

Poster contributions

Tuesday 19th, Institut Henri Poincaré

Loïc Balazi (CEA Saclay)

Multi-scale Finite Element Method for incompressible flow in Perforated Domain

Sébastien Boyaval (Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant)

Symmetric-hyperbolic conservation laws modelling viscoelastic flows

Ibtissem Lannabi (LMAP, UPPA et Inria Bordeaux Sud-Ouest)

Low Mach number flows: a cure to checkerboard modes

Alexandra M. Log (Norwegian University of Science and Technology, Trondheim)

An implicit arbitrary-rate relaxation technique for the simulation of evaporating flows with real gas equations of state

Nathalie Nouaime (LJLL, Sorbonne Université et CEA Saclay)

Analyse de sensibilité pour la thermohydrodynamique : analyse d'incertitude et estimation de paramètres

Andrew Peitavy (CEA Saclay, Université Gustave Eiffel)

Éléments finis non-conformes et schéma MPFA pour le problème de Stokes

Alexiane Plessier (CEA DAM)

Schémas implicites semi-Lagrangiens pour la dynamique des gaz compressibles

Pablo Rubiolo (Grenoble INP)

Mutliphysics modeling of the production, the transport and the separation of the Fission Products (FPs) existing in the fuel salt flow of a Molten Salt Reactor (MSR)

Multi-scale Finite Element Method for incompressible flow in Perforated Domain

Loïc BALAZI, CEA/DES/ISAS/DM2S/STMF/LMSF - Saclay
Grégoire ALLAIRE, CMAP, Ecole Polytechnique - Palaiseau
Pascal OMNES, CEA/DES/ISAS/DM2S/STMF/LMSF - Saclay

Multi-scale problems arise in numerous engineering fields such as reservoir engineering, flows through fractured porous media, flows in nuclear reactor cores, etc. In these media with many obstacles of various sizes, the macroscopic flow is directly influenced by local phenomena occurring at the finest scales. Thus, these problems require a very fine mesh to resolve all the details. Despite the continuous increase in computer resources, these are insufficient to perform classical finite element simulations with an accuracy allowing correct resolution of the finest scales of the flow. To overcome this limitation, various multi-scale methods have been developed to attempt to resolve scales below the coarse mesh scale by incorporating local computations into a global problem which is defined only on a coarse mesh. Among the many multi-scale approaches that have been proposed in the literature, we can mention the Heterogeneous Multiscale Method (HMM) [4], the Local Orthogonal Decomposition (LOD) [3] or the Multi-scale Finite Element Method (MsFEM). In this contribution, we focus on the Multi-scale Finite Element Method.

The Multi-scale Finite Element Method uses a coarse mesh on which one defines basis functions which are no longer the classical polynomial basis functions of finite elements, but which solve fluid mechanics equations on the elements of the coarse mesh. These functions are themselves numerically approximated on a fine mesh considering all the geometric details, which gives the multi-scale aspect of this method.

Based on the work of [5, 8], we propose to develop an enriched non-conforming Multi-scale Finite Element Method (MsFEM) to solve viscous incompressible flow in heterogeneous media (Stokes problem). Our MsFEM is in the vein of the classical non-conforming Crouzeix-Raviart finite element method with high-order weighting functions. The novelty of this work is the actual implementation of higher order method and the proof of error estimate.

In [5], the well-posedness of the global Stokes problem defined on the coarse mesh using MsFEM basis functions, has been proved. In addition, the well-posedness of the continuous local problems defined on each coarse element has also been shown. To complete this work, we show, the well-posedness of the discretized local problems for family of non-conforming finite elements of arbitrary order on triangles presented in [9], using the so-called Fortin criteria [6].

In addition, we perform a homogenization of the Stokes Equations in periodic perforated domain, using the two-scale asymptotic expansions, leading to Darcy equation in perforated domain [2]. Inspired by the work of [8], we propose a rigorous estimation of the convergence of the homogenized quantities in any dimension. Based on these estimates, we quantify the error between the MsFEM and the exact solution, for the global Stokes problem in perforated domain.

