

Midapack : Development of a HPC library for Cosmic Microwave Background data analysis

Frédéric Dauvergne

Journée du laboratoire LUTH,
Le château – 18 décembre 2013.

Centres d'intérêt scientifiques

Mes domaines de compétences scientifiques se regroupent principalement autour du **calcul scientifique** :

- ▶ Analyse numérique ;
- ▶ Méthodes numériques ;
- ▶ Mécanique des fluides.

Je m'intéresse aussi fortement au **calcul haute performance** sur machines massivement parallèles. C'est une problématique devenue vraiment incontournable si on veut pouvoir exploiter pleinement les capacités fournies par les supercalculateurs actuels.

Cela nécessite de pouvoir développer des **algorithmes de calcul** adaptés à ces architectures. L'objectif est généralement de rester **robuste**, **efficace** et d'avoir une bonne **extensibilité** lorsqu'on augmente fortement le nombre de cœurs.

La simulation numérique et la science

“ La simulation numérique a révolutionné notre approche de la recherche scientifique ” :

C'est devenu une étape cruciale du processus de recherche dans beaucoup de domaines scientifiques.

Théorie \rightarrow Simulation \leftrightarrow Expérience

“ Le calcul intensif est la deuxième révolution numérique dans la recherche scientifique ” :

- ▶ C'est un outil pour la recherche ;
- ▶ C'est un domaine de recherche scientifique en soit.

Augmentation significative du nombre de cœurs par machine en 5 ans :

En Juin 2007 : 41% ont entre 1024 et 2048 cœurs ;

En Juin 2012 : 54% ont entre 8192 et 16384 cœurs.

Domaines d'applications

De part mon cursus, j'ai une petite préférence pour les applications **multiphysiques** et/ou en **mécaniques des fluides** car elles présentent souvent de réels challenges en matière de **modélisation numérique**.

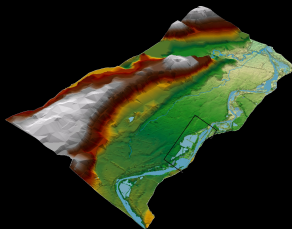
J'ai travaillé sur la modélisation numérique de **problèmes physiques** dans **divers domaines d'application** :

- ▶ Pour des écoulements dans les milieux poreux ;
- ▶ Pour des écoulements de fluides diphasiques ;
- ▶ En Cosmologie ;
- ▶ En Astrophysique.

Some keywords :

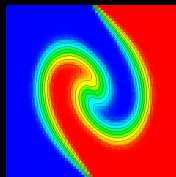
Numerical Analysis, Computational Science, High Performance Computing, Intensive Computing, Fluids Dynamics, Multiphase Flow, Environmental Modelling, Groundwater Flow.

Principaux domaines d'application



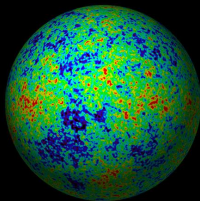
Écoulements souterrains

(F. Dauvergne, EMSE)



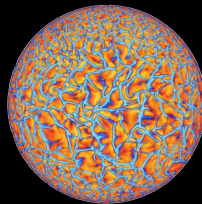
Fluides mono/diphasiques

(F. Dauvergne, ENS Cachan)



Fond diffus cosmologique

(WMAP Team, NASA)



Convection à la surface des étoiles

(Bessolaz et Brun, CEA/Irfu)

Plan de l'exposé

- ▶ Cadre du projet Midas ;
- ▶ La cosmologie comme cadre d'application ;
- ▶ Description de la bibliothèque de calcul Midapack ;
- ▶ Un exemple d'application avec la cartographie du fond diffus cosmologique.

Cadre du projet Midas



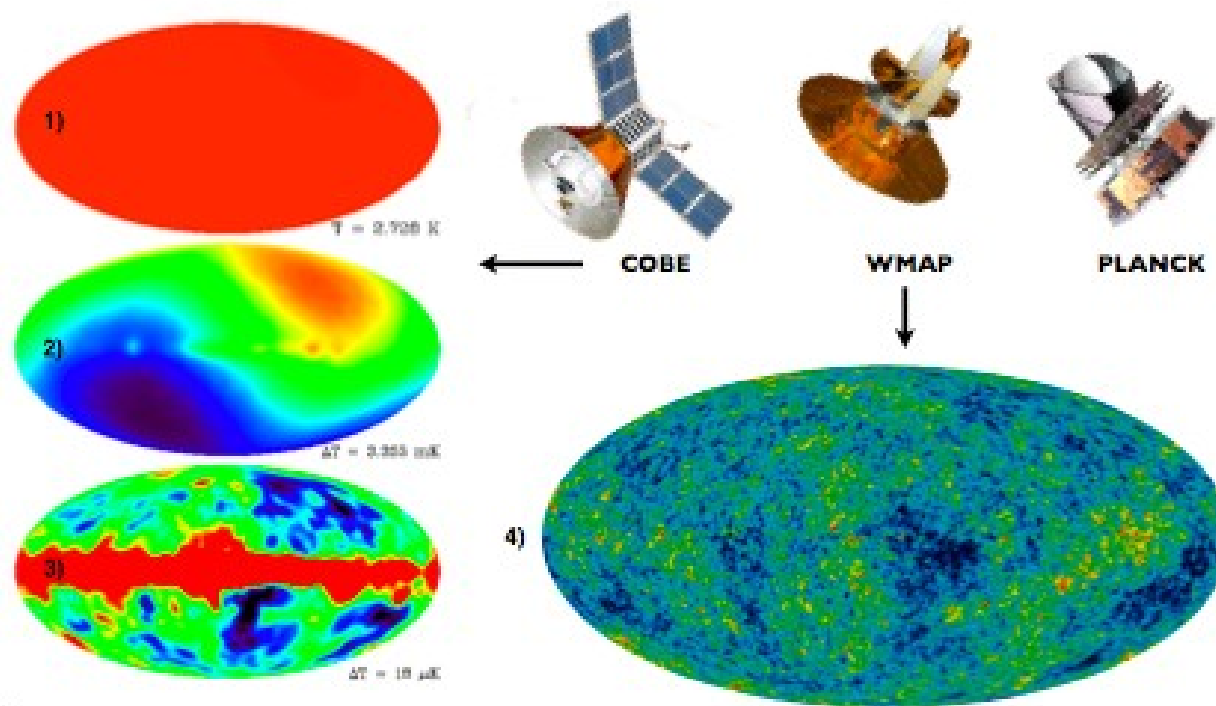
ACKNOWLEDGMENT: This work has been supported in part by the French National Research Agency (ANR) through COSINUS program (project MIDAS no. ANR-09-COSI-009).

