

Doctorant : Thomas Burgot

Titre de la thèse : Viabilité et performance des solveurs points de grille dans la résolution du problème implicite du noyau dynamique du modèle AROME

Encadrants : Ludovic Auger et Pierre Bénard

Soutenance : mardi 19 janvier 2021 à 14h en visioconférence

Lien : <https://bluejeans.com/368373808>

Résumé de la thèse :

AROME est le modèle à aire limitée de Prévision Numérique du Temps (PNT) de Météo-France. Il fournit des prévisions météorologiques plusieurs fois par jour à une échéance maximale de deux jours et à une résolution horizontale kilométrique. Son noyau dynamique résout les équations d'Euler pleinement compressibles. Pour respecter les délais fortement contraints inhérents à la PNT, c'est-à-dire de fournir une prévision complète en 70 minutes de simulation, les méthodes numériques utilisées reposent sur une utilisation appropriée des supercalculateurs actuels composés d'un grand nombre de nœuds travaillant en parallèle. Un levier d'amélioration des modèles de PNT dans les prochaines années est de poursuivre l'affinement de la résolution horizontale pour mieux décrire l'orographie du relief et les phénomènes d'échelle hectométrique. Cet objectif ne pourra être atteint qu'en adaptant les méthodes numériques aux supercalculateurs de plus en plus parallèles du futur.

La méthode numérique semi-implicite (SI) actuellement employée dans le modèle AROME traite les termes responsables de la propagation des ondes rapides dans un problème implicite linéaire. Combinée avec un schéma semi-Lagrangien pour traiter les termes d'advection, alors que tous les autres termes sont traités explicitement, les plus fortes contraintes de stabilité numérique s'en trouvent affaiblies. Un grand pas de temps est ainsi utilisé et permet de respecter les délais fortement contraints de la PNT, en limitant le nombre d'étapes intermédiaires pour fournir une prévision à temps, au prix notamment d'une dégradation d'une partie du signal non-hydrostatique de petite échelle.

La méthode semi-implicite repose sur la construction d'un opérateur linéaire approchant les équations d'Euler pleinement compressibles, et sur le choix d'un état de base tels que les ondes les plus rapides soient traitées implicitement. Un état de base atmosphérique homogène suivant la direction horizontale sur un terrain plat est actuellement considéré. Il permet notamment de séparer les parties horizontale et verticale du problème et autorise alors une large gamme de discrétisation des opérateurs de dérivée horizontale. Dans la version actuelle du modèle, une fois le domaine bi-périodisé horizontalement, les champs météorologiques peuvent être décomposés en différentes harmoniques par l'utilisation d'un algorithme de Transformée de Fourier Rapide. Cela permet d'une part de calculer très précisément les opérateurs de dérivée horizontale, et d'autre part de résoudre trivialement le problème implicite dans cet espace spectral.

Toutefois cet algorithme requière de nombreuses communications entre les nœuds de calcul notamment lors de la transposition du vecteur d'état, posant ainsi un problème de scalabilité dans le contexte d'utilisation de machines de plus en plus massivement parallèles. Une alternative où les opérateurs de dérivées horizontales sont discrétisées en différences finies et où le problème implicite est inversé via un solveur de Krylov est ainsi exposée. Une fois que les paramètres de ce solveur sont correctement réglés, on montre que seules quelques itérations suffisent pour atteindre une solution de qualité acceptable, y compris pour des écoulements à plusieurs régimes fortement non linéaires. Hormis pour le calcul de certains produits scalaires, on montre que les différents opérateurs appliqués sont aussi locaux que ceux utilisés dans la classe des modèles Horizontalement-Explicitement/Verticalement-Implicite (HEVI) utilisant une méthode de pas de temps fractionné, réputés comme étant particulièrement scalables dans le paradigme de parallélisation actuel. Des efficacités comparables sont ainsi atteintes entre les deux classes de modèles HEVI et SI. Cela suggère une amélioration significative de la scalabilité de cette nouvelle version par rapport à la version spectrale actuelle du modèle AROME. Ces expériences ont été

menées pour différents pas de temps, y compris des plus petits que ceux actuellement considérés, pour mieux décrire le signal non-hydrostatique de petite échelle.

Lorsque des résolutions hectométriques sont considérées, les plus fortes pentes qui résultent d'une meilleure description de l'orographie, conduisent à des instabilités numériques. On montre qu'il suffit de considérer un état de base contenant cette fois-ci l'orographie au lieu d'un terrain plat, en conservant les autres hypothèses, pour améliorer significativement la stabilité numérique. Les expériences menées montrent un gain d'une dizaine de degrés sur la pente maximale par rapport à la version actuelle. Dans ce cas, le problème n'est plus séparable et les transformées de Fourier sont immédiatement abandonnées au profit d'une discrétisation en différences finies et d'un solveur de Krylov dont le conditionnement n'est que faiblement dégradé par rapport à la version actuelle où ces termes orographiques sont traités explicitement.

Composition du jury :

Rapporteurs

M. Xavier Blanc (Laboratoire Jacques-Louis Lions, Université Paris Diderot)

M. Thomas Dubos (Laboratoire de Météorologie Dynamique, Ecole Polytechnique)

M. Piet Termonia (Ghent University, Belgique)

Examineur

Mme Christine Lac (Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse)

Encadrants

M. Ludovic Auger (Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse), co-directeur de thèse

M. Pierre Bénard (Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse), directeur de thèse