

## Simulations micromagnétiques et parallélisation GPU de l'équation de Landau-Lifshitz-Gilbert stochastique

**Matthieu BOILEAU**, IRMA UMR 7501, INRIA MACARON - Strasbourg

**Raphaël CÔTE**, IRMA UMR 7501 - Strasbourg

**Clémentine COURTÈS**, IRMA UMR 7501, INRIA MACARON - Strasbourg

**Paul-Antoine HERVIEUX**, IPCMS UMR 7504 - Strasbourg

**Giovanni MANFREDI**, IPCMS UMR 7504 - Strasbourg

**Lauriane TURELIER**, IRMA UMR 7501 - Strasbourg

L'intérêt pour les nano-objets ferromagnétiques (nanofils, nanocouches) est en forte croissance du fait de leur intégration dans les dispositifs de stockage d'information. La prédiction de leur dynamique à l'échelle mésoscopique nécessite des outils de simulation numérique précis et performants. Dans ce travail, l'influence de la température sur les propriétés magnétiques fondamentales de ces objets est étudiée, en particulier la dépendance de la température de Curie ( $T_C$ ) à la taille du système.

Le modèle continu sous-jacent repose sur l'équation de Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG). Pour y intégrer les fluctuations thermiques, un champ magnétique stochastique (bruit blanc) dont la variance est proportionnelle à la température est ajouté au champ effectif. Une difficulté numérique majeure de cette approche réside dans la forte dépendance des résultats vis-à-vis du pas d'espace  $\Delta x$  : les fluctuations agissant physiquement à l'échelle atomique ( $a_{\text{eff}}$ ), une implémentation naïve sur un maillage de taille supérieure mène à des températures de Curie erronées. Ce problème d'homogénéisation est résolu par une méthode de redimensionnement de la température par un facteur  $\Delta x/a_{\text{eff}}$ . Cette stratégie, décrite dans [1], permet de retrouver des valeurs de  $T_C$  macroscopiques indépendantes du maillage et d'identifier la loi de puissance régissant les effets de taille finie pour des géométries 1D et 2D, avec un exposant critique  $\lambda \approx 2$ , une valeur proche des résultats théoriques et expérimentaux.

La résolution de l'équation de LLG stochastique en 3D requiert des temps d'intégration longs pour atteindre l'équilibre thermodynamique, ce qui représente un défi calculatoire. Pour y répondre, le code LLG3D, un solveur écrit en Python, a été développé. Dans [1], une première stratégie de parallélisation en décomposition de domaine a été mise en œuvre, permettant d'exploiter efficacement les ressources de calcul de type CPU multicœurs. Afin de repousser les limites de temps de simulation, une implémentation sur GPU a été réalisée au moyen de la bibliothèque OpenCL, ce qui ouvre la voie à l'étude statistique de systèmes magnétiques instationnaires.

Cet exposé présente l'approche numérique adoptée pour résoudre l'équation de LLG stochastique, les résultats obtenus pour la dépendance de  $T_C$  à la taille du système dans des nanofils et nanocouches, ainsi que les différentes étapes d'optimisation du code : du script Python initial à l'implémentation parallèle CPU, puis à l'implémentation GPU.

- [1] C. Courtès, M. Boileau, R. Côte, P. A. Hervieux, G. Manfredi. *Micromagnetic simulations of the size dependence of the Curie temperature in ferromagnetic nanowires and nanolayers*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **598**, 172040, 2024. doi :10.1016/j.jmmm.2024.172040.