At the numerical level, we implement the Multi-Scale Finite Element Methods developed, for two dimensional cases up to the order two, in a parallel framework using PETSc in FreeFEM [7] : the basis functions being independent of each other, their approximations as well as the assembly of the macroscopic problem can be carried out in parallel. To solve the local problem, we implement the

finite element defined in [9] for the order three in FreeFEM, known under the name of $P3_pnc$, and we assess its performance. The perforated meshes are generated with the platform SALOME [1]. We carry simulations for well-known test cases : the cavity lid driven and the open channel, and we compare the MsFEM results with reference results obtained by performing the simulations on a fine grid with classical Finite Element Methods.

The perspective of this work is now to have meaningful numerical results to emphasize our theoretical results. Then we will consider the Stokes Equations in dimension three. The major difficulty will be to find a family of finite elements which allow to solve the discretized local problem while verifying the inf-sup conditions on tetrahedras.

- [1] *Salome Platform - The open-source platform for numerical simulation.*
- [2] G. Allaire. *A brief introduction to homogenization and miscellaneous applications.* ESAIM : Proceedings, **37**, 1–49, 2012. doi :10.1051/proc/201237001.
- [3] R. Altmann, P. Henning, D. Peterseim. *Numerical homogenization beyond scale separation.* Acta Numerica, **30**, 1–86, 2021. doi :10.1017/S0962492921000015.
- [4] W. E, B. Engquist, Z. Huang. *Heterogeneous multiscale method : A general methodology for multiscale modeling.* Phys. Rev. B, **67**, 092101, 2003. doi :10.1103/PhysRevB.67.092101.
- [5] Q. Feng, G. Allaire, P. Omnes. *Enriched Nonconforming Multiscale Finite Element Method for Stokes Flows in Heterogeneous Media Based on High-order Weighting Functions.* Multiscale Modeling & Simulation, pp. 462–492, 2022. doi :10.1137/21M141926X. Publisher : Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [6] M. Fortin. *An analysis of the convergence of mixed finite element methods.* RAIRO. Analyse numérique, **11(4)**, 341–354, 1977. doi :10.1051/m2an/1977110403411.
- [7] F. Hecht. *New development in freefem++.* J. Numer. Math., **20(3-4)**, 251–265, 2012.
- [8] G. Jankowiak, A. Lozinski. *Non-Conforming Multiscale Finite Element Method for Stokes Flows in Heterogeneous Media. Part II : error estimates for periodic microstructure.* arXiv :1802.04389 [math], 2018. ArXiv : 1802.04389.
- [9] G. Matthies, L. Tobiska. *Inf-sup stable non-conforming finite elements of arbitrary order on triangles.* Numerische Mathematik, **102**, 293–309, 2005. doi :10.1007/s00211-005-0648-8.

SYMMETRIC-HYPERBOLIC CONSERVATION LAWS MODELLING VISCOELASTIC FLOWS

SÉBASTIEN BOYAVAL

Many equations have been proposed to model flows with a viscoelastic behaviour, for various applications (polymer suspensions, turbulent fluids averaged in time/space. . .). As regards viscoelastic models for fluids, with stress relaxation, seminal equations have been proposed by Maxwell in 1867. The Upper-Convected Maxwell equations are useful for one-dimensional flows in particular. But the usability of such viscoelastic fluid systems for multi-dimensional flows remains limited, as shown by numerous numerical simulations that do not converge when the discretization parameters are refined beyond a critical value for the relaxation-time of the stress. As a remedy, we propose to consider a system of conservation laws with algebraic source terms (balance laws) to model viscoelastic flows. The system is symmetric-hyperbolic. It unifies hardly-elastic fluid models with hardly-compressible solid models, similarly to the famous K-BKZ integral viscoelastic models, but in a more versatile (purely differential) way based on an evolution equation for the anelasticity metric tensor. The new system can be manipulated for various applications of the viscoelastic flow concept in environmental hydraulics (shallow-water flows) or materials engineering (non-isothermal flows).

