

الجمهورية الشعبية الديمقراطية الجزائرية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة العليا للإعلام الآلي 08 ماي 1945. بسيدي بلعباس
École Supérieure en Informatique
-08 Mai 1945- Sidi Bel Abbès



THESIS

To obtain the diploma of **Master**
Field: **Computer Science**
Specialty: **Artificial Intelligence and Data Science (AI&DS)**

Theme

**Decoding Biomedical Time Series into Natural
Language Using Hybrid Quantum-Classical
Transformers**

Presented by:
BADEREDDINE Haitham

Submission Date: **June, 2026**
In front of the jury composed of:

Dr. CHAIB Souleyman
Dr. KHALDI Belkacem
Pr. CHIKHAOUI Belkacem
Dr. BOUSMAHA Rabab

President
Supervisor
Co-Supervisor
Examiner

Academic Year : 2025/2026

The automated interpretation of electroencephalography (EEG) signals into clinically actionable natural language reports is a critical challenge in modern computational neuroscience, with direct implications for the diagnosis and monitoring of neurological disorders such as epilepsy, sleep disorders, and encephalopathies. Classical deep learning architectures perform well on structured biomedical data, yet struggle to capture the high-dimensional, non-stationary complexity of multi-channel neural signals. Concurrently, quantum machine learning (QML) and large language models (LLMs) offer theoretically motivated pathways to overcome these limitations, through quantum-enhanced feature representation and prompt-driven natural language generation respectively.

This thesis is centered around academic research and comparative analysis, with no practical implementation undertaken at this stage. It surveys and critically examines the most impactful approaches at the intersection of three transformative paradigms: classical and hybrid deep learning for EEG analysis, hybrid quantum-classical machine learning, and LLM-based clinical report generation. Across these paradigms, the dominant methodologies, representative architectures, and results reported on standard public EEG benchmarks are systematically reviewed and compared. Through this investigation, three critical gaps are identified: the limited expressiveness of purely classical models on non-stationary neural dynamics, the scarcity of resource-efficient hybrid quantum-classical designs suited to near-term quantum hardware, and the absence of grounded, verifiable mechanisms for translating learned representations into trustworthy clinical language. The identified gaps outline concrete directions for future research, particularly toward improving automated EEG interpretation in resource-constrained healthcare environments where access to trained neurologists is limited.

Keywords : Electroencephalography (EEG); Quantum Machine Learning (QML); Hybrid Quantum-Classical Learning; Deep Learning; Self-Attention; Large Language Models (LLM); Clinical Report Generation; Comparative Survey; Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ).

L'interprétation automatisée des signaux d'électroencéphalographie (EEG) en rapports cliniques exploitables en langage naturel constitue un défi majeur de la neuroscience computationnelle moderne, avec des implications directes pour le diagnostic et le suivi des troubles neurologiques tels que l'épilepsie, les troubles du sommeil et les encéphalopathies. Les architectures d'apprentissage profond classiques offrent de bonnes performances sur les données biomédicales structurées, mais peinent à capturer la complexité non-stationnaire et multidimensionnelle des signaux neuronaux multicanaux. Parallèlement, l'apprentissage automatique quantique (QML) et les grands modèles de langage (LLM) ouvrent des voies théoriquement motivées pour surmonter ces limitations, à travers la représentation quantique des caractéristiques et la génération de texte par ingénierie de prompts.

