

Projet ANR Dark-era

Adéquation Algorithme Architecture (A³) pour la radioastronomie

Illustration de similitudes entre calcul HPC et calcul embarqué

Nicolas Gac

Professeur à l'université Paris-Saclay, laboratoire SATIE



Daniel Charlet**⁵ (IJCLab), Karol Desnos¹, Mickael Dardaillon¹, André Ferrari⁴, Chiara Ferrari⁴, David Guibert* (Eviden), Nicolas Gac**³ (SATIE), Adrien Gougeon², Shan Mignot⁴, Nicolas Monnier³, Jean-François Nezan¹, Hugo Miomandre¹, François Orieux³, Simon Prunet⁴, Martin Quinson², Erwan Raffin* (Eviden), Frédéric Suter**² (Oak Ridge National Laboratory) Cyril Tasse**⁵ (GEPI), Ophélie Renaud¹, Cédric Viou⁵, Sunrise Wang^{3,4}

¹IETR (INSA) ²IRISA (ENS) ³L2S (CS) ⁴Lagrange (UCA)
⁵ORN (OP)



1 Adéquation Algorithme Architecture

- *Roofline model*
- Reconstruction tomographique

2 Dark-era

- *SKA computing*, un défi HPC
- SimSDP, un outil de prototypage rapide
- Algorithme *Grid to Grid* (G2G)
- Travaux en cours

Adéquation Algorithme Architecture

Meilleure **combinaison d'architectures et d'algorithmes** sous **contraintes**

- temps de traitement
- précision de calcul
- consommation énergétique
- coût du système de calcul
- temps de développement
- éco-responsabilité

Adéquation Algorithme Architecture

Meilleure **combinaison d'architectures et d'algorithmes** sous **contraintes**

- temps de traitement
- précision de calcul
- consommation énergétique
- coût du système de calcul
- temps de développement
- éco-responsabilité

A³ interdisciplinaire

- Algorithmes pour **problèmes inverses**
*radioastronomie, tomographie, radar,
planétologie, flot optique dense,
localisation de sources acoustiques*

Adéquation Algorithme Architecture

Meilleure **combinaison d'architectures et d'algorithmes** sous **contraintes**

- temps de traitement
- précision de calcul
- consommation énergétique
- coût du système de calcul
- temps de développement
- éco-responsabilité

A³ interdisciplinaire

- Algorithmes pour **problèmes inverses**
radioastronomie, tomographie, radar, planétologie, flot optique dense, localisation de sources acoustiques
- Architectures de **calcul intensif**
GPU, multiGPU, SoC GPU, FPGA

Adéquation Algorithme Architecture

Meilleure **combinaison d'architectures et d'algorithmes** sous **contraintes**

- temps de traitement
- précision de calcul
- consommation énergétique
- coût du système de calcul
- temps de développement
- éco-responsabilité

A³ interdisciplinaire

- Algorithmes pour **problèmes inverses**
radioastronomie, tomographie, radar, planétologie, flot optique dense, localisation de sources acoustiques
- Architectures de **calcul intensif**
GPU, multiGPU, SoC GPU, FPGA

⇒ *Comment se rapprocher des performances maximales ?*

Adéquation Algorithme Architecture

Meilleure combinaison d'architectures et d'algorithmes sous contraintes

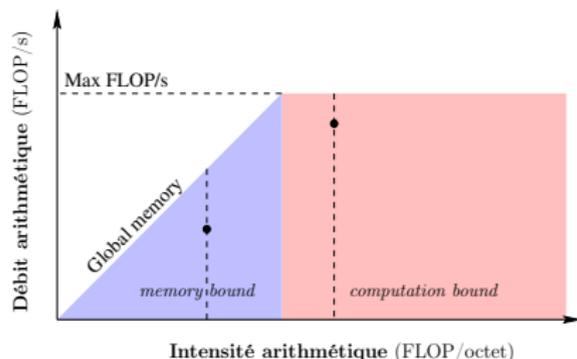
- temps de traitement
- précision de calcul
- consommation énergétique
- coût du système de calcul
- temps de développement
- éco-responsabilité

A³ interdisciplinaire

- Algorithmes pour **problèmes inverses**
radioastronomie, tomographie, radar, planétologie, flot optique dense, localisation de sources acoustiques
- Architectures de **calcul intensif**
GPU, multiGPU, SoC GPU, FPGA

⇒ *Comment se rapprocher des performances maximales ?*

The Berkeley roofline model



[Williams 2009]

Adéquation Algorithme Architecture

Meilleure combinaison d'architectures et d'algorithmes sous contraintes

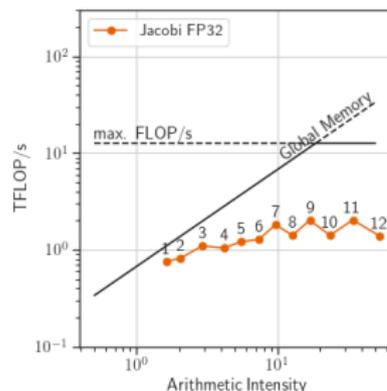
- temps de traitement
- précision de calcul
- consommation énergétique
- coût du système de calcul
- temps de développement
- éco-responsabilité

A³ interdisciplinaire

- Algorithmes pour **problèmes inverses**
radioastronomie, tomographie, radar, planétologie, flot optique dense, localisation de sources acoustiques
- Architectures de **calcul intensif**
GPU, multiGPU, SoC GPU, FPGA

⇒ *Comment se rapprocher des performances maximales ?*

The Berkeley roofline model



Flot optique dense sur GPU [M. Seznec, JRTIP 2022b]

Adéquation Algorithme Architecture

Meilleure combinaison d'architectures et d'algorithmes sous contraintes

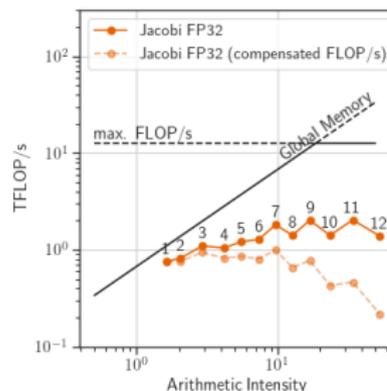
- temps de traitement
- précision de calcul
- consommation énergétique
- coût du système de calcul
- temps de développement
- éco-responsabilité

A³ interdisciplinaire

- Algorithmes pour **problèmes inverses**
radioastronomie, tomographie, radar, planétologie, flot optique dense, localisation de sources acoustiques
- Architectures de **calcul intensif**
GPU, multiGPU, SoC GPU, FPGA

⇒ *Comment se rapprocher des performances maximales ?*

The Berkeley roofline model



Flot optique dense sur GPU [M. Seznec, JRTIP 2022b]

Adéquation Algorithme Architecture

Meilleure combinaison d'architectures et d'algorithmes sous contraintes

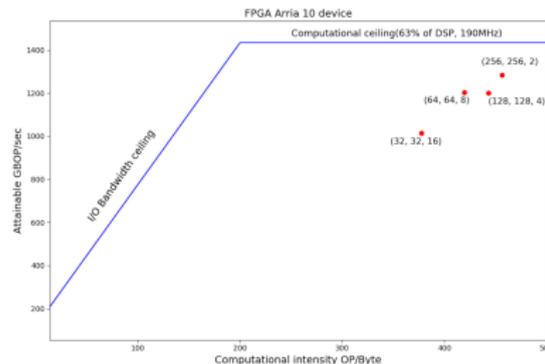
- temps de traitement
- précision de calcul
- consommation énergétique
- coût du système de calcul
- temps de développement
- éco-responsabilité

A³ interdisciplinaire

- Algorithmes pour **problèmes inverses**
radioastronomie, tomographie, radar, planétologie, flot optique dense, localisation de sources acoustiques
- Architectures de **calcul intensif**
GPU, multiGPU, SoC GPU, FPGA

⇒ Comment se rapprocher des performances maximales ?

