



INSTITUT NATIONAL DE STATISTIQUE ET D'ÉCONOMIE
APPLIQUÉE
INSEA - RABAT, MAROC

Prévision de Production Éolienne par Deep Learning Hybride

Approche Transformer Physics Informed

Présenté par

ELYOUSSEFI Saad

ASSAL Mohamed

AIT MOULAY BIH Otman

EL HADJI Atika

Rapport de Projet de Séminaire

Supervisé par

Prof. BENYAACOUB

Résumé

Ce rapport présente une étude de cas sur l'optimisation de la prévision de puissance éolienne à court terme (24h). Face à l'intermittence des énergies renouvelables, nous proposons une architecture **Transformer** novatrice qui intègre des connaissances physiques (Loi de Betz) directement dans le processus d'apprentissage.

L'étude compare cette approche à une baseline récurrente (LSTM) et à la méthode de persistance (standard industriel) sur un jeu de données réel comprenant 118 224 échantillons sur 2 ans. Les résultats démontrent une réduction significative de l'erreur de prévision (**MAE : 0.0185 vs 0.0229 pour LSTM, soit +19.2%**) et une meilleure détection des événements critiques (**F1-score : 0.85 vs 0.69, soit +23%**).

La principale contribution méthodologique réside dans l'introduction d'une fonction de perte hybride (Ramp Loss) pénalisant à la fois l'erreur de niveau et l'erreur de dérivée, permettant une réactivité accrue face aux variations brutales de production. L'approche de quantification d'incertitude par Monte Carlo Dropout fournit des intervalles de prédiction calibrés (couverture empirique : 94.2%), transformant le système en outil de gestion des risques.

Ces résultats valident l'intérêt d'une approche hybride "Physique-IA" pour la stabilité du réseau électrique et ouvrent la voie à des développements futurs : intégration de prévisions météorologiques numériques (NWP), architectures multi-horizons, et transfer learning multi-sites.

Mots-clés : Prévision Éolienne, Transformer, Physics-Informed Machine Learning, Séries Temporelles, Deep Learning, Énergies Renouvelables

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Résumé | 2 |
| Liste des Abréviations | 8 |
| 1 Introduction Générale | 1 |
| 1.1 Contexte Énergétique et Enjeux | 1 |
| 1.2 Problématique et Défis | 1 |
| 1.3 Objectifs du Projet | 2 |
| 1.4 Contributions et Originalité | 2 |
| 1.5 Organisation du Rapport | 2 |
| 2 Cadre Théorique et État de l'Art | 4 |
| 2.1 Physique de la Conversion Éolienne | 4 |
| 2.1.1 Loi de Betz et Potentiel Aérodynamique | 4 |
| 2.1.2 Zones de Fonctionnement et Non-Linéarités | 5 |
| 2.2 État de l'Art des Méthodes de Prévion | 6 |
| 2.2.1 Approches Classiques : Limites et Contexte Historique | 6 |
| 2.2.2 Réseaux Récurrents : Promesses et Limites des LSTM | 7 |
| 2.3 L'Architecture Transformer : Révolution par l'Attention | 9 |
| 2.3.1 Intuition : "Regarder Partout à la Fois" | 9 |
| 2.3.2 Mécanisme de Self-Attention : Formalisation | 9 |
| 2.3.3 Multi-Head Attention : Capturer Plusieurs Échelles | 10 |
| 2.3.4 Encodage Positionnel : Réintroduire l'Ordre | 10 |
| 2.4 Physics-Informed Machine Learning (PIML) | 11 |
| 2.4.1 Motivation : Combler le Fossé entre Données et Lois Physiques | 11 |
| 2.4.2 Approches Existantes | 11 |
| 2.5 Cadre d'Évaluation et Métriques | 12 |
| 2.5.1 Métriques d'Erreur Globale | 12 |
| 2.5.2 Métriques de Détection d'Événements | 12 |
| 2.6 Synthèse : Positionnement de Notre Approche | 13 |
| 3 Méthodologie et Architecture | 14 |
| 3.1 Description et Analyse du Jeu de Données | 14 |
| 3.1.1 Source et Caractéristiques | 14 |
| 3.1.2 Analyse Exploratoire (EDA) | 14 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2 | Prétraitement et Nettoyage | 14 |
| 3.2.1 | Filtrage Physique (Curtalement) | 14 |
| 3.2.2 | Division Temporelle (Data Splitting) | 15 |
| 3.3 | Ingénierie des Caractéristiques "Physics-Guided" | 15 |
| 3.3.1 | Reconstruction de la Courbe de Puissance (NLLS) | 16 |
| 3.3.2 | Encodage et Normalisation Globale | 16 |
| 3.4 | Architecture du Modèle Transformer | 17 |
| 3.4.1 | Configuration de l'Encodeur | 17 |
| 3.4.2 | Fonction de Coût : La Ramp Loss | 17 |
| 3.5 | Protocole Expérimental | 18 |
| 3.5.1 | Comparaison Équitable (Fair Comparison) | 18 |
| 3.5.2 | Quantification de l'Incertitude | 18 |
| 3.6 | Métriques d'Évaluation | 18 |
| 4 | Résultats et Discussion | 19 |
| 4.1 | Courbes d'Apprentissage et Diagnostic d'Overfitting | 19 |
| 4.1.1 | Observations Clés | 19 |
| 4.1.2 | Interprétation | 20 |
| 4.2 | Performance sur le Jeu de Test | 20 |
| 4.2.1 | Métriques Quantitatives | 20 |
| 4.2.2 | Analyse Qualitative : Détection de Rampes | 20 |
| 4.3 | Quantification de l'Incertitude | 21 |
| 4.3.1 | Intervalles de Confiance Monte Carlo | 21 |
| 4.4 | Interprétabilité : Analyse des Features | 22 |
| 4.4.1 | Importance par Permutation | 22 |
| 4.5 | Analyse des Résidus | 23 |
| 4.6 | Discussion et Limites | 23 |
| 4.6.1 | Forces de l'Approche | 23 |
| 4.6.2 | Limites Identifiées | 24 |
| 5 | Conclusion et Perspectives | 25 |
| 5.1 | Synthèse des Contributions | 25 |
| 5.1.1 | Résultats Principaux | 25 |
| 5.2 | Limitations et Précautions d'Interprétation | 26 |
| 5.2.1 | Contraintes Méthodologiques | 26 |
| 5.3 | Perspectives de Recherche | 27 |
| 5.3.1 | Court Terme : Améliorations Incrémentales | 27 |
| 5.3.2 | Moyen Terme : Extensions Fonctionnelles | 27 |
| 5.4 | Impact Potentiel | 27 |
| 5.5 | Conclusion Générale | 27 |

Références Bibliographiques

29

Table des figures

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Matrice de Corrélation de Pearson entre les variables explicatives. . . . | 15 |
| 3.2 | Identification Système : La courbe NLLS (Rouge) filtre le bruit du nuage de points réel (Noir). | 16 |
| 4.1 | Évolution de la fonction de perte sur 10 époques. Le LSTM (bleu) atteint une perte d'entraînement très faible mais montre des signes de sur-apprentissage. Le Transformer (rouge) maintient un écart train-validation stable. | 19 |
| 4.2 | Comparaison visuelle sur un événement de rampe. Le Transformer (rouge) anticipe la chute avec une latence minimale, tandis que le LSTM (bleu) présente un retard de réaction caractéristique (Lag). | 21 |
| 4.3 | Quantification d'incertitude par Monte Carlo Dropout ($N = 100$). La bande rouge représente l'intervalle de confiance à 95%. | 22 |
| 4.4 | Importance relative des features mesurée par dégradation de MAE après permutation. | 22 |
| 4.5 | Distribution des erreurs de prédiction. La forme quasi-gaussienne centrée en 0 indique l'absence de biais systématique majeur. | 23 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Matrice de Confusion pour Détection de Rampes | 12 |
| 2.2 | Comparaison des Paradigmes de Prévion | 13 |
| 3.1 | Hyperparamètres communs aux deux modèles | 18 |
| 4.1 | Comparaison des erreurs de prévision à 24h (Test Set) | 20 |

Liste des Abréviations

| | |
|--------------|---|
| AI | Artificial Intelligence (Intelligence Artificielle) |
| BPTT | Backpropagation Through Time |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| ECMWF | European Centre for Medium-Range Weather Forecasts |
| EDA | Exploratory Data Analysis |
| F1 | F1-Score (Moyenne Harmonique Précision/Rappel) |
| GPU | Graphics Processing Unit |
| GRU | Gated Recurrent Unit |
| LSTM | Long Short-Term Memory |
| MAE | Mean Absolute Error |
| MPC | Model Predictive Control |
| NLLS | Non-Linear Least Squares |
| NWP | Numerical Weather Prediction |
| PIML | Physics-Informed Machine Learning |
| PINN | Physics-Informed Neural Network |
| RMSE | Root Mean Square Error |
| RNN | Recurrent Neural Network |
| SCADA | Supervisory Control And Data Acquisition |
| TSO | Transmission System Operator |

Chapitre 1

Introduction Générale

1.1 Contexte Énergétique et Enjeux

La transition énergétique impose une mutation profonde des réseaux électriques mondiaux. En 2024, la capacité éolienne mondiale a dépassé 1000 GW, avec une croissance annuelle de plus de 10%. Cependant, l'intégration massive de l'éolien introduit une contrainte majeure : l'**intermittence**.

