

TITRE DU PROJET

Optimisation des stratégies d'ordonnement et prédiction des performances pour des applications dominées par le flux des données sur plateformes hétérogènes: cas du système de traitement des données de l'Observatoire SKA et synergies avec les systèmes radars de future génération.

RÉSUMÉ DU PROJET

L'objectif de ce projet est de proposer des **approches innovantes et optimisées d'ordonnement temps-réel de chaînes de réception et de traitement de signal, sur plateformes matérielles hétérogènes** (CPU, GPU, cartes réseau rapides et intelligentes), pour des applications en radio-astronomie (dans le cadre de la contribution française à l'Observatoire SKA) ainsi que des radars de nouvelle génération (tels les radars de surveillance aérienne). Bien que cette étude soit dédiée à ces cas d'applications, un **impact important est attendu dans d'autres champs applicatifs** partageant des contraintes similaires (infrastructures réseau 5G/6G, systèmes de gestion de grille électrique, etc.). Le travail technique inclut 3 phases : 1) une phase de **développement et d'outillage de codes de référence** (*micro-benchmarks* et *pipelines* complets) sur différentes cibles matérielles et avec les outils logiciels standards fournis par les fabricants ; 2) une phase d'analyse de ces résultats afin de fournir les éléments nécessaires au **paramétrage de modèles formels de l'exécution** visant à prédire les performances dans un contexte de passage à l'échelle et de mises à jour régulières des solutions matérielles ; 3) une phase d'**expérimentation et de tests sur plateforme hétérogène** afin de valider les résultats de la modélisation. Ce travail s'appuiera sur des ressources matérielles financées par le DIM ORIGINES¹ (plateforme STREAMS en cours d'intégration à l'IDRIS) et s'inscrira dans un tissu collaboratif très riche, au niveau international à travers le programme Rising STARS², une initiative soutenue par le programme Horizon 2020 MSCA-RISE, ainsi qu'au niveau national à travers une **collaboration étroite avec l'équipe ROMA d'Inria**, bénéficiant d'échanges avec un programme de partenariat stratégique entre Inria et l'entreprise Atos. Au-delà du partenariat entre l'Observatoire de Paris (OP), Thales LAS et Inria, le/la candidat(e) retenu(e) bénéficiera d'un soutien à la mobilité maximum de 12 mois, grâce au programme Rising STARS, pour des expérimentations visant à mettre en œuvre un prototype du système de traitement central de SKA, qui sera testé sur des précurseurs en Australie, dont l'expérience UTMOST.

EXCELLENCE SCIENTIFIQUE

Contexte: SKAO, le SKA Observatory, est le plus grand projet de radio astronomie aujourd'hui en construction (depuis Juillet 2021). Alors que la France a annoncé sa décision de devenir membre de SKAO en février 2021, la co-conception et la maîtrise d'œuvre de la construction (physique et logicielle) de l'étage de traitement central (SDP pour *Science Data Processor* dans la nomenclature SKA) des flux de données d'observation, un sous-système critique de l'observatoire (incluant la partie imageur susmentionnée) est un des principaux apports des équipes françaises à la construction de SKAO. Le RSM NG est un radar de dernière génération. Ces deux cas d'applications sont des **exemples concrets et très stratégiques pour les tissus académiques et industriels français**, représentatifs d'une nouvelle génération de systèmes cyber-physiques (SCP), nécessitant la mise en œuvre d'une chaîne d'acquisition de signal très haut débit (jusqu'à 10 Tb/s en continu pour SDP, 10 To/s pour les radars) rendue interopérable à très basse latence avec une chaîne de traitement complexes des données, s'appuyant sur une très forte puissance de calcul (échelle 10 à 100 PFLOP/s [1]) pour leur réduction en temps-réel, afin de permettre la prise de décision sur l'exécution des opérations et la distribution de données à la communauté des utilisateurs.