The Berkeley roofline model



Tomographie sur FPGA [D. Diakite, IEEE TBioCAS 2023]

Adéquation Algorithme Architecture

Meilleure combinaison d'architectures et d'algorithmes sous contraintes

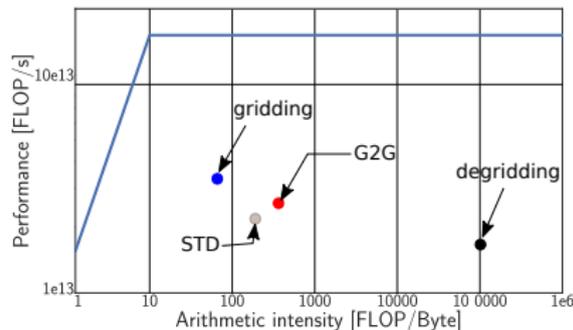
- temps de traitement
- précision de calcul
- consommation énergétique
- coût du système de calcul
- temps de développement
- éco-responsabilité

A³ interdisciplinaire

- Algorithmes pour **problèmes inverses**
radioastronomie, tomographie, radar, planétologie, flot optique dense, localisation de sources acoustiques
- Architectures de **calcul intensif**
GPU, multiGPU, SoC GPU, FPGA

⇒ *Comment se rapprocher des performances maximales ?*

The Berkeley roofline model



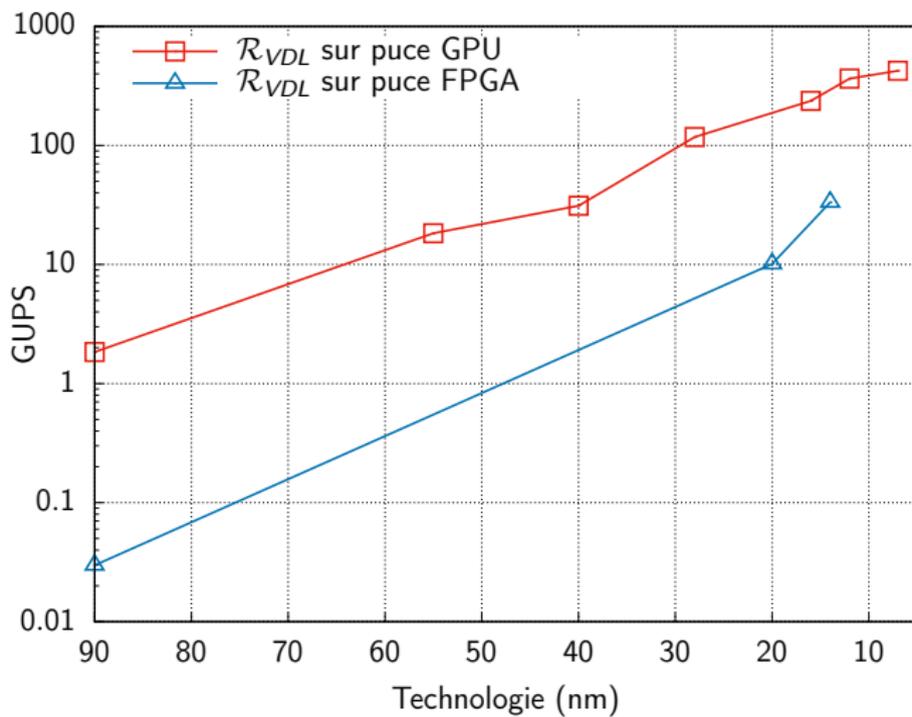
Radioastronomie sur GPU [N. Monnier, F. Orioux et al, Astronomy and Computing 2023]

Tomographie : état de l'art

	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019
GPU			10	17	18	9	13	20	30
Nvidia			10	14	17	7	10	20	
AMD				1	1		1		
Intel				2		2	2		
multi-GPU					3	3	3		1
CNN								2	13
Autres proc.	2	3	10	7	3	2	1	2	
CPU	2	3	5	6	3	2	1	2	
Cell (IBM)			3						
DSP			2	1					
FPGA			4		1		1		

Table – Cartes accélératrices utilisées dans les travaux publiés à la conférence Fully 3D.

Tomographie : GPU versus FPGA



[N. Gac, Embedded Systems, 2008], [D. Diakite, IEEE TBioCAS 2023] [N. Gac, HDR 2020]

- 1 Adéquation Algorithme Architecture
 - *Roofline model*
 - Reconstruction tomographique
- 2 Dark-era
 - *SKA computing*, un défi HPC
 - SimSDP, un outil de prototypage rapide
 - Algorithme *Grid to Grid* (G2G)
 - Travaux en cours



Le très grand Square Kilometer Array (SKA)

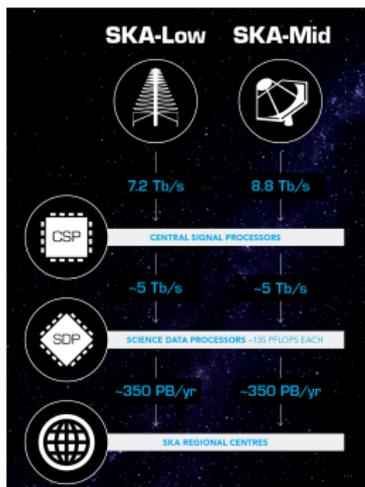
- 200+ paraboles en Afrique du Sud
- 130 000+ antennes en Australie

Un pipeline d'imagerie fait de trois étages

CSP Le flux des antennes est corrélé pour produire des **visibilités**, c-à-d des points de Fourier.

SDP Une image **hyperspectrale** est reconstruite à partir du plan de Fourier

SRC Un post-traitement dans des centres régionaux



Science Data Processor (SDP)

Très forte puissance de calcul

~ 125 PFLOPS crête (efficacité visée de ~ 10 %)

Similitude avec le domaine de l'embarqué

- Traitement en **temps réel** du flux de données
entrée ~ 8 Tb/s \implies sortie ~ 100 Gb/s
- Consommation **énergétique** limité
Puissance instantanée ~ 1 MW pour chaque SDP
- Un calculateur **dédié** à une application
- Des **modèles de programmation** experts (CUDA, MPI...) pour obtenir des performances optimales

Adéquation Algorithme Architecture

- Chaîne algorithmique en **flot de donnée** complexe et évolutive
- Supercalculateur hétérogène (CPU+GPU) à grande échelle (>100 noeuds) non encore construit

⇒ Nécessité d'outils de prototypage rapide pour une **estimation précoce** des performances en **temps** et en **consommation énergétique**

Adéquation Algorithme Architecture

- Chaîne algorithmique en **flot de donnée** complexe et évolutive
- Supercalculateur hétérogène (CPU+GPU) à grande échelle (>100 noeuds) non encore construit

⇒ Nécessité d'outils de prototypage rapide pour une **estimation précoce** des performances en **temps** et en **consommation énergétique**

Projet ANR Dark-era (2021-2025)