ACKNOWLEDGEMENTS

This research has been supported by ANR project 15-CE01-0013 SEDIFLO: “Modelling and simulation of solid transport in rivers”

REFERENCES

- [1] Boyaval, Sébastien *Viscoelastic flows of Maxwell fluids with conservation laws. ESAIM Math. Model. Numer. Anal.* 55(3):807–831, 2021.
- [2] Boyaval, Sébastien and Dostalík, Mark *Non-isothermal viscoelastic flows with conservation laws and relaxation J. Hyperbolic Diff. Equa.* in press.

LABORATOIRE D’HYDRAULIQUE SAINT-VENANT (ECOLE DES PONTS PARISTECH – EDF R&D), EDF’LAB CHATOU & MATHEMATICS, INRIA PARIS ; FRANCE. (SEBASTIEN.BOYAVAL@ENPC.FR)

Low Mach number flows: A cure to checkerboard modes

Jonathan Jung¹, Ibtissem Lannabi¹, Vincent Perrier¹

SUMMARY

It is well known that Godunov type schemes applied to the numerical resolution of the compressible Euler system are not accurate at low Mach number, in particular, on Cartesian meshes. As explained in [1], this inaccuracy is occurring due to a disparity between the continuous and the discrete levels. Over the years, many fixes have been proposed to remedy these deficiencies [2]. However, fixing low Mach number accuracy problem generally introduces other issues like inaccurate acoustic computations [3], degraded CFL condition, inability to recover the optimal order for a Discontinuous Galerkin discretization of the Euler system and checkerboard modes [4].

Interestingly, there is a link between the low Mach number accuracy problem and the long time limit of a linear wave system [5]. This result is useful in explaining the low Mach accuracy problem encountered in the discrete compressible Euler system through an analysis of the linear wave system. In this work, we first propose to exploit this link to identify the origin of the checkerboard modes in the solution of the Euler system. A discrete Hodge-Helmholtz decomposition of the velocity field for the wave system is used to identify the term responsible for the appearance of the checkerboard modes. Next, we investigate the utility of the filtering method developed in [6] towards removing the checkerboard mode from the numerical solution of the linear wave system and eventually the Euler system.

Keywords: Finite volume methods, low Mach flows, checkerboard modes.

AMS Classification: 65M08, 65N22, 76N99

References

- [1] H. GUILLARD and C. VIOZAT. On the behaviour of upwind schemes in the low Mach number limit. *Computers & fluids*, 1999.
- [2] F. RIEPER. A low-Mach number fix for Roe’s approximate Riemann solver. *Journal of Computational Physics*, 2011.
- [3] P. BRUEL, S. DELMAS, J. JUNG and V. PERRIER. A low Mach correction able to deal with low Mach acoustics. *Journal of Computational Physics*, 2019.
- [4] S. DELLACHERIE. Checkerboard modes and wave equation. *Proceedings of ALGORITMY*, 2009. p. 71-80.
- [5] J. JUNG and V. PERRIER. Long time behavior of finite volume discretization of symmetrizable linear hyperbolic systems. *IMA Journal of Numerical Analysis*, 2021.
- [6] J. Jung and V. PERRIER. Steady low Mach number flows : identification of the spurious mode and filtering method. *Journal of Computational Physics*, 2022.

¹LMAP UMR CNRS 5142 and Inria Bordeaux Sud-Ouest, CAGIRE team
Université de Pau et des Pays de l’Adour, Avenue de l’Université 64 013 Pau, France

An implicit arbitrary-rate relaxation technique for the simulation of evaporating flows with real gas equations of state

Alexandra M. Log^{1*}, Svend T. Munkejord² and Morten Hammer²

^{1*} Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, NO-7491 Trondheim, Norway, alexandra.m.log@ntnu.no

² SINTEF Energy Research, P.O. Box 4761 Sluppen, NO-7465 Trondheim, Norway, svend.t.munkejord@sintef.no, morten.hammer@sintef.no

Keywords: *Multiphase flows, depressurization, liquid-vapor transition, relaxation processes, CO₂*

