



HAL
open science

Prototypage rapide d'un supercalculateur dédié à la radioastronomie

Nicolas Gac, Jean-François Nezan, André Ferrari, Chiara Ferrari, Martin Quinson, Cedric Dumez-Viou

► To cite this version:

Nicolas Gac, Jean-François Nezan, André Ferrari, Chiara Ferrari, Martin Quinson, et al.. Prototypage rapide d'un supercalculateur dédié à la radioastronomie. L'Interdisciplinarité. Voyages au-delà des disciplines, CNRS Edition, 2023, 978-2-271-13983-2. <hal-03704333>

HAL Id: hal-03704333

<https://hal.science/hal-03704333v1>

Submitted on 26 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Prototypage rapide d'un supercalculateur dédié à la radioastronomie

Nicolas Gac (1), Jean Francois Nezan (2), André Ferrari (3), Chiara Ferrari (4), Martin Quinson (5), Cédric Viou (6)

Le projet SKA [1] est considéré comme l'une des plus grandes machines de physique en cours de réalisation sur Terre. Les instruments de cet observatoire radio-astronomique ont été conçus entre 2012 et 2020 par SKA Organisation [2], société avec des membres de 14 pays (parmi lesquels le CNRS) et des collaborations avec environ 100 organisations de plus de 20 pays.

Aujourd'hui, c'est une Organisation Inter Gouvernementale (à laquelle la France est en train d'adhérer [3]), le SKA Observatory (SKAO), qui a la charge de la construction et de l'exploitation des télescopes et des infrastructures nécessaires à fournir aux astrophysiciens les données scientifiques à analyser. Parmi ces dernières, nous mentionnons les supercalculateurs HPC (*High Performance Computing*) qui seront partie intégrante de l'Observatoire SKA. L'un des défis majeurs à relever est de parvenir à évaluer les performances (en temps de calcul et en énergie) des nouveaux algorithmes imaginés par les radioastronomes sur des infrastructures de calcul complexes qui n'existent pas encore. C'est dans cette perspective que l'équipe DARK-ERA [3] – formée d'informaticiens, de spécialistes du traitement du signal et de radioastronomes provenant de cinq laboratoires (IETR, IRISA, L2S, Lagrange, ObsNançay) – développe un nouvel outil de prototypage rapide pour ces supercalculateurs.

Le SKA, un mégaprojet scientifique

La construction de SKAO a officiellement démarré au 1^{er} juillet 2021. Il en résultera un observatoire exploitant deux télescopes constitués par des grands réseaux d'antennes illustrés en Fig. 1 (des dizaines de milliers de petites antennes en Australie, SKA-LOW, et des dizaines de paraboles d'environ 15 m de diamètre en Afrique du Sud – SKA-MID), capables de capter globalement le rayonnement électromagnétique émis par les objets célestes entre 50 MHz et 15.4 GHz.

Au cours des prochaines décennies, cet observatoire permettra de faire des découvertes fondamentales sur l'univers, avec un vaste éventail de sujets scientifiques couverts en cosmologie, en astronomie et en physique fondamentale.



Fig. 1 Réseaux de paraboles (à gauche) et d'antennes (à droite) de l'Observatoire SKA déployés respectivement en Afrique du Sud et en Australie (crédits SKAO)

En plus d'être un télescope majeur, le SKA sera également l'un des plus grands projets de Big Data au monde, avec des défis informatiques sans précédent. La chaîne de traitement illustrée en fig.2 verra l'utilisation de deux supercalculateurs. Le premier, le Central Signal Processor (CSP), sera chargé de la recherche de « pulsars » (étoiles à neutrons émettant de forts rayonnements électromagnétiques) et de la corrélation des signaux électriques provenant des antennes pour calculer les visibilité interférométriques. Le second, le Science Data Processor (SDP), transformera les données interférométriques brutes en données scientifiques. En mode imageur, le SDP fournira aux astronomes un ensemble d'images du ciel observées à différentes fréquences, appelées « hypercubes ». Cette nouvelle génération d'interféromètres est caractérisée par de très larges champs de vision, une grande largeur de bande, une haute sensibilité et une haute résolution. Si en astronomie optique, la correction des perturbations dues à l'atmosphère est appliquée en temps réel au miroir, en radioastronomie, elle est appliquée dans le supercalculateur qui effectue le traitement de l'image. Des algorithmes mesurent les perturbations engendrées par l'atmosphère sur le signal provenant d'objets célestes et ils appliquent ensuite une correction qui permet d'annuler ces effets. Jusqu'à présent, les radioastronomes ont obtenu des résultats étonnants, par exemple avec LOFAR (pour *LOW Frequency ARray*, le plus grand radiotélescope basse-fréquence actuellement, avant l'arrivée de SKA) et la détection de centaines de milliers de galaxies inconnues [4], mais les défis du Big Data du SKA nécessitent un co-développement avec des experts du domaine informatique.

