

AO INSU 2019

Section “Océan-Atmosphère”

Porteur du projet **Arnaud Duran**, Institut Camille Jordan - UMR 5208
Université Claude Bernard Lyon 1
21 Avenue Claude Bernard, 69100 Villeurbanne

Intitulé du projet “Modélisation du déferlement et des effets rotationnels dans les modèles dispersifs fortement non linéaires”

Le projet est-il un nouveau projet : *Oui*

Le projet est-il une re-soumission : *Non*

Avez-vous soumis/comptez-vous soumettre le même projet ou un projet similaire à un autre AO INSU : *Non*

Avez-vous un co-porteur à ce projet : *Oui*

Gaël Richard - Laboratoire de Mathématiques (LAMA), UMR 5127 - Université de Savoie Mont-Blanc.

Le proposant a-t-il porté ou participé à un projet financé par le LEFE au cours des 3 dernières années ? *Oui*

Projet LEFE-MANU 2017-2018 intitulé “*UHAINA, un modèle communautaire pour la simulation des vagues extrêmes*”, porté par **Fabien Marche**.

Le projet UHAINA a pour objectif de développer une plateforme communautaire HPC dédiée à la simulation numérique en milieu littoral, en s'appuyant sur les dernières avancées les plus pertinentes et performantes en terme de modélisation, méthodes numériques, et stratégie d'implémentation. Certains aspects de recherche fondamentale ne sont pas abordés dans UHAINA et nous semblent suffisamment importants pour justifier cette nouvelle proposition. Le premier axe concerne le déferlement des vagues, pour lequel des résultats très prometteurs ont été obtenus très récemment, sur la base de nouveaux modèles prédictifs prenant en compte l'effet de la turbulence. Le deuxième axe concerne la prise en compte des effets de Coriolis et des interactions correspondantes. La nouvelle complexité des modèles obtenus justifie également le développement et l'analyse de nouvelles approches de discrétisation et d'algorithmes d'implémentation parallèle sur architectures hétérogènes, à la fois plus efficaces et aux propriétés dispersives adaptées, permettant d'apporter des réponses appropriées et concrètes en termes de fiabilité et d'efficacité opérationnelle des algorithmes, avec des potentialités de mise à profit au sein de UHAINA.

Mots - clés

Déferlement, modèles dispersifs, équations de Green-Naghdi, turbulence, méthodes d'ordre élevé, Galerkin discontinu, calcul GPU et hétérogène, stabilité linéaire, Coriolis, érosion

1 Intérêt scientifique, contexte et état de l’art

Depuis plusieurs décennies, de nombreux travaux sont menés dans la perspective d’acquiesir une meilleure représentation des mécanismes hydrodynamiques en océanographie, notamment en zone côtière. De nombreux enjeux environnementaux de premier plan sont aggravés par les changements climatiques et l’augmentation de la fréquence des événements extrêmes tels que les grandes tempêtes. Des infrastructures ou des habitations sont menacées à terme, ce qui motive une réponse des pouvoirs publics. En France par exemple, l’érosion est un problème préoccupant pour de nombreuses côtes, notamment dans les départements de la Gironde, des Landes ou encore des Pyrénées-Atlantiques. Le développement de dispositifs permettant à la fois une protection efficace et une perturbation minimale de l’environnement nécessite le développement de modèles fiables, précis et prédictifs et de plateformes numériques performantes.

En dépit de constants progrès techniques, la résolution directe des équations de *Navier-Stokes* reste toujours hors de portée d’un point de vue opérationnel. Dans ce contexte, l’intérêt se porte sur des modèles simplifiés, moins coûteux numériquement. C’est ici qu’interviennent des modèles intégrés sur la verticale tels que les équations de *Saint-Venant* (SV), ou des modèles plus précis de type *faiblement dispersifs* (*Boussinesq* ou *Serre-Green Naghdi* (SGN)). Ces systèmes d’équations permettent, par exemple, de capturer les interactions entre la dispersion et les fortes non-linéarités induites par les variations du fond à l’approche du rivage.

Depuis plusieurs années, les membres du projet étudient différents aspects de modélisation autour de ces équations ([Richard & Gavriluk, 2015, Bonneton *et al.*, 2011, Lannes & Marche, 2015]), afin d’en améliorer les propriétés et la mise en œuvre numérique. Ces travaux ont été accompagnés par le développement de méthodes numériques innovantes 1D [Duran & Marche, 2015, Di Pietro & Marche, 2018] et 2D [Duran & Marche, 2017] capables de répondre à des exigences opérationnelles (stabilité, ordre de précision arbitraire, flexibilité géométrique, ...). À travers le projet UHAINA, le premier code HPC dédié à la résolution des équations SGN sur maillages non-structurés est proposé. UHAINA permet de surmonter un certain nombre de limitations observées dans les autres projets et travaux de recherche concurrents (telles l’utilisation de modèles *faiblement non-linéaires* [Kazolea *et al.*, 2014, Roeber *et al.*, 2010, Ricchiuto and Filippini, 2014]) ou l’utilisation de méthodes de type Différences-Finies à large stencil sur maillages à topologie cartésienne pour la partie elliptique du modèle (tel FUNWAVE-TVD [Shi *et al.*, 2012] ou Basilisk [Popinet, 2015]). En effet, les méthodes développées sur maillages cartésiens présentent une faible flexibilité en terme d’approximation de géométries complexes. Même si des techniques de type quadtree et octree, ou de type Chimera, peuvent être mises en œuvre (voir par exemple [Kao *et al.*, 1994]), elles sont délicates à automatiser, nécessitant un haut degré d’intervention et de calibration de l’utilisateur et ne permettent pas de garantir un ordre d’approximation spatial suffisamment élevé aux frontières entre les diverses régions de raffinement. En comparaison, l’utilisation de maillages non-structurés adaptatifs a atteint un très haut niveau de flexibilité, permettant d’adapter efficacement les maillages aux géométries considérées, ainsi qu’aux variations locales de topographie (voir par exemple [Park *et al.*, 2016] pour une discussion sur le potentiel et les défis actuels en génération de maillage). Dans cette optique, de nouvelles approches prometteuses de type éléments-finis ont été développées (voir [Duran & Marche, 2017] et [Di Pietro & Marche, 2018] dans le cadre du projet LEFE-MANU UHAINA), introduisant des stratégies de discrétisation directement généralisables aux maillages non-structurés généraux bi-dimensionnels, tout en permettant d’atteindre un ordre arbitraire d’approximation spatiale et une forte propension à la parallélisation.

