**Joffrey CHANEAC**  
**Métadonnées du manuscrit de thèse - 01/2023**

## Résumé

*Techniques de simulation multi-résolutions en méthode SPH, pour applications industrielles*

**Auteur : J. CHANEAC**  
**LMFA – ECL**

Selon les dernières projections du Groupe d'experts Inter-gouvernemental sur l'\'Evolution du Climat (GIEC), les émissions globales de gaz à effet de serre doivent encore diminuer de moitié à l'horizon 2030 afin de respecter l'Accord de Paris. Pour y parvenir, le GIEC recommande en particulier d'accroître la production mondiale d'hydroélectricité. Cependant, le développement des machines hydrauliques est aujourd'hui freiné par des limitations techniques. Il est notamment nécessaire de mieux caractériser la physique de l'écoulement mis en jeu afin d'optimiser ces technologies. En complément aux études en laboratoire, la simulation numérique des écoulements est un outil indispensable à intégrer au processus de conception.

La méthode SPH-ALE présente un formalisme qui est particulièrement bien adapté pour simuler de tels écoulements. La communauté juge toutefois que cette méthode n'est actuellement pas exploitable à son plein potentiel à cause de ses coûts, notamment dus à l'utilisation contrainte de pas de discrétisation uniformes en espace et en temps. Ainsi, pour garantir la capture précise d'un phénomène borné spatio-temporellement, le coût d'une simulation augmente fortement puisqu'il s'avère nécessaire de discrétiser finement l'entièreté de l'écoulement. L'enjeu de ces travaux est de rendre cette méthode plus précise et compétitive de par le développement de techniques multi-résolutions en espace et/ou en temps.

D'une part, le formalisme de la méthode SPH-ALE a été révisé selon la technique du « Dual-Time Stepping » (DTS) afin d'en assurer la stabilité temporelle inconditionnelle. Les simulations peuvent ainsi être conduites avec de plus grands pas en temps. De plus, en bénéficiant de la seconde échelle temporelle introduite, une stratégie visant à corriger le mouvement des particules a été développée afin d'améliorer la consistance du schéma numérique sans modifier les propriétés physiques de l'écoulement. D'autre part, ces travaux ont également aboutit au développement d'une nouvelle technique de raffinement zonal adaptée au formalisme SPH : l'HAPR (« Hybridized Adaptative Particle Refinement »). Celle-ci consiste en un couplage SPH-SPH d'une résolution grossière (les mères) et fine (les filles), interagissant indirectement par recouvrement au moyen de particules non-matérielles (les gardes et les hybrides). L'HAPR permet ainsi de discrétiser plus finement les régions d'intérêt de l'écoulement, sans pour autant recourir à une résolution uniformément fine du domaine fluide.

La pertinence des techniques multi-résolutions proposées est jugée sur un ensemble de cas tests académiques complémentaires. Le premier est un cas eulérien d'écoulement quasi-1D dans un tube à choc. Pour aller plus loin, l'analyse est étendue à la simulation lagrangienne 2D d'un canal oscillant horizontalement. L'étude spécifique aux techniques multi-résolutions en temps est ensuite complétée par la simulation des tourbillons de Taylor-Green. Enfin, la simulation d'un jet plan impactant une plaque plane en incidence normale clôt cette étude.

## Mots-clefs : *SPH-ALE ; couplage ; intégration implicite ; techniques multi-résolutions ; APR ; HAPR ; DTS ; turbines hydrauliques.*

## Abstract

*Multi-resolution industrial SPH-ALE solver*

**Author : J. CHANEAC**  
**LMFA – ECL**

The latest Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) report finds that unless there are immediate, rapid and large-scale reductions in greenhouse gas emissions, limiting warming to close to 1.5°C will be beyond reach. These environmental issues lead to an increasing investment in renewable energy sources. In particular, hydropower enjoys continuing popularity. However, further improvements are needed for overtaking some current technical limitations. Hence, it is of paramount importance that flows are properly taken into account in the design phase. Numerical simulation, together with model tests, is an appropriate way to do so.

The SPH-ALE method presents a formalism that is particularly well suited to simulating such flows. However, the community considers that this method is currently not exploitable to its full potential because of its costs, notably due to the constrained use of uniform discretization steps in space and time. Thus, in order to guarantee the accurate capture of a spatio-temporally bounded phenomenon, the cost of a simulation increases greatly since it is necessary to finely discretise the entire flow. The challenge of this work is to make this method more accurate and competitive by developing multi-resolution techniques in space and/or time.

On the one hand, the formalism of the SPH-ALE method has been revised according to the DTS technique in order to ensure its unconditional temporal stability. The simulations can thus be conducted with larger time steps. Furthermore, by taking advantage of the second time scale introduced, a particle shifting strategy was developed to improve the consistency of the numerical scheme without changing the physical properties of the flow. On the other hand, this work also led to the development of a new local refinement technique adapted to the SPH formalism: HAPR (Hybridized Adaptative Particle Refinement). This consists of an SPH-SPH coupling of overlapping coarse (mothers) and fine (daughters) resolutions, interacting indirectly through non-material particles (guard and hybrid). HAPR thus allows a finer discretisation of the interest regions in the flow, without resorting to a uniformly fine resolution of the fluid domain.

The relevance of the proposed multi-resolution techniques is judged on a set of complementary academic test cases. The first one is an Eulerian case of quasi-1D flow in a shock tube. To go further, the analysis is extended to the 2D Lagrangian simulation of a horizontally oscillating channel. The specific study of multi-resolution time techniques is then completed by the simulation of Taylor-Green vortices. Finally, the simulation of a plane jet impacting a flat plate at normal incidence closes this study.

## Keywords: *SPH-ALE; adaptivity; implicit method ; multi-résolution scheme ; APR ; HAPR ; DTS ; hydraulic turbines.*