Volume de données des expériences dans la cosmologie

COBE (1989) : 10 Gigabytes of data

PLANCK (2012) : 1 Terabyte of data

CMBPOL (2020) : 0.5 Petabyte of data (estimation)



(J. Errard, 2012)

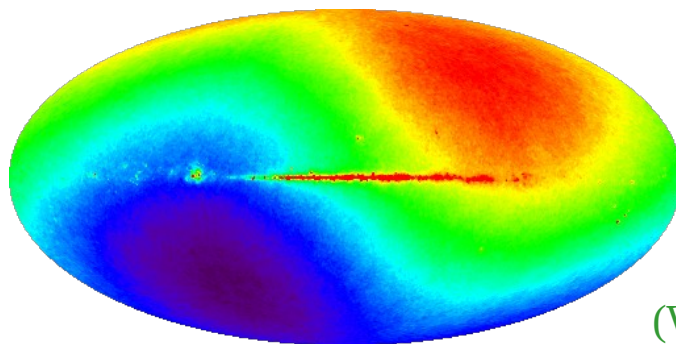
➡ Nécessite une importante puissance de calcul

Un peu de cosmologie

- ▶ Le CMB est extrêmement isotrope ;
- ▶ La température est globalement uniforme avec une température moyenne de 2.725 K (-270 °C) ;

Fluctuation de température pour le CMB :

$$\Delta T = 3.1 \text{ mK}$$

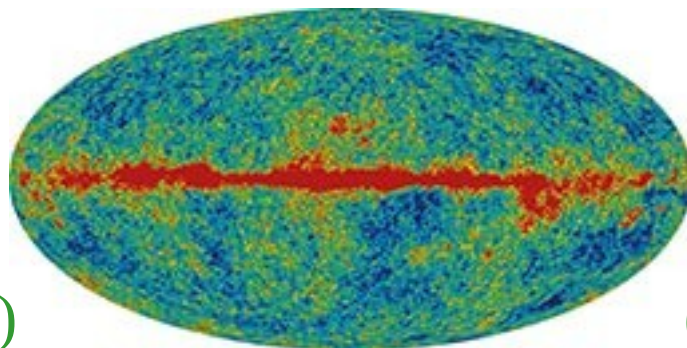


Variation dues au mouvement du Système Solaire

(WMAP, Nasa)

Après soustraction de ce dipôle :

$$\Delta T = 200 \text{ } \mu\text{K}$$



En rouge, c'est le plan galactique

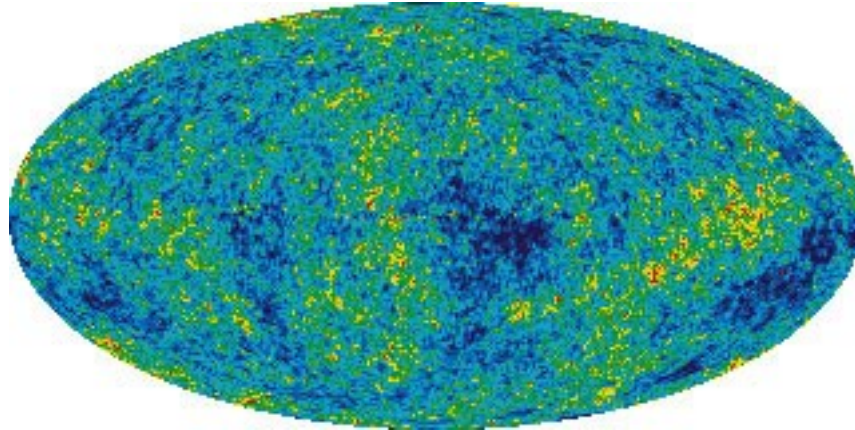
(61 GHz)

(WMAP, Nasa)

Un peu de cosmologie

- ▶ CMB déterminé par 5 ans de données WMAP :

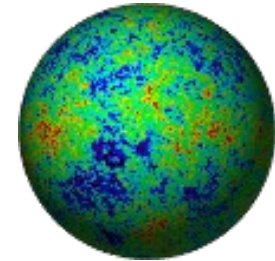
$$\Delta T = 200 \mu\text{K}$$



Le signal venant de notre galaxie a été soustrait en utilisant des données provenant de plusieurs fréquences.