*Dataflow Algorithm aRchitecture
co-design of SKA pipeline for
Exascale Radio Astronomy*



ANR-20-CE46-0001-01



Astronomy

C. Tasse
(Obs Paris)

C. Ferrari (Lagrange)



C. Viou (Obs Nançay)

S. Prunet
(Lagrange)N. Monnier
(L2S/Atos/Obs Paris)

O. Renaud (IETR)



S. Mignot (Lagrange)

EVIDEN

E. Raffin (Eviden,
anciennement Atos-Bull)

F. Orieux (L2S)

A. Ferrari
(Lagrange)S. Wang
(L2S/Lagrange)

Architecture

HPC

M. Dardailion
(IETR)J.F. Nezan
(IETR)K. Desnos
(IETR)A. Gougeon
(IRISA)M. Quinson
(IRISA)

F. Suter (IN2P3)

Signal processing

Laboratoire
Signaux &
Systèmes

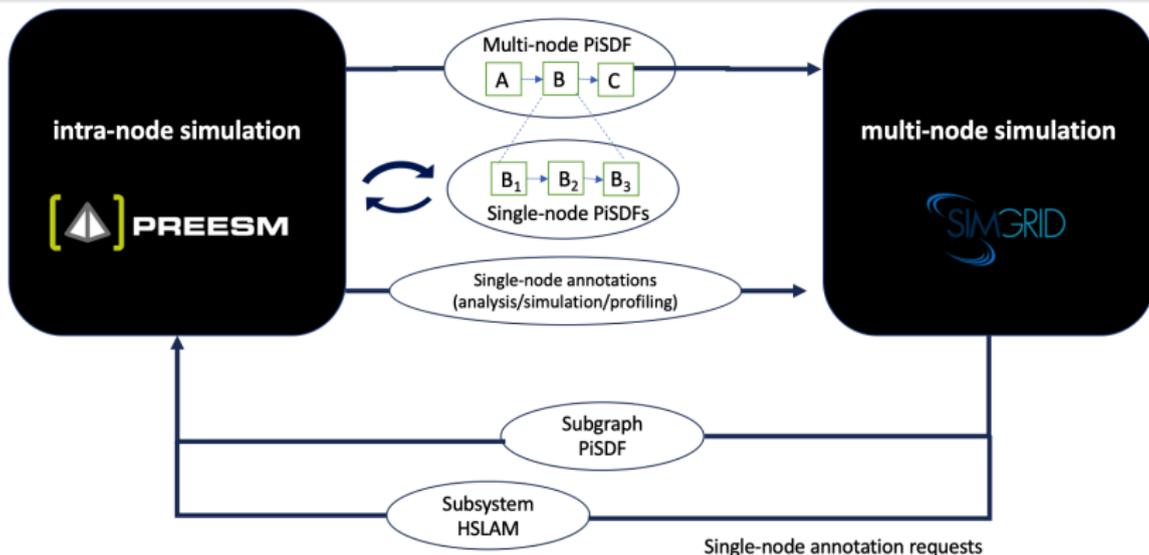
N. Gac (SATIE)



Prototypage rapide d'un supercalculateur dédié à la radioastronomie,
L'Interdisciplinarité. Voyages au-delà des disciplines, CNRS Edition, 2023

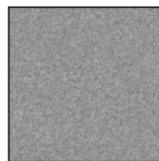
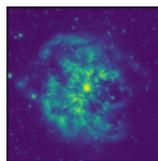
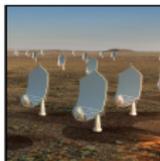
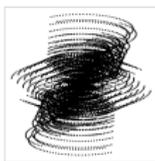
Objectif Dark-era

Construire **SimSDP**, un outil de prototypage rapide fournissant des simulations *exascale* à partir d'une description en flot de données des algorithmes.



Résolution d'un problème inverse

Modélisation de l'instrument



$$\mathbf{v} = \mathbf{H} \times \mathbf{x} + \mathbf{n}$$

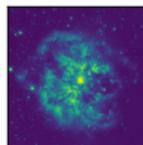
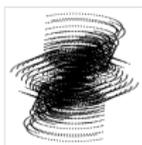
$\mathbf{v} \in \mathbb{C}^M$: Vecteur des visibilités

$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^P$: Image du ciel

$\mathbf{n} \in \mathbb{C}^M$: Bruit gaussien

Résolution d'un problème inverse

Modélisation de l'instrument



$$\mathbf{v} = \mathbf{S} \times \mathbf{F} \times \mathbf{x} + \mathbf{n}$$

$\mathbf{v} \in \mathbb{C}^M$: Vecteur des visibilitées

$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^P$: Image du ciel

$\mathbf{n} \in \mathbb{C}^M$: Bruit gaussien

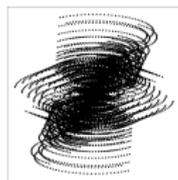
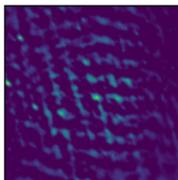
Décomposition de H

$\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{P \times P}$: Transformée rapide de Fourier

$\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{M \times P}$: *Sampling Operator (Degriding)*

