



Biodiversité
Agriculture
Alimentation
Environnement
Terre
Eau



OFFRE DE THESE

Sujet : Prédiction des crues par intelligence artificielle : augmentation de l'horizon de prévision

Flood forecasting using artificial intelligence: increasing the lead-time

Etablissement / Host institution : IMT Mines Alès (Ecole nationale supérieure des mines d'Alès)

Centre et équipe de recherche : CREER

Localisation / Location : Alès (1h from Montpellier, 30min from Nîmes)

Ecole doctorale / Doctoral school : GAIA (<https://gaia.umontpellier.fr/>)

Spécialité / Discipline : Terre et eau / Earth and water

Directeur(trice) de thèse / *Thesis supervisor* : Anne Johannet & Yves Tramblay

Financement / Funding type : Allocation doctorale IMT Mines Alès

Début de la thèse / *Starting date* : 1^{er} février 2023

Date limite de candidature / *Application deadline* : 30 novembre 2022

Langues / Languages : français ou anglais / French or English

Contact : anne.johannet@mines-ales.fr ; yves.tramblay@ird.fr ; guillaume.artigue@mines-ales.fr

Présentation de l'établissement et du centre d'accueil

L'institut Mines-Télécom (IMT) est un grand établissement public dédié à l'enseignement supérieur et la recherche pour l'innovation ; c'est le premier groupe d'écoles d'ingénieurs en France. Acteur majeur du croisement entre les sciences et les technologies du numérique et de l'ingénieur, l'IMT met les compétences de ses écoles en perspective dans les grands champs des transformations numériques, industrielles, énergétiques et éducatives. L'IMT fédère 11 écoles d'ingénieur publiques réparties sur le territoire national, qui forment 13 500 ingénieurs et docteurs. L'IMT emploie 4500 femmes et hommes et dispose d'un budget annuel de 400M€ dont 40% de ressources propres. L'IMT comporte 2 instituts Carnot, 35 chaires industrielles, produit annuellement 2100 publications de rang A, 60 brevets et réalise 110M€ de recherche contractuelle au sein de 55 centres de recherche rattachés à ses écoles.

IMT Mines Alès est une des écoles de l'IMT. Forte de 180 ans d'histoire au service de la science et des entreprises, l'école dispose d'une solide culture scientifique et technique qu'elle met au service de l'enseignement, de la recherche et du transfert technologique. L'école emploie 350 personnes et forme plus de 1200 élèves ingénieurs et chercheurs. Ses 3 centres de recherche développent une activité de haut niveau scientifique en partenariat avec les entreprises, dans les domaines de l'environnement, des risques, des matériaux, du génie civil, de l'intelligence artificielle et du génie industriel et numérique. Les valeurs promues à l'école sont l'audace, l'engagement, le partage et l'excellence.

Le Centre de Recherche et d'Enseignement en Environnement et en Risques (CREER) héberge des activités de recherches axées sur deux thématiques dans les domaines de l'environnement et du risque. Chacune des thématiques est portée par un Laboratoire de recherche :

- HSM (HydroSciences Montpellier) pour les activités dans le Domaine de l'eau
- LSR (Laboratoire des Sciences du risque), pour les recherches sur les risques et la qualité de l'Air.

Le Laboratoire commun Hydr.IA est un laboratoire commun, cofinancé par l'ANR (Agence nationale de la Recherche, entre l'Unité mixte de recherche HSM (HydroSciences Montpellier ; UMR 5151) et l'entreprise SYNAPSE Informatique.

- HSM est une unité mixte de recherche (UMR UM CNRS 5151, IMT Mines Alès, IRD 050). C'est une des unités de recherche Phare en France dans le domaine de l'eau, elle compte près de 200 personnes, plus de 120 permanents scientifiques et plus de 50 doctorants et post-doctorants travaillant au sein de six équipes de recherches et deux ateliers transverses : l'atelier *modélisation hydrologique* et l'atelier *Machine Learning*. Ce Laboratoire Commun mobilise les compétences de huit chercheurs ou enseignant-chercheurs appartenant aux équipes HYTAQUE (HYdrogéologie et Transferts dans les Aquifères Karstiques et hétérogènes) et HEC (Hydrologie, Ecohydrologie, Climat) localisés sur trois sites de l'Université de Montpellier (Maison des Sciences de l'Eau – campus Triolet et Faculté de Pharmacie), sur le site Alésien d'IMT Mines Alès et et au sein de certaines implantations IRD dans les pays du Sud (Etranger et ROM-COM). L'UMR accueille également une centaine de stagiaires par an.