Accurate simulations of evaporating flows following depressurization are needed in a range of engineering applications. Experiments have found that rapid evaporation due to depressurization often shows significant departure from equilibrium and relaxation models must be applied to describe the process [1]. Lately, a hierarchy of different relaxation models have been developed and studied [2], and relaxation techniques have been devised for infinite, finite and arbitrary-rate relaxation terms [3]. When conducting simulations using a real gas equation of state (EOS), multistep relaxation methods that are not implicit may fail as unstable thermodynamic states can be encountered in the solution procedure. We therefore propose an implicit two-step relaxation technique for arbitrary-rate relaxation terms where the thermodynamic state of the solution is guaranteed to be stable. The technique is tested for the 4-equation relaxation model with the Peng-Robinson EOS. We compare the results of this model to experimental data of CO₂ depressurizations [1].

References

- [1] S. T. Munkejord, A. Austegard, H. Deng, M. Hammer, H. G. J. Stang, and S. W. Løvseth, “Depressurization of CO₂ in a pipe: High-resolution pressure and temperature data and comparison with model predictions,” *Energy*, vol. 211, p. 118 560, Nov. 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118560.
- [2] H. Lund, “A Hierarchy of Relaxation Models for Two-Phase Flow,” *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 72, no. 6, pp. 1713–1741, Jan. 2012, Publisher: Society for Industrial and Applied Mathematics. DOI: 10.1137/12086368X.
- [3] M. Pelanti, “Arbitrary-rate relaxation techniques for the numerical modeling of compressible two-phase flows with heat and mass transfer,” *arXiv:2108.00556 [physics]*, Aug. 2021, arXiv: 2108.00556.

Analyse de sensibilité pour la thermohydrodynamique: analyse d'incertitude et estimation des paramètres

Nathalie NOUAIME^{1,2}, Bruno DESPRÉS¹, Maria Adela PUSCAS², Camilla FIORINI³

¹ LJLL, Sorbonne Université, Paris, France,

² CEA, Centre de Saclay, DEN/DM2S/STMF/LMSF, Saclay, France,

³ M2N, Conservatoire National des Arts et Métiers.

L'analyse de sensibilité est une méthode qui permet de mesurer comment l'impact des incertitudes d'une ou plusieurs variables d'entrée peut conduire à des incertitudes sur les variables de sortie. Dans les modèles thermohydrodynamiques, plus précisément les équations de Navier-Stokes couplées avec l'équation de la chaleur sur lesquelles nos études sont basées, l'analyse de sensibilité peut être utilisée pour déterminer comment la réponse du modèle en un point est affectée par une modification des conditions initiales ou aux limites, ou de tout autre paramètre physique tel que la viscosité, la capacité thermique, la diffusivité thermique, etc.

Notre projet est basé sur un travail récent [1] dans lequel les variations de température n'étaient pas prises en compte. Ce travail a permis de donner à l'aide d'une analyse de quantification des incertitudes, des estimations de premier ordre de la moyenne et de la variance de la solution des équations de Navier Stokes lorsque certains paramètres sont incertains, puis d'utiliser la variance estimée pour calculer les intervalles de confiance. Ces méthodes de propagation de l'incertitude basées sur l'analyse de sensibilité sont très avantageuses en temps de calcul et peuvent être utilisées à la place d'un grand nombre de simulations Monte Carlo.

Soit le domaine $\Omega = (0, l)^2$ avec $l \in R^{+*}$, on considère les équations de Navier-Stokes et la loi de conservation de l'énergie sur ce domaine avec les conditions aux limites correspondantes :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \partial_t \mathbf{u} - \nu \Delta \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \frac{1}{\rho} \nabla p = -\beta(T - T_0)g & \Omega, t > 0, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 & \Omega, t > 0, \\ \partial_t T - \frac{\lambda}{\rho c_p} \Delta T + \mathbf{u} \cdot \nabla T = 0 & \Omega, t > 0, \\ \mathbf{u} = \mathbf{0} & \partial\Omega, t > 0, \\ \mathbf{u}(x, 0) = \mathbf{0} & \Omega, t = 0 \\ \nabla T \cdot \mathbf{n} = 0 & \Gamma_N, t > 0 \\ T = f(x) & \Gamma_D, t > 0 \end{array} \right.$$