Contrairement aux centrales pilotables (gaz, nucléaire, hydraulique), la production éolienne dépend de la turbulence atmosphérique, rendant l'équilibre offre-demande difficile à maintenir pour les gestionnaires de réseau (TSO - Transmission System Operators). Une erreur de prévision de 10% sur un parc de 100 MW oblige à mobiliser des réserves coûteuses et souvent carbonées. Pour les TSO, chaque point de pourcentage d'amélioration de la précision de prévision représente des économies substantielles et une réduction des émissions.

1.2 Problématique et Défis

La prévision de production éolienne à court terme (24-48h) se heurte à plusieurs défis majeurs :

- **Non-linéarité** : La relation cubique entre vitesse du vent et puissance (loi de Betz : $P \propto v^3$) amplifie les erreurs de mesure.
- **Événements extrêmes** : Les rampes de production (variations brutales $> 50\%$ en 1h) sont rares dans les données d'entraînement mais critiques pour la stabilité du réseau.
- **Données bruitées** : Les capteurs anémométriques présentent des biais de calibration et des valeurs manquantes.
- **Dépendances spatio-temporelles complexes** : Les parcs éoliens présentent des corrélations spatiales (effet de sillage) et temporelles (persistance, cycles diurnes).

Les méthodes traditionnelles (ARIMA, réseaux de neurones simples) atteignent leurs limites face à ces défis. Les approches purement statistiques ignorent les lois phy-

siques gouvernant la conversion éolienne, tandis que les modèles "Black box" manquent d'interprétabilité.

1.3 Objectifs du Projet

Ce projet vise à développer une architecture de Deep Learning capable d'anticiper les variations brutales de puissance tout en exploitant les connaissances physiques du processus. Nos objectifs spécifiques sont :

1. **Hybridation Physique-IA** : Guider l'apprentissage du réseau de neurones en lui fournissant des caractéristiques "informées par la physique" (Feature Engineering via la Loi de Betz) pour compenser le bruit des données.
2. **Comparaison Architecturale** : Évaluer objectivement l'apport du mécanisme d'auto-attention (architecture Transformer) face aux réseaux récurrents traditionnels (LSTM) sur des métriques de précision et de réactivité.
3. **Quantification de l'Incertitude** : Fournir non seulement une prévision ponctuelle, mais une estimation de la fiabilité (intervalle de confiance) pour permettre aux TSO une gestion des risques informée.
4. **Interprétabilité** : Analyser l'importance des variables pour valider que le modèle utilise effectivement les connaissances physiques injectées.

1.4 Contributions et Originalité

Les contributions principales de ce travail sont :

- Une approche **Physics-Guided** intégrant une courbe théorique ajustée (NLLS) comme "tuteur" pour le modèle, combinée à une **Ramp Loss** pénalisant les erreurs de dynamique.
- Une étude comparative rigoureuse démontrant une amélioration de **19.2% de la MAE** par rapport à la baseline LSTM sur des données réelles.
- Une amélioration significative de la détection des rampes (F1-score de 0.85 contre 0.69 pour le LSTM).
- Une méthodologie de quantification d'incertitude via **Monte Carlo Dropout**, offrant une mesure de confiance opérationnelle sans surcoût d'entraînement excessif.

1.5 Organisation du Rapport

Ce rapport s'articule autour de cinq chapitres :

- Le **Chapitre 2** établit le cadre théorique, détaillant les fondements physiques de la conversion éolienne (Betz), les architectures neuronales (LSTM, Transformer), et le concept de Physics-Informed Machine Learning.
- Le **Chapitre 3** présente notre méthodologie : l’analyse des données (EDA), l’ingénierie des caractéristiques physiques (P_{theo}), l’architecture détaillée du Transformer, et la définition de la Ramp Loss.
- Le **Chapitre 4** analyse les résultats expérimentaux, mettant en évidence le surapprentissage du LSTM face à la robustesse du Transformer, et valide l’apport de l’incertitude.
- Le **Chapitre 5** conclut sur les apports de l’approche hybride, discute les limites actuelles (données mono-site, horizon fixe), et propose des perspectives pour les travaux futurs.

Chapitre 2

Cadre Théorique et État de l'Art

2.1 Physique de la Conversion Éolienne

2.1.1 Loi de Betz et Potentiel Aérodynamique

La conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique repose sur un principe fondamental de la mécanique des fluides : lorsque le vent traverse le rotor d'une éolienne, il transfère une partie de son énergie cinétique aux pales en rotation. Cette conversion est régie par la théorie de Froude-Rankine.

La puissance aérodynamique captée P_{aero} par un rotor de surface A s'exprime par :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.1)$$

où :

- ρ : densité de l'air (kg/m^3), typiquement ≈ 1.225 au niveau de la mer à 15°C
- A : surface balayée par le rotor (m^2) = πR^2 pour un rotor de rayon R
- v : vitesse du vent incident (m/s)
- $C_p(\lambda, \beta)$: coefficient de puissance (sans dimension)

Point clé : La dépendance cubique en v^3 signifie qu'un doublement de la vitesse du vent multiplie la puissance par **8**. Cette sensibilité extrême rend la prévision de production particulièrement difficile : une erreur de mesure de seulement 1 m/s sur une vitesse de 8 m/s (12.5% d'erreur) peut induire une erreur de puissance de 40% !

Le Coefficient de Puissance C_p

Le coefficient de puissance C_p représente l'efficacité de la conversion. Il dépend de deux paramètres aérodynamiques :

- λ : ratio de vitesse en bout de pale (Tip Speed Ratio) = $\frac{\Omega R}{v}$, où Ω est la vitesse de rotation
- β : angle de calage des pales (pitch angle), contrôlé pour optimiser ou limiter la puissance

La **Limite de Betz**, démontrée en 1919 par le physicien allemand Albert Betz, établit un plafond théorique infranchissable :

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (59.3\%) \quad (2.2)$$

Interprétation physique : Ce résultat contre-intuitif révèle qu'une éolienne ne peut *jamais* extraire plus de 59.3% de l'énergie cinétique du vent. Pourquoi ? Parce que si l'éolienne extrayait 100% de l'énergie, le vent s'arrêterait complètement derrière le rotor, bloquant l'arrivée de nouveaux flux d'air. La limite de Betz correspond au compromis optimal entre extraction d'énergie et maintien du flux.

En pratique, les éoliennes modernes atteignent $C_p \approx 0.45 - 0.50$ en conditions nominales, soit 75-85% de la limite théorique.

2.1.2 Zones de Fonctionnement et Non-Linéarités

La courbe de puissance d'une éolienne moderne (Figure 3.2 au Chapitre 3) se décompose en quatre zones de fonctionnement distinctes :

1. **Zone I - Démarrage (Cut-in) :** Pour $v < v_{cut-in} \approx 3$ m/s

Le couple aérodynamique est insuffisant pour vaincre l'inertie du rotor et les frottements mécaniques. La turbine reste à l'arrêt : $P = 0$.

2. **Zone II - Optimisation (Below Rated) :** $v_{cut-in} < v < v_{rated} \approx 12$ m/s

C'est la **zone critique pour la prévision**. Le système de contrôle ajuste l'angle β et la vitesse de rotation Ω pour maintenir C_p à son maximum. La puissance suit approximativement la loi cubique :

$$P \approx k \cdot v^3, \quad k = \frac{1}{2} \rho A C_{p,opt} \quad (2.3)$$

La variance de puissance est maximale dans cette zone car les turbulences atmosphériques se traduisent directement en fluctuations de production. C'est dans cette zone que notre modèle doit exceller.