État de l'art: À ce jour, le sous-système SDP a été dimensionné à l'aide d'un modèle paramétrique simple, qu'il convient de mettre 1) à jour (cette étude datant de la « Conceptual Design Review » en 2018-2019 [2]) et 2) à niveau, dans la mesure où les outils en place se basent sur des considérations de charge moyenne sur le supercalculateur alors que les scénarios observationnels envisagés sont bien plus complexes et incluent un certain nombre de tâches, plus ou moins dimensionnantes, en amont ou en concurrence de la partie imageur et utilisant les mêmes données. Dans le cas des systèmes radars, les contraintes de complexité et d'encombrement du système d'acquisition-traitement imposent un dimensionnement relativement fixe de l'infrastructure, avec la volonté de tirer partie au mieux des ressources disponibles afin d'atteindre des niveaux de sensibilité et résolution maximum tout en fournissant le plus d'informations possibles sur l'environnement observé (approche massivement multi-hypothèses). Dans ce contexte la communauté des instrumentalistes pour la radio-astronomie et les concepteurs de systèmes radars partagent le même objectif de mettre en œuvre une stratégie d'ordonnement optimisé et totalement maîtrisé d'ensembles de tâches complexes afin de garantir la qualité de service pendant les opérations, adapter les traitements aux pannes de matériel avec la meilleure performance possible, et de prédire les performances pour des mises à jour.

L'observatoire de Paris (OP) et Thales LAS ont pu initier, sous l'impulsion d'un financement de thèse de la région IdF (PRPhD20 – thèse de Julien Plante), des premiers travaux sur l'axe « chaîne d'acquisition très haut débit – Terabit – et traitement de signal massivement multi-hypothèses », dans le même contexte dual du traitement de données des radio-télescopes et des radars de nouvelle génération. Un accent particulier a été mis au cours de cette thèse sur l'ingestion de données très haut débit avec la validation sur prototype d'un lien direct basse latence entre contrôleur réseau et accélérateur GPU multi-100 Gb/s et l'utilisation de GPU avec latence très basse et maîtrisée. Ces travaux ont donné lieu à deux publications dans des conférences internationales ([3], [4]), alors que 2 articles de rang A sont en préparation, visant les communautés radio-astronomie et radar respectivement. Au-delà des champs applicatifs visés, la pertinence de ces travaux est également attesté par la collaboration étroite avec l'entreprise Nvidia (co-signature de [4]) qu'ils ont permis de renforcer. Le prototype de système de détection d'événements transitoires sur l'instrument NenuFAR, précurseur de SKA et opéré par l'OP, décrit dans [3] est aujourd'hui en phase de tests et de validation sur le site de l'Observatoire à Nançay.

Les équipes Inria, notamment ROMA, travaillent depuis de nombreuses années sur des problématiques d'allocation de ressources et d'ordonnements multi-critères, dans un but de dimensionnement des ressources ou afin de minimiser la consommation énergétique des applications. Ces travaux couvrent différents contextes dont des environnements temps-réel et des *datacenters* avec contraintes de qualité de service [6][7][8]. Un point fondamental qui n'a pas encore été traité dans ces

¹ <http://www.dim-origines.fr/spip.php?article368>

² <https://cordis.europa.eu/project/id/873120>

travaux concerne le lien avec les stratégies d'ingestion de données massives et l'optimisation de son intégration avec la chaîne de traitement, dans une vision généralisée de la problématique de gestion des communications et des entrées/sorties.

STREAMS est une plate-forme haute performance pour l'intégration continue et le test de nouvelles technologies répondant aux défis du traitement de flux de données à grande échelle. Cette installation expérimentale, co-financée par le DIM ORIGINES et un consortium public-privé incluant OP et Thales LAS, combine le transport de données multi-Tb/s avec le calcul haute performance et l'analyse de données (y compris les réseaux de neurones profonds) et le stockage à grande capacité et à grande vitesse. Les travaux menés dans ce projet bénéficieront d'un accès privilégié à la plate-forme durant toute leur durée.

Objectifs: Ce projet se place dans la continuité de la thèse PRPhD20 mentionnée ci-dessus et vise à définir et mettre en œuvre une **stratégie de placement optimal des tâches en tenant compte des pénalités de transfert, de synchronisation, de parallélisation / concurrence** des calculs à travers l'utilisation de modèles intégrant la **notion d'un «horizon» à la fois de l'ingestion et du traitement des données**. La méthodologie s'appuiera sur une démarche d'outillage de codes applicatifs, visant à fournir les **éléments dimensionnants pour le paramétrage de modèles de la performance** en y intégrant des contraintes de placement des calculs et des données, de coût des mouvements de données (réseau, ou bus de données), de puissance de calcul disponible et d'empreinte de chaque opération, de budget de latence et de disponibilité en terme de résilience aux pannes. Les tâches techniques principales incluent :

