :
python3 -m streamlit run streamlit_app.py
```

4. ANALYSE DES CAPTEURS ET DÉTECTION DES ANOMALIES

Avant toute prédiction, le système "nettoie" et analyse la cohérence des capteurs.

4.1. Méthodologie Statistique (Seuils IQR)

Le programme utilise les écarts interquartiles pour définir ce qu'est un comportement "normal" pour chaque variable :

- **Vitesse du Vent** : Détection des sous-performances.
- **Vibrations** : Identification des signes d'usure mécanique.
- **Température** : Surveillance des risques d'incendie ou de grippage dans la nacelle.
- **Puissance** : Vérification de la corrélation entre le vent et l'énergie produite.

4.2. Le Phénomène des "Zéro Détections"

Une attention particulière est portée aux valeurs nulles. Le système identifie automatiquement les capteurs qui cessent d'émettre (valeur bloquée à 0), ce qui permet de différencier une panne machine d'une simple panne de capteur.

Type Anomalie
upper
lower
lower
lower
upper
upper
zero_detection_issue
upper
upper
lower

5. L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : VALIDATION TECHNIQUE

5.1. Sélection du Modèle : Le choix de la Classification

Le département R&D a comparé deux approches :

- **Modèle de Régression** : Tentait de prédire le nombre de jours exacts. Jugé trop instable pour la prise de décision.
- **Modèle de Classification (Modèle Retenu)** : Répond par "Risque élevé sous 7 jours : OUI ou NON". Ce modèle offre une robustesse bien supérieure pour les équipes opérationnelles.

5.2. Analyse Approfondie des Métriques de Performance

Le modèle déployé affiche des résultats exceptionnels, garantissant une confiance totale de la part des utilisateurs :

- **Précision Globale (Accuracy) : 99,7%**
- **F1-Score (Équilibre Précision/Rappel) : 0,88**
- **Taux de détection (Recall) : 83% (Soit 8 pannes réelles sur 10 correctement anticipées).**



6. L'INTERFACE UTILISATEUR : DASHBOARD « ENERGI-PRO »

L'interface a été conçue selon des principes d'ergonomie décisionnelle.

6.1. Supervision en Temps Réel

Le bandeau supérieur de l'application affiche les indicateurs clés (KPIs) : nombre total d'anomalies, pannes critiques détectées, et état de santé global du parc.

6.2. Gestion des Alertes et Priorisation

Le tableau central liste les turbines nécessitant une attention immédiate.

- **Le score de risque :** Chaque turbine reçoit une probabilité de panne (0 à 100%).
- **Le code couleur :** Un gradient allant du rouge (critique) au vert (stable) permet une lecture instantanée de l'urgence.

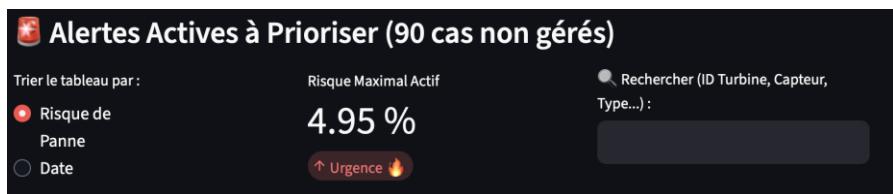
Alertes Actives à Prioriser (90 cas non gérés)						
Trier le tableau par :			Risque Maximal Actif	Rechercher (ID Turbine, Capteur, Type...) :		
<input checked="" type="radio"/> Risque de Panne	<input type="radio"/> Date		4.95 %			
0	26	2024-01-30 00:00:00	4.95 %	temperature	upper	9.30000
2	14	2024-07-26 00:00:00	4.00 %	vibration_level	upper	17.50000
3	43	2024-10-25 00:00:00	4.00 %	wind_speed	lower	33.50000
1	8	2024-08-25 00:00:00	4.00 %	wind_speed	zero_detection_issue	30.90000
4	37	2024-12-28 00:00:00	3.05 %	power_output	upper	24.20000
5	9	2024-07-14 00:00:00	2.50 %	vibration_level	upper	25.50000
6	7	2024-04-12 00:00:00	2.00 %	power_output	zero_detection_issue	33.70000
7	7	2024-04-12 00:00:00	2.00 %	wind_speed	lower	33.70000
10	1	2024-07-17 00:00:00	1.50 %	vibration_level	upper	17.60000
11	3	2024-09-15 00:00:00	1.50 %	vibration_level	upper	19.90000

Le tri par défaut est basé sur le Risque de Panne. Les couleurs indiquent la criticité (Rouge = Urgence, Vert = Moins Critique).

6.3. Flexibilité et Recherche (La "Roulette" de filtrage)

Pour gérer des volumes importants de données, le dashboard intègre des filtres dynamiques. Les chefs d'équipe peuvent isoler

des turbines spécifiques ou filtrer par type d'anomalie de capteur.



7. SÉCURITÉ ET INTÉGRITÉ DU SYSTÈME

7.1. Gestion des Interventions existantes

Le système est "intelligent" vis-à-vis des opérations en cours. Si une maintenance a déjà été effectuée ou est enregistrée comme "faite", l'IA retire automatiquement l'éolienne de la liste des alertes critiques, évitant ainsi les doublons et la confusion opérationnelle.

7.2. Pseudonymisation et Traçabilité

Afin de respecter la protection des données et d'assurer une traçabilité sans faille, les identifiants des techniciens sont pseudonymisés. Chaque prédiction générée par le système est archivée avec un horodatage précis.

8. IMPACT ET RECOMMANDATIONS OPÉRATIONNELLES

8.1. Gains Attendus

Le déploiement de la solution Energi-Pro permet d'anticiper :

- Une réduction de 15% des coûts logistiques de maintenance.

- Une augmentation de 5% de la production annuelle par la réduction des temps d'arrêt.
- Une meilleure sécurité pour les techniciens intervenant moins souvent en urgence.

8.2. Recommandations de la R&D

Nous recommandons d'utiliser le Modèle de Classification comme base de décision prioritaire. Les alertes présentant une probabilité supérieure à 80% doivent déclencher une inspection visuelle immédiate ou par drone.

9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le programme de maintenance prédictive d'EnergiTech est désormais une réalité opérationnelle. En alliant la puissance du Machine Learning à une interface métier intuitive, l'entreprise sécurise ses actifs énergétiques pour les années à venir.

Roadmap Future :

- Intégration de l'analyse vibratoire par sonogramme.
- Module de prédiction de l'impact financier de chaque panne en temps réel.
- Déploiement sur terminaux mobiles durcis pour les techniciens.