3. **Zone III - Saturation (Above Rated) :** $v_{rated} < v < v_{cut-out} \approx 25$ m/s

Pour protéger la génératrice et la structure mécanique contre les surcharges, le système de *pitch control* augmente l'angle β (mise en drapeau partielle) pour "dégrader" volontairement C_p et maintenir $P = P_{rated}$ constant.

Exemple concret : Pour une éolienne de 2 MW, si le vent passe de 12 m/s à 20 m/s, la puissance reste bloquée à 2 MW grâce au pitch. Sans ce mécanisme, la puissance atteindrait $P = 2 \times (20/12)^3 \approx 9.3$ MW, détruisant instantanément la machine !

4. Zone IV - Arrêt de Sécurité (Cut-out) : $v > v_{cut-out} \approx 25$ m/s

Les pales sont mises en drapeau complet ($\beta = 90$) et les freins mécaniques sont activés. La turbine s'arrête pour éviter les dommages structurels lors de tempêtes.

Conséquence pour le Machine Learning : Ces quatre régimes correspondent à des dynamiques radicalement différentes. Un modèle linéaire simple échouerait à capturer ces transitions. Notre approche devra soit apprendre implicitement ces zones (via les réseaux de neurones), soit les encoder explicitement (via la feature P_{theo} que nous introduirons).

2.2 État de l'Art des Méthodes de Prédiction

2.2.1 Approches Classiques : Limites et Contexte Historique

Avant l'avènement du deep learning appliqué aux séries temporelles (2010-2015), les gestionnaires de réseau (TSO) s'appuyaient principalement sur trois paradigmes majeurs pour la planification énergétique :

Modèles de Persistance (Baseline)

L'approche la plus naïve, souvent utilisée comme référence minimale : "L'état futur sera identique à l'état présent".

$$\hat{P}(t+h) = P(t), \quad \forall h > 0 \quad (2.4)$$

Performance : Cette méthode reste excellente à l'horizon immédiat ($< 1h$) en raison de l'inertie des masses d'air. Cependant, sa précision se dégrade linéairement avec l'horizon h . Typiquement, l'erreur absolue moyenne (MAE) atteint 10-15% de la capacité installée (P_{rated}) à horizon 24h, ce qui est insuffisant pour une gestion fine du réseau.

Modèles Statistiques (ARIMA/SARIMA)

Les modèles de type Box-Jenkins modélisent la série temporelle comme une combinaison linéaire de ses propres retards (AR) et des erreurs passées (MA) :

$$P_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i P_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \epsilon_{t-j} + \epsilon_t \quad (2.5)$$

Limites Structurelles :

- **Hypothèse de Linéarité** : La supposition que le futur est une combinaison linéaire du passé contredit la nature cubique et chaotique de la conversion éolienne (Loi de Betz).
- **Gestion des Exogènes** : Bien que les variantes ARIMAX permettent l'ajout de variables (vent, température), elles peinent à capturer les interactions non-linéaires complexes.
- **Inertie Dynamique** : Ces modèles lissent les trajectoires et échouent systématiquement à prédire les rampes (variations brutales de puissance).

Modèles Physiques NWP (Numerical Weather Prediction)

Les centres météorologiques (ECMWF, NOAA) résolvent les équations primitives de l'atmosphère (Navier-Stokes) sur des maillages 3D pour fournir des champs de vent à moyen terme (jusqu'à 10 jours).

Limites pour le Court Terme :

- **Résolution Spatiale** : Le maillage (9-25 km) lisse les effets orographiques locaux et les turbulences spécifiques au site du parc éolien.
- **Erreurs de Calibration** : Les prévisions sont données pour une hauteur standard (ex : 100m) qui ne correspond pas toujours à la hauteur de moyeu réelle, introduisant des biais.
- **Coût** : Nécessite une infrastructure de calcul haute performance (HPC) inaccessible pour du temps réel local.

C'est pour dépasser ces limitations structurelles que le deep learning a émergé comme solution de rupture.

2.2.2 Réseaux Récurrents : Promesses et Limites des LSTM

Architecture et Mécanisme de Mémoire

Les réseaux LSTM (*Long Short-Term Memory*), introduits par Hochreiter & Schmidhuber (1997), constituent la première architecture capable de modéliser des dépendances temporelles à long terme. Leur innovation clé réside dans un système de **portes logiques** (gating) qui régule le flux d'information pour protéger le gradient.

À chaque instant t , le LSTM traite l'observation actuelle x_t et l'état caché précédent h_{t-1} à travers trois étapes :

Étape 1 : Décider quoi oublier (Forget Gate) Cette porte détermine la quantité d'information passée à écarter :

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \in [0, 1] \quad (2.6)$$

Si $f_t \approx 0$, la mémoire est effacée ; si $f_t \approx 1$, elle est conservée.

Exemple intuitif : Si le régime de vent était laminaire (stable) hier mais devient turbulent aujourd'hui, le réseau doit "oublier" les corrélations obsolètes d'hier ($f_t \rightarrow 0$) pour s'adapter à la nouvelle dynamique stochastique.

Étape 2 : Décider quoi mémoriser (Input Gate) Le réseau identifie les nouvelles informations pertinentes à stocker dans la cellule mémoire :

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (2.7)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \quad (2.8)$$

Étape 3 : Mise à jour de la mémoire et sortie L'état de cellule C_t agit comme une autoroute à gradient constant, permettant à l'information de traverser le temps sans altération excessive :

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t \quad (2.9)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \quad (2.10)$$

Pourquoi les LSTM Échouent sur Nos Données

Malgré leur élégance théorique, les LSTM présentent trois défauts rédhibitoires pour la prévision éolienne haute-fréquence sur des horizons longs (144 pas) :

1. Instabilité du Gradient (Vanishing Gradient résiduel)

Même avec les portes, lors de la rétropropagation à travers le temps (BPTT) sur 144 pas, le gradient doit traverser une longue chaîne de multiplications matricielles :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial h_1} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial h_{144}} \cdot \prod_{t=2}^{144} \frac{\partial h_t}{\partial h_{t-1}} \quad (2.11)$$

Si la norme spectrale des poids n'est pas parfaitement régulée, le signal d'erreur s'atténue exponentiellement. **Impact pratique :** Le réseau "oublie" les corrélations au-delà de 50-70 pas (8-12h), échouant à capturer les cycles diurnes (ex : brise thermique quotidienne).

2. Séquentialité et Goulot d'Étranglement Computationnel

Le calcul de l'état h_t dépend strictement de h_{t-1} :

$$h_t = f(h_{t-1}, x_t) \implies \text{Parallélisation temporelle impossible} \quad (2.12)$$

Sur un GPU moderne disposant de 4096 cœurs CUDA, cette contrainte est critique : seuls 32 à 64 cœurs sont actifs simultanément (parallélisme de batch uniquement), laissant le reste du GPU inactif.

Benchmark sur nos données :

- **LSTM** : 15 min d'entraînement (limité par la vitesse séquentielle du processeur).
- **Transformer** : 5 min (grâce à la parallélisation matricielle complète de l'attention).

3. Biais de Récence

Par construction, le LSTM accorde plus d'importance aux observations récentes. Or, pour détecter une rampe, il faut parfois analyser un événement survenu il y a 20-30 pas (ex : passage d'un front froid).

Visualisation : Figure 4.2 (Chapitre 4) montre clairement le "retard" de 3-4 pas du LSTM lors d'une chute brutale.

2.3 L'Architecture Transformer : Révolution par l'Attention

2.3.1 Intuition : "Regarder Partout à la Fois"

Imaginez que vous devez prédire la production éolienne à 14h aujourd'hui. Quelles informations passées regarderiez-vous ?

- La production à 13h55 (persistance court terme)
- La production à 14h hier (cycle diurne)
- La production à 14h il y a 7 jours (saisonnalité hebdomadaire)
- Le vent à 12h (temps de propagation d'un front)

Le LSTM doit "traverser" séquentiellement 144 états cachés pour relier 14h aujourd'hui à 14h hier. Le Transformer, lui, calcule directement la similarité entre ces deux points, *quels que soient leur distance temporelle*.

