

الجمهورية الشعبية الديمقراطية الجزائرية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
المدرسة العليا للإعلام الآلي 8 ماي 1945 - سيدي بلعباس
Higher School of Computer Science
8 Mai 1945 - Sidi Bel Abbès



THESIS

To obtain the diploma of **State Engineer**

Field: **Computer Science**

Specialty: **Artificial Intelligence**

Theme

A Dual-Track Cloud–Edge Digital Twin for Gas Turbine Predictive Maintenance

Presented by:
AISSAOUI Ismail

Defended on: **28 of June 2026**
In front of the jury composed of:

Pr. Belkacem KHALDI

Dr. Ghizlene Amira BELMEKKI

Dr. Mohamed BEDJAOU

Dr. Mohamed KECHAR

President

Examiner

Supervisor

Co-Supervisor

Academic Year: 2025/2026

Abstract

Problem: The unexpected failure of heavy industrial gas turbines results in catastrophic financial and safety hazards. Accurate Remaining Useful Life (RUL) prediction is critical for predictive maintenance in strict, zero-trust industrial environments.

State of the Art: Current deep learning models achieve high accuracy on benchmark datasets but produce risky point-predictions, suffer from quadratic memory bottlenecks on edge hardware, and often violate fundamental thermodynamic laws.

Solution: We propose a Dual-Track Cloud–Edge Digital Twin framework. The architecture leverages a Spatio-Temporal Koopman-Distributed Transformer (ST-KDFormer) in the Cloud, and a quantized Temporal Convolutional Network alongside a Selective State-Space Model (MambaTS) at the Edge.

Contributions: Key contributions include augmenting the ST-KDFormer with a Conformal Prediction Head to yield guaranteed 95% confidence intervals, utilizing Meta-Learning (MAML) for fleet generalization, and enforcing physics constraints using B-Spline Kolmogorov-Arnold Networks (KAN). We also document the "Mamba Hardware Paradox," proving its CUDA dependency relegates it to Edge Gateways over CPU-based PLCs.

Results: Empirical results demonstrate state-of-the-art diagnostic accuracy on the N-CMAPSS dataset while reducing the model footprint by 400% for deep edge deployment. The system is containerized within an air-gapped React application featuring a Generative AI RAG Copilot for explainable maintenance.

Keywords: Predictive Maintenance, Digital Twin, RUL, Koopman, Mamba, KAN, Edge AI, Conformal Prediction.

Résumé

Problématique: La défaillance inattendue des turbines à gaz industrielles entraîne des risques financiers et sécuritaires majeurs. La prédiction de la durée de vie restante (RUL) est essentielle pour la maintenance prédictive dans des environnements isolés.

État de l'art: Les modèles d'apprentissage profond actuels produisent des prédictions ponctuelles risquées, souffrent de goulots d'étranglement de mémoire sur le matériel Edge, et violent souvent les lois de la thermodynamique.

Solution: Nous proposons un Jumeau Numérique "Dual-Track" Cloud-Edge. L'architecture exploite un Transformer Spatio-Temporel (ST-KDFormer) dans le Cloud, et un réseau MambaTS avec un TCN quantifié au niveau de l'Edge.

Contributions: Les contributions incluent l'ajout d'un module de Prédiction Conforme pour garantir des intervalles de confiance de 95%, l'utilisation du Meta-Learning (MAML) pour la généralisation, et l'intégration de réseaux KAN pour contraindre la physique. Nous documentons également le "Paradoxe Matériel Mamba" limitant son déploiement aux passerelles Edge.

Résultats: Les résultats montrent une précision de diagnostic de pointe sur N-CMAPSS, réduisant l'empreinte de 400% pour le Edge. Le système est encapsulé dans une application React hors-ligne avec un Copilote RAG d'IA Générative.

Mots-clés: Maintenance Prédictive, Jumeau Numérique, RUL, Koopman, Mamba, KAN, Edge AI.

الملخص

المشكلة: يؤدي الفشل غير المتوقع لتوريبينات الغاز الصناعية إلى مخاطر مالية وأمنية كارثية. لذلك، يُعد التنبؤ الدقيق بالعمر الإنتاجي المتبقي (RUL) أمراً بالغ الأهمية للصيانة التنبؤية في البيئات الصناعية المعزولة. حالة الفن (الأبحاث السابقة): تحقق نماذج التعلم العميق الحالية دقة عالية، لكنها تقدم تنبؤات نقطية محفوفة بالمخاطر، وتعاني من استهلاك مفرط للذاكرة على الأجهزة الطرفية، (Edge) وغالباً ما تنتهك القوانين الديناميكية الحرارية. الحل: نقترح إطار عمل لتوأم رقمي مزدوج المسار (سحابي-طرفي). تعتمد الهيكلية على محول زمني-مكاني (ST-KDFormer) في السحابة، ونموذج (MambaTS) مع شبكة (TCN) كمية على الأجهزة الطرفية. المساهمات: تشمل المساهمات الرئيسية تزويد النموذج بوحدة تنبؤ امتثالي لضمان فترات ثقة بنسبة 95%، واستخدام التعلم البعدي (MAML) للتعميم، وفرض قيود فيزيائية باستخدام شبكات (KAN). كما وثقنا "مفارقة عتاد مامبا"، مما يثبت أن اعتمادها على معالجات الرسوميات يحد من قدراتها في البوابات الطرفية فقط. النتائج: تظهر النتائج التجريبية دقة تشخيصية متطورة على مجموعة بيانات N-CMAPSS مع تقليل حجم النموذج بنسبة 400% للتشغيل الطرفي. تم تغليف النظام في تطبيق معزول تماماً يحتوي على مساعد ذكاء اصطناعي (RAG) لتفسير الصيانة.

الكلمات المفتاحية: الصيانة التنبؤية، التوأم الرقمي، العمر الإنتاجي المتبقي، كوبمان، مامبا، الذكاء الاصطناعي الطرفي.