

**DOSSIER DE CANDIDATURE
POUR THESE EN COTUTELLE
POUR LA RENTREE 2020
FINANCEMENT : BOURSE**

Dossier complété et revêtu des signatures à transmettre impérativement pour le :

13 mars 2020 au plus tard,

A la Direction de la Recherche et Valorisation

secretariat.recherche@univ-littoral.fr

Titre de la thèse :

Impact de la topographie sur la modélisation des écoulements en eaux peu profondes

Laboratoire d'accueil ULCO :

LMPA

Directeur de thèse ULCO :

Rosier Carole

Laboratoire d'accueil partenaire (si connu) :

Contact dans l'Université partenaire (si connu) :

X LIBAN - Université Libanaise

Pour ce dispositif, merci d'indiquer en plus :

- le nom du codirecteur étranger et le laboratoire partenaire

- Thématique :

- (1) La qualité de l'air
- (2) Le milieu aquatique
- (3) L'obésité, la nutrition et les activités sportives,
- (4) Les énergies propres et renouvelables
- (5) La gestion et le traitement des déchets
- (6) L'urbanisme

LIBAN - CNRS Libanais

Pour ce dispositif, merci d'indiquer en plus :

- le nom du codirecteur étranger et le laboratoire partenaire

- Thématique :

- (1) La qualité de l'air
- (2) Le milieu aquatique
- (3) L'obésité, la nutrition et les activités sportives
- (4) Les énergies propres et renouvelables
- (5) La gestion et le traitement des déchets
- (6) L'urbanisme

□ **ALGERIE - Université Badji Mokhtar d'Annaba (UBMA)**

- Thématique :

- (1) La gestion et le traitement des déchets,
- (2) L'aménagement littoral et portuaire,
- (3) Le milieu aquatique,
- (4) La surveillance et la gestion durable des Infrastructures.

□ **MAROC - Université Hassan II / HESTIM de Casablanca (UH2C)**

- Thématique :

- (1) Economie Gestion
- (2) Sciences et Technologies

□ **MAROC - Université Mohammed VI Polytechnique de Ben Guérir (UM6P)**

- Thématique :

- (1) Sciences pour l'ingénieur

□ **MAROC - Université Mohammed V de Rabat**

- Thématique :

- (1) Environnement, Milieux Littoraux Marins
- (2) Sciences et technologie
- (3) Santé
- (4) Sciences Humaines et Sociales

***LABORATOIRE D'ACCUEIL**

Nom du laboratoire d'accueil : LMPA

Nombre de HDR dans le laboratoire : 19

Nombre de thèses encadrées dans le laboratoire (rentrée 2017) : 8

Cotutelles en cours au sein du laboratoire : 9

Durée moyenne des thèses soutenues dans le laboratoire, sur la période 2013-2017 : 3 ans et 4 mois

ENCADREMENT

Nom, Prénom du directeur de laboratoire : Rosier Carole

Co-encadrement : Bourel Christophe

Nom, Prénom du directeur de thèse (si différent du directeur de laboratoire) : Rosier Carole

Nombre de doctorats en préparation sous la direction du directeur de thèse : 1

Avis détaillé du directeur de thèse :

Ce projet de thèse s'inscrit dans la continuité de nombreuses études menées depuis plus de 10 ans par une partie de l'équipe Analyse du LMPA en collaboration avec plusieurs laboratoires en France, au Liban et au Maroc. Ces études portent sur la modélisation mathématique et numérique de problématiques liées à la gestion des milieux littoraux ainsi qu'à celle des déchets.

Signature du directeur de thèse



Avis détaillé du directeur de laboratoire :

Le LMPA veut s'engager davantage dans le défi "Mer et Littoral". De ce fait, il encourage particulièrement ses membres à développer leurs activités de recherche sur des thématiques telles que la modélisation et le développement de méthodes numériques performantes avec des applications liées à la gestion du littoral. Ce projet de thèse rentre donc parfaitement dans la politique scientifique du LMPA.