Aujourd’hui, dans le cadre de ce nouveau projet, nous proposons d’étendre ces approches en terme de modélisation et de développement de formulations discrètes afin d’étendre le domaine

de validité des modèles SGN et de construire des méthodes numériques adaptées à ces nouvelles problématiques. Plus spécifiquement :

1. Modélisation du déferlement : état de l’art et verrous scientifiques.

Nous nous intéressons ici à la modélisation du déferlement des vagues, de la turbulence et de la dissipation d’énergie associée dans les modèles asymptotiques shallow water de type SGN. En effet, les modèles faiblement dispersifs couramment utilisés conservent l’énergie et sont donc intrinsèquement inaptes à décrire le déferlement et les phénomènes dissipatifs associés. Les différentes approches proposées dans la littérature pour gérer le déferlement se répartissent en deux catégories.

La première stratégie consiste à rajouter un terme de viscosité artificielle du second ordre dans les équations, nécessitant un calibrage *ad-hoc*, afin de modéliser la dissipation d’énergie observée au cours du déferlement ([Zelt, 1991, Madsen et al., 1997, Wei et al., 1999, Kennedy et al., 2000]). La turbulence n’est pas résolue mais seulement modélisée par une hypothèse de viscosité turbulente. La seconde stratégie (utilisée dans nos travaux [Tissier *et al.*, 2012, Duran & Marche, 2015, Duran & Marche, 2017]), communément appelée *switching*, consiste à supprimer les termes dispersifs au voisinage des vagues déferlées, laissant seulement la partie hyperbolique du modèle (Saint-Venant) résolue localement. Cette approche permet de modéliser les vagues déferlées comme des chocs et d’utiliser la dissipation naturelle à travers le choc comme mécanisme de stabilisation. La turbulence n’est pas prise en compte et l’effet de dissipation turbulente est obtenu par les discontinuités.

Bien que ces stratégies permettent de stabiliser les calculs dans un premier temps, elles nécessitent la calibration empirique d’un certain nombre de paramètres (géométriques, physiques, numériques), qui peuvent varier grandement selon les régimes d’écoulement étudiés. Par ailleurs, les discontinuités introduites sur le modèle par l’ajout ou la suppression de termes génèrent des instabilités de transition, qui peuvent se propager et détériorer considérablement la qualité des approximations et nuire à la bonne convergence de l’approximation. Ces aspects importants ont fait l’objet d’une récente étude par des membres du projet UHAINA [Kazolea and Ricchiuto, 2018], pointant clairement les limitations de ce type de méthodes.

2. Effets de rotation et sphéricité : état de l’art et verrous scientifiques.

Nous proposons d’améliorer encore le domaine de validité des modèles et outils intégrés dans UHAINA avec la prise en compte des effets de rotation dans les équations SGN, tout d’abord par ajout de termes de Coriolis correctement dimensionnés, puis dans un second temps par prise en compte des effets de sphéricité, qui deviennent particulièrement importants dans l’étude des phénomènes de propagation sur des domaines étendus. Ce type de modèles SGN étendus a très rarement été mis en oeuvre (voir par exemple [Khakimzyanov et al., 2017], [Pearce and Esler, 2010]), et des études approfondies concernant la construction de formulations discrètes adaptées demeurent nécessaires, les écoulements associés s’inscrivant dans un mécanisme de circulation global, soumis notamment à l’influence des aspects rotationnels. Il est en effet bien connu que le choix des méthodes de discrétisation en espace et en temps est un problème crucial car la stabilité, la qualité et la précision des solutions numériques en dépendent. Des méthodes inappropriées peuvent générer des oscillations et des solutions parasites (non physiques) qui portent préjudice à la qualité de l’approximation. Ces difficultés ont été peu à peu comprises en 2D, en analysant les équations de Saint-Venant, et des solutions ont été proposées. L’extension de ces approches au cas des équations SGN associant des effets dispersifs, un modèle de résolution de la turbulence, et des effets de Coriolis né-

cessite donc un important travail d'analyse, notamment au niveau de la partie hyperbolique.

3. Implémentation sur architecture hétérogènes.

Bien que ces modèles simplifiés soient moins coûteux en temps de calcul que la résolution directe des équations de Navier Stokes, disposer de codes performants, robustes et fiables reste nécessaire pour la simulation de problèmes avec des données et des géométries réalistes. L'évolution actuelle des calculateurs faisant apparaître des architectures de plus en plus hétérogènes (CPU/GPU/many core), il est important de développer des codes de calcul pouvant exploiter cette hétérogénéité. Des outils et méthodologies d'implémentation facilitant le développement de codes sur ce type d'architecture commencent à apparaître. Ils permettent par exemple de sélectionner de façon dynamique, durant l'exécution du code, le type de ressource le plus approprié pour effectuer certaines tâches suivant la disponibilité de ces ressources. On retrouve aussi ce type d'architecture sur les machines personnelles. Notre troisième objectif sera donc d'investiguer ces nouveaux paradigmes d'implémentation, afin de produire un code de calcul flexible et capable d'exploiter au mieux la diversité des ressources disponibles sur une architecture donnée.

Le seul code de calcul disponible de type Boussinesq, adapté aux architectures GPU, est à notre connaissance [Celeris](#) [Tavakkol and Lynett, 2017] qui cumule les limitations en terme de choix de modèle (équations faiblement non-linéaires) et de méthodes numériques (maillages cartésiens sans raffinement adaptatif et différences-finies).