Midapack : Motivation pour une bibliothèque de calcul

Fournir des outils de calcul pour l'analyse des données cosmologiques



- ▶ Haute performance ;
 - ▶ Massivement parallèle ;
 - ▶ Portable ;
 - ▶ Incluant de nouvelles approches algorithmiques ;
 - ▶ Capable de gérer un volume de données très important.
- ➔ Résoudre l'équation du « mapmaking » par le maximum de vraisemblance pour le fond diffus cosmologique (CMB)

Définition du problème « mapmaking » pour le CMB

Le problème « mapmaking » par le maximum de vraisemblance consiste à déterminer la meilleure estimation du « ciel » à partir d'un signal de données brutes temporelles, d'une stratégie de scan et d'une description du bruit.

Cela s'exprime sous la forme d'une équation par :

$$A_{pt}^T N_{tt}^{-1} A_{tp} \tilde{x}_p = A_{pt}^T N_{tt}^{-1} d_t$$

Avec:

- ▶ d_t le signal des données brutes temporelles ;
- ▶ A_{tp} la matrice de pointage qui relie chaque terme de d_t à un pixel du CMB par la relation :

$$d_t = A_{tp} x_p + n_t$$

- ▶ n_t le bruit instrumental, qui est supposé Gaussien et stationnaire par morceau.

Représentation du bruit instrumental

Les informations statistiques du bruit sont contenu dans la matrice de covariance $N_{tt} = \langle n_t n_t^T \rangle$

On assume généralement que N_{tt}^{-1} est

- ▶ une matrice symétrique et définie positive ;
- ▶ une matrice bande diagonale Toeplitz par morceau

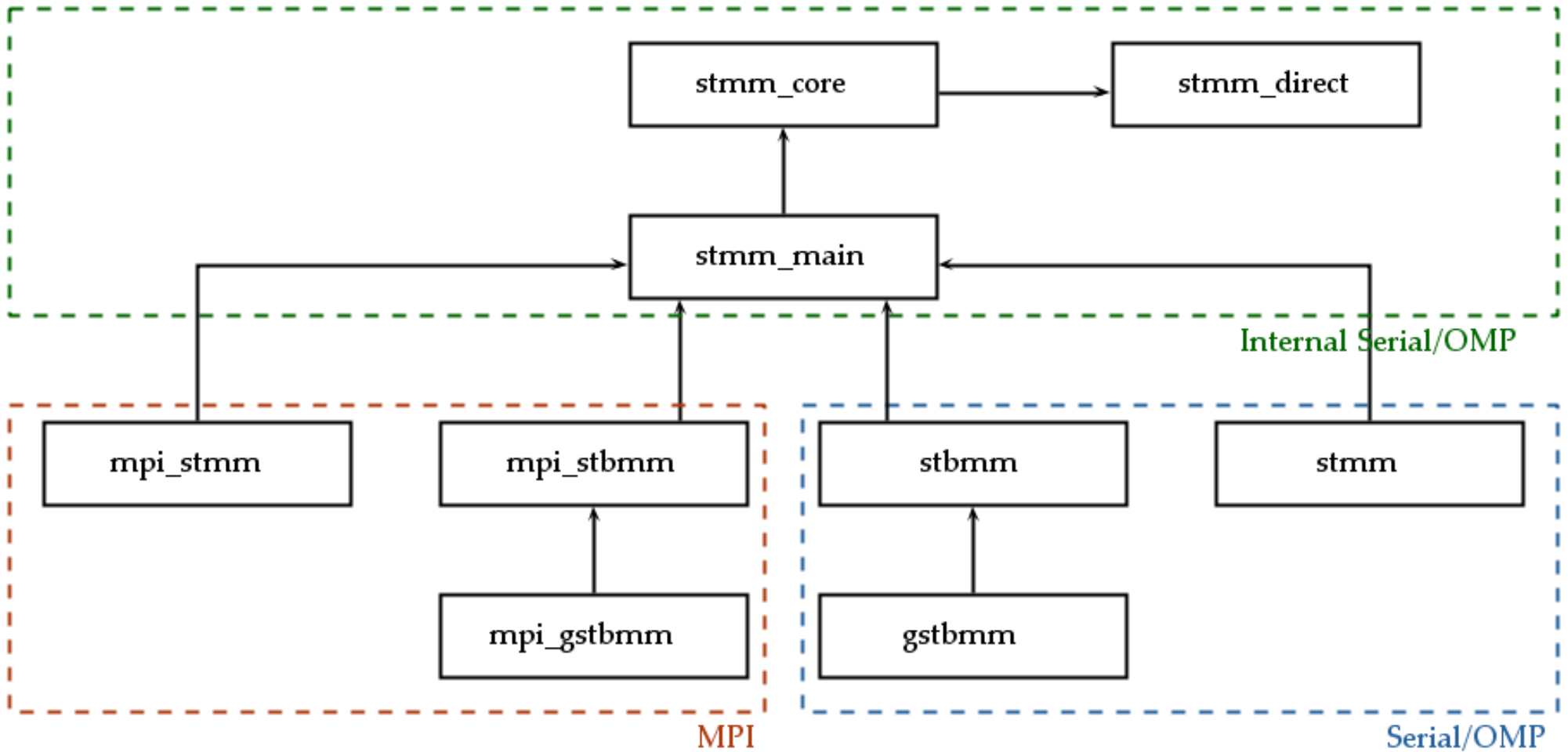
Cela nous permet d'exploiter des algorithmes performants :

- ▶ Algorithmes basés sur la FFT;
- ▶ Besoins en mémoire réduits.