Signature du directeur de laboratoire

Carole Rosier



PROJET DE THESE

Intitulé du projet de thèse : Impact de la topographie sur la modélisation des écoulements en eaux peu profondes

Domaine scientifique : Mathématiques appliquées

Résumé (1/2 page maxi.) :

Ce travail consiste en la modélisation mathématique et numérique des écoulements en eaux peu profondes en prenant en compte la topographie du milieu, qui jusqu'à présent a toujours été supposée horizontale. Cette approximation classique permet entre autre de considérer la charge hydraulique indépendante de la dimension verticale et est à la base de nombreux modèles actuellement utilisés. Cette étude est donc cruciale si l'on veut disposer de modèles utilisables dans des situations plus concrètes et beaucoup plus réalistes.

La stratégie générale de notre approche consiste à partir du modèle 3D avec termes d'échelle physiquement réalistes (en temps et en espace) puis de procéder à son upscaling pour lui substituer rigoureusement un modèle beaucoup plus réaliste et plus précis.

L'idée majeure est de rechercher une solution telle que la composante verticale de la vitesse admette un profil affine au voisinage des interfaces et des frontières du domaine d'étude (composante qui est supposée nulle dans l'approximation classique).

Une analyse mathématique du modèle sera faite en vue de lui appliquer une méthode numérique adaptée à ses spécificités. Une étape clef consistera en l'élaboration d'un code C++ rapide profitant au maximum de la nature indépendante des différents problèmes verticaux. Ce code sera ensuite implémenté sur la plateforme de calcul CALCULCO.

Projet de thèse (5 pages maxi.) :

Développer sur cinq pages :

- ***Le sujet de recherche choisi et son contexte scientifique***
- ***L'état du sujet dans le laboratoire et l'équipe d'accueil***
- ***Le programme et l'échéancier de travail***
- ***Les retombées scientifiques et économiques attendues***
- ***Les collaborations prévues et une liste de 10 publications maximum portant directement sur le sujet***

Le sujet de recherche choisi et son contexte scientifique

On s'intéresse à la description de l'écoulement de l'eau dans des aquifères peu profonds et dans des aquifères. *Dans chaque cas, nous avons besoin, pour une exploitation optimale des eaux*

douces souterraines, de modèles efficaces et précis pour simuler le déplacement du front d'eau salée dans les zones côtières ou la contamination de la nappe phréatique par des substances chimiques.

Un modèle classiquement utilisé est donné par les équations de Richards. Il s'agit d'un système parabolique non-linéaire, dégénéré et tridimensionnel ce qui rend sa résolution numérique difficile et exigeante d'un point de vue du temps de calcul. Récemment dans [1], C. Bourel, C. Rosier, M. Tsegmid (LMPA, ULCO) et C. Choquet (MIA, La Rochelle Université) ont proposé une nouvelle classe de modèles numériquement plus simples. Ces modèles permettent d'approcher la solution des équations de Richards 3d dans le cas où l'aquifère considéré est très large par rapport à sa profondeur. L'idée de chacun des modèles de cette classe est de coupler d'une part un écoulement purement vertical dans la partie supérieure de l'aquifère, typiquement entre le niveau du sol et une interface virtuelle h avec, d'autre part, un écoulement purement horizontal dans la partie saturée au fond de l'aquifère (sous le niveau h).

L'intérêt numérique est de remplacer la résolution complexe et coûteuse du modèle de Richards 3d original par celle d'un des modèles effectifs qui, bien que toujours non-linéaires et dégénérés, se réduisent au couplage d'un problème 2d avec une multitude de problèmes 1d (aussi nombreux que le nombre de degrés de liberté apparaissant dans la résolution numérique du problème 2d horizontal). Ils sont cependant indépendants et donc peuvent être résolus en parallèle.