- **Spécifications initiales et implémentation de référence :** L'objectif de ce groupe de tâches est de 1) capturer les spécifications pour les deux applications visées (au-delà de l'algorithmique dédiée, les contraintes de volume de données, de latence maximale et de disponibilité requise sont les premières visées ici, ainsi que le coût global et la consommation énergétique) et 2) développer des instanciations outillées de référence pour les pipelines correspondants (au niveau des noyaux d'ingestion et de calculs élémentaires, pour les micro-benchmarks, et pour des pipelines complets), sur la base des outils standards fournis par les fabricants pour différentes cibles matérielles (modèles de CPU, accélérateurs, cartes réseau intelligentes).
- **Modélisation.** Cette partie du projet vise à identifier les bons outils de modélisation de l'exécution d'applications, basées sur le traitement de flux de données massives, dans un contexte d'hétérogénéité des ressources (en terme de moyens de calcul mais également d'ingestion et de redistribution des flux de données) et de les nourrir avec un paramétrage adéquat, issu d'une campagne d'identification et de quantification des mesurables obtenues sur le code outillé mentionné ci-dessus. Ce travail inclut également le développement de nouvelles fonctionnalités dans ces modèles, concernant l'ingestion de données à haut débit et à faible latence. L'exploitation des résultats de cette phase de modélisation permettra non seulement une automatisation de la stratégie d'ordonnement de pipelines complexes mais également de prédire les performances dans un contexte de passage à l'échelle et d'évolution du matériel fourni par les fabricants.
- **Validation des performances & test :** l'objectif de ce travail est de mettre en œuvre les stratégies d'ordonnement optimisées issues des modèles sur plateformes matérielles hétérogènes, afin de 1) valider les prédictions et 2) évaluer la capacité à porter le code applicatif sur une large variété de solutions matérielles en conservant une grande efficacité (en terme d'utilisation de la puissance de calcul disponible, de budget de latence et de disponibilité des ressources). Nous prévoyons également de tirer partie du programme de mobilité Rising STARS pour soutenir un échange potentiel avec nos collaborateurs australiens, afin de mener des expériences *in situ*, sur de grands radio-télescopes en opération (expérience UTMOST³ à observatoire Molongo et sur le précurseur ASKAP à l'ATNF⁴).

Innovations: Les principales innovations techniques sont listées ci-dessous, et visent toutes à augmenter les capacités des systèmes d'acquisition et de traitement, intégrés aux infrastructures radio-astronomiques et radars:

- **mise en œuvre automatique de la solution définie** à partir du modèle, incluant l'ordonnement temps-réel adapté aux contraintes
- **intégration de l'ingestion très haut débit, du stockage local et de la redistribution** des données dans ces modèles,
- intégration, dans ces modèles, de différents types d'accélérateurs matériels et de contrôleurs réseau intelligents permettant de **réaliser des chemins de données complexes dans des architectures hétérogènes**
- **développement d'une stratégie de reconfiguration rapide**, afin de favoriser l'adaptabilité du système à des évolutions du régime opérationnel (flux de données, ensemble de tâches, concurrence, pannes)

Équipes scientifiques: **Thales est leader mondial pour la fourniture de systèmes radars** pour le contrôle aérien civil, et conçoit des radars civils depuis plus de trente ans. L'architecture de traitement numérique de ces systèmes est conçue sur le site Limours (Essonne), qui réunit des équipes de conception et développement de calculateurs, des experts en développement logiciel, dans le domaine de la programmation temps-réel, du traitement de signal et de l'algorithmique radar. Ces équipes assurent la production de systèmes matériels et logiciels fiables (exigences de disponibilité très élevées, traitements répliqués), industriels (durée de vie supérieure à 15 ans après installation), et sûrs (exigences de sûreté de fonctionnement pour le contrôle aérien). L'équipe de l'OP apporte une vaste expérience dans plusieurs domaines, de l'informatique appliquée aux systèmes de contrôle temps-réel à l'instrumentation pour les très grands télescopes.

