



Pôle des Etudes Doctorales  
Centre des Etudes Doctorales  
Sciences et Techniques et Sciences Médicales

## AVIS DE SOUTENANCE DE THESE DE DOCTORAT

**Monsieur EN-NAGRE Khalid**

**Présentera ses travaux de recherche en vue de l'obtention du  
Doctorat**

**Formation Doctorale : Biologie, Chimie et Géologie**

**Discipline : Géologie**

**Spécialité : Géo-informatiques, Hydrologie et Climatologie**

**Le 19/07/2025 à 10H00 à la salle de réunion du département de  
Chimie de la Faculté des Sciences de Tétouan.**



**Sous le thème**

**Validation des Produits Pluviométriques Satellitaires et Intégration du  
Machine Learning et du Deep Learning dans la Modélisation  
Hydrologique : Cas du bassin versant Haut Drâa, Sud au Maroc.**

**Devant le jury composé de :**

Nom et Prénom	Etablissement	Qualité
Pr. OUAZANI TOUHAMI Abdelouahed	Faculté des Sciences de Tétouan, UAE	Président
Pr. DRAOUI Mohamed	ENS de Tétouan, UAE	Rapporteur
Pr. EL MRINI Abdelmounim	Faculté des Sciences de Tétouan, UAE	Rapporteur
Pr. HILALI Mohamed	Faculté des Sciences de Meknès, UMI	Rapporteur
Pr. CHERKAOUI DEKKAKI Hinde	FST d'Al Hoceima, UAE	Examinatrice
Pr. BEN MAKHLOUF Mohamed	Faculté des Sciences de Tétouan, UAE	Examineur
Pr. AQNOUY Mourad	FST d'Errachidia, UMI	Co-Directeur
Pr. STITOU EL MESSARI Jamal Eddine	Faculté des Sciences de Tétouan, UAE	Directeur

*Structure de recherche UAE/U08FS: Laboratoire de recherche en Géosciences appliquées et marines, Géotechniques et Géorisques (LR3G) : FS-Tétouan.*

## Résumé



Dans les environnements arides et semi-arides, la disponibilité et la fiabilité des données hydrologiques, notamment les précipitations et les débits, sont essentielles pour la gestion des ressources en eau et la modélisation hydrologique. Cependant, les limitations des observations in situ, dues aux contraintes techniques et à la représentativité spatiale des stations de mesure, compliquent l'analyse des phénomènes hydrologiques. Le bassin versant du Haut Drâa (BVHD), situé au sud du Maroc, illustre parfaitement ces défis en raison de la variabilité des précipitations et des pertes hydriques importantes par évaporation, aggravées par des épisodes de sécheresse persistante.

Dans ce contexte, l'utilisation des produits de précipitations satellitaires (PPS) constitue une alternative prometteuse pour pallier le manque de données in situ. De plus, l'intégration de l'intelligence artificielle ouvre de nouvelles perspectives dans la gestion et la prévision hydrologique. Cette thèse vise à évaluer l'adéquation des PPS pour les applications hydrologiques et à analyser les tendances de la sécheresse, en exploitant les capacités des algorithmes de Machine Learning (ML) et de deep learning (DL) pour la prédiction des indices de sécheresse (SPEI) et des débits des rivières du BVHD.

La méthodologie repose sur deux approches principales. Tout d'abord, une validation directe des PPS (TRMM, GPM et CHIRPS V2.0) a été réalisée en comparant leurs estimations aux données pluviométriques in situ à différentes échelles temporelles. Ensuite, ces PPS ont été intégrés dans deux modèles hydrologiques (HEC-HMS, semi-distribué, et GR4J, global) afin d'évaluer leur pertinence pour la simulation des débits. Par ailleurs, l'analyse des tendances de sécheresse a été effectuée à l'aide du test de Mann-Kendall modifié et de l'estimateur de pente, tandis que quatre algorithmes d'apprentissage automatique (KNN, Random Forest, AdaBoost et VR) ont été utilisés pour la prédiction du SPEI. Enfin, la modélisation des séries temporelles des débits journaliers a été réalisée à l'aide de modèles de deep learning (CNN, LSTM, RNN).

Les résultats montrent que les PPS surestiment les précipitations à l'échelle journalière (PBIAS positif) avec une corrélation modérée aux données in situ ( $R^2 < 0,5$ ). Toutefois, à l'échelle mensuelle, la corrélation s'améliore significativement. Concernant, la modélisation hydrologique, la plateforme HEC-HMS, forcée par les données de précipitations TRMM 3B42-V7, fournit des simulations satisfaisantes du débit observé, contrairement à GR4J, qui présente des performances limitées. L'analyse de la sécheresse révèle une variabilité spatiale et temporelle marquée, influencée par les indices SPI et SPEI. Les algorithmes Random Forest, VR et AdaBoost offrent les meilleures performances pour la prédiction du SPEI (NSE entre 0,74 et 0,93), tandis que KNN est moins performant (NSE entre 0,44 et 0,84). De plus, la prévision des débits journaliers sur 7 jours met en évidence la supériorité du modèle LSTM (NSE = 0,63 ;  $R^2 = 0,72$ ) par rapport aux autres approches.

En conclusion, l'intégration des PPS, des modèles hydrologiques et des approches d'intelligence artificielle constitue une avancée significative pour l'analyse et la gestion des ressources en eau dans les bassins versants arides. Cette approche offre des perspectives prometteuses pour la prévision hydrologique et l'optimisation de la gestion de l'eau en contexte de données limitées.

**Mots clés:** Précipitations Satellitaires ; Modélisation Hydrologique ; Sécheresse ; Apprentissage Automatique ; Deep Learning ; Bassin Versant Aride.