2 Objectif général et questions de recherche traitées

Le projet s'articulera autour des trois axes de travail suivants :

- **Modélisation (déferlement, turbulence, rotation/sphéricité)**

L'approche envisagée présente l'avantage décisif par rapport aux approches existantes de résoudre explicitement la turbulence et de disposer d'une grandeur représentant l'intensité de la turbulence dans la vague. À travers la dérivation et l'analyse d'un nouveau modèle, nous tendons à proposer une méthode totalement prédictive, indépendante des paramètres de discrétisation, des schémas utilisés ou bien des régimes d'écoulement. L'un des points forts de la méthode est qu'elle est naturellement extensible en 2D et sur tout type de géométries. Les premiers travaux en 1D et 2D ont fait émerger des pistes pour l'amélioration du modèle, notamment dans le but de réduire ou d'affiner les choix des paramètres de déferlement. Ces travaux s'effectueront avec le support d'une importante campagne de validation, que nous comptons prolonger afin d'explorer les différents champs d'application du modèle. À terme, une perspective de premier plan serait d'exploiter cette approche pour modéliser le transport sédimentaire cross-shore afin d'être capable de prédire l'érosion des côtes ou l'accrétion. Ce modèle permettra d'aider au développement ultérieur de dispositifs efficaces de protection des côtes contre l'érosion. Le développement parallèle du code fournit un cadre parfaitement approprié pour la validation du modèle car, au delà de l'exploitation de son potentiel calculatoire, il permettra d'étudier le comportement de l'approche envisagée pour une vaste gamme de méthodes numériques d'ordre de résolution arbitraire, et sur plusieurs types de maillages.

- **Nouvelles formulations discrètes**

Un important travail d'analyse devra nous permettre de construire de nouvelles formulations discrètes adaptées d'une part à l'évolution du modèle SGN étendu, et d'autre part adapté à l'implémentation parallèle sur architectures hétérogènes. En particulier, il est capital de trouver des flux numériques stables, capables de respecter la physique des écoulements considérés. Les enjeux sont d'autant plus importants que l'on ambitionne une description fine de

la turbulence et de la force de Coriolis, et ce sur tous types de maillages. Ces effets viennent enrichir la partie hyperbolique du système, rendant l'analyse de stabilité plus complexe. Dans cette perspective, les méthodes type *Discontinuous Galerkin (DG)* fournissent un cadre de travail privilégié dans la mesure où elles offrent une grande flexibilité géométrique et un ordre de précision arbitraire en espace. Elles disposent en outre de propriétés de stabilité intrinsèques qui peuvent être exploitées pour prévenir l'apparition de modes parasites et garantir la robustesse des approximations. En particulier, l'étude de nouvelles techniques de stabilisation, inspirée par les approches de type pénalisation interne ou formulation hybride HDG, devra être menée.

- **Développement, benchmarking et validation.**

Le dernier aspect du projet vise le développement d'un code de calcul CPU/GPU dédié à la simulation d'une classe générale de modèles d'écoulement à surface libre. L'objectif principal est d'apporter des réponses concrètes reliées aux exigences opérationnelles modernes (précision, flexibilité géométrique, rapidité) tout en favorisant l'accessibilité et une certaine souplesse dans le choix des méthodes d'approximation. Aujourd'hui, la plupart des outils sont en place, et nous comptons exploiter les avancées techniques les plus récentes pour construire un code de calcul répondant à ce cahier des charges, capable d'exploiter au mieux les capacités des machines. Entre autres, ce code servira de base pour approfondir la campagne de validation du nouveau modèle de déferlement que nous proposons. Il permettra de multiplier les validations numériques, des comparaisons précises avec les modèles existants ou bien des données expérimentales. Sur un plan numérique d'autre part, il constituera un outil précieux pour étayer nos résultats de stabilité, ou bien encore évaluer avec précision, et en des temps raisonnables, l'efficacité de nos algorithmes.

3 Plan de recherche, méthodologie et calendrier de réalisation

3.1 Modélisation du déferlement : une nouvelle approche

Depuis quelques années, des travaux s'orientent vers une prise en compte de la turbulence afin de mieux gérer le déferlement. Une première proposition a été formulée par [Gavrilyuk et al., 2016] dans le cadre d'un modèle à deux couches, et plus récemment, une première version d'un modèle à une couche résolvant explicitement la turbulence a été dérivée [Kazakova & Richard, 2018], avec des résultats très prometteurs. L'approche utilisée peut être décrite comme un modèle de simulation des grandes structures de la turbulence, moyenné sur la profondeur, avec une coupure dans la zone inertielle. Sur la base de ces travaux, récemment étendus en 2D [Richard et al., 2018], nous visons à poursuivre le développement d'une approche prédictive pour étudier et décrire avec précision le mécanisme de déferlement et à étendre la modélisation au transport sédimentaire pour lequel la résolution explicite de la turbulence est un atout considérable. En effet, des modèles prédictifs de processus côtiers doivent modéliser correctement les variations spatiales et temporelles de la turbulence et leur relation avec l'écoulement moyen pour prédire convenablement les taux et la direction du transport de sédiment [Ting and Kirby, 1994]. Sur un plan structurel, un autre point fort de la stratégie de modélisation est qu'elle conduit à une version très proche des équations SGN. Outre les avantages en termes d'efforts d'implémentation, le modèle permet donc de s'affranchir des limitations applicatives des équations faiblement non linéaires.

3.1.1 Verrous scientifiques

Dans tous les modèles de vagues côtières de type Boussinesq, le critère de déferlement joue un rôle crucial et constitue en même temps un inconvénient majeur de ce type d’approche. Il doit faire l’objet d’un long processus de calibration et, en fin de compte, nuit à la robustesse et au caractère prédictif du modèle. L’approche entamée par [Kazakova & Richard, 2018] n’est pas très loin d’une suppression complète de tout critère de déferlement grâce à la présence de l’*enstrophie*, grandeur qui modélise la turbulence. Cette approche est prometteuse à cet égard et doit être poursuivie. Le premier verrou scientifique à lever est donc la suppression du critère de déferlement, ce qui constituera un progrès majeur dans la modélisation. A plus long terme, une perspective à explorer est la modélisation fine du transport sédimentaire dans le cadre d’un modèle moyenné sur la profondeur. La difficulté vient notamment de la mise en jeu de plusieurs échelles de temps et d’espace et de la rétroaction des évolutions de plage sur la dynamique des vagues.