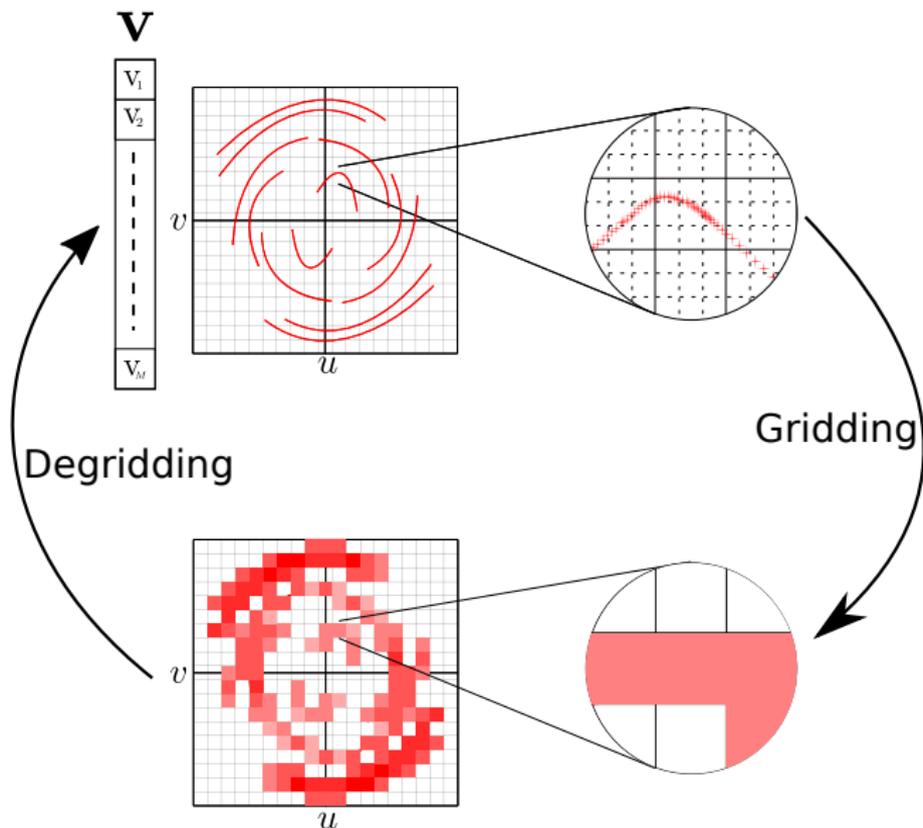
Opérateurs duaux F^\dagger et S^\dagger

Synthèse d'image



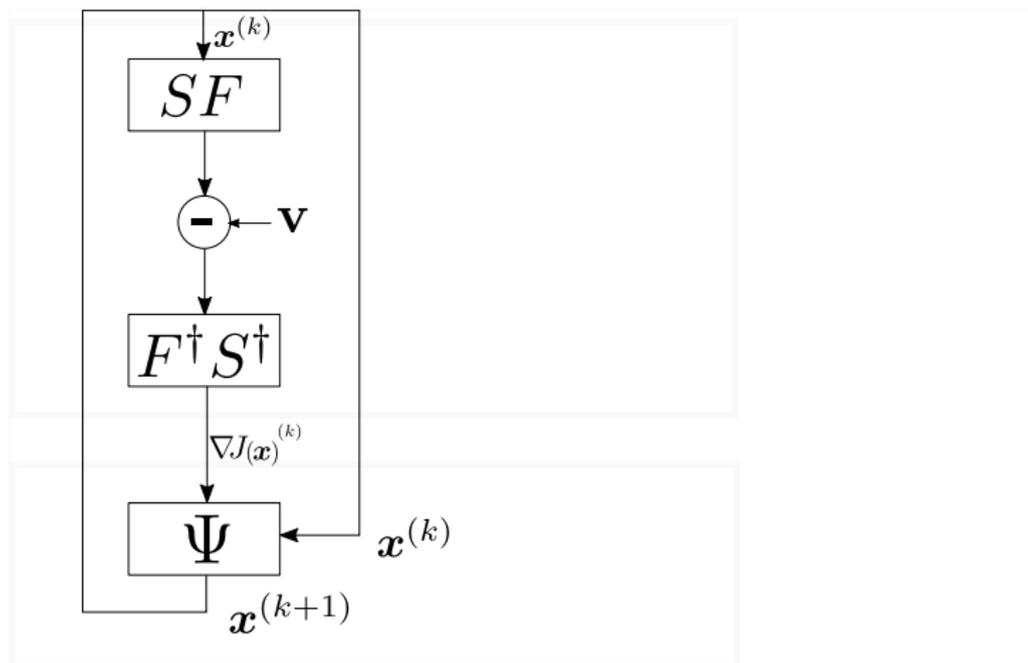
$$\mathbf{y} = \mathbf{F}^\dagger \times \mathbf{S}^\dagger \times \mathbf{v}$$

- $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^P$: Dirty image
- $\mathbf{F}^\dagger \in \mathbb{C}^{P \times P}$: Transformée rapide de Fourier
- $\mathbf{S}^\dagger \in \mathbb{C}^{P \times M}$: Sampling operator (Gridding)
- $\mathbf{v} \in \mathbb{C}^M$: Vecteur de visibilité

Opérateurs de *gridding* S^\dagger et *degridding* S 

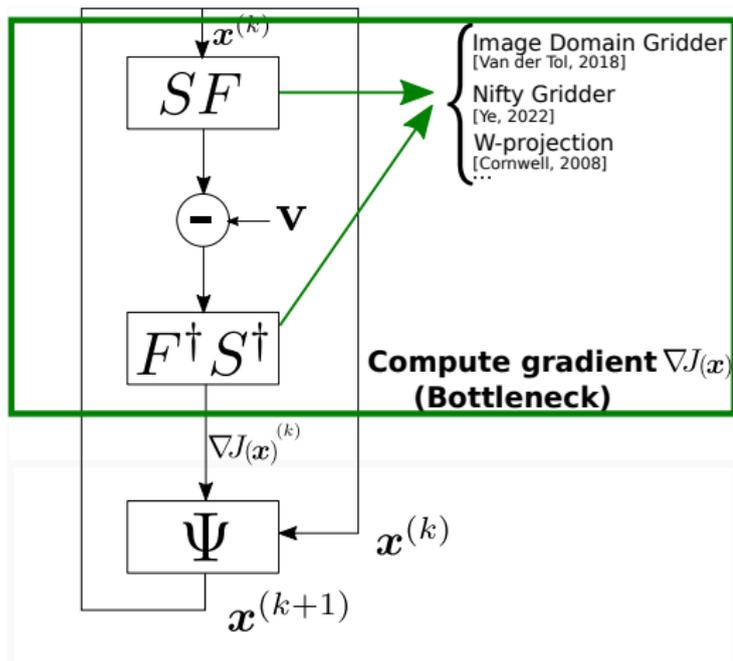
Recherche de $\hat{\mathbf{x}}$ minimisant $J(\mathbf{x})$

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) = \arg \min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{v} - \mathbf{SF}\mathbf{x}\|_2^2 + \alpha R(\mathbf{x})$$



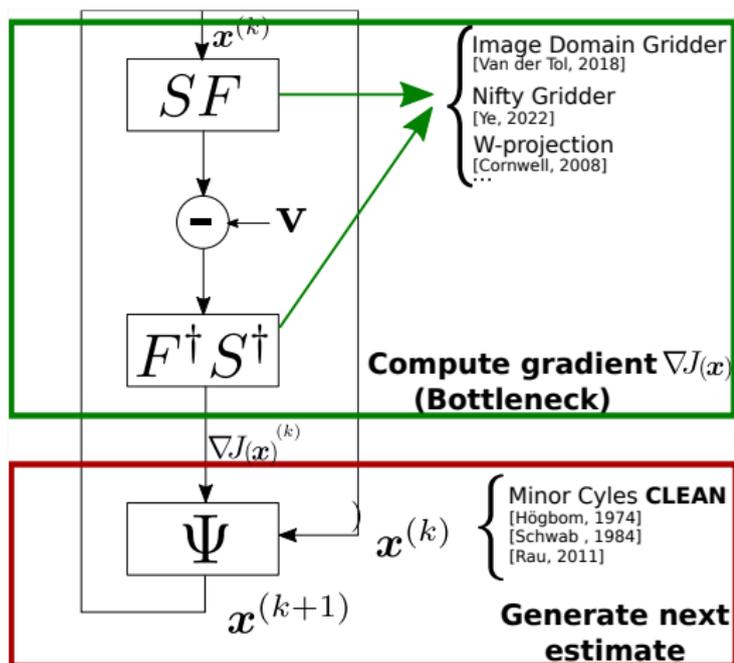
Recherche de $\hat{\mathbf{x}}$ minimisant $J(\mathbf{x})$

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) = \arg \min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{v} - \mathbf{SF}\mathbf{x}\|_2^2 + \alpha R(\mathbf{x})$$