➡ C'est généralement considéré comme un bon compromis pour la représentation de la corrélation du bruit du CMB.

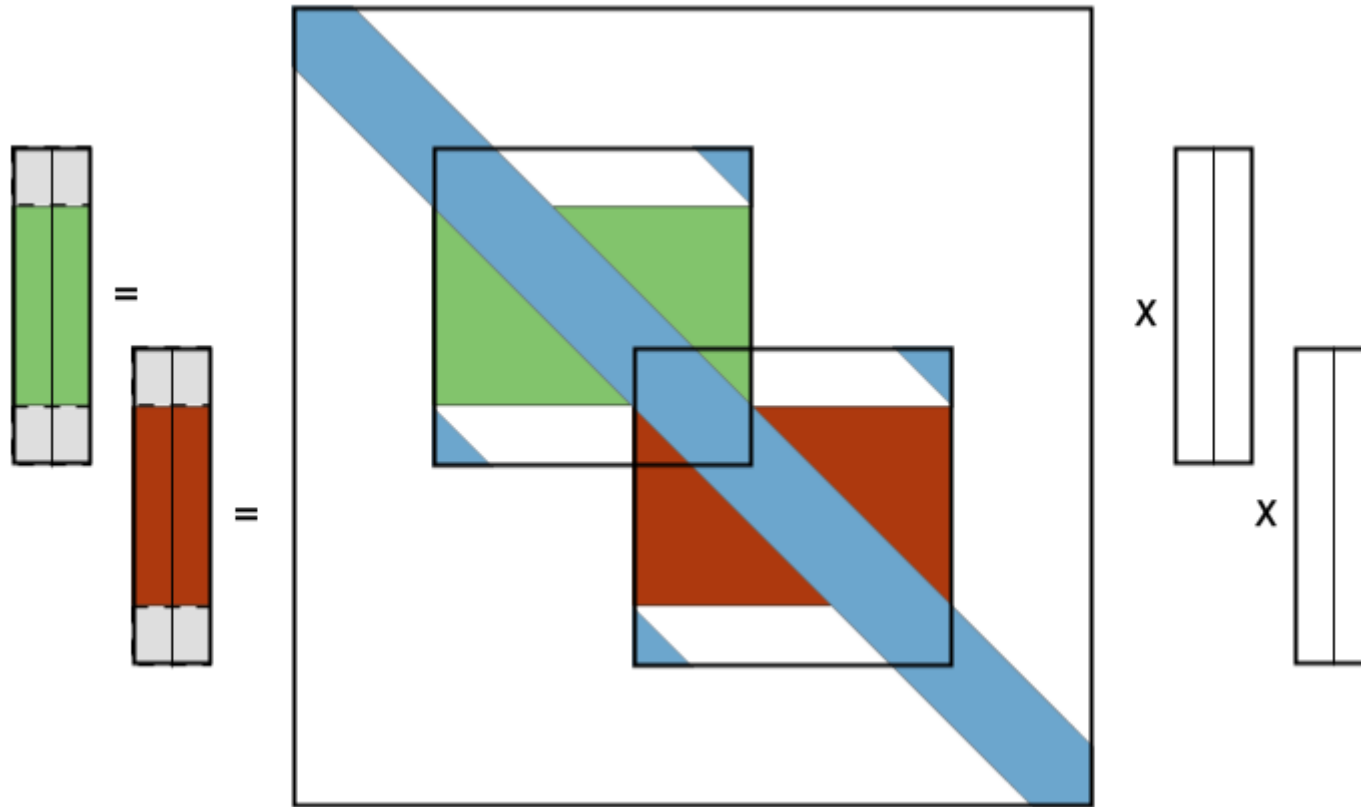
Module « algèbre de Toeplitz »