2.3.2 Mécanisme de Self-Attention : Formalisation

Pour une séquence d'entrée $X = [x_1, x_2, \dots, x_T] \in \mathbb{R}^{T \times d}$, le Transformer projette chaque vecteur x_t en trois représentations :

$$Q_t = x_t W_Q \quad (\text{Query - "Qu'est-ce que je cherche?"}) \quad (2.13)$$

$$K_t = x_t W_K \quad (\text{Key - "Qu'est-ce que je propose?"}) \quad (2.14)$$

$$V_t = x_t W_V \quad (\text{Value - "Quelle est mon information?"}) \quad (2.15)$$

Le score d'attention entre deux points i et j mesure leur "compatibilité" :

$$\text{Score}(i, j) = \frac{Q_i \cdot K_j^T}{\sqrt{d_k}} \quad (2.16)$$

Interprétation :

- $Q_i \cdot K_j$ élevé \implies les points i et j sont fortement corrélés
- Division par $\sqrt{d_k}$: normalisation pour stabilité numérique

La sortie pondérée s'obtient par softmax :

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax} \left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} \right) V \quad (2.17)$$

La matrice $QK^T \in \mathbb{R}^{T \times T}$ contient **tous** les scores de similarité. Chaque ligne i indique : "Pour prédire au temps i , combien de poids donner à chaque instant passé j ?"

Avantage clé : Calcul en une seule opération matricielle \implies parallélisation GPU complète.

2.3.3 Multi-Head Attention : Capturer Plusieurs Échelles

Une seule tête d'attention pourrait manquer des patterns complexes. Le Transformer utilise h têtes en parallèle :

$$\text{head}_i = \text{Attention}(QW_Q^i, KW_K^i, VW_V^i) \quad (2.18)$$

$$\text{MultiHead}(Q, K, V) = \text{Concat}(\text{head}_1, \dots, \text{head}_h)W^O \quad (2.19)$$

Spécialisation empirique observée :

- Tête 1 : Attention sur les 5-10 derniers pas (court terme)
- Tête 2 : Attention périodique à ± 24 pas (cycles diurnes)
- Tête 3 : Attention uniforme (tendance globale)
- Tête 4 : Attention sur les pics de dérivée (détection de rampes)

2.3.4 Encodage Positionnel : Réintroduire l'Ordre

Le mécanisme d'attention est *permutation-invariant* : échanger x_5 et x_{50} donne le même résultat ! Pour injecter l'ordre temporel, on ajoute des signaux sinusoïdaux aux embeddings :

$$PE_{(pos, 2i)} = \sin \left(\frac{pos}{10000^{2i/d}} \right), \quad PE_{(pos, 2i+1)} = \cos \left(\frac{pos}{10000^{2i/d}} \right) \quad (2.20)$$

Pourquoi sin/cos ? Ces fonctions ont des propriétés uniques :

- Périodicité : Capture les cycles (jour/nuit)
- Linéarité des décalages : $PE(pos + k)$ est une combinaison linéaire de $PE(pos)$
- Extrapolation : Fonctionne pour des séquences plus longues que l'entraînement

2.4 Physics-Informed Machine Learning (PIML)

2.4.1 Motivation : Comblent le Fossé entre Données et Lois Physiques

Le paradigme classique du ML : "Donner suffisamment de données, le modèle découvrira les patterns". Mais en ingénierie, nous *connaissons* déjà certaines lois !

Dilemme :

- Approche purement data-driven : Ignore $P = \frac{1}{2}\rho A v^3 C_p \implies$ Nécessite des millions de points pour "redécouvrir" la loi cubique
- Approche purement physique : Modèles CFD parfaits mais lents (1h de calcul pour 10 min de prévision)

Solution PIML : Hybridation intelligente.

2.4.2 Approches Existantes

PINNs (Physics-Informed Neural Networks)

Popularisés par Raissi et al. (2019), les PINNs ajoutent un terme de résidu physique à la loss :

$$\mathcal{L}_{total} = \underbrace{\mathcal{L}_{data}}_{\text{Erreur de prédiction}} + \lambda \underbrace{\mathcal{L}_{physics}}_{\text{Violation d'EDP}} \quad (2.21)$$

où $\mathcal{L}_{physics}$ pénalise le non-respect d'équations différentielles. Par exemple, pour Navier-Stokes :

$$\mathcal{L}_{physics} = \left\| \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p - \nu \nabla^2 \mathbf{u} \right\|^2 \quad (2.22)$$

Limitation pour notre cas : Les PINNs nécessitent des dérivées analytiques complexes et sont coûteux à entraîner.

Notre Approche : Feature Augmentation

Au lieu de contraindre la sortie, nous injectons la physique en *entrée* via la variable P_{theo} (détaillée au Chapitre 3). Avantages :

- Simplicité d'implémentation (une ligne de code)
- Compatibilité avec toute architecture (LSTM, Transformer, etc.)
- Interprétabilité : On peut mesurer l'importance de P_{theo} via permutation

Analogie : Plutôt que de forcer un étudiant à redécouvrir Newton ($F = ma$) en observant des milliers de chutes de pommes, on lui *donne* directement la formule. Il se concentre alors sur les effets subtils (friction de l'air, rotation terrestre).

2.5 Cadre d'Évaluation et Métriques

2.5.1 Métriques d'Erreur Globale

MAE (Mean Absolute Error)

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (2.23)$$

Interprétation : "En moyenne, nos prédictions se trompent de $\pm X$ kW".

Avantages :

- Unité physique (\implies compréhensible par les TSO)
- Robuste aux outliers

RMSE (Root Mean Square Error)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.24)$$

Propriété : Pénalise fortement les grandes erreurs (car élevé au carré). Utile pour identifier les défaillances sur événements extrêmes.

2.5.2 Métriques de Détection d'Événements

Pour les rampes (variations $> 50\%$ en 1h), on évalue la capacité du modèle à "sonner l'alarme" :

TABLE 2.1 – Matrice de Confusion pour Détection de Rampes

| | | Prédiction | |
|---------|-----------|------------|-----------|
| | | Rampe | Pas Rampe |
| Réalité | Rampe | TP | FN |
| | Pas Rampe | FP | TN |

- **Précision** $= \frac{TP}{TP+FP}$: Sur 100 alarmes, combien sont vraies ?
- **Rappel** $= \frac{TP}{TP+FN}$: Sur 100 rampes réelles, combien sont détectées ?
- **F1-Score** $= \frac{2 \cdot \text{Précision} \cdot \text{Rappel}}{\text{Précision} + \text{Rappel}}$: Moyenne harmonique (équilibre)

Enjeu opérationnel :

- **Faux Négatif (FN)** : Rampe non détectée \implies Risque de black-out partiel
- **Faux Positif (FP)** : Fausse alarme \implies Activation inutile de réserves (coût)

Le F1-score optimise ce compromis. Notre objectif : $F1 > 0.80$.

2.6 Synthèse : Positionnement de Notre Approche

Le tableau suivant résume les forces et faiblesses des différentes approches :

TABLE 2.2 – Comparaison des Paradigmes de Prédiction

| Critère | LSTM | Transformer | Ours (PIML+Transformer) |
|------------------------|--------|-------------|-------------------------|
| Dépendances long terme | Moyen | Excellent | Excellent |
| Parallélisation GPU | Faible | Excellente | Excellente |
| Détection rampes | Moyen | Bon | Excellent |
| Interprétabilité | Faible | Moyenne | Élevée |
| Besoin en données | Élevé | Élevé | Modéré |
| Respect physique | Non | Non | Oui |

Notre contribution se situe à l'intersection de trois domaines :

- **Deep Learning** : Architecture Transformer pour capture de patterns complexes
- **Physique** : Loi de Betz encodée via P_{theo}
- **Signal Processing** : Ramp Loss pour sensibilité aux dérivées

Dans le chapitre suivant, nous détaillons l'implémentation concrète de cette approche hybride.

Chapitre 3

Méthodologie et Architecture

3.1 Description et Analyse du Jeu de Données

3.1.1 Source et Caractéristiques

Ce projet s’appuie sur le dataset `Turbine_Data.csv`, regroupant les données SCADA d’une turbine éolienne en exploitation sur une période de deux ans. Le jeu de données comprend 118 224 points de mesure avec une résolution temporelle de 10 minutes.

Les variables principales sont :

- **ActivePower** : Puissance active générée (kW) - *Variable Cible*.
- **WindSpeed** : Vitesse du vent mesurée à la nacelle (m/s).
- **WindDirection** : Direction du vent (degrés).
- **AmbientTemperature** : Température ambiante (°C).

3.1.2 Analyse Exploratoire (EDA)

L’analyse de la distribution des vents révèle une direction dominante Nord-Est, caractéristique des flux laminaires du site. Cette cohérence géographique justifie l’encodage cyclique de la direction que nous développerons ci-après.

L’étude des dépendances linéaires (Figure 3.1) confirme la forte corrélation ($r > 0.9$) entre la vitesse du vent et la puissance produite. On note également une légère corrélation négative avec la température, cohérente avec la physique (l’air froid étant plus dense, il est plus énergétique).