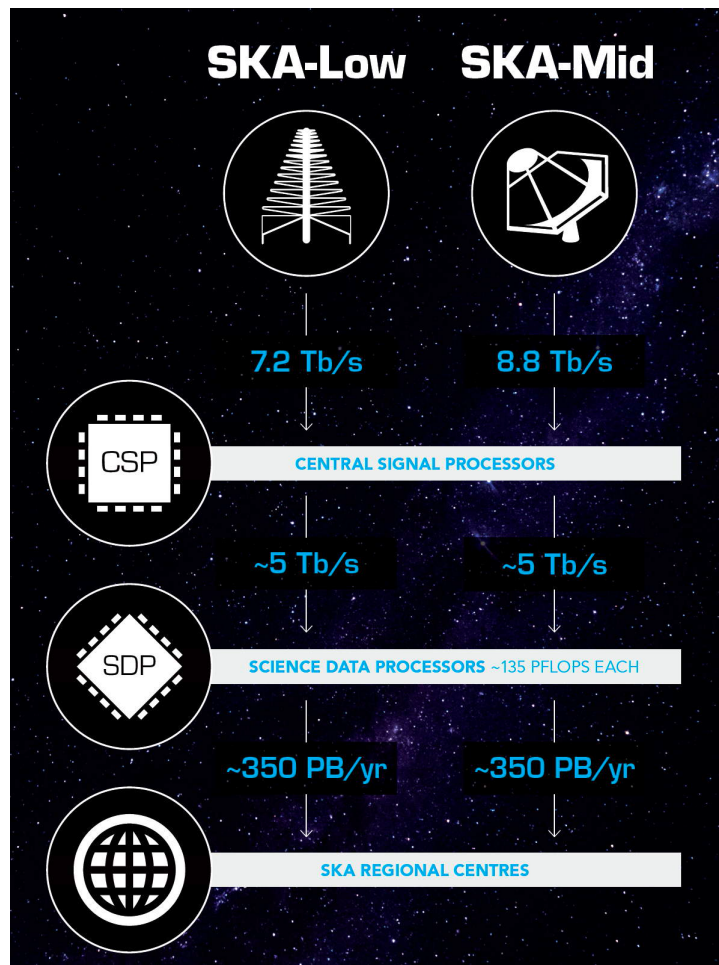


Fig. 2 Chaîne de traitement de l'instrument SKA avec les débits de données associés (crédits SKAO) ; les antennes réceptionnent les ondes, le CSP les corrèle, le SDP forme les images du ciel à différentes longueurs d'ondes, et in fine les centres de calculs régionaux analysent ces « hypercubes ».

Exploration des algorithmes et des architectures de calcul

Le consortium international en charge de relever le défi de la conception du supercalculateur SDP a identifié deux verrous technologiques et un verrou méthodologique : (i) les énormes besoins en calcul, de l'ordre de 250 PetaFlops (250 millions de milliards d'opérations en une seconde), pour traiter des données en streaming temps réel à un débit de 7,2 téraoctets par seconde (10^{12} bits/seconde), ce qui exclut tout stockage exhaustif des données ; (ii) le budget énergétique limité de chaque installation SDP, fixé à 1 MWatt (pour comparaison, le supercalculateur chinois Tianhe-2 a une puissance de 34 PFlops pour 40 MW), ce qui implique la conception d'un superordinateur économe en énergie utilisant des coprocesseurs à faible consommation pour le calcul intensif ; et (iii) l'énorme écart entre les modèles d'algorithmes initiaux définis lors de la conception algorithmique par les astronomes dans des langages de programmation de haut niveau comme Python, et finaux correspondants à la mise en

œuvre effectuée par les experts en calcul intensif. Cette double complexité algorithmique et architecturale rend difficile les estimations précoces des performances des algorithmes candidats. Jusqu'à présent, la plupart des logiciels développés en radioastronomie l'ont été par des astronomes pour des astronomes. Par exemple, le logiciel CASA (*Common Astronomy Software Applications*) a été développé pour répondre aux besoins de post-traitement des données des radiotélescopes des années 1990. Ces logiciels de radioastronomie devront être adaptés au supercalculateur SDP, qui exécute des millions de tâches de calcul sur des architectures hautement hétérogènes avec deux niveaux de parallélisation. Le premier niveau dit à « grain épais » correspond à la distribution des calculs sur les différents nœuds de calcul à base de processeur standard. Sur chacun de ces nœuds, le second niveau dit à « grains fins » fait appel aux cartes accélératrices possédant des circuits intégrés spécialisés avec des milliers de cœurs de calcul (GPU et MPPA) ou des architectures électroniques reconfigurables dédiées (FPGA). Ces éléments de traitement sont généralement gérés à l'aide de plusieurs modèles de programmation dépendant de l'architecture. Ils reposent tous sur les compétences et l'expérience du concepteur, et échouent lorsqu'ils sont appliqués à des projets complexes comme SKA, avec des contraintes spécifiques de temps réel et d'énergie. Ainsi, un outil de prototypage rapide sera nécessaire au moment de la conception, lorsque le système de calcul SDP est dimensionné, mais aussi tout au long de sa durée de vie, pour l'estimation précoce des besoins en temps et en énergie des nouvelles méthodes à exécuter sur le système de calcul SDP. Les explorations des algorithmes et des architectures de calcul doivent se faire conjointement par les astronomes sans que cela nécessite des optimisations manuelles complexes et sujettes aux erreurs dépendant du matériel.