avec $\mathbf{u} = (u^x, u^y)^t$ la vitesse, p la pression, ρ la densité, $g = (0, 9.81)^t$ la gravité et T la température. Les coefficients μ et λ sont respectivement, la viscosité du fluide et le paramètre de diffusion de la température, c_p la capacité thermique. Tout d'abord, nous différencierons le système de Navier-Stokes couplé avec la température, qui sera notre modèle d'état, par rapport au paramètre d'intérêt, ce qui fournit un système de sensibilité analytique. Nous présenterons des estimations de stabilité pour l'état et la sensibilité pour des conditions aux limites données. Dans un second temps, nous discrétiserons les deux systèmes (état et sensibilité) dans un cadre de volumes éléments finis (VEF) [2] qui est bien adapté au code open-source TrioCFD [3] à l'aide duquel les simulations numériques de ce projet seront effectuées.

Références

- [1] C. Fiorini, B. Després, and M. A. Pucas. Sensitivity equation method for the Navier–Stokes equations applied to uncertainty propagation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2020.
- [2] P. E. Angeli, M. A. Pucas, G. Fauchet, and A. Cartalade. FVCA8 Benchmark for the Stokes and Navier–Stokes equations with the TrioCFD code - Benchmark session. In *International Conference on Finite Volumes for Complex Applications*, pages 181–202. Springer, 2017.
- [3] <https://trio CFD.cea.fr/>

Workshop "New trends in complex flows"

Poster : Éléments finis non-conformes et schéma MPFA pour le problème de Stokes

Doctorant : Andrew PEITAVY	Établissement : CEA Saclay / Université GUSTAVE EIFFEL
Responsable CEA : Erell JAMELOT	Collaborateur Académique : Robert EYMARD
Directeurs de thèse : Christophe LE POTIER Eric CHÉNIER	Date de début de thèse : 01/12/2020

1 Contexte

Dans le cadre de la sécurité nucléaire, le Laboratoire de Modélisation et de Simulation en mécanique des Fluides (LMSF) développe le code TrioCFD, qui permet la résolution des équations de Navier-Stokes. Le problème de Stokes est une approximation de ces équations lorsque les effets visqueux dominent sur les effets inertiels. Dans le cadre du cas isotherme, incompressible stationnaire et homogène et si l'on considère Ω , un ensemble borné convexe à frontière Lipschitzienne, alors, les inconnues sont la vitesse $\mathbf{u} \in \mathbf{H}_0^1(\Omega)$ et la pression $p \in L_0^2(\Omega)$ du fluide tel que :

$$\begin{cases} -\nu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{grad} p = \mathbf{f} & \text{dans } \Omega \\ \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 & \text{dans } \Omega \end{cases}$$

où ν est la viscosité cinématique et le terme source est représenté par $\mathbf{f} \in \mathbf{L}^2(\Omega)$.

Pour les maillages de simplexes, la discrétisation spatiale du code TrioCFD est basée sur les éléments finis non conformes de Crouzeix-Raviart [1] : l'espace de discrétisation des composantes de la vitesse est l'espace P^1 non conforme (noté P_{nc}^1) et l'espace de discrétisation de la pression est l'espace $P^1 \cap L_0^2(\Omega) + P^0 \cap L_0^2(\Omega)$ (noté $M^1 + M^0$), ce qui permet de réduire les courants parasites et d'améliorer la précision [2]. Cette amélioration est optimale en 2D, mais en 3D [3], il faut rajouter un nombre important de degrés de liberté pour la pression qui rendent la résolution plus coûteuse en nombre d'opérations et en empreinte mémoire.

2 Objectifs

Le but de ces travaux est d'obtenir un schéma aussi précis que le schéma $P_{nc}^1 - (M^0 + M^1)$ en réduisant les courants parasites mais avec moins de degrés de liberté pour la pression.