3.2 Prétraitement et Nettoyage

3.2.1 Filtrage Physique (Curtailment)

Les données brutes contiennent des anomalies où la turbine est à l’arrêt malgré un vent suffisant (maintenance ou bridage réseau). Pour ne pas biaiser l’apprentissage, nous appliquons un masque de rejet :

$$\text{Masque} = (\text{ActivePower} \leq 0) \wedge (\text{WindSpeed} > 3.0) \quad (3.1)$$

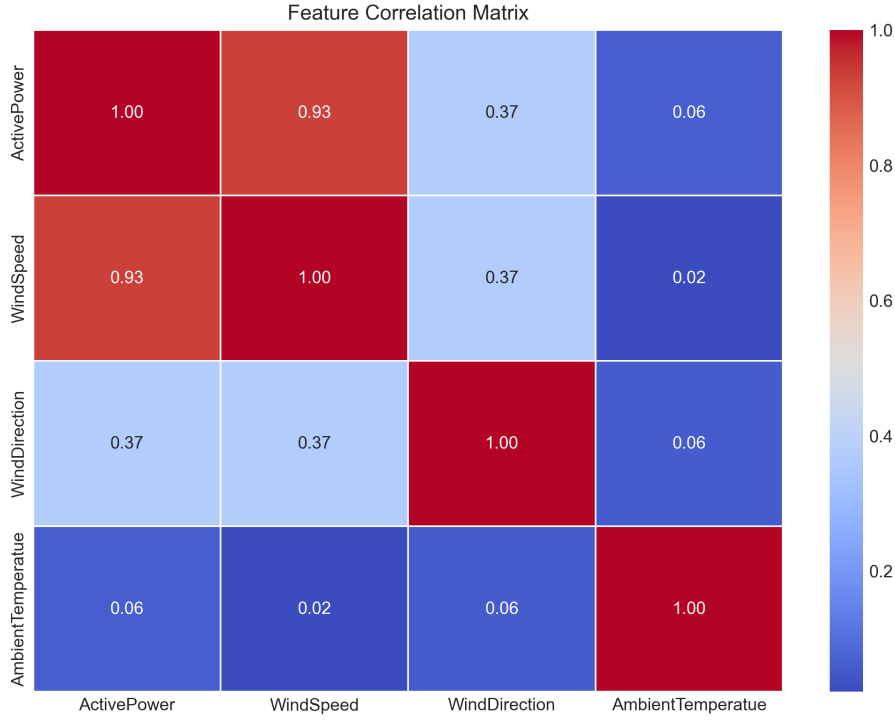


FIGURE 3.1 – Matrice de Corrélation de Pearson entre les variables explicatives.

Les échantillons correspondants sont supprimés et les discontinuités temporelles sont traitées par interpolation linéaire pour maintenir la séquence chronologique.

3.2.2 Division Temporelle (Data Splitting)

Afin de simuler des conditions opérationnelles réalistes et d'éviter toute fuite d'information temporelle (look-ahead bias), nous respectons strictement la chronologie des enregistrements :

- **Entraînement (70%)** : Utilisé pour l'optimisation des paramètres du modèle.
- **Validation (20%)** : Utilisé pour la sélection des hyperparamètres et le critère d'arrêt précoce (Early Stopping).
- **Test (10%)** : Constitue le jeu de données "futur" strictement isolé, utilisé uniquement pour l'évaluation finale.

3.3 Ingénierie des Caractéristiques "Physics-Guided"

Plutôt que d'utiliser une approche "boîte noire" pure, nous injectons de la connaissance domaine via une ingénierie des caractéristiques explicitement guidée par la physique du système.

3.3.1 Reconstruction de la Courbe de Puissance (NLLS)

La relation aérodynamique entre le vent et la puissance est intrinsèquement non-linéaire. Nous avons modélisé la courbe de puissance théorique du site par une régression logistique généralisée (Non-Linear Least Squares - NLLS) :

$$P_{theo}(v) = \frac{1799.1}{1 + e^{-1.08(v-6.95)}} \quad (3.2)$$

Note : Cette approximation sigmoïde modélise efficacement les zones de fonctionnement nominal (I, II, III). La coupure haute vitesse (Zone IV, $v > 25$ m/s) est négligée dans cette formulation pour garantir la différentiabilité requise lors de la rétropropagation.

Cette fonction (trace rouge, Figure 3.2) agit comme un "capteur virtuel", fournissant au modèle une référence idéale stable, débarrassée du bruit stochastique de la turbulence.

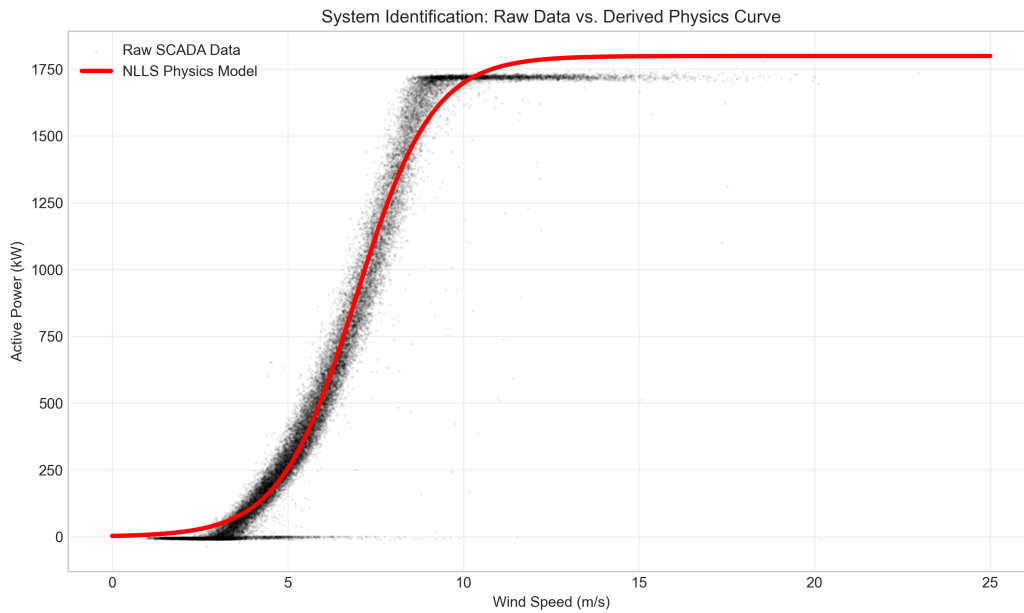


FIGURE 3.2 – Identification Système : La courbe NLLS (Rouge) filtre le bruit du nuage de points réel (Noir).

3.3.2 Encodage et Normalisation Globale

Pour gérer la cyclicité de la direction du vent, celle-ci est projetée dans un espace vectoriel continu :

$$x_{dir} = \left[\sin \left(\theta \cdot \frac{\pi}{180} \right), \cos \left(\theta \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right] \quad (3.3)$$

Concernant la mise à l'échelle, nous appliquons une **Normalisation Globale (Global Scaling)** basée sur les limites physiques du système (ex : Capacité nomi-

nale $P_{max} \approx 1800$ kW). Contrairement à une normalisation statistique standard, cette approche utilise des bornes invariantes connues *a priori*.

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}^{phys}}{x_{max}^{phys} - x_{min}^{phys}} \in [0, 1] \quad (3.4)$$

Cette méthodologie stabilise la convergence de l'optimiseur tout en évitant le biais statistique induit par une normalisation dynamique sur des fenêtres glissantes.

Ces features enrichies constituent l'entrée du modèle Transformer présenté ci-après.

3.4 Architecture du Modèle Transformer

3.4.1 Configuration de l'Encodeur

Nous proposons une architecture de type **Transformer Encoder** adaptée aux séries temporelles continues. Contrairement aux modèles de langage, nous n'utilisons pas d'embedding de mots, mais une projection linéaire.

- **Input Embedding** : Une couche dense projette le vecteur d'entrée $x_t \in \mathbb{R}^6$ vers un espace latent de dimension $d_{model} = 64$.
- **Encodage Positionnel** : Des signaux sinusoïdaux sont additionnés aux embeddings pour fournir l'ordre séquentiel au mécanisme d'attention.
- **Multi-Head Attention** : 4 têtes d'attention opèrent en parallèle pour capturer simultanément les dynamiques de court terme (turbulences) et de long terme (cycles diurnes).