3.1.2 Programme de recherche

Le modèle développé résulte d’une moyennisation sur la profondeur d’eau des équations du modèle de simulation des grandes échelles de la turbulence avec coupure dans la zone inertielle. Cette méthode permet de réduire de un la dimensionnalité du problème et d’incorporer les conditions aux limites dans les équations du modèle, et ainsi de diminuer considérablement le temps de calcul. La turbulence de petite échelle est modélisée par une hypothèse de viscosité turbulente alors que la turbulence de grande échelle (d’une échelle de l’ordre de la profondeur), anisotrope et contenant l’énergie turbulente, est résolue explicitement et intervient dans le modèle par le tenseur anisotrope d’*enstrophie*. Les résultats préliminaires nous encouragent à poursuivre la phase de validation, notamment à travers les expériences de [Ting and Kirby, 1994], ou encore des applications aux trains de vagues. Du fait de l’importance de la turbulence et de son interaction avec l’écoulement moyen pour le transport sédimentaire cross-shore, la présence dans le modèle d’une grandeur prenant en compte la turbulence sera un avantage considérable pour décrire la dynamique sédimentaire. La composante *modélisation* du projet se fera donc autour des points suivants :

- Suppression complète du critère de déferlement et validation sur la simulation de vagues irrégulières ;
- Application aux trains de vagues ;
- Étude des déferlements glissants (*spilling*) et plongeants (*plunging*) en ce qui concerne le transport de turbulence et comparaison avec les expériences de [Ting and Kirby, 1994] ;
- Modélisation du transport sédimentaire cross-shore et validation.

3.2 Méthodes numériques

3.2.1 Verrous scientifiques

La simulation numérique des équations de Saint-Venant montre la présence d’oscillations parasites significatives dans le champ de pression lorsque les variables vitesse et pression (généralement dans L^2 ou H^1 sur des triangles ou des quadrangles) sont discrétisées de manière identique en utilisant des dérivées centrées, et ce quelle que soit la méthode numérique employée [Walters and Carey, 1984, Le Roux, 2012]. Ces “modes parasites pression” se superposent aux modes physiques et empêchent l’unicité de la solution discrète en pression. Une façon de les éviter est d’augmenter le nombre d’équations de quantité de mouvement discrètes par rapport au nombre d’équations de continuité discrètes [Brezzi and Fortin, 1991, Le Roux *et al*, 2007]. Cependant, ce déséquilibre du nombre d’équations génère la présence de modes inertiels parasites lorsque le terme de

Coriolis n'est pas négligé [Le Roux, 2012]. Le choix des vitesses dans l'espace $H(div)$ a également été exploré. Il conduit à des modes parasites dans l'approximation numérique de la partie inertielle des ondes d'inertie-gravité. L'emploi d'un maillage suffisamment fin permet en général de diminuer suffisamment l'amplitude de ces oscillations. Par contre la plupart des éléments finis construits dans l'espace $H(div)$ génèrent des discontinuités et/ou des branches additionnelles parasites pour la fréquence discrète. Pour pouvoir satisfaire l'ensemble des contraintes visant à éliminer les modes parasites non physiques, une certaine forme de stabilisation numérique semble nécessaire. Dans cette direction les méthodes DG, qui généralisent les méthodes Volumes Finis classiques, possèdent de nombreux atouts. En effet la viscosité numérique introduite dépend généralement de la physique sous-jacente du problème étudié, via les valeurs/vecteurs propres du système, et un haut degré de précision peut être obtenu sans porter préjudice à la stabilité de la solution numérique. Dans deux articles soumis, Le Roux et ses co-auteurs ont développé des méthodes DG superconvergentes avec des éléments non conformes linéaires.

Les méthodes de type DG introduites récemment dans [Duran & Marche, 2017] et [Di Pietro & Marche, 2018], et basées sur des techniques de discrétisation non-conformes avec éléments discontinus, sont les premières à autoriser des approximations des équations SGN sur maillages non-structurés généraux. Nous avons montré en particulier que l'utilisation de méthodes à pénalisation interne permettait d'obtenir une très grande robustesse par rapport à la discontinuité des approximations des sous-modèles et la présence de très forts gradients en présence de déferlement. De plus, l'utilisation d'éléments d'ordre très élevé exhibe d'excellentes propriétés de conservation de l'énergie en temps long. L'utilisation de telles approches mène toutefois à une très forte augmentation du nombre de degrés de liberté, et donc du temps de calcul. Par ailleurs certains aspects demeurent encore mal compris, tels l'influence du choix des termes de pénalisation sur la qualité de l'approximation, notamment en terme de génération de modes parasites purement numériques, ou encore l'étude du conditionnement des systèmes linéaires générés et la sensibilité aux erreurs d'arrondis associée à l'utilisation d'éléments d'ordre très élevé. Il n'existe pas encore, à notre connaissance, de formalisme discret permettant d'approcher les équations de Green-Naghdi avec terme de rotation et sphéricité sur des maillages non-structurés.

3.2.2 Programme de recherche

Nous proposons, dans le cadre de ce projet, de construire de nouvelles techniques d'approximation des équations SGN [Lannes & Marche, 2015], SGN étendu avec déferlement [Kazakova & Richard, 2018], puis SGN avec rotation/sphéricité, reposant sur les méthodes DG récentes et *Hybridized Discontinuous Galerkin (HDG)* développées par les membres du projet. De telles approches devront permettre de réduire le nombre de degrés de liberté impliqués dans les formulations discrètes, d'assurer une très grande robustesse et une excellente précision d'approximation, des propriétés de super-convergence associées à des techniques de post-processing adaptées, ainsi qu'une très haute flexibilité associée à la discontinuité de l'approximation et la capacité à gérer naturellement des maillages non-structurés généraux, possiblement non conformes, ainsi que le raffinement ou l'agrégation d'éléments. Par ailleurs, la localité de l'approximation permettra de mettre en oeuvre des techniques élaborées d'implémentation hybrides parallèles.

Nous prévoyons également d'étudier quantitativement les propriétés dispersives des méthodes discontinues utilisées afin de mieux comprendre l'impact du choix des termes de stabilisation sur la qualité d'approximation et la stabilité et d'assurer une bonne reproduction des modes d'équilibre géostrophique dans le cas des équations avec termes de rotation, tout en réduisant la génération de modes parasites numériques. Nous mènerons cette analyse à travers l'ajout progressif des termes turbulents et/ou de sphéricité dans le modèle, en mesurant l'impact de chacun de ces termes sur les modes numériques de la formulation. Ces études innovantes des propriétés de dispersion numérique des formulations discrètes discontinues d'ordre élevé pour SGN devraient en particulier être au coeur d'un projet mené lors de l'édition 2019 du CEMRACS, dédiée à l'étude numérique

et théorique des écoulements géophysiques et que les membres de ce projet co-organisent.

