



جامعة محمد الخامس بالرباط  
Université Mohammed V de Rabat

**École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes**  
Centre d'Études Doctorales en Sciences des Technologies de l'Information et de l'Ingénieur

## **AVIS DE SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT**

**Monsieur Mohamed EL FEZAZI**

Soutiendra publiquement sa thèse de Doctorat en Sciences de l'ingénieur

**Spécialité** : Génie électrique

**Le Samedi 18 Janvier 2025 à 10h00 au Grand Amphi à l'ENSAM de Rabat**

**Intitulé de la thèse**

**Système Embarqué IoT pour le Traitement des Signaux en  
Télé-rééducation du Genou**

**Président :**

Pr. Ahmed HAMMOUCH, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

**Directeur de thèse :**

Pr. Atman JBARI, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

**Co-Directeur de thèse :**

Pr. Abdelilah JILBAB, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

**Rapporteurs :**

Pr. Rachid SAADANE, PES, Ecole Hassania Des Travaux Publics, Casablanca

Pr. Ouadoudi ZYTOUNE, PES, ENSA, Université Ibn Tofail, Kénitra

Pr. Mohamed HILAL, MCH, ISSS, Université Hassan I, Settat

**Examineur :**

Pr. Mounaim AQIL, MCH, EST, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal



**Résumé:** Les avancées des systèmes embarqués ont amélioré la mesure et le traitement des signaux biomédicaux, notamment pour l'analyse des mouvements humains en rééducation. Bien que diverses technologies de capteurs permettent une surveillance quantitative, elles restent coûteuses et limitées aux environnements cliniques, ce qui restreint l'accès aux services de rééducation, en particulier dans les pays à faible et moyen revenu. Cela souligne la nécessité de systèmes abordables et accessibles à domicile, assurant un suivi continu et à distance des progrès des patients. Les technologies de l'Internet des objets (IoT) et des systèmes portables présentent une solution potentielle pour répondre à cette demande croissante. Dans ce sens, l'objectif de cette thèse porte sur le développement d'un système embarqué IoT pour la télééducation du genou. La méthodologie employée dans cette recherche implique la conception d'un réseau de capteurs sans fil, constitué d'unités de mesure inertielles (IMU) portables et intégré dans une architecture IoT qui exploite à la fois l'Edge et le Cloud computing pour permettre une surveillance à distance et un retour d'information en temps réel. Nous avons mis en œuvre un algorithme de fusion de capteurs basé sur la méthode prédicteur-correcteur pour corriger la dérive inhérente et les erreurs de mesure associées aux capteurs inertiels, validant ainsi son efficacité en le comparant au filtre complémentaire à descente de gradient et au filtre de Kalman. De plus, nous avons développé une approche pour estimer la cinématique du genou, en intégrant une méthode de calibration automatique et autonome, basée sur l'analyse en composantes principales, afin d'obtenir des données cinématiques anatomiquement pertinentes. Par ailleurs, le système a été implémenté en utilisant la technologie System-on-Chip (SoC), permettant le traitement embarqué de signaux et la communication sans fil dans une conception compacte et à faible consommation d'énergie. La validité de notre approche a été évaluée par des tests expérimentaux en comparaison avec des systèmes de mesure de mouvement établis. Les résultats de ces expériences démontrent une grande précision et une forte corrélation par rapport aux normes de référence, indiquant des performances cliniquement acceptables. Le système proposé offre une solution prometteuse pour le suivi objectif et à distance du mouvement durant la télé-rééducation du genou, améliorant ainsi l'accessibilité aux services de rééducation au-delà des environnements cliniques.

**Mots-clés:** Fusion de capteurs inertiels, Informatique embarquée, Ingénierie de la télé-rééducation, Instrumentation électronique, Internet des objets (IoT), Réseau de capteurs sans fil, Système portable de mesure du mouvement.



**Abstract:** Advances in embedded systems have improved the measurement and processing of biomedical signals, particularly for analyzing human movements in rehabilitation. Although various sensor technologies enable quantitative monitoring, they remain expensive and limited to clinical settings, restricting access to rehabilitation services, especially in low- and middle-income countries. This highlights the need of affordable home-based systems that provide continuous and remote monitoring of patients' progress. Internet of Things (IoT) and wearable systems technologies present potential solutions to meet this growing demand. This thesis aims to develop an IoT embedded system for knee telerehabilitation. The methodology employed in this research involves the design of a wireless sensor network (WSN) of wearable inertial measurement units (IMU). This WSN is integrated into an IoT architecture that leverages Edge and Cloud computing to enable remote monitoring and real-time feedback. We implemented a sensor fusion algorithm based on the predictor-corrector method to correct the inherent drift and measurement errors associated with inertial sensors. The effectiveness of this algorithm is validated against the gradient descent complementary filter and the Kalman filter.

Furthermore, we developed an approach to estimating knee kinematics, which integrates an automatic and autonomous calibration method based on principal component analysis to obtain anatomically relevant kinematic data. The system uses System-on-Chip (SoC) technology, allowing embedded signal processing and wireless communication in a compact and low-power design. Experimental validation of our system against the gold standard motion capture system demonstrated good accuracy and strong correlation, indicating clinically acceptable performance. The proposed system offers a promising solution for objective and remote motion monitoring during knee rehabilitation, thus improving the accessibility of rehabilitation services beyond clinical environments.

**Keywords:** Electronic instrumentation, Embedded computing, Inertial sensor fusion, Internet of Things (IoT), Telerehabilitation engineering, Wearable motion capture system, Wireless sensor network.