Simulation d'une plateforme de calcul hétérogène à grande échelle

La plateforme de calcul du SDP sera constituée d'un grand nombre de composants hétérogènes assemblés selon une topologie qui n'a pas encore été définie et à laquelle il faudra s'adapter. Au moins trois niveaux de hiérarchie matérielle seront nécessaires : le niveau le plus bas est un processeur ou coprocesseur unique, le niveau intermédiaire est un nœud HPC complexe unique comprenant plusieurs processeurs et coprocesseurs (GPU, FPGA ou MPPA) et une mémoire partagée, et le niveau le plus élevé est constitué de plusieurs nœuds interconnectés par un réseau à la topologie donnée.

L'objectif de l'outil de prototypage rapide « SimSDP » est de fournir des analyses précoces en termes d'utilisation de la mémoire, de latence, de débit et de consommation d'énergie grâce à une approche mixte originale basée sur l'exécution et la simulation. Plus ces analyses seront effectuées tôt dans le processus de développement, plus les choix d'architecture seront éclairés le moment venu, et plus les efforts d'optimisation seront simples. Suivant une méthodologie d'Adéquation Algorithme Architecture (AAA), SimSDP s'appuiera sur un modèle de flux de données de l'algorithme et un modèle de l'architecture cible. Il sera basé sur deux outils existants, PREESM [5] et SimGrid [6], développés

respectivement pour l'informatique embarquée et le calcul haute performance. Comme illustré Fig.3, PREESM évalue avec précision les performances d'un nœud unique hétérogène et SimGrid simule avec précision les communications inter-nœuds. PREESM fournira donc à SimSDP des évaluations précises pour des nœuds uniques avec des architectures hétérogènes (comme des CPU et des coprocesseurs). SimGrid, quant à lui, fournira à SimSDP des estimations précises des communications entre un ensemble de nœuds HPC complexes pour optimiser les calculs de mapping/planification. Leur association permettra de réaliser des simulations fiables et rapides de systèmes HPC hétérogènes à grande échelle et sera ainsi capable de gérer l'énormité des données pendant l'exploration de l'espace de co-conception pour l'algorithme et l'architecture de calcul finale.

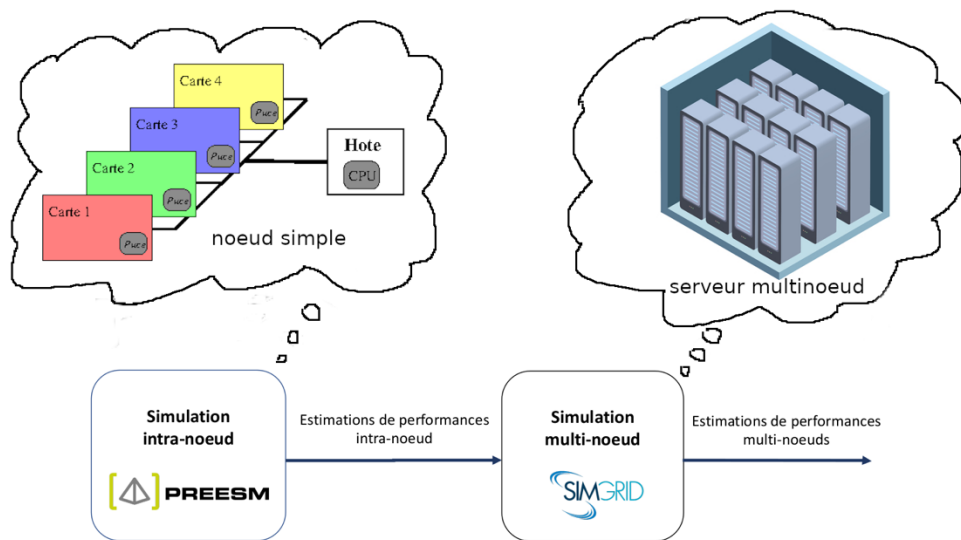


Fig. 3 Simulateur SimSDP avec l'estimation de performances (temps de calcul et énergie) par l'outil PREESM sur chacun des nœuds associés aux cartes accélératrices avec une puce GPU, FPGA ou MPPA) et par l'outil SimGrid sur le supercalculateur multi-nœud.