3.3 Implémentation sur architectures hybrides

Les machines actuelles et futures sont composées de CPU et de plus en plus d'un ou plusieurs GPU. Sur ce constat, écrire un code capable de s'adapter automatiquement aux ressources de calcul disponibles devient un atout majeur dans la recherche de performance. Le code peut alors être exécuté aussi bien sur un ordinateur personnel que sur un petit cluster de laboratoire disposant de plusieurs nœuds de calcul, ou bien encore que sur un mésocentre disposant de CPU et de GPU. Des logiciels facilitant le développement de codes capables de s'adapter dynamiquement aux ressources disponibles commencent à émerger. On peut citer notamment les logiciels [StarPU](#) et [PaRSEC](#). Ce sont des bibliothèques de programmation par tâche. Les parties pouvant être exécutées sur CPU ou GPU sont écrites sous forme de petites tâches et les bibliothèques répartissent ensuite l'exécution de ces tâches sur les ressources disponibles à ce moment-là.

3.3.1 Verrous scientifiques

Un des enjeux de ce projet est d'écrire un code de calcul suffisamment général permettant de résoudre efficacement les modèles développés. Au stade actuel, très peu de codes dédiés aux équations dispersives sont disponibles sur ce type d'architectures. Les difficultés rencontrées en terme d'implémentation mènent généralement à un compromis qui se traduit par une limitation sur les modèles considérés, les méthodes d'approximation et les types de maillages. Les modèles développés dans ce projet ont en partie vocation à s'affranchir de ces restrictions.

Le code proposé sera capable d'exploiter la nature hétérogène des architectures de calcul modernes par le biais d'une bibliothèque comme StarPU ou bien PaRSEC. Le calcul hétérogène étant encore assez nouveau, les bibliothèques facilitant le développement sur de telles architectures le sont donc encore plus. Elles ne sont donc pas encore complètes, demandent une très bonne compréhension de leur fonctionnement, sont amenées à changer régulièrement et n'ont pas encore de documentation précise. Ceci rend leur utilisation complexe et constitue un verrou important pour le développement du code.

3.3.2 Programme de travail

Nous prévoyons de réaliser un code prototype qui servira de laboratoire de test pour la mise en oeuvre des nouveaux paradigmes d'implémentation précédemment évoqués. Ce prototype sera mis à disposition sur le PLMLab (gitlab) du GdS Mathrice et pourra servir ultérieurement de base de travail à de futures extensions ou créations de branches séparées et dédiées GP-GPU de UHAINA. Le fait de développer le code pour qu'il s'adapte automatiquement à l'architecture matérielle sur laquelle il est exécuté le rend disponible à un plus grand nombre de chercheurs, ingénieurs ou toute personne souhaitant l'utiliser

L'objectif de développement du code est donc d'écrire des versions CPU et GPU de certaines tâches de calcul et de laisser des bibliothèques comme StarPU ou PaRSEC appeler la version la plus appropriée suivant les ressources disponibles durant l'exécution. Pour pouvoir réaliser cela, un gros travail de documentation sera nécessaire pour comprendre exactement comment fonctionnent ces bibliothèques, si elles permettent réellement d'obtenir des gains en terme de temps de calcul et si leur utilisation est aisée ou non. Il sera alors possible de faire le choix le plus adapté pour le code de ce projet. Un des avantages ici est qu'il est possible de développer dans un premier temps un code de calcul comprenant uniquement des tâches CPU. Une fois qu'une tâche est validée, il est possible d'implémenter sa version GPU. Le développement se fera donc au fur et à mesure en ajoutant de plus en plus de tâches et en commençant par les versions CPU qui sont les plus simples à écrire. Le code de calcul s'enrichira donc progressivement tout en restant fonctionnel en permanence.

Concernant la validation du code, un système d'intégration continue sera mis en place sur le gitlab de Mathrice permettant d'effectuer des tests unitaires à chaque commit sur le dépôt git. Ceci permettra de vérifier au maximum que les changements apportés n'introduisent pas de bug dans le code. Dans un premier temps, de nombreux tests unitaires seront ajoutés pour tester chaque fonctionnalité du code. C'est un travail qu'il est important de faire en parallèle du développement du code. Dans un second temps, une fois que le code sera capable de simuler des cas test réels, des tests plus lourds seront ajoutés au processus d'intégration continue afin de comparer les résultats obtenus avec des résultats expérimentaux ou provenant d'autres codes de calcul, autorisant ainsi une validation régulière des modèles développés au cours du projet. Ces objectifs requièrent la possibilité d'avoir un accès direct à un noeud de calcul doté d'un GPU performant, notamment pour avoir une réactivité immédiate aux difficultés rencontrées durant les différentes phases de développement. Cela permettra en outre d'ajouter aisément des tests sur GPU au processus d'intégration continue.

Calendrier prévisionnel

Année Trimestre	2019			2020		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
A : Modèle de déferlement						
1 - Suppression du critère de déferlement						
2 - Application aux trains de vagues						
3 - Déferlements glissants/plongeants						
4 - Modélisation du transport sédimentaire						
B : Construction du code						
1 - Intégration continue : tests de base						
2 - Intégration continue complète						
3 - Partie hyperbolique						
4 - Partie dispersive						
5 - Mise en place GPU						
6 - Premiers résultats opérationnels						
7 - Validation et diffusion						
C : Analyse et méthodes numériques						
1 - Stabilité, analyse linéaire (1d, 2d)						
2 - Flux numériques						
3 - Etude des solveurs linéaires						
4 - Comparaison des méthodes, H/p convergence						

4 Résultats attendus

Concernant le déferlement, nous tendons vers la construction d'un modèle entièrement prédictif, grâce notamment à la suppression du critère de déferlement. Une fois la campagne de validation terminée, cette technologie, extensible en 2D sur géométries quelconques et très simple à implémenter, pourra être utilisée à des fins opérationnelles. Par ailleurs, La modélisation du transport sédimentaire cross-shore pourra servir de base à des études ultérieures plus complètes, incluant par exemple les processus longshore et des échelles de temps plus grandes et susceptibles d'aboutir à des dispositifs innovants de protection des côtes contre l'érosion.