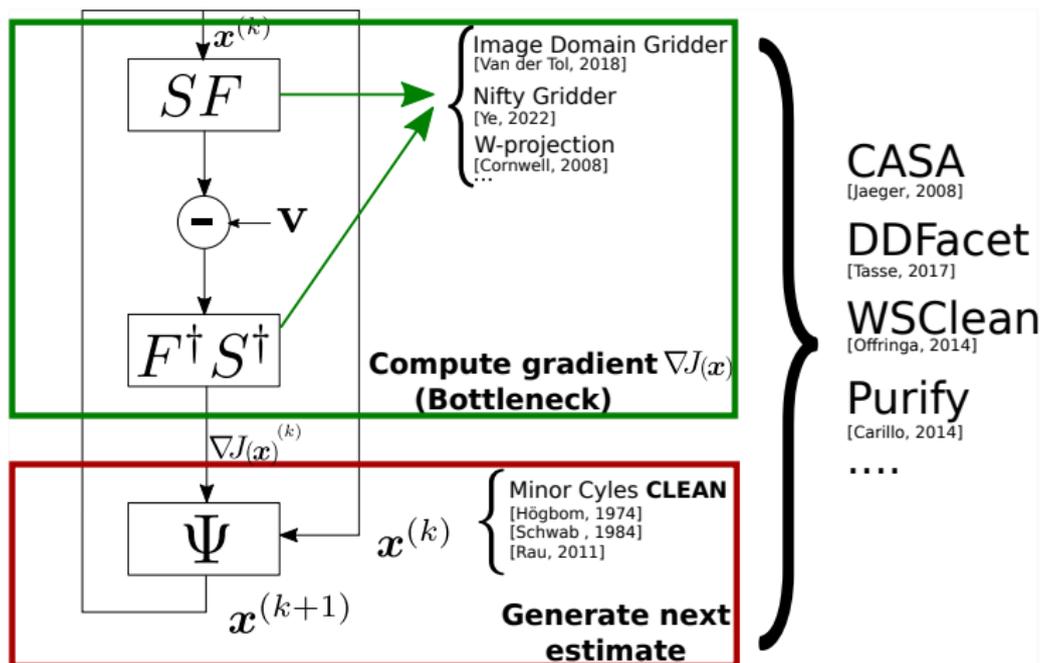
Recherche de $\hat{\mathbf{x}}$ minimisant $J(\mathbf{x})$

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) = \arg \min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{v} - \mathbf{SF}\mathbf{x}\|_2^2 + \alpha R(\mathbf{x})$$



Recherche de $\hat{\mathbf{x}}$ minimisant $J(\mathbf{x})$

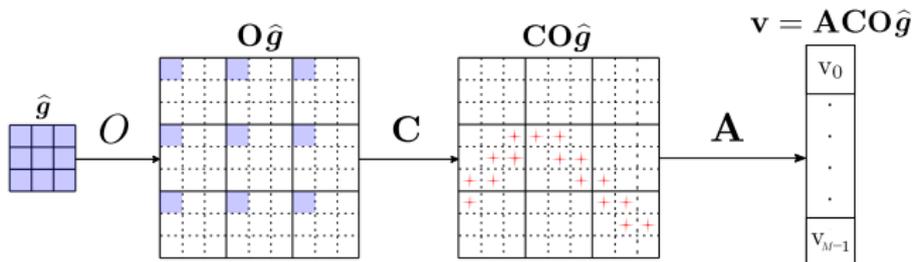
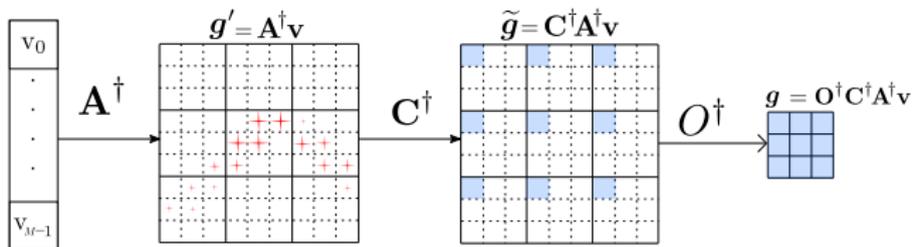
$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) = \arg \min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{v} - \mathbf{SF}\mathbf{x}\|_2^2 + \alpha R(\mathbf{x})$$



G2G : calcul du gradient dans l'espace image

$$\nabla J_{STD}(\mathbf{x}) = \mathbf{F}^\dagger \mathbf{S}^\dagger (\mathbf{v} - \mathbf{S}\mathbf{F}\mathbf{x})$$

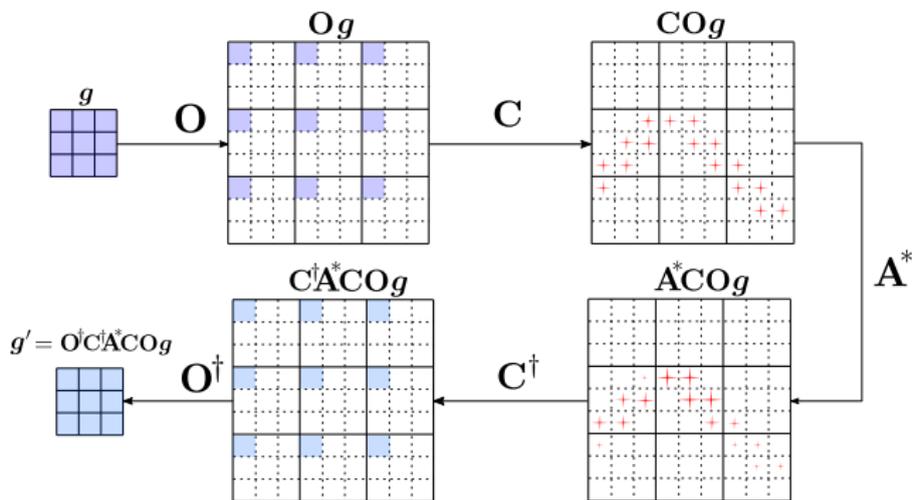
$$\nabla J_{G2G}(\mathbf{x}) = \mathbf{F}^\dagger \mathbf{S}^\dagger \mathbf{v} - \mathbf{F}^\dagger \mathbf{S}^\dagger \mathbf{S}\mathbf{F}\mathbf{x}$$

Décomposition du *degriding*Décomposition du *gridding*

G2G : calcul du gradient dans l'espace image

$$\nabla J_{STD}(\mathbf{x}) = \mathbf{F}^\dagger \mathbf{S}^\dagger (\mathbf{v} - \mathbf{S}\mathbf{F}\mathbf{x})$$

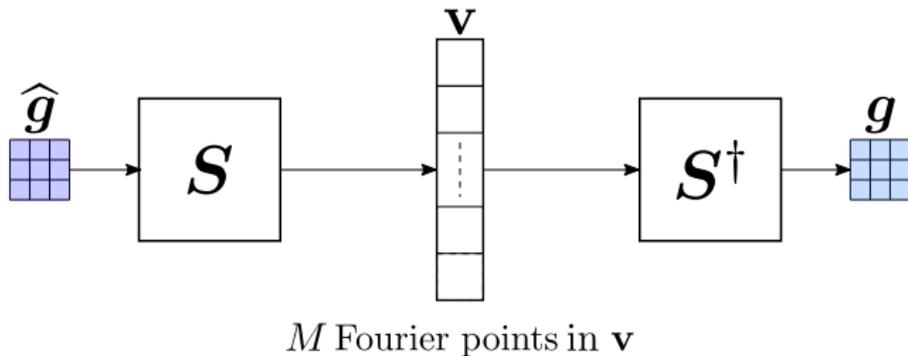
$$\nabla J_{G2G}(\mathbf{x}) = \mathbf{F}^\dagger \mathbf{S}^\dagger \mathbf{v} - \mathbf{F}^\dagger \mathbf{S}^\dagger \mathbf{S}\mathbf{F}\mathbf{x}$$