Les prototypes de SDP sur les coprocesseurs MPPA et FPGA seront développés et profilés sur des ensembles de données à petite échelle provenant du radiotélescope NenuFAR de l'observatoire de Nançay (un des instruments éclaireurs de SKAO), et permettront d'évaluer le potentiel de ces accélérateurs à plus faible consommation énergétique que les processeurs graphiques (GPUs). Le MPPA a déjà montré des performances énergétiques prometteuses sur d'autres étages de calcul du pipeline de SKAO, pour le corrélateur et la calibration. Pour les architectures FPGA, un sujet d'attention lors de la conception de ce prototype est la plus grande facilité de développement offert par les outils de synthèse de haut niveau ; la promesse de ces outils est de simplifier la phase de configuration de ces circuits logiques permettant de concevoir des architectures de calcul « sur mesure » à l'aide de

langages de programmation logiciels comme le C et non plus avec des langages de description matérielle requérant une plus grande expertise et un temps de développement plus long.

Conclusion

Lors de la phase finale du projet DARK-ERA, les espaces d'algorithmes et d'architectures seront explorés dans le contexte du projet SKA grâce aux simulations à grande échelle offertes par SimSDP. Les chaînes de traitement (ou « pipelines ») d'imagerie radioastronomique seront décrites à un haut niveau d'abstraction permettant de cibler tout système HPC multinœuds hétérogène que SKAO pourrait choisir à l'avenir. Plusieurs configurations de l'architecture SDP (nombre de nœuds, type d'accélérateurs) et plusieurs configurations d'algorithmes SDP seront ensuite explorées.

L'outil de simulation SimSDP facilitera l'optimisation des techniques de réduction de données et de traitement du signal au sein du pipeline SDP par les astronomes eux-mêmes. Il permettra ainsi à la communauté astronomique d'exploiter pleinement la mine d'or de découvertes que recèlent les données de SKAO.

Références

- [1] Ferrari, C., *Le Square Kilometre Array (SKA) : un radiotélescope géant pour étudier l'aube et l'évolution du cosmos*, 2020, Reflets de la Physique, 67, 10
- [2] "SKA Organisation", <https://www.skatelescope.org>
- [3] "DARK-ERA (Dataflow Algorithm aRchitecture co-design of SKA pipeline for ExascaleRadio Astronomy), projet ANR-20-CE46-0001-01", <https://dark-era.pages.centralesupelec.fr/>
- [4] <https://ska-france.oca.eu/fr/news/626-une-etape-historique-pour-l-adhesion-de-la-france-a-skao>
- [5] <https://www.observatoiredeparis.psl.eu/premiere-carte-du-ciel-du.html?lang=en>
- [6] "SimGrid, Simulation of Distributed Computer Systems", <https://simgrid.org>
- [7] "PREESM, an open source rapid prototyping tool," <https://preesm.github.io>.

Affiliations des auteurs

1 - Maître de conférence à l'Université Paris-Saclay, L2S (Université Paris-Saclay/CNRS/CentraleSupélec), Gif-sur-Yvette, nicolas.gac@l2s.centralesupelec.fr

2 – Professeur à l'INSA Rennes, IETR (Université Rennes/INSA Rennes/CNRS), Rennes, jean-francois.nezan@insa-rennes.fr

3 – Professeur à l'université Côte d'Azur, Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Laboratoire Lagrange, Nice, Andre.Ferrari@unice.fr

4 - Astronome à l'Observatoire de la Côte d'Azur, Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Laboratoire Lagrange, Nice, chiara.ferrari@oca.eu

5 – Professeur à l'ENS Rennes, IRISA (Univ Rennes/Inria/CNRS), Rennes, martin.quinson@ens-rennes.fr

6 - Ingénieur de recherche CNRS, USN (Observatoire de Paris/CNRS), Nançay, Cedric.Viou@obs-nancay.fr

Glossaire

Big Data : traitement numérique de données massives.

Interférométrie : superposition des ondes électromagnétiques provenant du ciel permettant l'extraction d'information.

Flops : vitesse de calcul exprimée en nombre d'opérations effectuées par seconde.

circuit intégré FPGA (Field Programmable Gate Array) : réseau de portes programmables pouvant être reconfiguré après fabrication pour concevoir des circuits logiques « sur mesure ».

circuit intégré GPU (Graphic Processing Unit) : unités de calcul utilisés pour l'accélération des traitements graphiques et des algorithmes massivement parallélisables.

circuit intégré MPPA (Massively Parallel Processor Array) : réseau de processeurs massivement parallèles développé par la société Kalray.