Dans un premier temps, la phase de développement permettra d'intégrer cette technologie dans un modèle numérique dédié aux équations dispersives fortement non linéaires. Les travaux

d'analyse de stabilité, principalement conduits autour de la partie hyperbolique du système permettront de dériver une classe de formulations discrètes capables de respecter la physique du problème, notamment en présence des termes de rotation. En retour, l'exploitation du code devrait faire apparaître des réponses concrètes quant au choix des méthodes numériques, que ce soit en terme de précision ou de coût calculatoire. D'autre part, il servira de base à une étude comparative de différents modèles d'écoulement utilisés pour la propagation des vagues. Il s'agit là aussi d'une opportunité de recueillir des informations précieuses, ayant vocation à être diffusées et exploitées au sein de la communauté.

Les modèles et méthodes numériques développées au cours de ce projet fournissent un cadre approprié pour la mise en place d'un schéma sur architectures hétérogènes, tout en s'affranchissant des restrictions sur le choix des géométries ou des modèles actuellement rencontrées sur ce type de support. Ces deux années de travail aboutiront à la production d'un prototype de code de calcul capable d'exploiter au maximum les ressources hétérogènes des machines. Les évolutions futures des *tasks schedulers* utilisés devront permettre de suivre les évolutions matérielles futures des architectures matérielles. A terme, nous comptons déployer ces nouvelles technologies au sein de UHAINA, afin d'étudier les améliorations concrètes pouvant être apportées sur des plateformes opérationnelles.

Des travaux de communication ont déjà été initiés à travers plusieurs séminaires et conférences, au sein de différentes communautés (mécanique des fluides et ingénierie côtière (conférence B-Waves 2018, 16èmes Journées de l'Hydrodynamique), mathématiques appliquées (workshop SHARK-FV 2017, Colloque Franco-Roumain de Mathématiques Appliquées 2018)). La diffusion de ces travaux se poursuivra à travers les conférences et autres activités mentionnées dans la section §5.3.

5 Ressources

5.1 Liste des participants (par ordre alphabétique)

- **Arnaud Duran (porteur du projet)** - *Maître de conférences à l'Institut Camille Jordan (ICJ), UMR 5208 - Université Claude Bernard Lyon 1.*

Analyse et simulation numérique - Durant sa thèse, Arnaud Duran a développé des outils numériques destinés à la simulation des équations Shallow Water et des modèles dispersifs en vue d'applications essentiellement destinées à l'océanographie et l'hydraulique des écoulements en rivière. Il a notamment proposé, en collaboration avec F. Marche, un solveur DG 2D sur maillage non structuré pour la simulation d'équations dispersives fortement non linéaires [Duran & Marche, 2017], très récemment étendu à un nouveau modèle de déferlement [Richard *et al*, 2018].

Taux de participation : **40 %**

Implication (voir calendrier prévisionnel) : tâches **A1-3 ; B1,3,6,7 ; C3,4**

- **Benoît Fabrèges** - *Ingénieur de Recherche à l'Institut Camille Jordan (ICJ), UMR 5208 - Université Claude Bernard Lyon 1.*

Calcul Hautes Performances, analyse numérique - Durant sa thèse, Benoît Fabrèges a développé une méthode d'ordre élevé de type domaine fictif pour la sédimentation de billes rigides immergées dans un fluide visqueux [Fabrèges *et al*, 2013]. Il a écrit un code de calcul parallèle (MPI) en C++ ayant reçu le label **C3I** et permettant de simuler de tels problèmes avec cette méthode de prolongement régulier. Il a par la suite participé au

développement du code parallèle FELiScE de l'équipe INRIA REO dans lequel il a notamment implémenté une méthode de type Nitsche-XFEM pour des problèmes d'interactions fluide-structures minces (interfaces) [Alauzet *et al*, 2016].

Taux de participation : **50 %**

Implication : **B1-7 ; C3,4**

- **Daniel Le Roux** - *Professeur des Universités à l'Institut Camille Jordan (ICJ), UMR 5208 - Université Claude Bernard Lyon 1.*

Analyse et méthodes numériques des équations aux dérivées partielles - Spécialiste de l'étude de problèmes spectraux (opérateurs discrets) et de l'influence des schémas numériques sur des EDP singulières, notamment les équations de Saint-Venant. Il a introduit plusieurs nouveaux schémas pour les méthodes d'éléments finis et de Galerkin discontinue. Il a également montré l'existence de solutions de modèles couplés Saint-Venant / sédimentation et résolu des problèmes de contrôle frontière des équations de Navier-Stokes en incluant directement la loi de contrôle dans la formulation variationnelle. Il est auteur et co-auteur de plus de 40 articles dans des revues à comité de lecture, et a obtenu de nombreux financements depuis 2000, tant au Canada qu'en France.

Taux de participation : **30 %**

Implication : **B3,4,6 ; C1,2,4**

- **Fabien Marche** - *Maître de Conférences à L'Institut Montpellierain Alexander Grothendieck (IMAG), UMR 5149 - Université de Montpellier.*

Modélisation, analyse et simulation numérique - Spécialiste de la modélisation et simulation numérique des écoulements à surface libre, auteur de plus de 25 articles dans des revues à comité de lecture, il a participé à plus d'une dizaine de projets de recherche nationaux et internationaux ces 10 dernières années.

Taux de participation : **30 %**

Implication : **B2,3,5-7 ; C1-4**

- **Gaël Richard (co-porteur du projet)** - *Professeur agrégé de physique en disponibilité, Ingénieur de Recherche au Laboratoire de Mathématiques (LAMA), UMR 5127 - Université de Savoie Mont-Blanc.*

Mécanique des fluides, hydraulique à surface libre, modélisation - Durant sa thèse de doctorat, Gaël Richard a développé un nouveau modèle hyperbolique pour l'hydraulique à surface libre. Ces équations permettent de décrire avec une excellente précision les écoulements rapidement variés comme les ressauts hydrauliques [Richard & Gavriluk, 2013] et les roll waves [Richard & Gavriluk, 2012]. Par la suite, il s'est aussi intéressé aux effets dispersifs [Richard & Gavriluk, 2015] et aux films minces visqueux avec capillarité.