3 Méthodologie

Dans cette optique, une nouvelle méthode de discrétisation avec les éléments finis de Crouzeix-Raviart non conformes pour la vitesse et un schéma MPFA symétrique (Multipoint Flux Approximations [4, 5]) pour la pression sera présentée. Son principe en 2D est de découper les mailles triangulaires en trois quadrangles en reliant les milieux des arêtes et le barycentre des éléments. Ensuite, en introduisant des inconnues aux tiers des arêtes pour la pression, on peut définir un gradient de pression constant pour chaque quadrangle. Enfin, en imposant la continuité des flux de ces gradients à travers les arêtes, on peut alors substituer les inconnues des arêtes par celles des cellules dans le système global. Pour éliminer les inconnues de pression des arêtes sur le bord, on impose la vitesse sur une petite épaisseur du bord.

4 Résultats

Actuellement, le schéma a été programmé sur une maquette, pour traiter le problème de Stokes instationnaire avec différents types de schémas temporels (semi-implicite, implicite, explicite) ainsi que sur le problème de Navier-Stokes avec le schéma de convection décrit dans [6]. Cette méthode livre des résultats prometteurs et est un bon compromis entre les schémas $P_{nc}^1 - M^0$ et $P_{nc}^1 - (M^0 + M^1)$.

Références

- [1] M. Crouzeix and P.-A. Raviart. Conforming and nonconforming finite element methods for solving the stationary Stokes equations. *RAIRO, Série Analyse Numérique*, 7(3), 1973.
- [2] S. Heib. *Nouvelles discrétisations non structurées pour des écoulements de fluides à incompressibilité renforcée*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie Paris 6, 2003.
- [3] T. Fortin. *Une méthode éléments finis à décomposition L^2 d'ordre élevé motivée par la simulation d'écoulement diphasique bas Mach*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie Paris 6, 2006.
- [4] L. Agélas and R. Masson. Convergence of the finite volume MPFA O scheme for heterogeneous anisotropic diffusion problems on general meshes. *Comptes Rendus Mathématique*, 346(17), 2008.
- [5] C. Le Potier. Schéma volumes finis pour des opérateurs de diffusion fortement anisotropes sur des maillages non structurés. *Comptes Rendus Mathématique*, 340(12), 2005.
- [6] R. Herbin L.Gastaldo and J.-C. Latché. An unconditionally stable finite element-finite volume pressure correction scheme for the drift-flux model. *ESAIM : M2AN*, 44(2) :251–287, 2010.

Schémas implicites semi-Lagrangiens pour la dynamique des gaz compressibles

Alexiane PLESSIER, CEA, LJLL

Stéphane DEL PINO, CEA

Bruno DESPRÉS, LJLL

Le but de ce projet est de travailler sur les interactions fluide-structure, en considérant une structure fine en formalisme Lagrangien.

Pour approcher les équations traduisant le mouvement des fluides, on utilise traditionnellement des schémas explicites qui pour être stables sont sujets à une condition CFL. Dans le cas qui nous intéresse, l'épaisseur de la structure peut être très fine et la vitesse du son très grande. Il est donc nécessaire de prendre un pas de temps très petit et par conséquent, il est difficile d'obtenir de bons résultats numériques à faibles coûts.

Pour remédier à ce problème, l'idée est d'utiliser des schémas implicites. Néanmoins, des difficultés techniques majeures apparaissent, notamment la difficulté de montrer que le schéma est bien défini (la solution au temps suivant existe et est unique). Nous proposons un schéma implicite non linéaire pour la partie hydrodynamique qui résout les équations d'Euler compressibles multi-D écrites en formalisme semi-Lagrangien.