Diagramme de dépendances des routines API



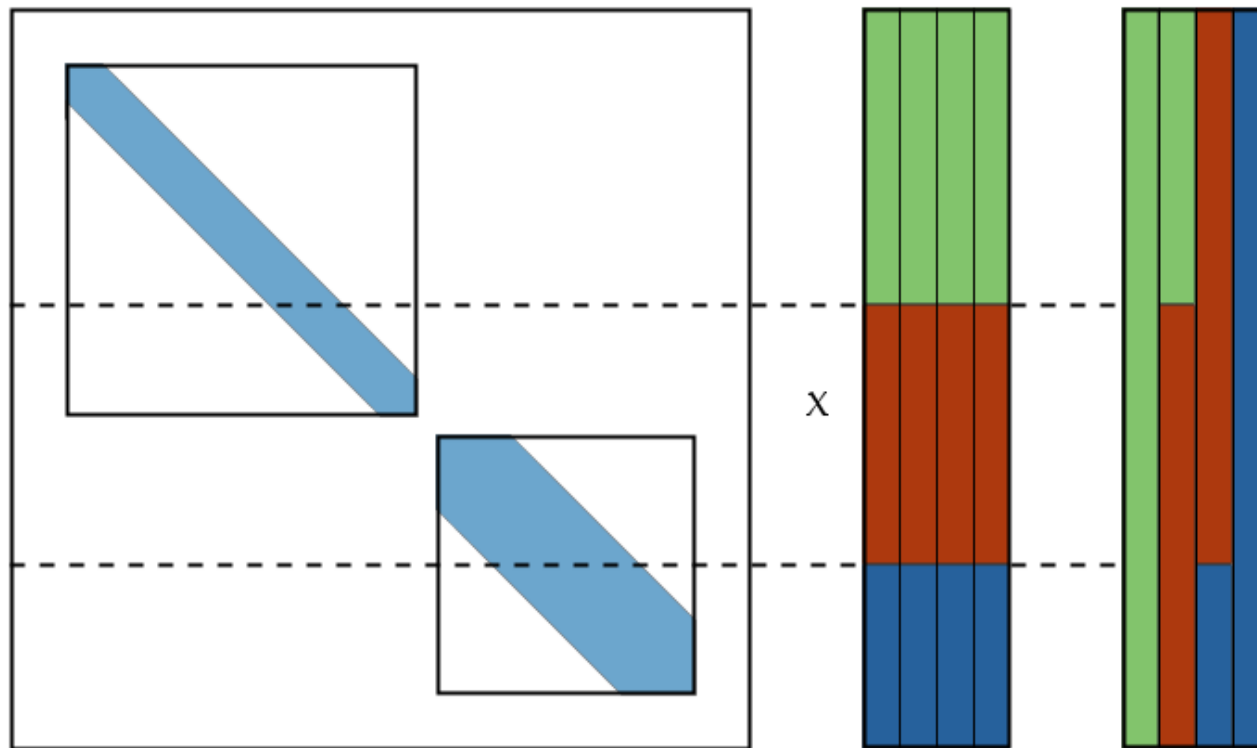
L'algorithme en fenêtre glissante – séquentiel (core routine)

- ▶ Limite la taille des données à copier ;
- ▶ Les performances sont très dépendantes de la taille de ce bloc.



Toeplitz block diagonale – Parallèle MPI

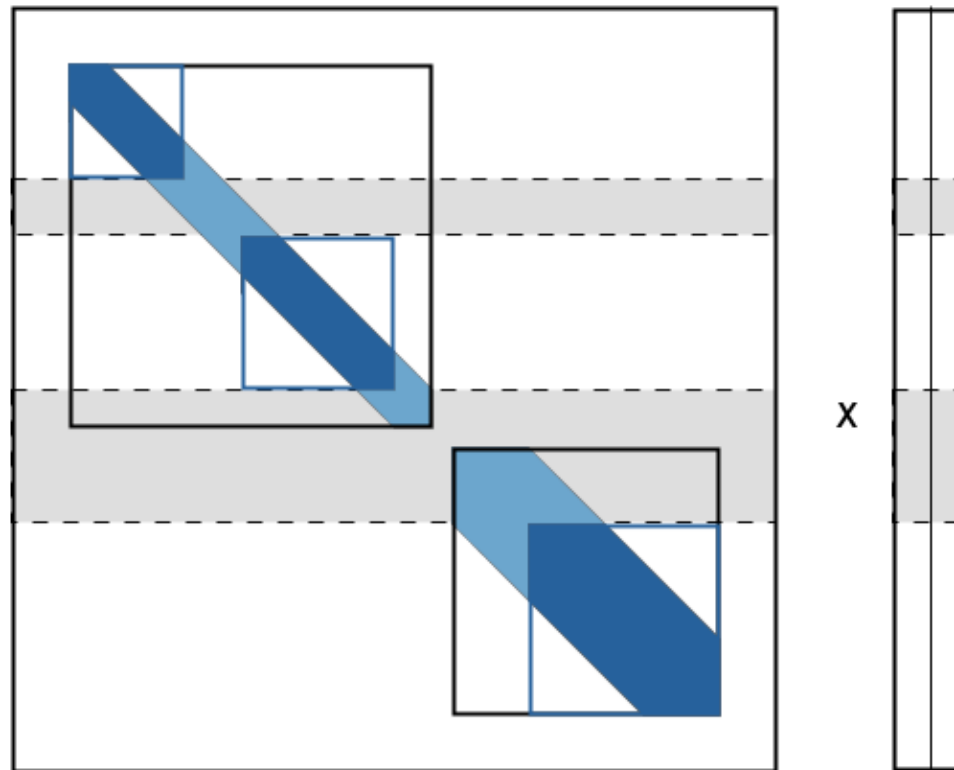
- ▶ Utilise des blocs flottants ;
- ▶ Les communications entre voisins sont faites seulement si besoin ;
- ▶ Il est possible de définir plus de blocs que nécessaire.



➔ Le nombre de blocs à définir localement dépend fortement de
La distribution des données.

Toeplitz block diagonale « gappy » – Parallèle MPI

- ▶ Utilise des blocs flottants ;
- ▶ Les communications entre voisins sont faites seulement si besoin ;
- ▶ Il est possible de définir plus de blocs que nécessaire.