La variété des disciplines adressées par HSM permet de relever les grands défis liés à l'eau qui nécessitent des compétences variées (surveillance, déploiement de réseaux de capteurs, modélisation, chimie, biologie, gestion...) permettant aux équipes de s'intégrer dans des projets pluridisciplinaires et de s'impliquer dans plusieurs cercles et communautés, amplifiant ainsi son rayonnement.

- *SYNAPSE Informatique SARL* est une société d'ingénierie avec 25 collaborateurs spécialisée dans la mise en place et l'accompagnement de projets informatiques ambitieux d'expertise et d'intégration de systèmes. Synapse est fondée en 1997 et implantée actuellement à Montpellier et Marseille. Synapse a développé ces dernières années un pôle d'édition, intégration et services en ligne dans le domaine de la concentration des données hydrologiques, pour les alertes de crues et la gestion des ressources en eau. Les systèmes proposés par Synapse sont utilisés par les services de l'état - services de prévisions de crues essentiellement, incluant ceux présents sur notre région, les collectivités territoriales, les syndicats de bassin, les industriels. En plus des réalisations en France, Synapse a une activité à l'international, avec plusieurs déploiements au Maroc et au Madagascar sur des bassins hydrographiques critiques pour la problématique inondation et/ou la gestion des ressources en eau.

Le doctorant sera recruté par IMT Mines Alès et basé principalement sur le site Alésien de HSM.

Mots clés

Jumeaux numériques/Digital Twin, Neural Networks/Machine Learning, Deep Learning, Hydrology, Karst, Watershed, Water Resources, Flash Floods, Droughts, Meteorology, Times Series, Data Analysis, Statistics, Databases, Modeling, applied Mathematics.

Description du sujet de thèse

Contexte et problématique. Les modèles d'intelligence artificielle : les réseaux de neurones et les modèles à apprentissage profond, ont prouvé leur capacité à produire des prévisions des crues sur différents types de bassins. Leur temps de calcul en conditions opérationnelles est très rapide, et l'absence d'hypothèse explicite sur le fonctionnement de l'hydrosystème évite l'acquisition, la collecte et l'utilisation de nombreuses données, parfois peu représentatives et entraînant des coûts significatifs.

Ces modèles ont notamment la capacité de produire des prévisions hydrologiques (débits ou hauteurs d'eau) sans prévision de leurs entrées (en général, les précipitations), sur un horizon de prévision proche du temps de réponse de l'hydrosystème. Or, ce dernier est en général assez limité (parfois moins de deux heures pour les crues rapides), ce qui ne permet pas nécessairement de proposer un horizon de prévision suffisant pour les opérations de gestion de crise associées à ces crues.

Les prévisions quantitatives de précipitations sont en général fournies par les modèles météorologiques. Elles manquent souvent de précision sur les événements convectifs extrêmes mais apportent beaucoup pour la distribution spatiale des pluies futures parce que parfois, leurs biais sont systématiques. Néanmoins, les utiliser « brutes » pour la modélisation hydrologique reste difficile. Pour les réseaux de neurones en particulier, cela implique des changements dans l'architecture postulée et dans la gestion des transitions entre valeurs observées et valeurs prévues.

Plusieurs thèses se sont déjà déroulées au Laboratoire avec succès sur la modélisation hydro(géo)logique par intelligence artificielle : Mohamed Toukourou (2009), Line Kong A Siou (2011), Guillaume Artigue (2012), Audrey Bornancin-Plantier (2013), Virgile Taver (2014), Thomas Darras (2015), Michaël Savary (2018), Nicolas Akil (2021), Bob Saint Fleur (2021), entre autres, qui ont pu contribuer à la définition de méthodologies de conception de ces modèles pour maximiser leurs propriétés prédictives et leur robustesse. Ceci étant, aucune n'a encore expérimenté le couplage avec des prévisions des entrées, au-delà de prévisions basiques (parfaites, persistance des pluies passées, pluies nulles, etc.), ce qui est un point crucial pour favoriser l'utilisation en conditions opérationnelles de ces modèles. La maturité sur le sujet permet aujourd'hui d'envisager ces développements.

