Exploration architecturale pour l'accélération des traitements en radioastronomie

Thèse université Paris Saclay (financement 50% ANR 50% Programme Blanc ED STIC)

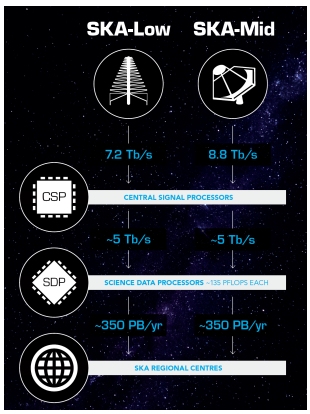
octobre 2022/septembre 2025

Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S)
Inverse Problem Group (GPI)
Encadrants : nicolas.gac@l2s.centralesupelec.fr (dir.) l2s.centralesupelec.fr/u/gac-nicolas/
francois.orieux@l2s.centralesupelec.fr l2s.centralesupelec.fr/u/orieux-francois/

Mots clefs : Adéquation Algorithme Architecture, FPGA, High Level Synthesis, calcul parallèle, radioastronomie

SKA computing Le très grand radiotelescope SKA [1] va générer dès 2024 une quantité massive de données (∼10 Tb/s) impossible à stocker qui impose un traitement en temps réel. Le défi à relever est de générer des images multidimensionnelles du ciel avec un gain en sensibilité d'un ordre de magnitude à partir du flux de données brutes provenant des milliers d'antennes. Sur toute la chaîne de traitement, une démarche d'Adéquation Algorithme Architecture devra donc être mise en œuvre pour respecter les contraintes de débit, coût et précision de calcul, ainsi que de consommation énergétique.

Le radiotelscope SKA déployé en 2024+ en Afrique sur Sud et en Australie.

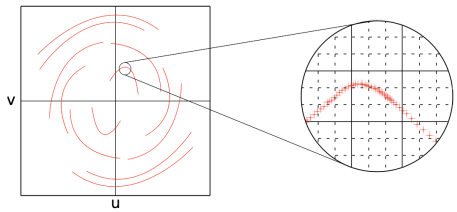


Chaine de traitement HPC à trois étages : CSP, SDP, et SRC.

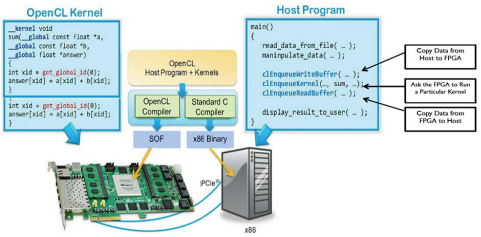
Groupe Problème Inverse Via son implication dans des projets collaboratifs, le GPI mène des travaux en adéquation algorithme architecture pour l'accélération de la résolution du problème de grande dimension que constitue le traitement des donnés du SKA : (i) le projet ExaSKA (L2S/Obs-Paris/Atos Bull) porté par la thèse de Nicolas Monnier a pour objectif l'accélération sur serveur multi-noeuds à base de GPU d'algorithmes de radioastronomie, (ii) le projet ANR Dark-era [2] (2021-25) coordonné par le L2S vise à dimensionner le serveur de calcul SDP (Science

Data Processing). Un défi crucial consiste en effet à évaluer les performances, tant en temps qu'en énergie, des nouveaux algorithmes de flux de données scientifiques complexes sur un serveur de calcul multi-noeuds complexe qui n'existe pas encore, ce qui est difficilement possible sans des méthodes de co-conception efficaces et des outils de prototypage rapide. Dans ce but, le simulateur intra-noeud et inter-noeud SimSDP adapté au contexte du radiotelescope SKA est en cours de developpement par le consortium Dark-era regroupant des compétences complémentaires en informatique, traitement du signal et astronomie, avec douze membres permanents provenant des équipes de SimGrid [3] (IRISA) et de PREESM [4] (IETR), du GPI au L2S et de deux équipes de radioastronomie aux Obs. de Paris et de la Côte d'Azur. Le L2S a pour mission plus spécifique de concevoir un prototype d'accélérateur sur FPGA de méthodes d'imagerie et de calibration pour le radiotelescope NenuFAR [5] de l'observatoire de Nançay. Ce radiotelescope précurseur à petite échelle de SKA produit des données à un débit cent fois moins important qui sera ajustable pour être traité par un seul noeud de calcul avec une seule carte accélératrice. Les travaux du doctorant s'inscriront dans cette dynamique de recherche du Groupe Problème Inverse (GPI).