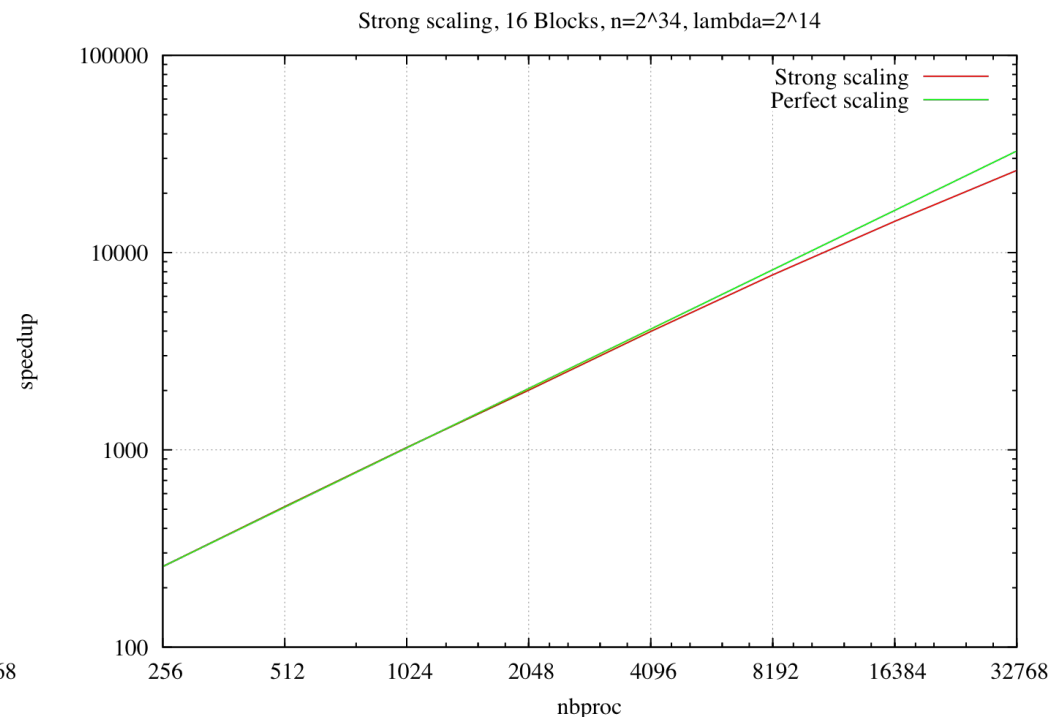
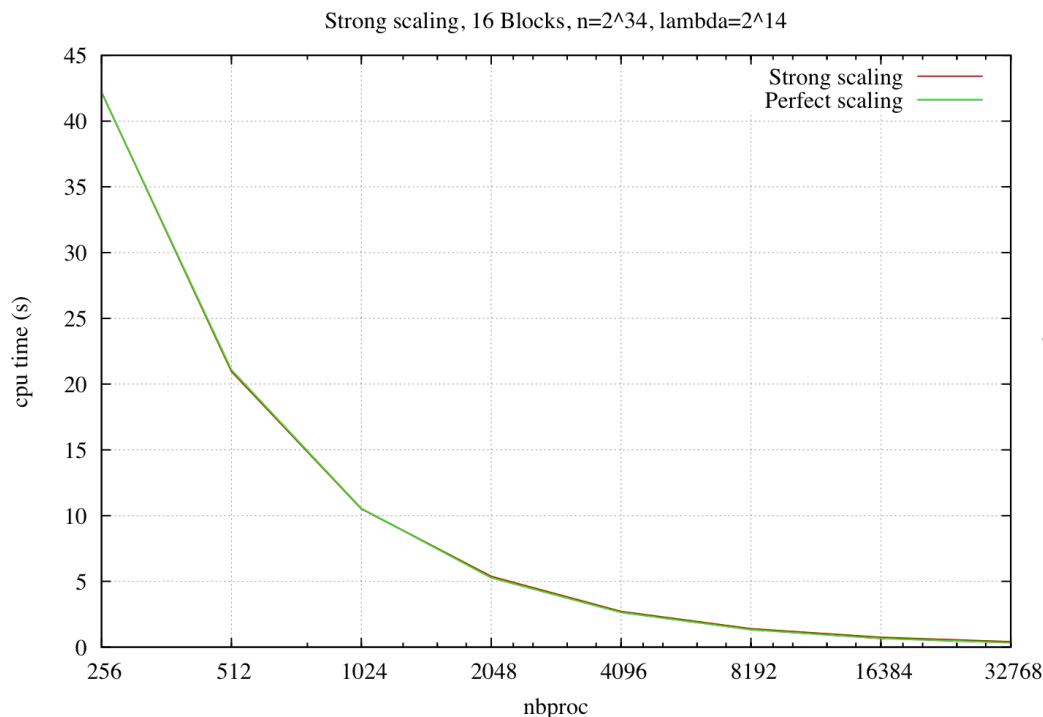


➔ Le nombre de blocs à définir localement dépend fortement de
La distribution des données.

Résultat d'extensibilité pour le « produit Toeplitz »

Extensibilité forte :

- ▶ Le volume de données reste constant, seul le nombre de processus change.



17 Milliards de données (doubles)
= 136 Milliards d'octets

$$\text{speedup} = \frac{t_1}{t_n}$$

Module « Matrice de pointage »

Cette matrice très creuse est de taille (m, n) avec :

- ▶ m la taille de la série temporelle locale au processeur ;
- ▶ n le nombre de pixels parcouru localement ;
- ▶ Le nombre de valeurs non nulles par lignes est très faible (de l'ordre de 1 à 5) pour les applications en cosmologie.

