

## ÉLÉMENT DE PORTFOLIO 02



# Logiciel ou bibliothèque logicielle

## 1 DÉFINITION DE CET ÉLÉMENT

**Titre de l'élément :** Bibliothèque CADNA

**URL de l'élément :** <http://cadna.lip6.fr>

## 2 MOTIVATIONS DU CHOIX DE CET ÉLÉMENT

L'évolution des moyens de calcul est telle que la barrière de l'Exascale ( $10^{18}$  opérations en double précision par seconde) a été franchie en 2020. Or chaque opération flottante peut entraîner une erreur d'arrondi et l'accumulation de ces erreurs peut invalider les résultats calculés. La validation numérique des résultats est donc cruciale. La bibliothèque CADNA permet d'estimer la propagation d'erreur d'arrondi dans les simulations numériques. Elle peut être utilisée sur un large éventail de codes : en C/C++ ou Fortran, dans un environnement séquentiel ou parallèle, sur CPU ou GPU. Elle nécessite peu de modifications dans les codes à contrôler et permet d'estimer l'erreur commise dans tout type d'algorithme numérique. La bibliothèque CADNA a ainsi pu être utilisée avec succès pour la validation numérique de codes académiques ou industriels dans différents domaines : astrophysique, physique atomique, chimie, sciences du climat, mécanique des fluides, géophysique,...

## 3 PRÉSENTATION DE CET ÉLÉMENT



La bibliothèque CADNA (Control of Accuracy and Debugging for Numerical Applications) permet de contrôler les erreurs d'arrondi générées par les programmes en arithmétique à virgule flottante. CADNA implante l'Arithmétique Stochastique Discrète (ASD) [12]. Celle-ci consiste à exécuter chaque opération arithmétique plusieurs fois avec l'arrondi stochastique (par excès ou par défaut avec la même probabilité). Puis le test de Student permet, à partir de l'échantillon obtenu, d'estimer le nombre de chiffres significatifs exacts du résultat avec un intervalle de confiance à 95%. Il a été montré que 3 exécutions suffisent pour obtenir une estimation fiable de l'erreur d'arrondi commise [11]. CADNA fournit de nouveaux types (les types stochastiques) et la surcharge de tous les opérateurs et fonctions mathématiques agissant sur des variables stochastiques. CADNA nécessite donc peu de changements dans les codes à contrôler, essentiellement le remplacement des types numériques classiques par des types stochastiques. L'ASD fonctionne de manière synchrone : chaque opération est exécutée 3 fois avant de passer à la suivante. Ainsi le nombre de chiffres corrects d'un résultat peut être connu à tout moment de l'exécution du code. Ceci permet, pendant l'exécution, de détecter les instabilités numériques et aussi d'optimiser les paramètres d'une simulation numérique (pas d'intégration, seuil de convergence) de manière dynamique [8].

La bibliothèque CADNA peut être utilisée dans les codes en C/C++ et Fortran, dans les codes séquentiels ou parallèles (utilisant OpenMP et/ou MPI). Une attention particulière a été portée à l'optimisation des performances de CADNA afin que son surcoût dans les simulations numériques reste raisonnable [3]. Ces dernières années, CADNA a été étendue à la précision quadruple (128 bits) [6] et à la précision demie (16 bits) [10]. En outre, la version de CADNA qui permet de contrôler les codes sur architecture hybride CPU-GPU a bénéficié de différentes optimisations et de nouvelles fonctionnalités [4].

Par rapport à des simulations en double précision (64 bits), les simulations en précision réduite (32 ou 16 bits) ou mixte offrent l'avantage de réduire le temps d'exécution, l'empreinte mémoire et l'énergie consommée. La bibliothèque CADNA permet alors de s'assurer que ces simulations fournissent toujours des résultats de qualité numérique satisfaisante. Il est aussi possible d'utiliser le logiciel PROMISE [7] qui, à partir d'un code en C/C++ et de la précision souhaitée sur les résultats, génère une version en précision mixte de ce code. PROMISE utilise CADNA pour produire une configuration de types validée.


La bibliothèque CADNA est libre et régulièrement mise à jour à la suite des retours des utilisateurs. Le site web associé fournit différentes versions de CADNA incluant une documentation détaillée, des exemples d'utilisation, ainsi que des outils liés à CADNA : un "cadnaizer" pour l'instrumentation automatique des codes à analyser et "cadtrace" qui identifie automatiquement les instructions d'un code responsables d'instabilités numériques. Nous sommes contactés régulièrement via la liste [cadna-team@lip6.fr](mailto:cadna-team@lip6.fr) pour des questions ou des demandes de fonctionnalités supplémentaires. Nous avons veillé à la facilité d'installation de CADNA, notamment en prenant en compte différents matériels, compilateurs et environnements. Les utilisateurs peuvent être des chercheurs ou ingénieurs externes inconnus de l'équipe, des partenaires nous ayant sollicités pour une collaboration, des membres (permanents ou non) de l'équipe. Les contributeurs de CADNA (une douzaine au fil des années) sont essentiellement des enseignants-chercheurs, doctorants ou stagiaires de l'équipe. CADNA a aussi bénéficié de développements et de tests effectués par l'équipe support de l'IDRIS (centre de calcul national) et de contributions de l'université de Sydney sur des aspects plus théoriques.