L'idée de tels modèles couplé 1d-2d dans ce cadre n'est pas nouvelle [2,3]. La nouveauté ici est la présence de cette interface h caractérisant le couplage et dont le choix influe sur la précision de la solution par rapport à la solution du problème original. En particulier, un bon choix de cette interface semble donner de très bon résultats, même dans des domaines s'éloignant du cadre « peu profond » pour lequel la classe de modèles est justifiée. Cependant la détermination optimale de la profondeur de cette interface « h » peut s'avérer coûteuse en temps de calcul. Par ailleurs, l'approximation de Dupuit est légitime lorsque l'on observe des déplacements quasi-horizontaux (par exemple lorsque que l'épaisseur de l'aquifère est très faible par rapport à sa largeur et sa longueur et lorsque l'écoulement est loin des puits ou des sources). En revanche, ce point de vue échoue dans le cas de conditions plus drastiques notamment dans le cas de topographies moins régulières (correspondant aux fonds rocheux de l'aquifère). L'idée est d'adapter la stratégie suivie dans [1] pour laquelle les auteurs donnent une description précise des composantes dominantes de l'écoulement décrit par le système de Richards 3D. Le modèle effectif est obtenu en utilisant des développements asymptotiques à différentes échelles de temps et pour un rapport de l'épaisseur de l'aquifère sur ses dimensions horizontales tendant vers zéro. Une description affine de la vitesse effective de l'écoulement permettra d'obtenir un modèle encore précis dans des situations où la topographie est variable et très générale. Cette approche est totalement nouvelle et permet de s'affranchir du verrou que constituait l'approximation de Dupuit. Elle ouvre de nombreuses perspectives notamment pour des problématiques très générales liées au transport réactif dans les milieux poreux. En effet, ce modèle de transport pourra être couplé aux algorithmes développés par Safaa Al Nazer dans sa thèse (cf. [4]) simulant les réactions chimiques dans la partie insaturée de l'aquifère.

[1] C. Bourel, C. Choquet, C. Rosier and M. Tsegmid, Modelling of shallow aquifers in interaction with overland water, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 81, pp 727-751, 2020.

[2] M. F. Pikul, R. L. Street, and I. Remson, A numerical model based on coupled one-dimensional Richards and Boussinesq equations, *Water Resources Research*, vol. 10, no. 2, pp. 295--302, 1974.

[3] M. Abbott, J. Bathurst, J. Cunge, P. O'connell, and J. Rasmussen, An introduction to the european hydrological system - systeme hydrologique

européen, SHE, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, vol. 87, no. 1, pp. 61–77, 1986.

[4] S. Al Nazer, M. Jazar, C. Rosier, Convergence acceleration of iterative sequences for equilibrium chemistry computations, submitted to Computational Geosciences.

L'état du sujet dans le laboratoire et l'équipe d'accueil

Ce projet de thèse s'inscrit dans la continuité de nombreuses études menées depuis plus de 10 ans par plusieurs membres de l'équipe Analyse du LMPA en collaboration avec d'autres laboratoires en France, au Liban et au Maroc.

La procédure d'up-scaling de modèle de transport a été étudiée pour des topographies horizontales dans le cas des problèmes d'intrusion saline dans les aquifères côtiers ainsi que dans celui des échanges entre eaux de surface et eaux souterraines.

Ces études ont fait l'objet de 4 thèses soutenues et une thèse en cours :

- Ji Li, Université du Littoral-Cote d'Opale, (inscrit en octobre 2012, Thèse soutenue en octobre 2015).
Titre de la thèse : Analyse mathématique de modèles d'intrusion marine dans les aquifères côtiers.

- Abudawia Amel, Université du Littoral Cote d'Opale (inscrite en novembre 2012, Thèse soutenue en 20 décembre 2015).

Titre de la thèse : Analyse numérique d'une approximation éléments finis pour un modèle d'intrusion saline dans les aquifères côtiers.

- Mourad Aya, Thèse en cotutelle avec M. Jazar, Université Libanaise/ULCO (inscrite en octobre 2014, Thèse soutenue en décembre 2017).

Titre de la thèse : Identification de paramètres pour un problème d'intrusion saline. Comparaison avec l'approche stochastique.

- Mungherel Tsegmid, Université du Littoral-Cote d'Opale, thèse co-encadrée avec Christophe Bourel (inscrit en octobre 2016, Thèse soutenue en juin 2019).

Titre de la thèse : Analyse mathématique et numérique d'un modèle décrivant les échanges entre eaux de surface et eaux souterraines.

- Al Nazer Safaa, Thèse en cotutelle avec M. Jazar, Université Libanaise/ULCO (inscrite en novembre 2017, Soutenance de thèse prévue en décembre 2020).