Accélérateurs *low power* Les étages les plus couteux en temps de calcul sein de la chaine de traitement du SDP sont le gridding/degridding des visibilités dans le plan de Fourier, et la déconvolution. Les processeurs many cores de type GPUs (*Graphic Processing Units*) sont à l'heure actuelle la cible technologique privilégiée afin d'obtenir des facteurs d'accélération d'un ou deux ordres de magnitude. Plusieurs parallélisations de ces algorithmes adaptées à cette architecture de calcul ont ainsi déjà été proposées [6,7]. Toutefois d'autres architectures comme les FPGAs ou les MPPAs de la société Kalray peuvent se relever plus pertinentes grâce à une effacité energétique potentielle plus intéressante.



Echantillonnage non uniforme dans le plan (u,v) nécessitant une étape de gridding avant la FFT



Synthèse de haut niveau sur plateforme FPGA

Outils HLS pour FPGA Les FPGAs offrent une plus grande souplesse que les processeurs classiques ou spécialisés comme les GPUs : l'architecture de calcul est conçue sur mesure, s'adaptant aux contraintes spécifiques des algorithmes de l'application visée. Si les langages de description matérielle de type VHDL ou Verilog permettent d'atteindre une adéquation fine entre l'architecture et l'algoritme, ils requièrent un temps de développement et de validation très long comparé au développement logiciel classique. La synthèse haut niveau (HLS) offre un compromis entre temps de développement et performance en s'appuyant sur des langages haut niveau comme le C, le C++, OpenCL. La démocratisation de l'usage des FPGAs pour l'accélération des calculs est loin d'être encore au même niveau que celle apparue en 2006 pour les GPUs (Nvidia) avec le paradigme CUDA de programmation parallèle. En radioastronomie, à notre connaissance seule l'équipe Astron [8] a exploré le potentiel d'accélération offert par les FPGAs. Les outils HLS, bien que fournissant une abstraction permettant une facilité d'accès inégalée sur ces plateformes, apportent leurs lots de compromis, et une des thématiques de la thèse sera de les évaluer puis de partager à la communauté ces retours d'expérience.

Objectifs de la thèse L'objectif principal de cette thèse sera de proposer des architectures originales de calcul adaptées au contexte du SKA. La cible privilégiée sera le FPGA car offrant une grande liberté de conception dans une démarche d'adéquation algorithme architecture et offre une basse consommation de plus en plus recherchée dans le domaine HPC. Cette exploration architecturale se concentrera tout d'abord sur les algorithmes de gridding-dégridding et de déconvolution en faisant appel aux outils HLS (High Level Synthesis) d'Intel (OneAPI et HLS compiler). Le doctorant bénéficiera de l'accès au radiotelescope NenuFAR sur le site de l'observatoire de Nancay. Ce radiotelescope constituera pour le doctorant une plateforme d'expérimentation afin valider les concepts architecturaux développés au cours de sa thèse et d'évaluer de manière concrète le pouvoir d'accélération de la technologie FPGA par rapport au GPU. Le doctorant bénéficera de l'expertise du GPI à la fois sur les outils HLS principalement mené sur la reconstruction tomographique [9], et sur les algorithmes de radioastronomie avec la thèse en cours de Nicolas Monnier. Par ailleurs, selon l'évolution technologique des architectures de calcul au cours de la thèse, l'exploration architecturale pourra être élargie et ne pas se restreindre au seul FPGA même si ces derniers offrent déjà un large champs d'exploration. Les travaux appliqués au domaine de la radioastromie pourront dans un second temps être étendu à d'autres domaines possédant des proximités algorithmiques. Nous pensons par exemple à l'imagerie IRM qui se base aussi sur des techniques de degridding.

Profil recherché Le candidat en **Master 2** aura des compétences en **programmation parallèle** de type Cuda/OpenCL et/ou OpenCL-FPGA ainsi qu'une connaissance générale des architectures usuelles (CPU, GPU, FPGA). Un bon niveau de connaissance en **traitement du signal et des images** sera tout particulièrement appréciées.

References

[1] Fête de la science www.centralesupelec.fr/fr/radiostronomie-la-decouverte-du-projet-ska-square-kilometre-array
[2] Projet ANR Dark-era https://dark-era.pages.centralesupelec.fr
[3] H. Casanova et al., "Simulation of Distributed App." J. Parallel Distrib. Comput., 2014, hal-01017319v2.
[4] "PREESM, an open source rapid prototyping tool," https ://preesm.github.io.
[5] https://nenufar.obs-nancay.fr/
[6] B. Veenboer and J.W. Romein, Radio-astronomical imaging on GPU. Astr. Comput. (2020).
[7] B. Merry, Faster GPU-based convolutional gridding via thread coarsening, Astr. Comput. (2016)
[8] B Veenboer, JW Romein, Radio-astronomical imaging : Fpgas vs gpus. Euro-Par (2019)
[9] D. Diakite and N. Gac, OpenCL FPGA Optimization applied to tomography, IEEE FPL (2021)