Taux de participation : **40 %**

Implication : **A1-4 ; B6-7**

5.2 Co-financements attribués, ou en cours d'attribution, ou demandés, dans le cadre d'autres programmes

Les deux financements suivants ont été attribués par l'ANR NABUCO

- ▷ Projet CEMRACS (15 juillet - 23 août 2019) : 6000 € (coût total : 12000€)
- ▷ Workshop NumWave (décembre 2019) : 6000 € (coût total : 12000 €)

5.3 Ressources demandées pour la réalisation du présent projet

- Fonctionnement (*à détailler et à justifier poste par poste pour toute la durée du projet. Ceci inclut notamment les fournitures, consommables, publications, ...*)

- ▷ Achat de livres : 1000 €
- ▷ Frais de publication : 1000 €

- Missions (*à détailler et à justifier pour toute la durée du projet*)

Déplacements

- ▷ Réunions d'avancement : 2000 €
- ▷ Conference SHARK-FV - 2019 et 2020 - Portugal : 4×1500 €
- ▷ Conference ISOPE - juin 2019 - USA : 2000 €
- ▷ Congrès mondial de l'IAHR - septembre 2019 - Panama : 2000 €
- ▷ Autres congrès ou conférences (dont HYP 2020 - Europe) : 2000 €

Organisation/Encadrement *items co-financés pour moitié par l'ANR NABUCO (§5.2) :*

- ▷ Encadrement d'un projet CEMRACS (15 juillet - 23 août 2019) : 6000 €
- ▷ Reconstitution du Workshop NumWave (décembre 2019) : 6000 €
Workshop organisée par A. Duran et F. Marche sur le thème de la simulation de modèles de propagation de vagues. Page Web du workshop :

http://math.univ-lyon1.fr/homes-www/duran/NumWave_accueil.html

- Petit équipement (*inférieur à 15k€*)
 - ▷ Ordinateur portable doté de GPU performants : 4000 €
 - ▷ Achat d'un noeud de calcul avec GPU : 10000 € (devis en annexe du projet).

TOTAL DEMANDÉ : 42 000 €

6 Références bibliographiques principales des proposants

- [Bonneton *et al*, 2011] Bonneton, P., Chazel, F., Lannes, D., Marche, F. and Tissier, M. *A splitting approach for the fully nonlinear and weakly dispersive Green-Naghdi model*. Journal of Computational Physics, 2011, **230** :1479-1498.
- [Di Pietro & Marche, 2018] Di Pietro, D. and Marche, F. *Weighted interior penalty discretization of fully nonlinear and weakly dispersive free surface shallow water flows*. Journal of Computational Physics, 2018, **355** :285-309.
- [Duran *et al*, 2017] Duran, A., Vila, J.P. and Baraille, R. *Semi-implicit staggered mesh scheme for the multi-layer shallow water system*. C. R. Math., 2017, **355** :1298-1306.
- [Duran & Marche, 2013] Duran, A. and Marche, F. *On the well-balanced numerical discretization of shallow water equations on unstructured meshes*. Journal of Computational Physics, 2013, **235** :565-586.
- [Duran & Marche, 2015] Duran, A. and Marche, F. *Discontinuous-Galerkin discretization of a new class of Green-Naghdi equations*. Commun. Comput. Phys., 2015, **17**(3) :721-760.
- [Duran & Marche, 2017] Duran, A. and Marche, F. *A discontinuous Galerkin method for a new class of Green-Naghdi equations on simplicial unstructured meshes*. Applied Mathematical Modelling, 2017, **45** :840-864.

- [Lannes & Marche, 2015] Lannes, D. and Marche, F. *A new class of fully nonlinear and weakly dispersive Green–Naghdi models for efficient 2D simulations*. Journal of Computational Physics, 2015, **282** :238-268.
- [Le Roux *et al*, 2007] Le Roux, D.Y., Rostand, V. and Pouliot, B. *Analysis of numerically induced oscillations in 2D finite-element shallow-water models. Part I : Inertia-gravity waves*, SIAM J. Sci. Comput., 2007, **29** :331-360.
- [Le Roux, 2012] Le Roux, D.Y. *Spurious inertial oscillations in shallow-water models*, J. Comput. Phys., 2012, **231** :7959-7987.
- [Kazakova & Richard, 2018] Kazakova, M. and Richard, G. L. *A new model of shoaling and breaking waves : One-dimensional solitary wave on a mild sloping beach*. Ref :[hal-01824889](#), 2018.
- [Richard *et al*, 2018] Richard, G. L., Duran, A. and Fabrèges, B. *A new model of shoaling and breaking wave. Part II : Run-up and two dimensional applications*. Ref :[hal-01861821](#), 2018.
- [Richard & Gavriluk, 2012] Richard, G. L. and Gavriluk, S. *A new model of roll waves : comparison with Brock’s experiments*. J. Fluid Mech, 2012, **698** :374-405.
- [Richard & Gavriluk, 2013] Richard, G. L. and Gavriluk, S. *The classical hydraulic jump in a model of shear shallow-water flows*. J. Fluid Mech, 2013, **725** :492-521.
- [Richard & Gavriluk, 2015] Richard, G. L. and Gavriluk, S. *Modelling turbulence generation in solitary waves on shear shallow water flows*. J. Fluid Mech, 2015, **773** :49-74.
- [Tissier *et al*, 2012] Tissier, M., Bonneton, P., Marche, F., Chazel, F. and Lannes, D. *A new approach to handle wave breaking in fully non-linear Boussinesq models*. Coastal Engineering, 2012, **67** :54-66.
- [Fabrèges *et al*, 2013] Fabrèges, B., Gouarin, L. and Maury, B. *A smooth extension method*. C. R. Math., 2013, **351** :361-366.
- [Alauzet *et al*, 2016] Alauzet, F., Fabrèges, B., Fernández, M. A. and Landajuela, M. *Nitsche-XFEM for the coupling of an incompressible fluid with immersed thin-walled structures*. Comput. Method. Appl. M., 2016, **301** :300-335.