Ce schéma implicite non linéaire est basé sur une méthode de prédiction-correction [1]. La phase de prédiction résout les équations d'Euler isentropiques et la phase de correction correspond à la discrétisation des équations d'Euler avec conservation de l'énergie totale. La preuve de stabilité inconditionnelle du schéma implicite, voir [2], résulte de la réécriture du problème sous la forme

$$\begin{cases} \text{Trouver } U \in \mathcal{D} \subset \mathbb{R}^n \text{ tel que} \\ \nabla J(U) = AU, \end{cases} \quad (1)$$

où U est le vecteur des inconnues, J une fonctionnelle convexe définie sur le domaine \mathcal{D} et A une matrice antisymétrique de coefficients réels. Il sera précisé sous quelles hypothèses le problème (1) admet une unique solution. Quelques résultats numériques attestant de la précision et de la robustesse de ce schéma implicite seront présentés. Nous pourrions discuter par exemple de la sensibilité par rapport à l'augmentation du pas de temps, de l'utilisation d'un solveur explicite-implicite selon les parties du domaine, du coût de calcul par rapport au solveur acoustique explicite.

Références

- [1] C. CHALONS AND F. COQUEL AND C. MARMIGNON *Time-Implicit Approximation of the Multi-pressure Gas Dynamics Equations in Several Space Dimensions*, SIAM, Vol 48, 2010.
- [2] A. PLESSIER AND S. DEL PINO AND B. DESPRÉS, *Implicit discretization of Lagrangian gas dynamics*, soumis.

Title: Multiphysics modeling of the production, the transport and the separation of the Fission Products (FPs) existing in the fuel salt flow of a Molten Salt Reactor (MSR)

Authors: P. Rubiolo, V. Ghetta, J. Giraud, M. Marone

Description:

This poster will provide an overview of research work related to the multiphysics modeling of molten fuel salt flows in MSRs that is being performed in the framework of the *Innovative System for Actinides Conversion* (ISAC) project (2022-2026). The goal of ISAC is to study an alternative approach to the transmutation of minor actinides based on the use of a Molten Salt Reactor (MSR) with a fast neutron spectrum. The numerical and experimental work that we are developing at the FEST platform (Fluids Experiments and Simulations in Temperature) of the LPSC (Grenoble) will contribute to ISAC by improving the understanding and the numerical modeling of the dynamic behavior of the gas FPs produced inside the fuel circuit such as the Xenon. A key point of our work will be to correctly model the interactions between the FP gases and the inert gas bubbles (such as helium) that could be injected in a MSR fuel circuit to remove these PF gases and thus to help controlling corrosion issues in the fuel circuit. This possible technical solution is based on the migration of the FP gases such as Xenon into the inert gas bubbles to reach equilibrium. The extraction of bubbles at a separator system downstream the injector would allow to remove a significant fraction of the Xenon gas (and other PFs gases) and then to control their inventory in the fuel circuit.

The numerical modeling work will be carried-out using an already existing multiphysics tool. This multiphysics tool is based on a numerical coupling between the codes OpenFOAM and Serpent. OpenFOAM is a continuous mechanics numerical solver based on a Finite Volume (FV) method. OpenFOAM includes many different Computational Fluid Dynamic (CFD) algorithms that allow solving the Navier Stokes equations. Serpent is a Monte Carlo numeric solver employed to solve the neutron and gamma transport problem. This multiphysics tool has been developed at the Reactor Physics Group for studying diverse types of nuclear systems ranging from liquid fueled reactors (Molten Salt reactors for terrestrial or space applications) to nuclear systems where a criticality accident may occur (Godiva experiment, spent fuel pool, etc.). The novel capabilities for modeling Fission Products (FPs) will required developing and integrating into the multiphysics tool new model equations: the balance equations for the mass, the impulsion and the energy of a two-phase flow and the physical chemical equations allowing calculating the fission products concentration in the molten salt and in the bubbles. The experimental work will be develop at the FEST platform of the LPSC (Grenoble). Two forced convection loops, a water loop and a molten salt loop, will be designed, built and operated as part of the activities research of the ISAC project to investigate some of key phenomena related to the Fission Product (FPs) transport and separation in the fuel circuit. The experiments carried-out in the water loop and other experiments existing at FEST are expected to provide useful information for the new numerical models.