Travail proposé. Les travaux proposés dans cette thèse s'appuient donc sur l'expérience unique de l'unité de recherche dans ce domaine, conférant une maîtrise rare des outils de prévision par réseaux de neurones. Il s'agira de mobiliser de concert les techniques de l'IA : les réseaux de neurones et les modèles profonds, avec une analyse originale des conditions météorologiques au sein d'une modélisation innovante. La région cévenole, célèbre pour ses événements extrêmes sera d'abord ciblée, puis d'autres sites d'études de validation seront choisis, en fonction des problématiques rencontrées en conditions opérationnelles.

Cette thèse se déroulant au sein du Labcom Hydr.IA (<https://hydria.ai/>), elle donnera au doctorant l'opportunité de découvrir le monde de la recherche au sein de l'Unité HSM (<http://www.hydrosociences.org/>), unité de recherche majeure dans le paysage français, tout en collaborant avec des utilisateurs proches du terrain, préoccupés par le sauvegarde des vies et des biens.

Objectifs et résultats attendus

Compte tenu du contexte précédemment exposé, ce travail de thèse a pour objet d'augmenter l'horizon de prévision des modèles hydrologiques à réseaux de neurones par plusieurs moyens : prévision très court terme des précipitations, utilisation des prévisions météorologiques des principaux modèles opérationnels français et étrangers, post traitement des prévisions, etc. Le premier terrain d'étude sera la zone cévenole, qui dispose déjà de modèles hydrologiques prédictifs fonctionnels, et sera étendu à d'autres bassins des clients de SYNAPSE qui se porteront volontaires pour l'expérimentation, ainsi qu'éventuellement des bassins à l'international (Maroc en particulier).

Précision sur l'encadrement

Encadrement de la thèse : Anne Johannet (HSM, IMT Mines Alès), Yves Trambly (HSM, IRD) et Guillaume Artigue (HSM, IMT Mines Alès).

Anne Johannet, directrice de thèse, est spécialiste en modélisation par réseaux de neurones appliquée aux crues et au karst. Yves Trambly (IRD-HSM), co-directeur de thèse est spécialiste des processus hydrologiques et de la prévision météorologique. Guillaume Artigue, encadrant de proximité est spécialisé en modélisation des crues éclair et en prévision hydrométéorologique utilisant l'intelligence artificielle.

Profil du candidat

Un candidat titulaire d'un Diplôme National de Master ou d'un diplôme d'ingénieur dans les domaines de la physique est plus spécifiquement recherché, mais des compétences en hydrologie, météorologie ou apprentissage statistique seraient également les bienvenues. Une forte curiosité et appétence pour apprendre les autres disciplines est attendue.

Références bibliographiques

Virgile TAVER, 2014. « Modélisation hydrodynamique des aquifères karstiques par réseaux de neurones » École Doctorale SIBAGHE. Co-Directeurs de thèse Anne Johannet et Séverin Pistre

Line KONG-A-SIOU (2014). Kong-A-Siou, L., Fleury, P., Johannet, A., Borrell Estupina, V., Pistre, S. and Dörfliger N. Performance and complementarity of two systemic models (reservoir and neural networks) used to simulate spring discharge and piezometry for a karst aquifer. Journal of Hydrology, 519(D), 3178-3192, 2014.

Line KONG-A-SIOU (2011). « Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones ». Montpellier II, Ecole Doctorale SIBAGHE. Directeur de thèse : M. Séverin Pistre.

Thomas DARRAS (2015). « Prévision des crues rapides par apprentissage statistique ». Ecole Doctorale SIBAGHE. Co-Directeurs de thèse Anne Johannet et Séverin Pistre

Processus de candidature

Les candidatures (lettre de motivation, CV et notes de master2) sont à transmettre par mail à anne.johannet@mines-ales.fr, et anne-catherine.denni@mines-ales.fr avant le 30 novembre 2022- 23h00 - heure de Paris, au plus tard.