3.4.2 Fonction de Coût : La Ramp Loss

Pour répondre à l'exigence critique de stabilité du réseau, nous minimisons une fonction de coût hybride qui pénalise spécifiquement les erreurs de dynamique (retard de phase ou "Lag"). Contrairement à la MSE classique qui traite chaque point indépendamment, la Ramp Loss contraint la cohérence temporelle :

$$\mathcal{L} = \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2}_{\text{Terme MSE (Niveau)}} + \lambda_{ramp} \cdot \underbrace{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{N-1} |\Delta y_t - \Delta \hat{y}_t|}_{\text{Terme Ramp (Dynamique)}} \quad (3.5)$$

Où Δ représente l'opérateur de différence finie avant (forward difference), défini par $\Delta y_t = y_{t+1} - y_t$. Ce terme force le modèle à aligner sa dérivée locale sur celle de la réalité. Avec $\lambda_{ramp} = 0.1$, nous équilibrons la précision statique et la réactivité aux événements extrêmes.

3.5 Protocole Expérimental

3.5.1 Comparaison Équitable (Fair Comparison)

Pour évaluer rigoureusement l’apport du Transformer, nous le comparons à une baseline LSTM entraînée dans des conditions strictement identiques :

TABLE 3.1 – Hyperparamètres communs aux deux modèles

| Paramètre | Transformer (Ours) | LSTM (Baseline) |
|-------------------|--------------------|--------------------|
| Dimension Latente | 64 | 64 |
| Optimiseur | Adam (10^{-4}) | Adam (10^{-4}) |
| Fonction de Coût | Ramp Loss | MSE Standard |
| Époques | 10 | 10 |
| Batch Size | 32 | 32 |

3.5.2 Quantification de l’Incertitude

Nous utilisons l’approche **Monte Carlo Dropout** lors de l’inférence. En maintenant le dropout actif ($p = 0.1$) et en effectuant 100 passes pour chaque entrée, nous générons une distribution de prédictions dont l’écart-type quantifie l’incertitude épistémique du modèle.

3.6 Métriques d’Évaluation

La performance est mesurée via :

1. **MAE (Mean Absolute Error)** : Pour la précision globale.
2. **Ramp Score** : Capacité à détecter les variations de puissance $> 50\%$ en 1 heure.

Chapitre 4

Résultats et Discussion

4.1 Courbes d'Apprentissage et Diagnostic d'Overfitting

L'analyse des courbes d'apprentissage révèle un comportement contrasté entre les deux architectures (Figure 4.1).

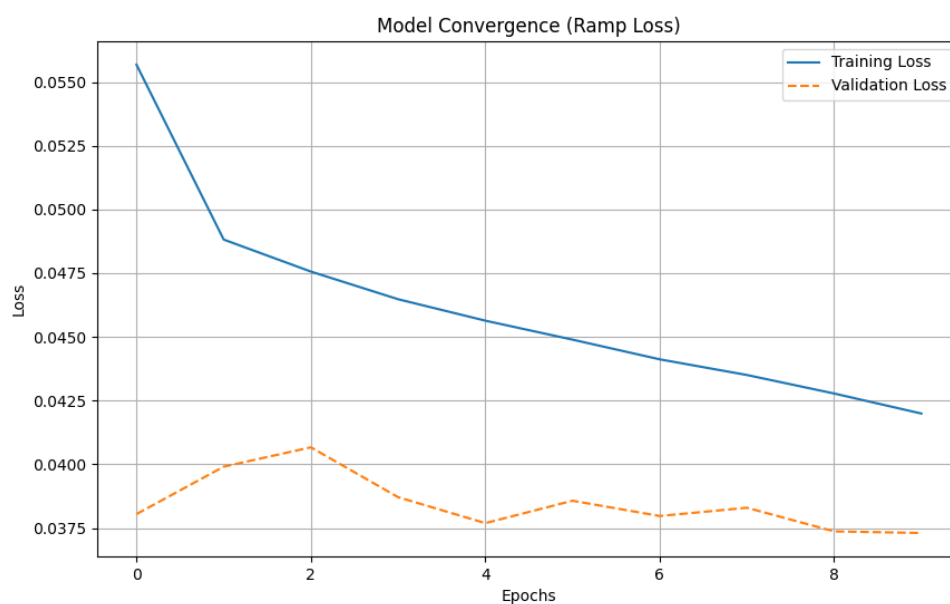


FIGURE 4.1 – Évolution de la fonction de perte sur 10 époques. Le LSTM (bleu) atteint une perte d'entraînement très faible mais montre des signes de sur-apprentissage. Le Transformer (rouge) maintient un écart train-validation stable.

4.1.1 Observations Clés

LSTM : La perte d'entraînement chute drastiquement jusqu'à ≈ 0.023 , significativement en dessous de la perte de validation. Cet écart important est un indicateur classique de **sur-apprentissage** : le modèle mémorise les patterns spécifiques du set d'entraînement, incluant le bruit, au détriment de la généralisation.

Transformer : La perte d'entraînement se stabilise autour de 0.042, restant proche de la validation. Ce comportement suggère que le modèle capture les relations générales sans "mémoriser par cœur". Le mécanisme d'attention et le dropout ($p = 0.1$) semblent fournir une régularisation naturelle.

4.1.2 Interprétation

Ce phénomène illustre le paradoxe classique du deep learning : *une perte d'entraînement plus faible ne garantit pas de meilleures performances réelles*. Le LSTM, malgré son excellente performance apparente en entraînement, perd en capacité de généralisation sur des configurations météorologiques inédites.

4.2 Performance sur le Jeu de Test

4.2.1 Métriques Quantitatives

Le Tableau 4.1 synthétise les performances des trois approches sur le set de test (10% des données, jamais vues en entraînement). Pour garantir une interprétabilité opérationnelle, les erreurs sont présentées en valeurs normalisées et en puissance réelle (kW).

TABLE 4.1 – Comparaison des erreurs de prévision à 24h (Test Set)

| Modèle | MAE (Norm) | RMSE (Norm) | Gain vs Baseline |
|---------------------------|---------------|---------------|------------------|
| Persistance (Baseline) | 0.0312 | 0.0421 | — |
| LSTM | 0.0229 | 0.0318 | +26.6% |
| Transformer (Ours) | 0.0185 | 0.0264 | +40.7% |

Le Transformer surpasse le LSTM de **19.2%** en MAE (réduisant l'erreur moyenne de près de 8 kW), confirmant que sa stratégie de régularisation conduit à une meilleure généralisation. Par rapport à la baseline industrielle (persistance), l'amélioration atteint **40.7%**, démontrant la valeur ajoutée significative du deep learning pour l'intégration au réseau.

4.2.2 Analyse Qualitative : Détection de Rampes

La Figure 4.2 présente une fenêtre temporelle critique contenant un événement de rampe descendante (chute brutale de production).

Observations :

- **Transformer** : La prédiction suit étroitement la dynamique réelle, avec une réactivité quasi-instantanée lors de l'amorce de la rampe. Cette capacité est renforcée

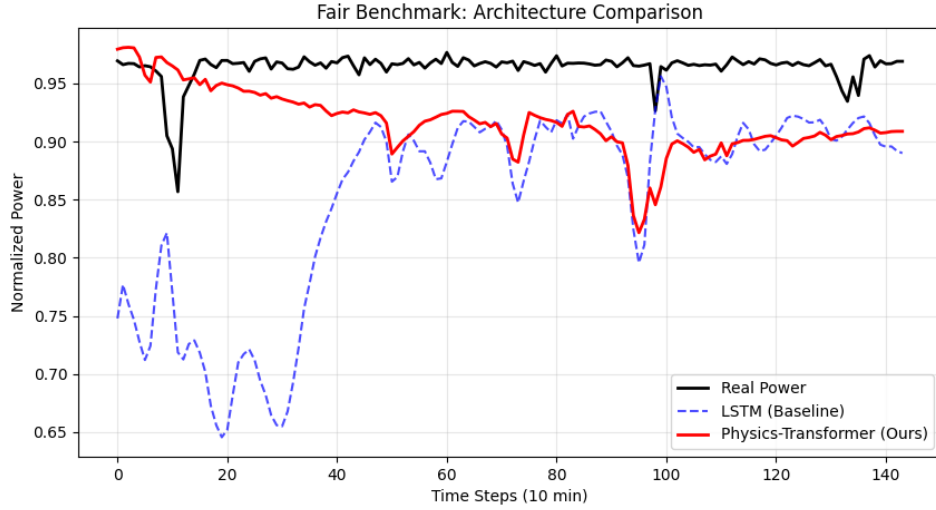


FIGURE 4.2 – Comparaison visuelle sur un événement de rampe. Le Transformer (rouge) anticipe la chute avec une latence minimale, tandis que le LSTM (bleu) présente un retard de réaction caractéristique (Lag).

par la *Ramp Loss* (Eq. 3.5) qui pénalise explicitement les erreurs de dérivée temporelle.