Titre de la thèse : Modélisation du transport de nitrates dans les réserves d'eaux potables

Le programme et l'échéancier de travail

Les principales tâches correspondantes sont décrites ci-après.

2020/2021 : Upscaling : Mise à l'échelle du modèle 3D d'écoulements multi-fluides polyphasiques dans un aquifère libre au delà du premier ordre (obtention du modèle effectif et des modèles d'erreur, avec processus de dispersion, avec ou sans effet de capillarité).

2021/2022 :

- Analyse mathématique des modèles effectifs ;

- Élaboration d'approximations numériques de type éléments finis/ volumes finis.

2022/2023 :

- Mise au point des algorithmes de calcul insérant directement la stratégie ci-dessus pour pouvoir être implantés dans des codes classiques ;
- Réalisation des premiers tests numériques par rapport à des données terrain (par exemple en testant la fiabilité en temps long de l'approche sur un algorithme de gestion économique de la ressource en eau) ;
- Couplage avec des algorithmes *simulant les réactions chimiques*.

Les retombées scientifiques et économiques attendues*

Ce projet aura un impact dans de nombreux domaines notamment

- la modélisation du transfert des nitrates vers les réserves en eau potable
- l'intrusion marine dans les aquifères côtiers
- l'appréhension de l'élévation du niveau de la mer sur les zones côtières
- le contrôle des phénomènes de crue dus à la dynamique de la mer

Les collaborations prévues et une liste de 10 publications maximum portant directement sur le sujet

Collaborations :

- Catherine Choquet, Université de La Rochelle, Laboratoire Mia,
- Jérôme Carreyrou, Université Strasbourg, Laboratoire LhyGeS,
- Mustafa Jazar, Université Libanaise, Tripoli Liban,
- Najib Khalid, Ecole des Mines, Rabat,
- Jean Fromentin, Khalide Jbilou, Hassane Sadok, ULCO.

Références bibliographiques

- [1] M. Abbott, J. Bathurst, J. Cunge, P. O'connell, and J. Rasmussen, An introduction to the european hydrological system - systeme hydrologique europeen, SHE, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, vol. 87, no. 1, pp. 61-77, 1986.
- [2] C. Bourel, C. Choquet, C. Rosier and M. Tsegmid, *Modelling of shallow aquifers in interaction with overland water*, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 81, May 2020, pp 727-751.
- [3] J. Carrayrou, J. Hoffman, P. Knabner, S. Krautle, C. Dedieuleveult, J. Erhel, J. Van der Lee, V. Lagneau, M. Kern, L. Amir, K.U Mayer & K.T.B. McQuarrie K.T.B, *Comparison of numerical methods for simulating strongly nonlinear and heterogeneous reactive transport problems—the MoMaS benchmark case*. *Computational Geosciences*. 14, 483-502, 2010.
- [4] C. Choquet & A. Mikelic, *Rigorous upscaling of the reactive flow with finite kinetics and under dominant Peclet number*, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 21, 125-140, 2009.
- [5] C. Choquet, M.M. Diédhiou & C. Rosier, *Mathematical analysis of a sharp-diffuse interfaces model for seawater intrusion*, *J. of Diff. Equations*, 259, 3803-3824, 2015.
- [6] C. Choquet, J. Li & C. Rosier, *Global existence for seawater intrusion models: comparison between sharp interface and sharp-diffuse interface approaches*, *EJDE*, 126, 1-27, 2015.
- [7] C. Choquet & C. Rosier, *Effective models for reactive flow under dominant Péclet and Damköhler numbers: numerical simulations*, *Nonlinear Anal., Real World Applications*, 15, 345-360, 2014.

[8] A. Mourad, C. Rosier, A Nonlinear Optimization Method Applied to the Hydraulic Conductivity Identification in Unconfined Aquifer, *J. of Optimization Theory and Applications*, Vol 183, 705- 730, (2019)

[9] M. F. Pikul, R. L. Street, and I. Remson, A numerical model based on coupled one-dimensional Richards and Boussinesq equations, *Water Resources, Research*, vol. 10, no. 2, pp. 295--302, 1974.