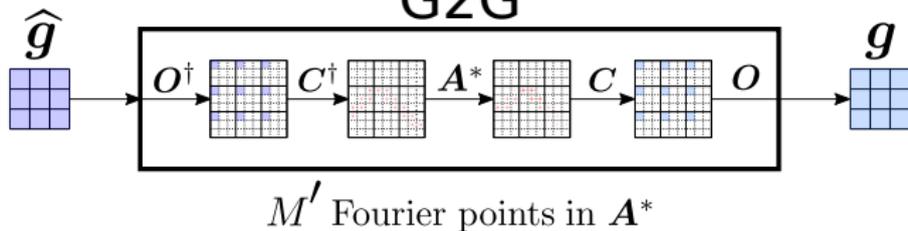
Algorithme G2G

[Astronomy and Computing 2023]

STD/IDG

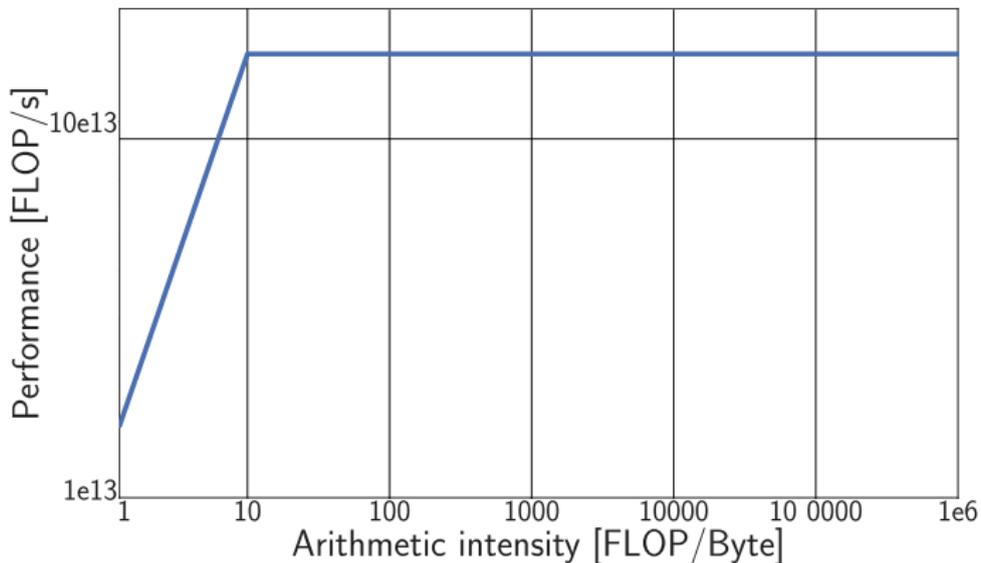


G2G



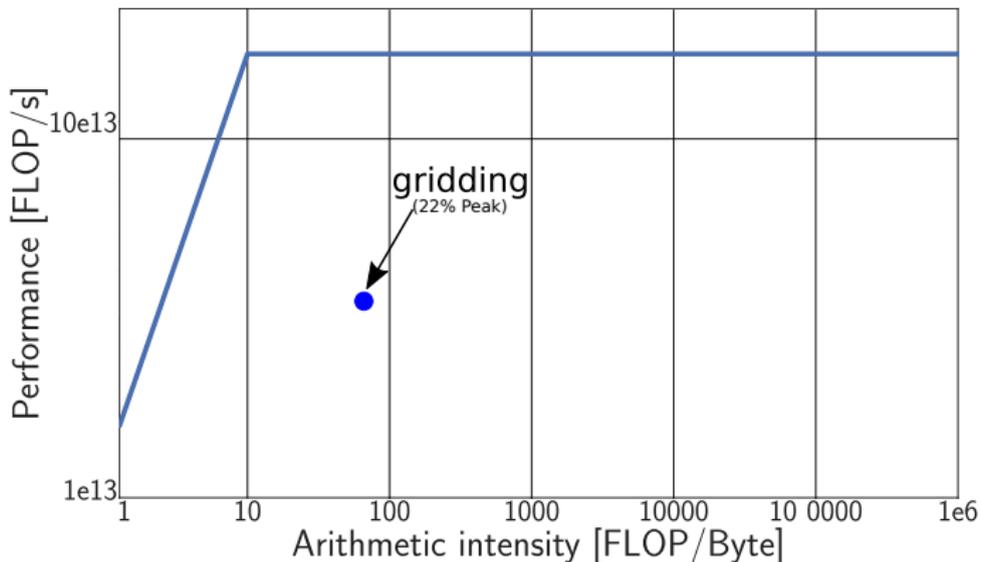
GPU Roofline Model - Nvidia A100

$$AI = \frac{\#OP}{\#\text{memory access}}$$



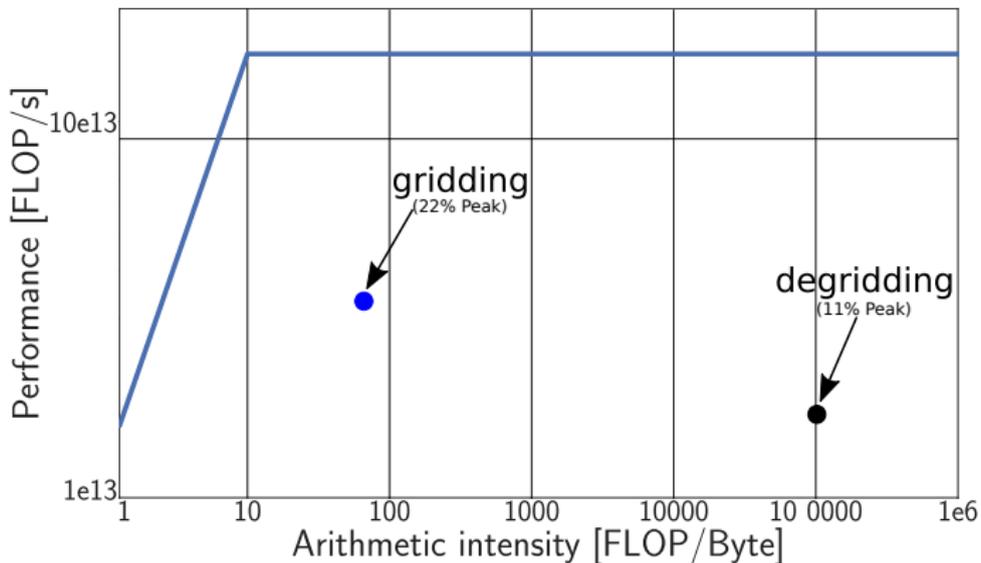
GPU Roofline Model - Nvidia A100

$$AI = \frac{\#OP}{\#\text{memory access}}$$



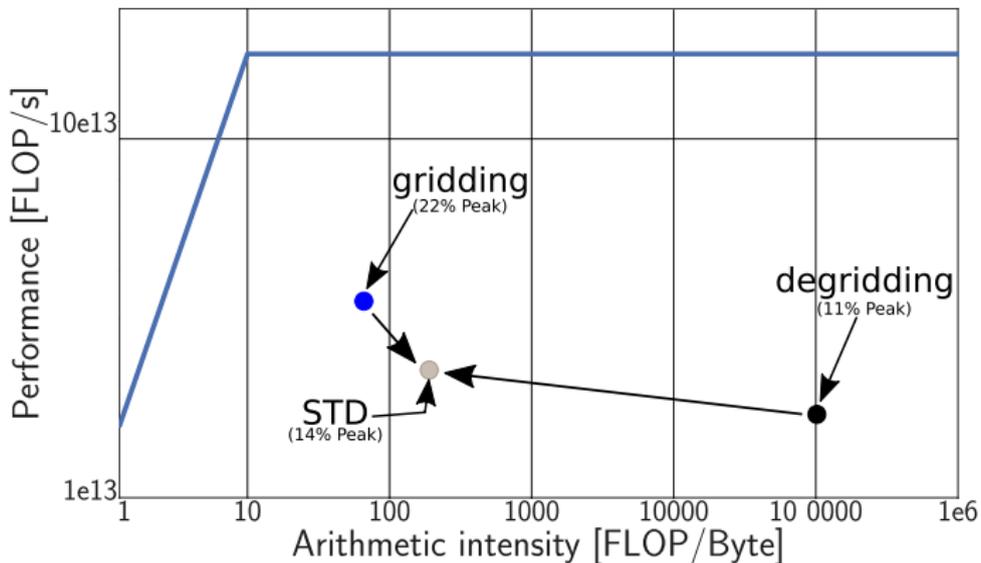
GPU Roofline Model - Nvidia A100

$$AI = \frac{\#OP}{\#\text{memory access}}$$



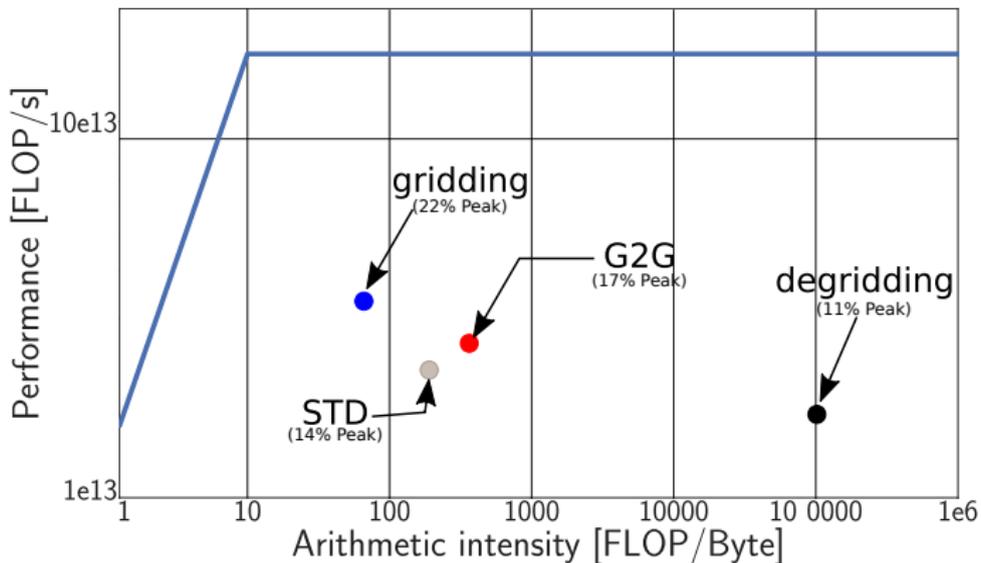
GPU Roofline Model - Nvidia A100

$$AI = \frac{\#OP}{\#memory\ access}$$



GPU Roofline Model - Nvidia A100

$$AI = \frac{\#OP}{\#\text{memory access}}$$

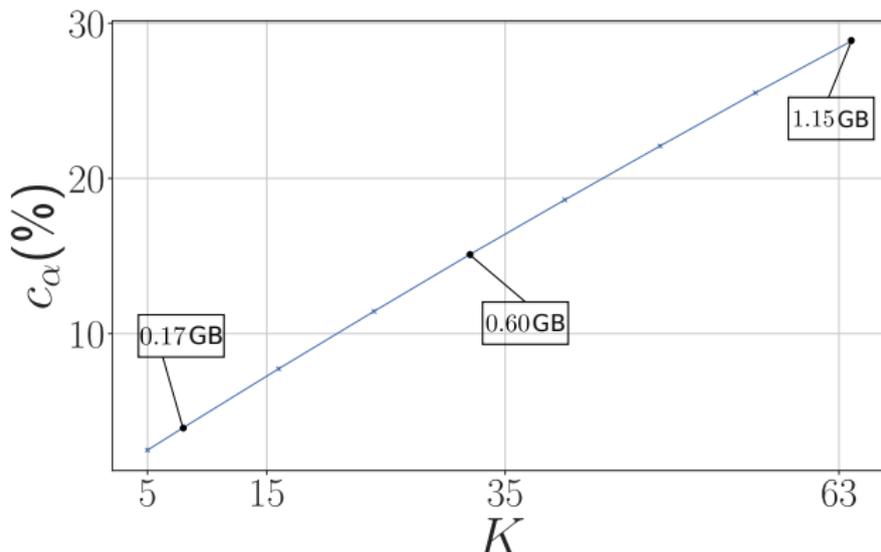


Empreinte mémoire

Compression des données