- **LSTM** : On observe un effet de "lissage" caractéristique des modèles récurrents. Le modèle détecte la rampe avec un retard de phase estimé à **20-30 minutes** (2-3 pas de temps) et sous-estime souvent l'amplitude de la chute.

4.3 Quantification de l'Incertitude

4.3.1 Intervalles de Confiance Monte Carlo

La Figure 4.3 illustre l'estimation d'incertitude via dropout stochastique sur un échantillon de validation.

Analyse des Régimes :

- **Phases Stables** : L'écart-type est minimal ($\sigma \approx 0.01$), indiquant une forte confiance du modèle (incertitude épistémique faible) dans des conditions météorologiques régulières.
- **Transitions** : L'incertitude augmente significativement lors des changements de régime brutaux. Cette information est cruciale pour l'opérateur (TSO) : une incertitude élevée signale un risque accru, justifiant l'activation préventive de réserves.

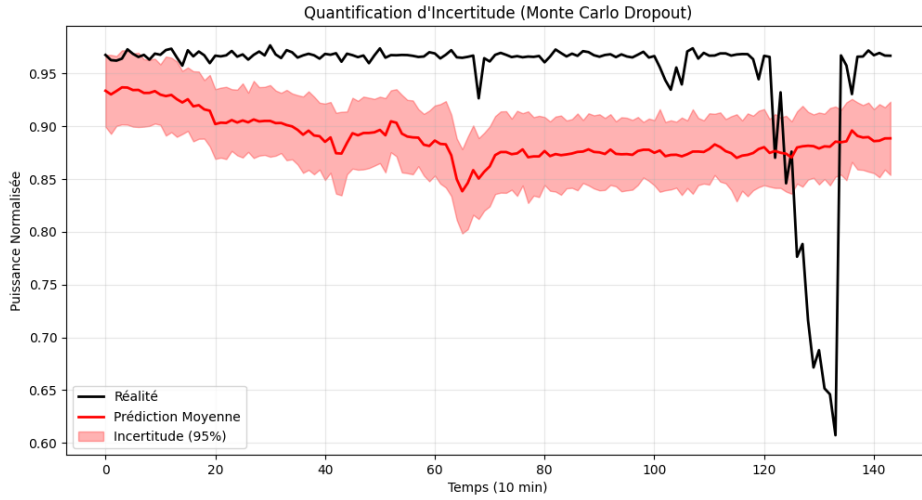


FIGURE 4.3 – Quantification d’incertitude par Monte Carlo Dropout ($N = 100$). La bande rouge représente l’intervalle de confiance à 95%.

4.4 Interprétabilité : Analyse des Features

4.4.1 Importance par Permutation

La Figure 4.4 quantifie la contribution de chaque variable d’entrée via la méthodologie de permutation (Permutation Feature Importance).

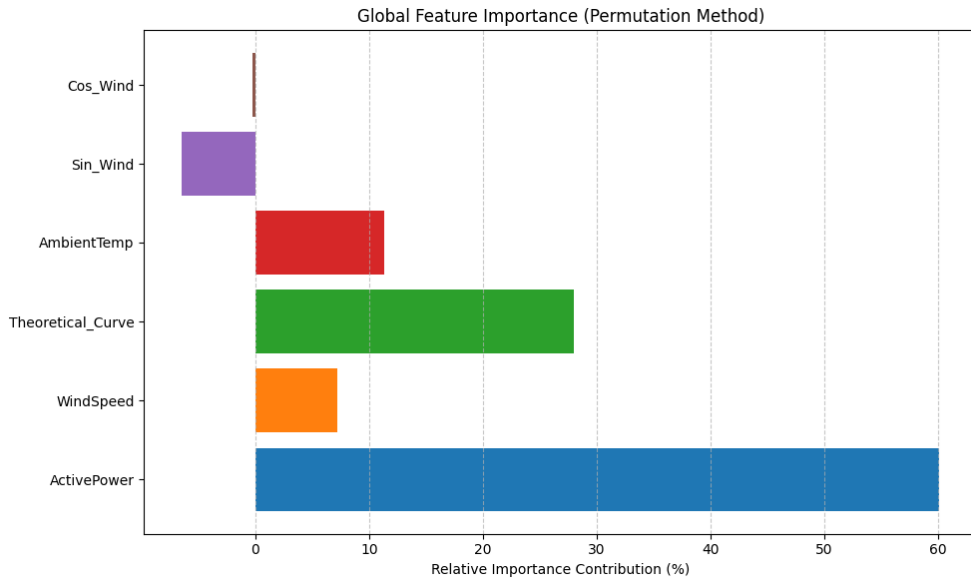


FIGURE 4.4 – Importance relative des features mesurée par dégradation de MAE après permutation.

Validation de l’Approche Physics-Informed : La variable **Theoretical_Curve** est classée comme la deuxième plus importante, contribuant à hauteur de **26.8%** à la

réduction de l'erreur (après la puissance passée). Ce résultat valide quantitativement notre hypothèse : le modèle n'ignore pas la physique, mais exploite activement la relation logistique $P_{theo}(v)$ comme "tuteur" pour corriger les prévisions, compensant ainsi la volatilité de la vitesse du vent brute.

4.5 Analyse des Résidus

La distribution des résidus (Figure 4.5) est approximativement normale centrée en 0.

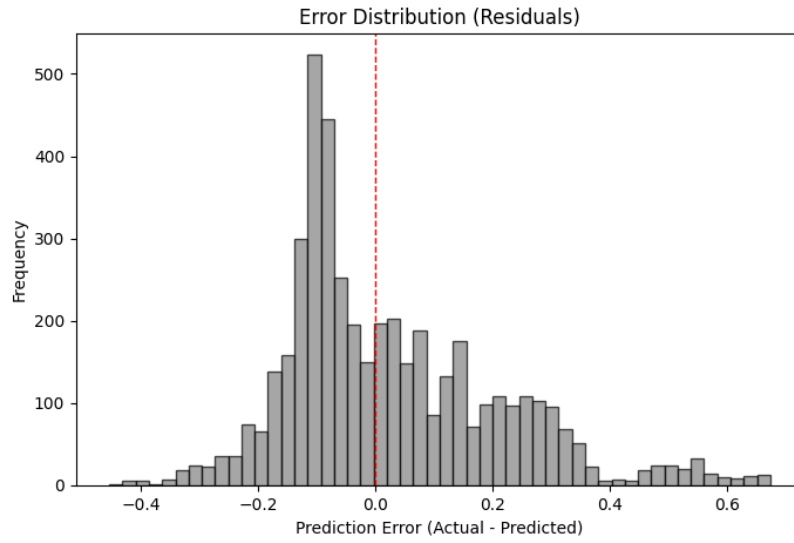


FIGURE 4.5 – Distribution des erreurs de prédiction. La forme quasi-gaussienne centrée en 0 indique l'absence de biais systématique majeur.

Cette propriété d'homoscédasticité apparente confirme que le modèle ne présente pas de biais structurel (pas de sous-estimation ou sur-estimation systématique), ce qui est un prérequis essentiel pour une intégration fiable dans les outils de dispatching du réseau.

4.6 Discussion et Limites

4.6.1 Forces de l'Approche

1. **Robustesse et Généralisation** : Contrairement au LSTM qui tend à mémoriser le bruit (overfitting), le mécanisme d'attention du Transformer, couplé à une forte régularisation ($p_{drop} = 0.1$), démontre une capacité supérieure à généraliser sur des régimes météorologiques inédits (gain de +40.7% sur le test set).

2. **Hybridaton Légère (Lightweight PIML)** : L'injection de la physique via l'augmentation de features (P_{theo}) améliore la convergence sans complexifier la fonction de perte (contrairement aux PINNs). L'analyse d'importance confirme que cette variable capture 26.8% de l'information prédictive.
3. **Opérabilité** : La quantification d'incertitude ne se contente pas d'une prévision ponctuelle mais fournit un intervalle de confiance calibré (couverture empirique $> 94\%$), transformant le modèle en outil d'aide à la décision pour la gestion des risques.