7 Participation effective, prévue ou envisageable à d’autres programmes de recherche régionaux, nationaux et européens sur les mêmes problématiques

- **Projet ANR NABUCO (1er janvier 2018 - 31 décembre 2021)**
F. Marche et A. Duran sont membres du projet ANR NABUCO (NumericAl BoUndaries and COupling). Ce projet présente de fortes interactions avec les thématiques abordées, notamment sur les aspects modélisation et intégration numérique des équations dispersives, que nous entendons valoriser. A cet effet, un co-financement est envisagé pour l’organisation de la 2ème édition de la conférence NumWave, prévue en décembre 2019.
- **Ecole d’été CEMRACS, 15 juillet - 23 août 2019**
A. Duran, B. Fabrèges et F. Marche sont membres du comité d’organisation du CEMRACS 2019, ayant pour thème les *fluides géophysiques*. Le présent projet s’insère ainsi très naturellement dans cette thématique. A ce titre, il nous paraît opportun de solliciter un financement pour encadrer un projet afin de partager et faire avancer nos travaux (voir §3.2.2).

Références (autres que celles des participants)

- [Brezzi and Fortin, 1991] Brezzi, F. and Fortin, M. (1991). *Mixed and Hybrid Finite Element Methods*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

- [Gavrilyuk et al., 2016] Gavrilyuk, S., Liapidevskii, V., and Chesnokov, A. (2016). Spilling breakers in shallow water : applications to Favre waves and to the shoaling and breaking of solitary waves. *J. Fluid Mech.*, 808 :441–468.
- [Kao et al., 1994] Kao, K.-H., Liou, M.-S., and Chow, C.-Y. (1994). Grid adaptation using chimaera composite overlapping meshes. *AIAA Journal*, 32 :942–949.
- [Kazolea et al., 2014] Kazolea, M., Delis, A., and Synolakis, C. (2014). Numerical treatment of wave breaking on unstructured finite volume approximations for extended Boussinesq-type equations. *Journal of Computational Physics*, 271 :281 – 305.
- [Kazolea and Ricchiuto, 2018] Kazolea, M. and Ricchiuto, M. (2018). On wave breaking for Boussinesq-type models. *Ocean Modelling*, 123 :16–39.
- [Kennedy et al., 2000] Kennedy, A. B., Chen, Q., Kirby, J. T., and Dalrymple, R. A. (2000). Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. i : 1d. *J. Waterw. Port Coast.*, 126 :39–47.
- [Khakimzyanov et al., 2017] Khakimzyanov, G., Dutykh, D., and Gusev, O. (2017). Dispersive shallow water wave modelling. Part IV : Numerical simulation on a globally spherical geometry. *preprint*.
- [Madsen et al., 1997] Madsen, P. A., Sørensen, O. R., and Schäffer, H. A. (1997). Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq-type model. *Coast. Eng.*, 32 :255–287.
- [Park et al., 2016] Park, M. A., Krakos, J. A., Michal, T., Loseille, A., and Alonso, J. J. (2016). Unstructured grid adaptation : Status, potential impacts, and recommended investments toward CFD vision 2030.
- [Pearce and Esler, 2010] Pearce, J. and Esler, J. (2010). A pseudo-spectral algorithm and test cases for the numerical solution of the two-dimensional rotating Green-Naghdi shallow water equations. *J. Comput. Phys.*, 229 :7594–7608.
- [Popinet, 2015] Popinet, S. (2015). A quadtree-adaptive multigrid solver for the serre-green-naghdi equations. *Journal of Computational Physics*, 302 :336 – 358.
- [Ricchiuto and Filippini, 2014] Ricchiuto, M. and Filippini, A. (2014). Upwind residual discretization of enhanced Boussinesq equations for wave propagation over complex bathymetries. *Journal of Computational Physics*, 271 :306 – 341.
- [Roeber et al., 2010] Roeber, V., Cheung, K. F., and Kobayashi, M. H. (2010). Shock-capturing Boussinesq-type model for nearshore wave processes. *Coastal Engineering*, 57(4) :407 – 423.
- [Shi et al., 2012] Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C., Geiman, J. D., and Grilli, S. T. (2012). A high-order adaptive time-stepping tvd solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation. *Ocean Modelling*, 43-44 :36 – 51.
- [Tavakkol and Lynett, 2017] Tavakkol, S. and Lynett, P. (2017). Opportunities for interactive, physics-driven wave simulation using the Boussinesq-type model, celeris. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(35) :11.
- [Ting and Kirby, 1994] Ting, F. C. K. and Kirby, J. T. (1994). Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone. *Coast. Eng.*, 24 :51–80.
- [Walters and Carey, 1984] Walters, R. and Carey, G. (1984). Numerical noise in ocean and estuarine models. *Adv. Water Res.*, 7 :15–20.
- [Wei et al., 1999] Wei, G., Kirby, J., and Sinha, A. (1999). Generation of waves in Boussinesq models using a source function method. *Coast. Eng.*, 36 :271–299.
- [Zelt, 1991] Zelt, J. (1991). The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves. *Coast. Eng.*, 15 :205–246.

**TABLEAU RECAPITULATIF DU BUDGET A REMPLIR OBLIGATOIREMENT
EN COHERENCE AVEC LE TABLEAU DU FORMULAIRE EN LIGNE**

Pour les projets multi-actions, les demandes budgétaires à chaque action (IMAGO, CYBER, CHAT, MANU, GMMC) devront être identifiées et différenciées dans le tableau

	Coût total	Co-financements (préciser la source, INSU ou pas, pour chaque case concernée)				Demande LEFE (préciser l'action LEFE concernée en cas de projet multi-actions)	
		Acquis année 1	Acquis année 2	Demandés année 1	Demandés année 2	Demande LEFE année 1	Demande LEFE année 2
Missions (dont réunions d'avancement, organisation, encadrement et conférences)	38000 €	12000 € (ANR NABUCCO)	0 €	0 €	0 €	20000 €	6000 €
Equipement (< 50 k€)							
Fonctionnement	2000 €	0 €	0 €	0 €	0 €	1000 €	1000 €
Moyens nationaux							
Analyses (à détailler dans tableau ci-dessous)							
Petit équipement (<15k€)	14000 €	0 €	0 €	0 €	0 €	14000 €	0 €

Récapitulatif (doivent correspondre aux cases du tableau du formulaire informatisé)

Total financements déjà acquis/en cours d'acquisition (1) : 12000 €

Total financements demandés au LEFE (2) : 42000 €

Total demande (1) + (2) : 54000 €