Ce mémoire est centré sur la recherche académique et l'analyse comparative, sans implémentation pratique à ce stade. Il passe en revue et examine de manière critique les approches les plus significatives à l'intersection de trois paradigmes transformateurs : l'apprentissage profond classique et hybride pour l'analyse des signaux EEG, l'apprentissage automatique quantique-classique hybride, et la génération de rapports cliniques par grands modèles de langage. À travers ces paradigmes, les méthodologies dominantes, les architectures représentatives et les résultats rapportés sur les jeux de données EEG publics de référence sont systématiquement passés en revue et comparés. Cette investigation permet d'identifier trois lacunes critiques : l'expressivité limitée des modèles purement classiques face aux dynamiques neuronales non-stationnaires, la rareté des conceptions hybrides quantiques-classiques efficaces en ressources et adaptées au matériel quantique à court terme, et l'absence de mécanismes fondés et vérifiables pour traduire les représentations apprises en un langage clinique fiable. Les lacunes identifiées tracent des directions concrètes pour les recherches futures, notamment en vue d'améliorer l'interprétation automatisée de l'EEG dans les environnements médicaux à ressources limitées où l'accès aux neurologues spécialisés est restreint.

Mots clés : Électroencéphalographie (EEG) ; Apprentissage Automatique Quantique (QML) ; Apprentissage Hybride Quantique-Classique ; Apprentissage Profond ; Auto-Attention ; Grands Modèles de Langage (LLM) ; Génération de Rapports Cliniques ; Étude Comparative ; Informatique Quantique de Moyenne Échelle Bruitée (NISQ).

الملخص

يُعدّ التفسير الآلي لإشارات تخطيط الدماغ الكهربائي (EEG) وتحويلها إلى تقارير سريرية باللغة الطبيعية تحدياً محورياً في علم الأعصاب الحاسبي الحديث، مع تداعيات مباشرة على تشخيص ومتابعة الاضطرابات العصبية كالصرع واضطرابات النوم والاعتلالات الدماغية. وقد أظهرت بنى التعلم العميق الكلاسيكية أداءً جيداً على البيانات الطبية الحيوية المنظمة، غير أنها تعجز عن التقاط التعقيد متعدد الأبعاد وغير الثابت لإشارات الدماغ متعددة القنوات. وبالتوازي، يُتيح التعلم الآلي الكومي (QML) والنماذج اللغوية الكبرى (LLM) مسارات مدعومة نظرياً للتغلب على هذه القيود، من خلال التمثيل الكومي للمميزات وتوليد النصوص عبر هندسة التوجيهات.

ترتكز هذه المذكرة على البحث الأكاديمي والتحليل المقارن، دون أي تنفيذ عملي في هذه المرحلة. يستعرض البحث ويفحص بشكل نقدي أبرز المقاربات عند تقاطع ثلاثة أطر تحويلية: التعلم العميق الكلاسيكي والمجين لتحليل إشارات EEG، والتعلم الآلي المجين الكمي-الكلاسيكي، وتوليد التقارير السريرية بالنماذج اللغوية الكبرى. وعبر هذه الأطر، تُستعرض وتُقارن بصورة منهجية المنهجيات السائدة والبنى التمثيلية والنتائج المُبلّغ عنها على قواعد بيانات EEG العامة المرجعية. ويتيح هذا البحث تحديد ثلاث فجوات جوهرية: محدودية القدرة التعبيرية للنماذج الكلاسيكية البحتة أمام الديناميكيات العصبية غير الثابتة، وندرة التصاميم المهيمنة الكمية-الكلاسيكية الموقرة للموارد والملائمة للعتاد الكومي قريب المدى، وغياب آليات راسخة وقابلة للتحقق لترجمة التمثيلات المُتعلمة إلى لغة سريرية موثوقة. وترسم الفجوات المُحددة اتجاهات ملهوسة للأبحاث المستقبلية، لا سيما نحو تحسين التفسير الآلي ل EEG في البيئات الصحية محدودة الموارد حيث يُعدّ الوصول إلى أطباء الأعصاب المتخصصين أمراً عسيراً.

الكلمات المفتاحية : تخطيط الدماغ الكهربائي (EEG)؛ التعلم الآلي الكومي (QML)؛ التعلم المجين الكمي-الكلاسيكي؛ التعلم العميق؛ الانتباه الذاتي؛ النماذج اللغوية الكبرى (LLM)؛ توليد التقارير السريرية؛ دراسة مقارنة؛ الحوسبة الكومية متوسطة النطاق المشوشة (NISQ).