Second Part: English Version

Presentation of the institution and the host laboratory

The Institute Mines-Télécom (IMT) is a French public establishment dedicated to higher education and innovative research and, as it represents the ministries of industry and digital technology, it is the largest group of engineering schools in France. Being a major actor in the crossover of science, digital technologies and engineering, the IMT harnesses the competencies of its member schools and allows them to excel in the fields of the transformation of digital technologies, the industry, energy and education. The IMT brings 11 public engineering across France together. Collectively, they train 13,500 engineers and doctoral students as well as employing 4,500 women and men and manage a budget of €400m within 55 research centers connected to the schools. IMT publishes 2000 publications each year and registers 60 patents.

IMT Mines Alès is one of the schools of IMT and, thanks to its 180 years of history of service to science and industry, the school thrives due to its solid culture of science and technology that it puts at the disposal of training, research and technology transfer. The school employs 350 people and trains more than 1100 students, engineers and researchers. Its three teaching and research poles contribute the development of high level scientific research in the areas of risk environment, materials, civil engineering, industrial engineering and digital technology. The school proposes rich and varied career paths as teacher/researchers have job mobility in the different schools of IMT and can equally take up, if they wish, positions of responsibility within the functional management of the school during a share of their time. Examples include dean, research director, international relations or economic development positions. The values promoted at the school are boldness, commitment, sharing and excellence.

The CREER center (Centre for Research and Teaching in Environment and Risks) hosts research activities focused on two themes in the fields of environment and risk. Each of these themes is supported by a research laboratory:

- HSM (HydroSciences Montpellier) for activities in the field of water
- LSR (Risk Sciences Laboratory), for research on risks and air quality.

The Hydr.IA Laboratory is a joint laboratory, co-financed by the ANR (French National Research Agency), between the HSM research unit (HydroSciences Montpellier; UMR 2525) and the company SYNAPSE Informatique.

- HSM is a research unit (UMR UM CNRS 5151, IMT Mines Alès, IRD 050). It is one of the leading research units in France in the field of water, with nearly 200 people, more than 120 permanent scientists and more than 50 doctoral and post-doctoral students working in six research teams and two transverse workshops: the hydrological modelling workshop and the Machine Learning workshop. This joint laboratory mobilises the skills of eight researchers or teacher-researchers belonging to the

HYTAQUE (HYdrogeology and Transfers in Karstic and Heterogeneous Aquifers) and HEC (Hydrology, Ecohydrology, Climate) teams located on three sites of the University of Montpellier (Maison des Sciences de l'Eau - Triolet campus and the Faculty of Pharmacy), on the Alésien site of IMT Mines Alès and within certain IRD establishments in southern countries (Abroad and ROM-COM).

- The variety of disciplines addressed by HSM enables it to take up the major challenges related to water, which require a variety of skills (monitoring, deployment of sensor networks, modelling, chemistry, biology, management, etc.), enabling the teams to be integrated into multidisciplinary projects and to become involved in several circles and communities, thereby increasing its influence.
- SYNAPSE Informatique SARL is an engineering company with 25 employees specialising in the implementation and support of ambitious IT projects involving expertise and systems integration. Synapse was founded in 1997 and is currently based in Montpellier and Marseille. Over the last few years, Synapse has developed a publishing, integration and online services division in the field of hydrological data concentration, for flood warnings and water resource management. The systems proposed by Synapse are used by state services - mainly flood forecasting services, including those present in our region -, local authorities, basin syndicates and industrialists. In addition to its work in France, Synapse is active internationally, with several deployments in Morocco and Madagascar in river basins that are critical for flooding and/or water resource management.

The PhD student will be recruited by IMT Mines Alès and based mainly at the HSM site in Alès.

Keywords

Digital Twin, Neural Networks/Machine Learning, Deep Learning, Hydrology, Karst, Watershed, Water Resources, Flash Floods, Droughts, Times Series, Data Analysis, Statistics, Databases, Modeling, applied Mathematics.

Description of thesis topic

Context of the study: Artificial intelligence models: neural networks and deep learning models, have proven their ability to produce flood forecasts on different types of basins. Their computation time in operational conditions is very fast and the absence of explicit hypothesis on the functioning of the hydrosystem avoids the acquisition, the collection and the use of numerous data, sometimes not very representative and entailing significant costs.

In particular, these models have the capacity to produce hydrological forecasts (flows or water levels) without forecasting their inputs (in general, precipitation), over a forecast horizon close to the response time of the hydrosystem. However, the latter is generally quite limited (sometimes less than two hours for rapid floods), which does not necessarily allow to propose a sufficient forecasting horizon for the crisis management operations associated with these floods.

