

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Stratégies adaptatives et extensibles de préconditionnement avec techniques de compression pour des systèmes linéaires creux de grande taille en mécanique des fluides.

Référence : **SNA-DAAA-2022-15**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Octobre 2022

Date limite de candidature : Mai 2022

Mots clés

Mécanique des fluides, calcul haute performance, méthodes de Krylov, préconditionnement, approximations de rang faible, déflation, différentiation automatique, équilibrage de charge

Profil et compétences recherchées

Mécanique des fluides, Programmation (C++, F90, Python)

Grandes écoles d'ingénieurs et/ou Master 2 Recherche

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Au cours des 20 dernières années, l'utilisation d'outils de simulation numérique en mécanique des fluides (CFD) est devenue incontournable pour le développement, le dimensionnement et même la maintenance des produits portés par les industriels du secteur aéronautique.

Ces codes de CFD sont toujours principalement limités par une utilisation trop grande des capacités mémoires à la fois en volume et en débit (limite appelée « memory bound »). Afin de tirer au mieux parti des différentes architectures matérielles disponibles actuellement, il devient indispensable de repenser, adapter, voire redévelopper les principaux algorithmes qui les composent. De nombreuses études telles que l'analyse de stabilité, le calcul des états stationnaires, ou encore l'adaptation du maillage en fonction des objectifs, se basent sur le calcul des points fixes des équations de Navier-Stokes (ou RANS). Des méthodes robustes et efficaces sont alors nécessaires pour résoudre des systèmes linéaires creux dont la taille souhaitée peut à présent avoisiner le milliard d'inconnues. Compte tenu des contraintes mémoire et des propriétés spectrales de l'opérateur à inverser [1], les méthodes itératives de type Krylov [2,3] semblent être les meilleures candidates. Cependant, leurs succès dépendent en grande partie de la qualité du préconditionneur.

Les travaux menés actuellement dans plusieurs équipes ONERA [1,4] ouvrent la voie à plusieurs axes de recherche pour réduire les coûts mémoire et CPU de ces solveurs itératifs, tant au niveau du redémarrage de ces algorithmes avec un recyclage de l'information spectrale (techniques de déflation), qu'autour de la stratégie de préconditionnement et de son effet à grande échelle. Concernant ce dernier thème, il a été mis en évidence [1] l'existence de zones critiques nécessitant le recours à une méthode directe avec factorisation LU [3,5,6]. Une stratégie hybride de résolution a alors été conçue et mise en œuvre. Elle s'appuie sur un solveur de type Restricted Additive Schwarz (RAS) [7] dans lequel les zones non-critiques sont préconditionnées à l'aide d'une factorisation incomplète ILU(0) [3,5]. Il devient alors capital de mettre en œuvre un nouveau paradigme de parallélisation basé cette fois sur la formulation globale du problème algébrique et non sur le maillage géométrique du cas d'étude afin de rééquilibrer sur la ressource de calcul les coûts provenant des choix hétérogènes de préconditionneurs. Il s'agira aussi de proposer et d'évaluer des règles de calibration prenant en compte ces coûts mais aussi l'intensité arithmétique de l'algorithme de factorisation choisi sur le paquet de données à déplacer. La solution retenue s'appuiera sur les protocoles d'échanges génériques définis dans la bibliothèque ParaDiGM [8] et sera ensuite éprouvée jusqu'à plusieurs centaines de cœurs de calcul.

Dans l'optique d'assurer le passage à l'échelle de cette stratégie hybride, des techniques de compression de données seront étudiées. En particulier, des travaux récents [9] sur des méthodes d'approximation de la factorisation LU appelées Block Low Rank LU (BLR-LU) [10-13] montrent que le couplage entre les différentes zones de problèmes hyperboliques peut être efficacement préconditionné par des opérateurs de rang faible. Il s'agira d'adapter ces méthodes et d'utiliser leurs bonnes propriétés de compression pour réduire les coûts des factorisations LU dans les zones concernées du solveur RAS. Si ces méthodes BLR-LU précitées s'avèrent efficaces sur des problèmes représentatifs, leur utilisation pourra alors être étendue/adaptée à d'autres endroits du solveur itératif.

Les résultats seront sujets à des publications dans des journaux à comité de lecture et des communications à des congrès scientifiques.

[1] N. Guilbert, "Amélioration de l'inversion de grand systèmes creux pour la simulation numérique en mécanique des fluides", Thèse, 2021.

[2] Y. Saad, "A Flexible Inner-Outer Preconditioned GMRES Algorithm", SIAM J. Sci. Comput. 14 (2), pp 461-469, 1993.

[3] Y. Saad, "Iterative Methods for Sparse Linear Systems", Second Edition, SIAM, 2003.

[4] M. Jadoui, C. Blondeau, E. Martin, F. Renac, and F.-X. Roux, "Comparative study of inner-outer Krylov solvers for linear systems in structured and high-order unstructured CFD problems", Preprint, Computer and Fluids, 2021.

[5] M. Benzi, "Preconditioning Techniques for Large Linear Systems: A Survey", J. Comput. Phys. 182 (2), pp 418-477, 2002

[6] [PARDISO Solver Project](#)

[7] X.-C. Cai and M. Sarkis, "A Restricted Additive Schwarz Preconditioner for General Sparse Linear Systems", SIAM J. Sci. Comput. 21(2), pp 792–797, 1999.

[8] E. Quemerais et al., "ParaDiGM library", ONERA internal software. Future diffusion under the LGPL license.

[9] Zan Xu, L. Cambier, J.J. Alonso, E. Darve, Towards a Scalable Hierarchical High-order CFD Solver, AIAA Scitech 2021 Forum, DOI: 10.2514/6.2021-0494, 2021

[10] P. Amestoy, C. Ashcraft, O. Boiteau, A. Buttari, J.-Y. L'Excellent, and C. Weisbecker, "Improving multifrontal methods by means of block low-rank representations", SIAM J. Sci. Comput., 37(3):A1451–A1474, 2015.

[11] L. Grigori, S. Cayrols, and J. Demmel, "Low Rank Approximation of a Sparse Matrix Based on LU Factorization with Column and Row Tournament Pivoting", SIAM J. Sci. Comput., 40 (2):C181-C209, 2018.

[12] Z. Jorti, "Fast solution of sparse linear systems with adaptive choice of preconditioners". General Mathematics, Thesis, Sorbonne Université, 2019.

[13] N. J. Higham and T. Mary, "Solving Block Low-Rank Linear Systems by LU Factorization is Numerically Stable", hal-02496325v1, 2020.

Collaborations envisagées

INRIA – Laboratoire JLL

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : DAAA (Aérodynamique, Aéroélasticité, Acoustique)

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Bruno MAUGARS / Emeric MARTIN / Cédric CONTENT

Tél. : 01 46 73 46 77 / 01 46 73 42 56

Directeur de thèse

Nom : GRIGORI Laura

Laboratoire : INRIA Paris, *Alpines group*, 2 Rue Simone IFF, 75012 Paris et Laboratoire J.L. Lions, Sorbonne Université Paris, France

Email : bruno.maugars@onera.fr / cedric.content@onera.fr

Tél. : 01 80 49 42 60 (Inria), 01 44 27 93 03 (LJLL)

Email : laura.grigori@inria.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>