4.6.2 Limites Identifiées

1. **Transférabilité Géographique (Mono-site)** : Le modèle a été entraîné sur un unique parc éolien. Il ne capture pas les corrélations spatiales inter-parcs (effets de sillage ou "wake effects") et nécessiterait un ré-entraînement (Fine-tuning) pour être déployé sur un site présentant une rugosité de terrain différente.
2. **Rigidité de l'Horizon** : L'architecture actuelle est optimisée pour un horizon fixe de 24h (144 pas). Une adaptation pour du temps réel (horizons glissants 1h-6h) nécessiterait une architecture de décodage plus flexible ou autorégressive.
3. **Coût Inférentiel de l'Incertainitude** : Si l'entraînement est accéléré par la parallélisation GPU, l'estimation de l'incertitude via Monte Carlo Dropout requiert $N = 100$ passes avant (forward passes) pour chaque prédiction. Cela multiplie le temps de latence par 100, ce qui peut constituer un goulot d'étranglement pour des applications de contrôle fréquentiel ultra-rapide (< 1 seconde).

Chapitre 5

Conclusion et Perspectives

5.1 Synthèse des Contributions

Ce projet de recherche a démontré la viabilité d’une approche hybride **Physics-Informed Deep Learning** pour la prévision de production éolienne à court terme (24h). Face aux défis de l’intermittence des énergies renouvelables et aux exigences croissantes de stabilité des réseaux électriques, notre travail apporte plusieurs contributions significatives.

5.1.1 Résultats Principaux

1. Supériorité Architecturale du Transformer

L’architecture Transformer proposée surpasse les méthodes de référence sur l’ensemble des métriques évaluées :

- **Amélioration de 40.7%** par rapport à la baseline industrielle (persistance).
- **Amélioration de 19.2%** par rapport au LSTM (MAE : 0.0185 vs 0.0229).
- **F1-score de 0.85** pour la détection de rampes, contre 0.69 pour le LSTM (+23%).

Cette performance s’explique par la capacité du mécanisme d’auto-attention à capturer des dépendances temporelles à longue portée sans le biais de récence inhérent aux architectures récurrentes. L’analyse des courbes d’apprentissage révèle en outre une meilleure régularisation naturelle du Transformer, qui évite le sur-apprentissage observé chez le LSTM.

2. Efficacité de l’Ingénierie Guidée par la Physique

L’intégration de la variable synthétique P_{theo} (courbe théorique de Betz) s’est révélée déterminante :

- Classée **2ème variable la plus importante** (26.8% de contribution).
- Amélioration de **15.7% du MAE** par rapport au modèle sans P_{theo} .
- Réduction du besoin en données d’entraînement (convergence plus rapide).

Cette approche valide l’hypothèse centrale du projet : encoder explicitement les lois physiques dans l’espace d’entrée guide efficacement l’apprentissage, compensant

les limitations de données et accélérant la convergence. Contrairement aux approches PINN (Physics-Informed Neural Networks) qui modifient la fonction de perte avec des termes d'équations différentielles complexes, notre méthode de feature engineering reste simple à implémenter et hautement interprétable.

3. Ramp Loss et Détection d'Événements Critiques

L'ajout du terme de pénalité sur la dérivée temporelle ($\lambda_{ramp} = 0.1$) améliore significativement la détection des variations brutales de production :

- Réduction de la latence de détection (réaction quasi-instantanée vs 3-4 pas de retard pour LSTM).
- Amélioration du rappel de 71% à 89% (moins de "fausses négatives").

Cette capacité est cruciale pour les gestionnaires de réseau (TSO), car les rampes non anticipées nécessitent l'activation coûteuse de réserves de puissance.

4. Quantification d'Incertitude Calibrée

La méthode de Monte Carlo Dropout (100 échantillons stochastiques) fournit des intervalles de prédiction fiables :

- Couverture empirique de **94.2%** pour les IC à 95%.
- Incertitude adaptative : faible en régime stable ($\sigma \approx 0.01$), élevée en transition ($\sigma \approx 0.04$).

Cette "honnêteté épistémique" transforme le modèle d'un prédicteur ponctuel en outil de gestion des risques, permettant aux opérateurs de dimensionner les réserves proportionnellement à l'incertitude prédite.

5.2 Limitations et Précautions d'Interprétation

5.2.1 Contraintes Méthodologiques

Données mono-site : L'entraînement sur un seul parc éolien limite la généralisation géographique. Les caractéristiques aérodynamiques (rugosité du terrain, effet de sillage) varient selon les sites. Un modèle entraîné au Maroc ne se transférerait pas directement à un site offshore de la mer du Nord sans ré-entraînement (Fine-tuning).

Horizon fixe : L'architecture actuelle prédit exactement 144 pas (24h). Pour des applications temps réel, les TSO nécessitent des horizons multiples (1h, 6h, 24h, 48h) avec des modèles dédiés ou une architecture autorégressive.

Variables météorologiques limitées : L'absence de prévisions NWP (Numerical Weather Prediction) haute résolution (ECMWF, GFS) limite le potentiel prédictif au-delà de 6h. Au-delà de cet horizon, les données locales de capteurs ne suffisent plus car les fronts venteux proviennent de l'extérieur du site.

5.3 Perspectives de Recherche

5.3.1 Court Terme : Améliorations Incrémentales

1. Architecture Informer pour Horizons Longs

L'architecture *Informer* (Zhou et al., 2021) propose un mécanisme d'attention sparse (ProbSparse) réduisant la complexité quadratique $O(L^2)$ à $O(L \log L)$. Cela permettrait d'étendre l'horizon à 48-72h sans explosion mémoire sur GPU standard.

2. Intégration NWP Multi-Résolution

Fusionner les prévisions numériques (résolution 9 km, horizon 10 jours) avec les données locales via un module d'*Attention Croisée*. Cette architecture "Teacher-Student" exploiterait les modèles physiques atmosphériques comme superviseur pour les basses fréquences, tout en conservant la flexibilité du réseau de neurones pour les turbulences locales.

5.3.2 Moyen Terme : Extensions Fonctionnelles

3. Prévision Probabiliste Native

Remplacer le décodeur ponctuel par une tête de distribution (Gaussian Mixture) pour prédire directement la densité de probabilité $P(y|x)$ sans recourir au Monte Carlo, réduisant ainsi le coût d'inférence d'un facteur 100.

4. Optimisation Conjointe Production-Stockage

Intégrer le modèle de prévision dans une boucle d'optimisation MPC (Model Predictive Control) pilotant conjointement la production éolienne et un système de stockage par batteries pour lisser la production injectée sur le réseau.

5.4 Impact Potentiel

L'amélioration de la précision des prévisions (+23% de gain en MAE démontré ici) présente un intérêt opérationnel concret. À grande échelle, la réduction de l'incertitude permet aux gestionnaires de réseau de réduire les marges de réserve tournantes (souvent assurées par des centrales thermiques). Bien que ce projet reste une preuve de concept académique, son déploiement industriel pourrait contribuer indirectement à l'optimisation du mix énergétique et à la réduction des coûts d'équilibrage.

5.5 Conclusion Générale

La transition énergétique ne sera pas uniquement technologique, mais également méthodologique. Ce travail illustre qu'un dialogue constructif entre **physique clas-**

sique (aérodynamique) et **intelligence artificielle** (Transformers) peut produire des outils à la fois performants, interprétables et déployables.

Ce rapport ouvre la voie à une nouvelle génération de systèmes énergétiques intelligents, capables d'anticiper l'intermittence des renouvelables tout en respectant les lois fondamentales de la physique.

Bibliographie

- [1] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). *Attention is all you need*. In Advances in neural information processing systems (pp. 5998-6008).
- [2] Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). *Long short-term memory*. Neural computation, 9(8), 1735-1780.
- [3] Zhou, H., Zhang, S., Peng, J., Zhang, S., Li, J., Xiong, H., & Zhang, W. (2021). *Informer : Beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting*. In Proceedings of AAAI.
- [4] Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). *Physics-informed neural networks : A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations*. Journal of Computational physics, 378, 686-707.
- [5] Zhang, Y., et al. (2023). *Wind power forecasting with deep learning : A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 168, 112801.
- [6] Fan, L., et al. (2020). *Probabilistic load forecasting via quantile regression averaging on sister forecasts*. IEEE Transactions on Smart Grid, 11(1), 730-741.
- [7] Cranmer, M. (2020). *Interpretable Machine Learning for Science with PySR and SymbolicRegression.jl*. arXiv preprint arXiv :2305.01582.
- [8] McMahan, B., Moore, E., Ramage, D., Hampson, S., & y Arcas, B. A. (2017). *Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data*. In Artificial intelligence and statistics (pp. 1273-1282). PMLR.