Quantitative precipitation forecasts are in general provided by meteorological models. They often lack accuracy on extreme convective events but are still valuable for spatial distribution of rainfall and because their biases are sometimes systematic. Nevertheless, using raw outputs of meteorological models remain difficult for hydrological modeling. For neural networks, it also implies changes in postulated architectures and in the management of the transitions between observed and forecast values.

Several PhD theses were successfully defended at the Laboratory about AI hydro(geo)logical modeling: Mohamed Toukourou (2009), Line Kong A Siou (2011), Guillaume Artigue (2012), Audrey Bornancin-Plantier (2013), Virgile Taver (2014), Thomas Darras (2015), Michaël Savary (2018), Nicolas Akil (2021) and Bob Saint Fleur (2021), among others, that were able to contribute to the definition of methodologies of model design in order to maximize their forecasting capacities and their robustness. This being said, none of these thesis have experienced a coupling with a forecast of the inputs, beyond basic forecasts (perfect, persistence of past rain, dry forecast), which is crucial to promote a use of these models in operational conditions. The maturity acquired on this topic now allows to consider these developments.

Proposed work. The work proposed in this thesis is therefore based on the unique experience of the research unit in this field, providing a rare mastery of forecasting tools by neural networks. It will mobilize together the techniques of AI: neural networks and deep models, with an original analysis of weather conditions within an innovative modeling. The *Cevennes* region, famous for its extreme events, will be targeted first, then other validation study sites will be chosen, depending on the problems encountered in operational conditions.

This thesis will take place within the Labcom Hydr.IA (<https://hydria.ai/>), and will give the PhD student the opportunity to discover the world of research within the HSM Unit (<http://www.hydrosciences.org/>), a major research unit in the French landscape, while

Goals and expected results

Given the above context, the aim of this thesis is to increase the lead-time of the neural networks forecasting models by several means: short term forecast of rainfall, use of meteorological forecasts from the main operational French and foreign models, post-processing of forecasts, etc. The first case study will be the *Cévennes* region, where predictive hydrological models exist, and might be extended to other basins from the customers of SYNAPSE that would be volunteer for the experiment, as well as international basins (Morocco in particular).

Precision on the supervisory staff

Thesis supervisors: Anne Johannet (HSM, IMT Mines Alès), Yves Trambly (HSM, IRD) and Guillaume Artigue (HSM, IMT Mines Alès).

Anne Johannet, thesis director, is a specialist in neural network modelling applied to floods and karst. Yves Trambly (UM-HSM), co-Director of the thesis is specialized in hydrological processes and meteorological forecasting. Guillaume Artigue, local supervisor, is specialized in flash-flood modelling and hydro-meteorological modelling/forecasting using artificial intelligence.

Candidate profile

A candidate with a National Master's degree or an engineering degree in physics is specifically sought, but skills in hydrology, meteorology or statistical learning would be welcome. A strong curiosity and appetite for learning about other disciplines is expected.

Application process

Applications (cover letter, CV and master 2 grades) must be sent by email to anne.johannet@mines-ales.fr, and anne-catherine.denni@mines-ales.fr, before November 30, 2022, 11:00 p.m. Paris time, at the latest.

References

Virgile TAVER, 2014. « Modélisation hydrodynamique des aquifères karstiques par réseaux de neurones » École Doctorale SIBAGHE. Co-Directeurs de thèse Anne Johannet et Séverin Pistre

Line KONG-A-SIOU (2014). Kong-A-Siou, L., Fleury, P., Johannet, A., Borrell Estupina, V., Pistre, S. and Dörfliger N. Performance and complementarity of two systemic models (reservoir and neural networks) used to simulate spring discharge and piezometry for a karst aquifer. Journal of Hydrology, 519(D), 3178-3192, 2014.

Line KONG-A-SIOU (2011). « Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones ». Montpellier II, Ecole Doctorale SIBAGHE. Directeur de thèse : M. Séverin Pistre.

Thomas DARRAS (2015). « Prévion des crues rapides par apprentissage statistique ». Ecole Doctorale SIBAGHE. Co-Directeurs de thèse Anne Johannet et Séverin Pistre