

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 **Engineer degree**
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 have demonstrated strong performance on structured biomedical data, yet they systematically struggle to capture the high-dimensional, non-stationary complexity of multi-channel neural signals. Concurrently, the emergence of quantum machine learning (QML) and large language models (LLMs) offers new and 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 signal analysis, hybrid quantum-classical machine learning, and LLM-based clinical report generation. Through this investigation, three critical gaps in the existing literature are identified, and the QASA-EEG framework is proposed as a theoretically grounded response, combining the Quantum Adaptive Self-Attention (QASA) module with a classical Transformer backbone and a prompt-driven LLM interface, analytically evaluated against the Temple University Hospital EEG Corpus (TUH EEG) spanning six clinical sub-corpora and over 1.14 million EEG segments.

The findings of this work have the potential to significantly improve the efficiency and clinical applicability of automated EEG interpretation, particularly in resource-constrained healthcare environments where access to trained neurologists is limited. The proposed framework is applicable to a broad range of clinical scenarios, including epilepsy monitoring, abnormality detection, neurological event classification, and the automated generation of structured diagnostic reports.

Keywords : Electroencephalography (EEG); Quantum Machine Learning (QML); Hybrid Quantum-Classical Learning; Quantum Adaptive Self-Attention (QASA); Variational Quantum Circuits (VQC); Architectural Parsimony; Large Language Models (LLM); Clinical Report Generation; TUH EEG Corpus; 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 ont démontré de bonnes performances sur les données biomédicales structurées, mais peinent systématiquement à capturer la complexité non-stationnaire et multidimensionnelle des signaux neuronaux multicanaux. L'émergence de l'apprentissage automatique quantique (QML) et des grands modèles de langage (LLM) ouvre de nouvelles 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. 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 cette investigation, trois lacunes critiques sont identifiées dans la littérature existante, et le cadre QASA-EEG est proposé comme réponse théoriquement fondée, combinant le module d'Attention Adaptative Quantique (QASA) avec un backbone Transformer classique et une interface LLM pilotée par ingénierie de prompts, évalué analytiquement sur le corpus EEG de l'Hôpital Universitaire Temple (TUH EEG) couvrant six sous-corpus cliniques et plus de 1,14 million de segments EEG.

Les résultats de ce travail ont le potentiel d'améliorer significativement l'efficacité et l'applicabilité clinique de l'interprétation automatisée des signaux EEG, notamment dans les environnements médicaux à ressources limitées où l'accès aux neurologues spécialisés est restreint. Le cadre proposé est applicable à un large éventail de scénarios cliniques, incluant la surveillance de l'épilepsie, la détection d'anomalies, la classification d'événements neurologiques, et la génération automatisée de rapports diagnostiques structurés.

Mots clés : Électroencéphalographie (EEG) ; Apprentissage Automatique Quantique (QML) ; Apprentissage Hybride Quantique-Classique ; Attention Adaptative Quantique (QASA) ; Circuits Quantiques Variationnels (VQC) ; Parcimonie Architecturale ; Grands Modèles de Langage (LLM) ; Génération de Rapports Cliniques ; Corpus TUH EEG ;

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 بصورة منهجية عن التقاط التعقيد متعدد الأبعاد وغير الثابت لإشارات الدماغ متعددة القنوات. وفي هذا السياق، يُتيح ظهور التعلم الآلي الكمومي (QML) والنماذج اللغوية الكبرى (LLM) مسارات جديدة ومدعومة نظرياً للتغلب على هذه القيود، من خلال التمثيل الكمومي للمميزات وتوليد النصوص الطبية عبر هندسة التوجيهات.

ترتكز هذه المذكرة على البحث الأكاديمي والتحليل المقارنة. يستعرض البحث ويفحص بشكل نقدي أبرز المقاربات عند تقاطع ثلاثة أطر تحويلية: التعلم العميق الكلاسيكي والهجين لتحليل إشارات EEG، والتعلم الآلي الهجين الكمي-الكلاسيكي، وتوليد التقارير السريرية بالنماذج اللغوية الكبرى. ومن خلال هذا البحث، يتم تحديد ثلاثة فجوات بحثية جوهرية في الأدوات القائمة، ويُقترح ال QASA استجابةً نظريةً راسخةً، يجمع بين وحدة الانتباه التكميني الكمومي وعمود فقري كلاسيكي من نوع Transformer وواجهة LLM مدفوعة بالتوجيهات، مُقيّمةً تحليلياً على قاعدة بيانات EEG لمستشفى جامعة تمبل (EEG TUH) التي تشمل ستة مجموعات فرعية سريرية وأكثر من 41.1 مليون مقطع EEG.

تتمتع نتائج هذا العمل بإمكانية تحسين كفاءة وقابلية التطبيق السريري للتفسير الآلي لإشارات EEG بشكل ملحوظ، لا سيما في البيئات الصحية ذات الموارد المحدودة حيث يُعدّ الوصول إلى أطباء الأعصاب المتخصصين أمراً عسيراً. ويصلح الإطار المقترح لتطبيقه على طيف واسع من السيناريوهات السريرية، بما فيها مراقبة الصرع، واكتشاف الشذوذات، وتصنيف الأحداث العصبية، والتوليد الآلي للتقارير التشخيصية المنظمة.

الكلمات المفتاحية: تخطيط الدماغ الكهربائي (EEG)؛ التعلم الآلي الكمومي (QML)؛ التعلم الهجين الكمي-الكلاسيكي؛ الانتباه التكميني الكمومي (QASA)؛ الدوائر الكمومية التغايرية (VQC)؛ الاقتصاد المعماري؛ النماذج اللغوية الكبرى (LLM)؛ توليد التقارير السريرية؛ مجموعة بيانات EEG TUH؛ الحوسبة الكمومية متوسطة النطاق المشوشة (NISQ).