Dans le domaine de la radioastronomie, le projet international SKA dominera l'avenir pendant plusieurs décennies [5]. Alors que la France rejoint officiellement les membres de SKAO, pilotant la construction du radiotélescope et de l'infrastructure associée, **les équipes de l'Observatoire de Paris (OP) sont amenées à jouer un rôle majeur dans la phase de co-design et l'accompagnement de la construction du système SDP**. Au-delà de ce sous-système critique, et avec l'objectif de préparer l'exploitation scientifique de SKA, ces équipes sont aussi fortement impliquées dans la définition des spécifications des centres régionaux, avec des besoins techniques très convergents. Ce projet participe de cette initiative et devrait fournir une visibilité forte aux partenaires impliqués sur des thématiques clés de SKA.

Enfin, l'**équipe ROMA d'Inria**, avec laquelle nous souhaitons collaborer étroitement, **est spécialisée dans l'ordonnement et la gestion des ressources pour le calcul haute performance**. Ses travaux couvrent de multiples aspects de ces

³ <https://astronomy.swin.edu.au/research/utmost/>

⁴ <https://www.atnf.csiro.au/projects/askap/index.html>

problématiques, comme la minimisation de la consommation énergétique, la tolérance aux pannes, la prise en compte et la minimisation des communications et entrées-sorties ou de la consommation mémoire. Depuis quelques années l'équipe développe des travaux dans un cadre temps-réel. ROMA est tout particulièrement attachée à développer des solutions s'exécutant rapidement.

Calendrier: Le calendrier du projet est détaillé dans le tableau ci-dessous. Les périodes de mobilité envisagées sont aussi reportées. Après une première phase de spécifications (premier trimestre du projet), une phase de développement s'étale sur 9 mois environ afin de mettre en œuvre le code outillé. La phase de modélisation et d'exploitation des résultats correspondants s'étale ensuite sur 15 mois environ. La phase de tests et d'exploitation d'un prototype en laboratoire et sur radiotélescope recouvre en partie ces activités et s'étale sur 18 mois environ, les expérimentations *in situ* en Australie s'effectuant à mi-parcours de cette phase. Les 6 derniers mois du projet sont dédiés à la poursuite des tests en laboratoire et à la rédaction du mémoire de thèse.

WP	Tache	Année 1			Année 2			Année 3		
		Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
Spécifications	1.1 Capture des spécifications communes	■								
	1.2 Implémentation de référence radars		■	■						
	1.3 Implémentation de référence radio-astronomie			■	■	■				
Modélisation	2.1 Campagne d'identification des mesurables			■	■					
	2.2 Intégration de fonctionnalités dans les modèles				■	■	■			
	2.3 Paramétrisation et exploitation des modèles					■	■			
Validation & tests	3.1 Tests en laboratoire (plateforme STREAMS)						■	■	■	■
	3.2 Tests sur radiotélescopes							■	■	■
Périodes de mobilité possibles									■	■

Diffusion des résultats: Les travaux seront publiés dans des revues telles que Astronomy & Astrophysics et le Journal of Astronomical Telescopes Instruments & Systems (JATIS), IEEE Transactions on Signal Processing et communiqués dans des conférences internationales telles que SPIE (astronomie) ou ISC (calcul haute performance) ou encore ISPDC (calcul distribué et parallèle). Des versions *preprint* seront mises à disposition dans HAL.

IMPACT

Stratégie régionale: Ce projet est totalement aligné avec les objectifs du programme PRPhD 2023, s'inscrivant dans les **thématiques du DIM ORIGINES** et en **ciblant les enjeux du développement numérique de l'entreprise partenaire**. Concernant le premier point, l'étude de cas sur SKA et la forte collaboration avec les partenaires australiens déjà impliqués dans ce projet a le potentiel de fournir un accès privilégié à cette installation majeure aux astronomes de l'OP. Concernant le second point, ce projet vient soutenir une collaboration déjà existante entre l'OP et Thales LAS sur l'axe « latence très basse » et « puissance de calcul massivement parallèle » dans le traitement du signal radar, et ainsi **permettre à Thales LAS de maintenir un haut niveau de compétitivité et de conserver sa position de leader mondial** pour la fourniture de systèmes radars pour le contrôle aérien civil. Le projet s'appuie sur la plateforme STREAMS, financée par le DIM ORIGINES et co-financée par Thales LAS et d'autres industriels du tissu francilien (en particulier l'entreprise REFLEX CES).