L'équipe contribue au projet ANR Interflop (2021-25) qui vise à proposer une plateforme unifiée d'analyse d'erreur pour l'arithmétique flottante. La bibliothèque CADNA va être intégrée dans cette plateforme, ainsi que les logiciels de validation numérique Verrou [5] et VerifiCarlo [2], eux aussi fondés sur une approche probabiliste. Ces logiciels effectuent aussi des perturbations des résultats. Contrairement à ces logiciels, CADNA utilise une approche synchrone, ce qui permet en une exécution d'obtenir à la fois la qualité numérique des résultats et un bilan des instabilités commises.

Sur la période évaluée, CADNA a généré différentes collaborations, notamment avec IFPEN (IFP Énergies Nouvelles), les laboratoires IJCLab (physique des particules) [1] et LOCEAN (sciences du climat) [4]. Dans le cadre de la collaboration de l'équipe avec RIKEN au Japon, CADNA et PROMISE ont pu être testés sur le supercalculateur "Fugaku". Des travaux menés avec RIKEN ont porté sur la réduction du coût de la validation numérique par CADNA dans les simulations haute performance [9]. Une perspective à ces travaux collaboratifs est l'optimisation des performances de noyaux de calcul en algèbre linéaire utilisant CADNA.

## 4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] David Chamont, Roméo Molina, Vincent Lafage, and Fabienne Jézéquel. Investigating mixed-precision for AGATA pulse-shape analysis. In *26th International Conference on Computing in High Energy & Nuclear Physics*, Norfolk, Virginia, United States, May 2023. Jefferson Lab.
- [2] Christophe Denis, Pablo de Oliveira Castro, and Eric Petit. Verificarlo : checking floating point accuracy through Monte Carlo Arithmetic. In IEEE, editor, *2016 IEEE 23rd Symposium on Computer Arithmetic (ARITH)*, Santa Clara, United States, July 2016.
- [3] P. Eberhart, J. Brajard, P. Fortin, and F. Jézéquel. High performance numerical validation using stochastic arithmetic. *Reliable Computing*, 21 :35–52, 2015.
- [4] Pacôme Eberhart, Baptiste Landreau, Julien Brajard, Pierre Fortin, and Fabienne Jézéquel. Improving CADNA Performance on GPUs. In *2018 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)*, pages 1016–1025, Vancouver, Canada, May 2018. IEEE.
- [5] François Févotte and Bruno Lathuillère. VERROU : Assessing Floating-Point Accuracy Without Recompiling. working paper or preprint, October 2016.
- [6] S. Graillat, F. Jézéquel, R. Picot, F. Févotte, and B. Lathuillère. Numerical validation in quadruple precision using stochastic arithmetic. In Matthieu Martel, Nasrine Damouche, and Julien Alexandre Dit Sandretto, editors, *TNC'18. Trusted Numerical Computations*, volume 8 of *Kalpa Publications in Computing*, pages 38–53. EasyChair, 2018.
- [7] Stef Graillat, Fabienne Jézéquel, Romain Picot, François Févotte, and Bruno Lathuillère. Auto-Tuning for Floating-Point Precision with Discrete Stochastic Arithmetic. *Journal of Computational Science*, 36 :101017, September 2019.
- [8] Fabienne Jézéquel. Benefits of stochastic arithmetic in high performance simulations and arbitrary precision codes. In *19th international symposium on Scientific Computing, Computer Arithmetic and Validated Numerics (SCAN 2020)*, Szeged, Hungary, September 2021.

- 
- [9] Fabienne Jézéquel, Stef Graillat, Daichi Mukunoki, Toshiyuki Imamura, and Roman Iakymchuk. Can we avoid rounding-error estimation in HPC codes and still get trustworthy results? In *NSV'20, 13th International Workshop on Numerical Software Verification*, Los Angeles, CA, United States, July 2020.
  - [10] F. Jézéquel, S. sadat Hoseininasab, and T. Hilaire. Numerical validation of half precision simulations. In *1st Workshop on Code Quality and Security (CQS 2021) in conjunction with WorldCIST'21 (9th World Conference on Information Systems and Technologies)*, Terceira Island, Azores, Portugal, 2021.
  - [11] J. Vignes. A Stochastic Arithmetic for Reliable Scientific Computation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 35(3) :233–261, September 1993.
  - [12] J. Vignes. Discrete Stochastic Arithmetic for Validating Results of Numerical Software. *Numerical Algorithms*, 37(1–4) :377–390, December 2004.