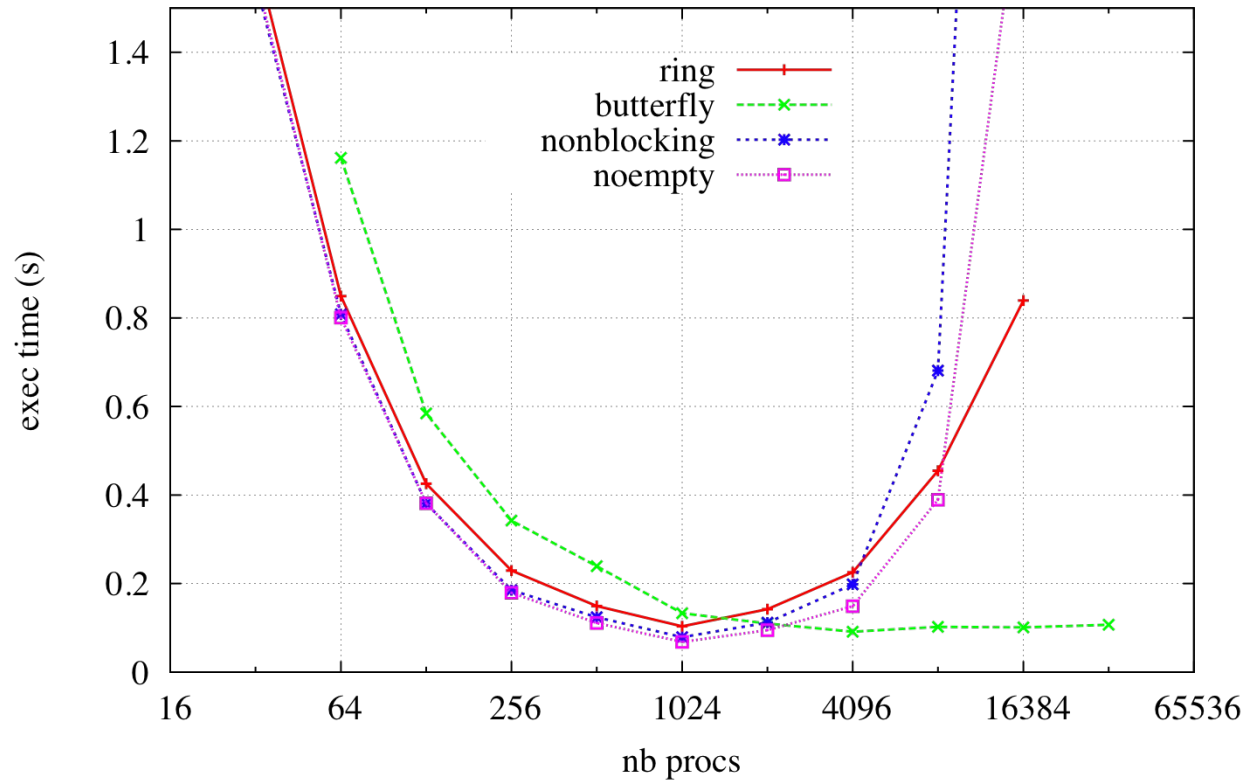
Les pixels peuvent être très éparpillés sur les processeurs :

- ▶ Les communications entre processeurs peuvent donc être très complexes pour le produit avec la matrice A_t ;
- ▶ Le temps de communication domine généralement le temps de calcul pour cette opération.

 Utilisation d'algorithmes spécifiques pour optimiser les communications.

Résultat d'extensibilité pour le « produit dépointage »

strong scaling hopper : $V := A^t U$, $nt=1638.4$ millions, $nnz=1$, $npix$ 12 millions



Un premier résultat de « mapmaking »

Résolution de l'équation du « mapmaking » avec la méthode du gradient conjugué préconditionné ;

Stratégie de scan :

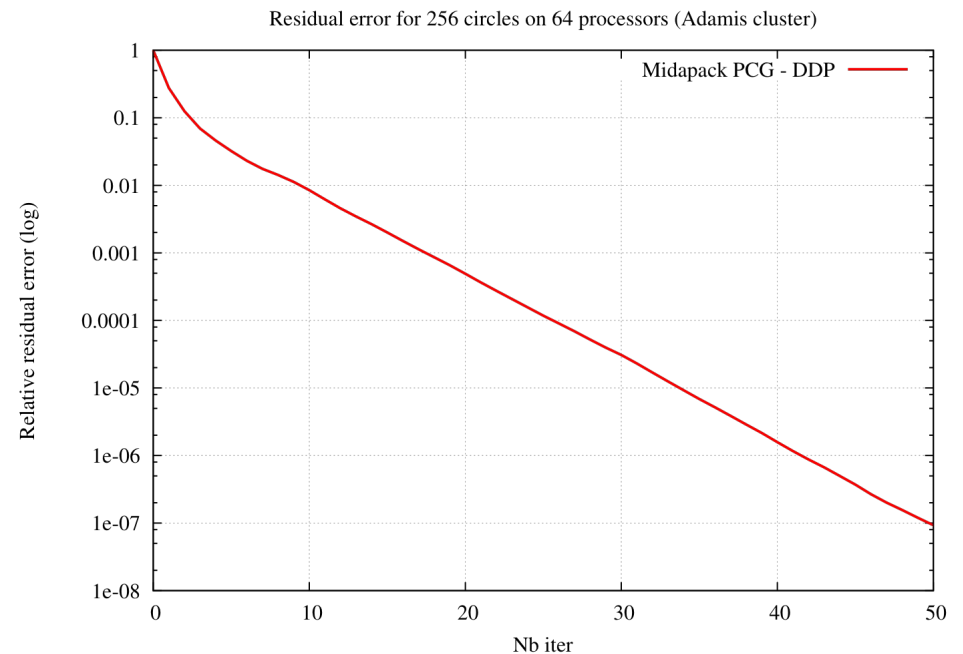
- ▶ 256 intervalles stationnaires de taille homogène 2^{20} ;
- ▶ Effectués par translation horizontale ;
- ▶ 1 valeur non nulle par ligne.