Contexte collaboratif: Ce projet s'inscrit dans un ensemble de collaborations très riche qui permettra de maximiser tant les retombées scientifique que l'impact. Au-delà des éléments mentionnés ci-dessus (plateforme STREAMS et collaboration avec IDRIS, collaboration avec Inria ROMA, projet Rising STARS), le projet bénéficiera d'**interactions avec de grandes initiatives au niveau national** (PEPR NumPEX⁵ et Origins⁶ dans lesquels D. Gratadour est fortement impliqué) **ainsi que du LabCom ECLAT⁷** (Laboratoire Commun CNRS, Atos, Inria) dont D. Gratadour prendra la direction à son démarrage en 2023.

Intégration dans le laboratoire et l'entreprise: Le projet de contrat de partenariat, joint à ce dossier, précise les modalités de **partage du temps, à parts égales**, entre les périodes en entreprise et les périodes en laboratoire, le projet de thèse soutenue par le programme PRPhD20 ayant permis de valider les principes de fonctionnement qui y figurent.

Formation: Au-delà de la formation doctorale, à laquelle le/la candidat(e) aura accès grâce à son inscription à l'ED 127, Thales LAS financera des formations supplémentaires sur des thématiques adaptées. Parmi les options considérées, on peut citer le management projet, le renforcement du niveau d'anglais ou encore des **formations spécifiques telles que l'informatique temps-réel ou le calcul haute performance**. Le coût typique d'une formation de ce type (format variable: typiquement 2 jours intensifs pour une formation en management projet ou programme immersif pour le renforcement de l'anglais) est estimé à 1.5-2 k€ par formation. L'enveloppe de 5 k€ proposée permettra au/à la candidat(e) de participer à 3 de ces formations.

Co-financement: Les détails du co-financement de ce projet sont donnés dans l'annexe financière jointe au dossier. La contribution du programme de mobilité Rising STARS est significative (25k€) pour permettre une collaboration active à l'international. Les contributions sur fonds propres incluent en particulier l'accès aux moyens matériels mis en œuvre dans la plateforme STREAMS. Le budget total d'achat de matériel pour la plateforme est de 750k€ pour la première phase, d'une durée de 4 ans (donc alignée sur ce projet). Afin de prendre en compte les coûts d'hébergement (dont facture d'électricité et soutien local), nous avons retenu un coût moyen de 5% du coût total d'achat du matériel. En tenant compte d'une utilisation représentant 15 % de temps d'accès réel (soit environ 36 jours / an pour une année de 250 jours ouvrés hors jours fériés), nous avons estimé cette contribution sur fonds propres à 20% du coût total de la plateforme soit 150 k€.

⁵ <https://numpex.fr/>

⁶ <https://www.cnrs.fr/en/pepr/pepr-exploratoire-origins-vie-et-univers>

⁷ https://www.skao.int/en/partners/prospective-members/188/france#__otpm4

RÉFÉRENCES

- [1] : Scaife. 2020 Big telescope, big data: towards exascale with the Square Kilometre Array. Phil. Trans. R. Soc. A 378: 20190060.
- [2] : <https://ska-sdp.org/news/sdp-passes-its-critical-design-review>
- [3] : [J. Plante et al.](#), A novel FRB detection pipeline for NenuFAR, ADASS XXXI, (2021)
- [4] : [J. Plante et al.](#) A high-performance data acquisition on COTS hardware for astronomical instrumentation, Proceedings of the SPIE, Volume 12189, id. 121890U 10 pp. (2022)
- [5]: F. Acero et al. French SKA White Book - The French Community towards the Square Kilometre Array, arXiv:1712.06950v3
- [6]: E. Lenormand, G. Edelin. An industrial perspective: A pragmatic high end signal processing design environment at Thales. Proceedings of the Third International Workshop on Systems, Architectures, Modeling and Simulation (SAMOS III), July 2003.
- [7]: [Tanissia Djemai](#). Placement optimisé de services dans les architectures fog computing et internet of things sous contraintes d'énergie, de QoS et de mobilité. Mémoire de thèse. HAL Id : tel-03280438, version 1.
- [8]: [R. Henia](#), [L. Rioux](#), [T. Vergnaud](#). Industrial adaptation of MARTE for early scheduling analysis of component-based applications. NFPinDSML '12: Proceedings of the Fourth International Workshop on Nonfunctional System Properties in Domain Specific Modeling Languages (2012)