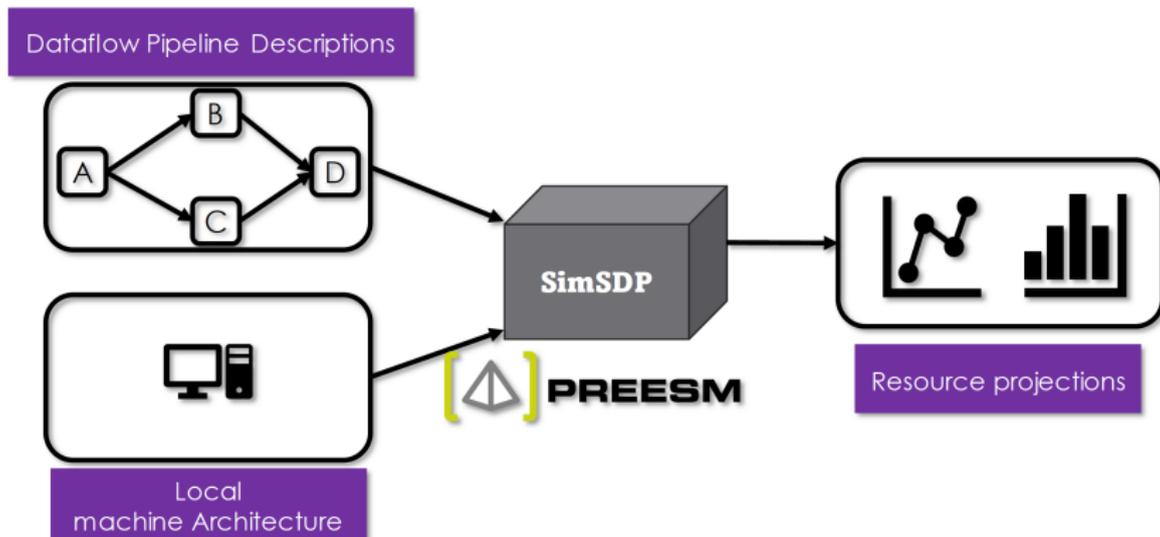
$$c_\alpha = \frac{M'}{M}$$

c_α petit \implies empreinte mémoire et coût en calcul plus faibles



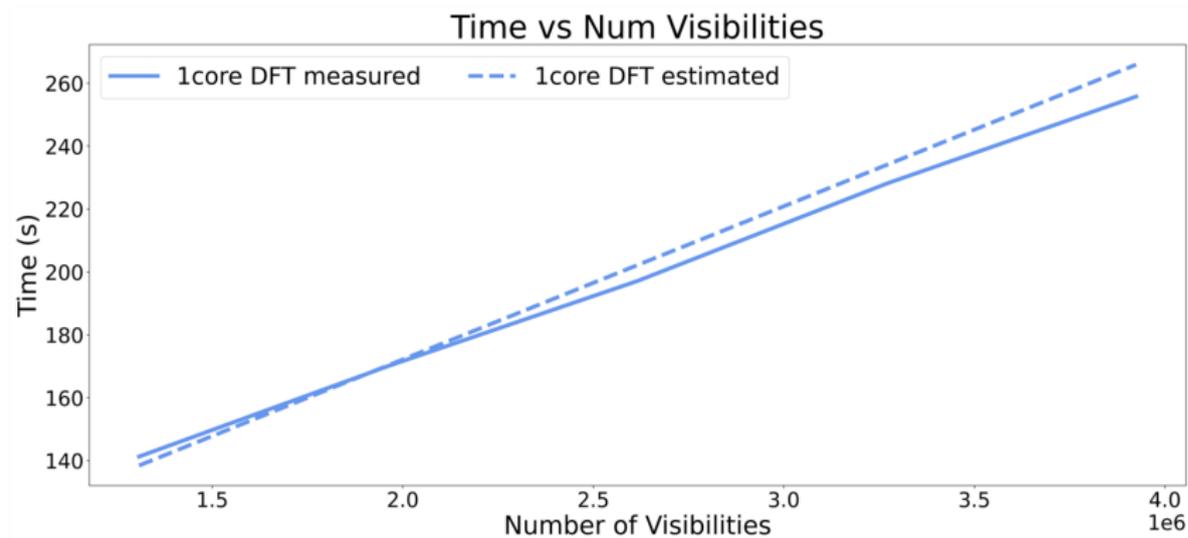
SimSDP sur un seul noeud

Sunrise Wang [DASIP 2024]



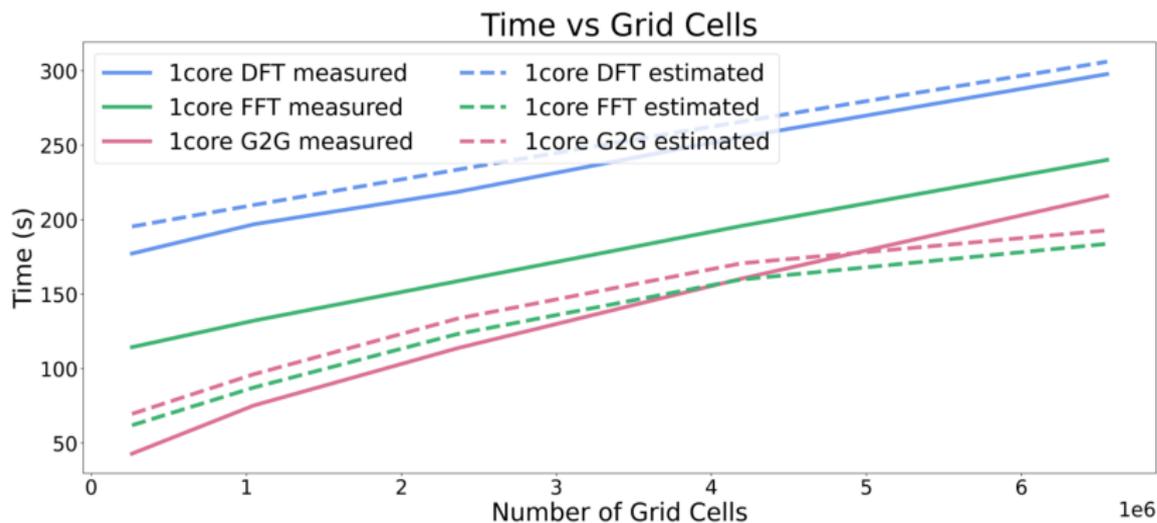
SimSDP sur un seul noeud

Sunrise Wang [DASIP 2024]



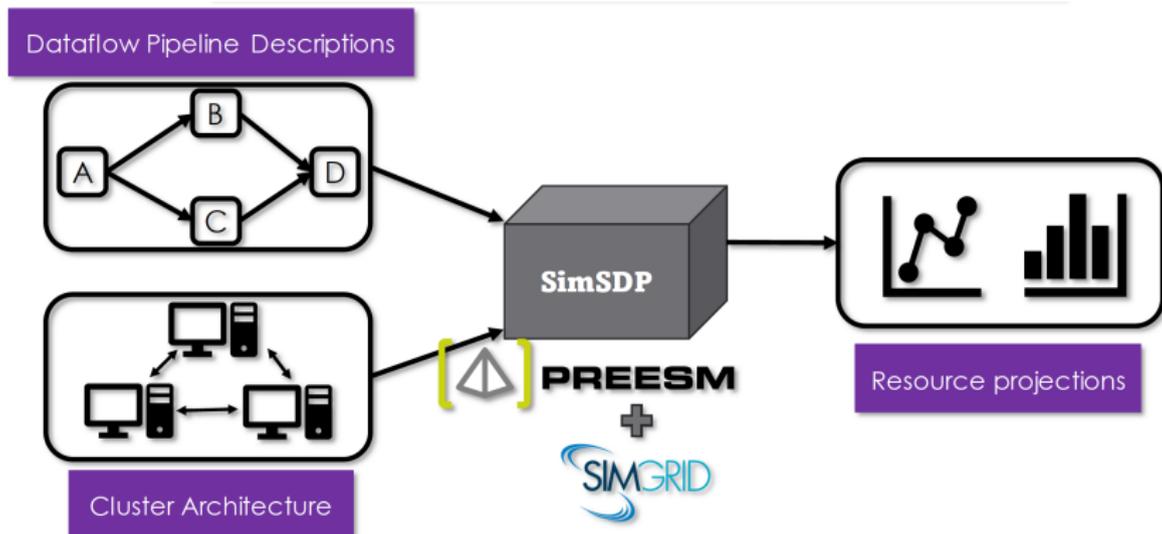
SimSDP sur un seul noeud

Sunrise Wang [DASIP 2024]



SimSDP (PREESM+SimGrid) sur une archi multinoeuds

Ophélie Renaud (IETR) et Adrien Gougeon (IRISA)



Prototypage sur NenuFAR à l'observatoire de Nançay



NenuFAR
données chiffrées...

- 3 instruments en 1** : réseau phasé et imageur autonomes, ou super station LOFAR
- 60 000 m²** d'aire effective à 25 MHz
- 96** mini-réseaux
- 19** antennes dans 1 mini réseau
- 400 m** de diamètre au cœur du réseau
- 600 Gbits/s** de volume de données traitées en temps réel 24/7
- un réseau total de **1 938** antennes situé à Nançay
- 10 à 85 MHz** de gamme de fréquence (longueurs d'onde de 3,5 m à 30 m)
- 6** mini-réseaux distants
- 3 km** de distance au mini-réseau le plus éloigné
- 180 km** de câbles coaxiaux
- 10 Po** de données brutes traitées par an









Extreme Computing Lab for Astronomical Telescopes

- CNRS (Terre & Univers)
- Eviden (ex Atos-Bull)
- 14 laboratoires et équipes : Observatoire de Paris (LERMA, GEPI), INRIA (Kerdata, Avalon), IRISA, IETR (Vaader), LAB, SATIE/L2S (thème commun *imagerie computationnelle en radioastronomie*)...



EVIDEN

Inria

Merci de votre attention

Site web Dark-era : <https://dark-era.pages.centralesupelec.fr>