Matrice de Toeplitz :

- ▶ Largeur de bande de taille 2^{14} .

Distribution des données :

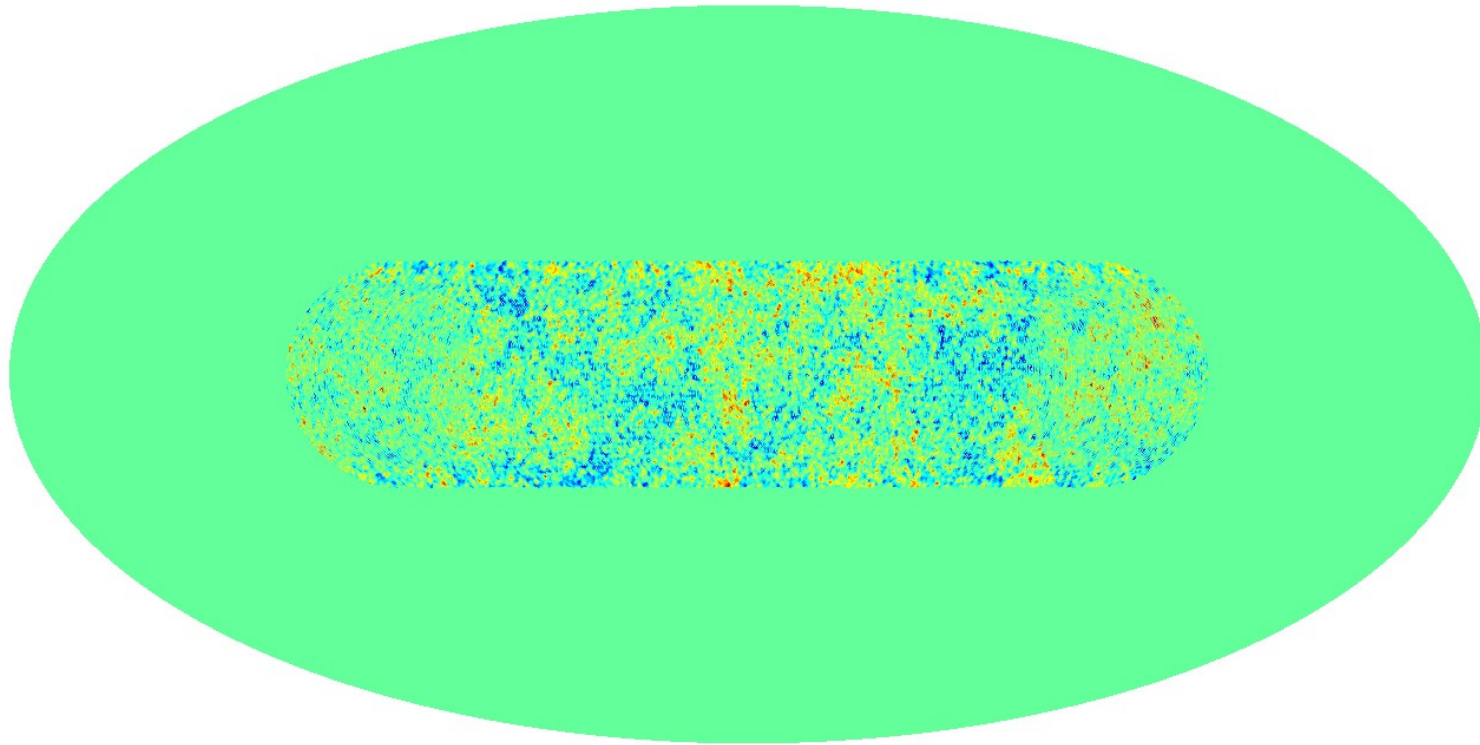
- ▶ Homogène par processus avec des intervalles stationnaires entiers.



Un premier résultat numérique

786432 pixels

Projection Mollweide



-391.  +400.

Conclusion

- ▶ Les éléments principaux de la librairie Midapack sont en place ;
- ▶ Cela fournit un ensemble de routines efficaces et flexibles ;
- ▶ Un paramétrage fin est aussi possible pour un utilisateur expert ;
- ▶ Il est déjà possible de résoudre l'équation du « mapmaking » ;
- ▶ **Midapack** est téléchargeable sur le site web officiel (projet MIDAS no. ANR-09-COSI-009) :
http://www.apc.univ-paris7.fr/APC_CS/Recherche/Adamis/MIDAS09/software.html

Merci !