

MINES PARISTECH - MS HPC-AI

# Projet d'Algèbre Linéaire Distribuée : Profiling de BoomerAMG

Julian AURIAC &amp; Aymeric MILLAN

Cours de Christophe BOVET

17 Janvier 2022

## Résumé

Voici le document regroupant nos benchmarks de [BoomerAMG](#), inclus dans la librairie [HYPRE](#).

L'objectif du projet est double : il s'agit d'abord d'appliquer les méthodes de résolutions multigrilles algébriques de BoomerAMG sur des [matrices de problématiques réelles](#) au format `.mtx` (Matrix Market). Le deuxième objectif du projet est la réalisation d'études d'extensibilités :

**Forte :** Avec [un problème de taille fixe](#) au format Matrix Market, nous augmentons le nombre de processus MPI.

**Faible :** En partant de 1 processus MPI et d'un problème de taille  $n \times n$ , nous doublons la taille du problème **et** le nombre de CPU qui travaillent sur le problème.

Nous mesurons dans les deux cas les temps d'exécutions de la résolution d'un système de la forme  $Au = f$ , avec  $A$  la matrice de départ (i.e l'observation),  $f$  la solution vers laquelle on veut converger (i.e le résultat) et  $u$  le système que l'on cherche à trouver.

En plus de ces outils, ce projet apporte une vision générale sur les méthodologies de développement sur des clusters de calculs comme celui du CEMEF. Nous avons pu approfondir les concepts tels que la réservation des coeurs de calcul, le partage de ressources ou encore les scripts automatisés, ici avec le scheduler OAR.

## 1 Récupérer le code

Le code est disponible sur [ce repo GitHub](#). Vous pourrez aussi trouver le code et une archive dans nos répertoires personnels sur le CEMEF. Le programme est déjà compilé sur le cluster.

Nous avons ajouté l'option `-file` à l'exécution qui permet de préciser un chemin d'accès

relatif vers un fichier au format `.mtx`. Le code fonctionne pour des **matrices carrées** uniquement. De plus, avec les options par défaut (e.g `-gamma`, le cycle AMG utilisé,  $V$  par défaut), seulement les matrices symétriques définies positives permettent de converger vers une solution. Nous avons téléchargé quelques matrices de ce type dans le répertoire `matrices`, à la racine du projet.

## 2 Logique d'implémentation

Pour le benchmarking, nous avons utilisé un script shell qui formate les données des logs OAR en fichiers csv. Ensuite, à l'aide de python et surtout de la librairie `pandas`, nous avons traité les données pour les visualiser ici. Les données brutes sont disponibles dans le répertoire `log/` du projet.

Pour ce qui est de la lecture de fichier `.mtx` et le découpage sur les différents coeurs de calculs, nous avons utilisé la librairie [Eigen](#). La difficulté était premièrement de s'approprier la librairie, notamment les méthodes pour accéder aux données brutes (i.e. `raw buffers`), dans le but de les envoyer à l'autre librairie, HYPRE. L'interface entre les deux librairies ainsi que le découpage de la matrice pour les différents processus MPI ont été pour nous des difficultés notables de ce projet (et donc des axes d'amélioration).

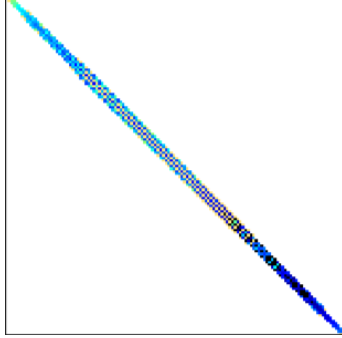
Nous avons essayé de réutiliser au maximum le code qui était déjà développé par le professeur, vous trouverez le code commenté dans le fichier `tp.cpp`.

## 3 Étude d'extensibilité forte

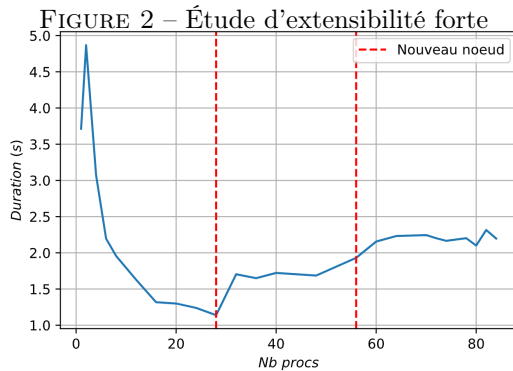
Dans cette partie, nous avons utilisé la matrice [Emilia923](#), qui est issue d'un problème de géomécanique. C'est une matrice symétrique dé-

finie positive avec environ  $4 \times 10^6$  nnz., et 923136 lignes et colonnes.

FIGURE 1 – Profil de Emilia923



En gardant ce même problème tout au long de l'étude, nous allons augmenter le nombre de processus MPI en parallèle. Nous montons jusqu'à  $3 \times 28 = 84$  processus car cela correspond à 3 noeuds de calcul du cluster CEMEF complets. Nous avons délimité par la ligne horizontale rouge le nombre de coeurs pour un même noeud. Voici les résultats de ces exécutions :

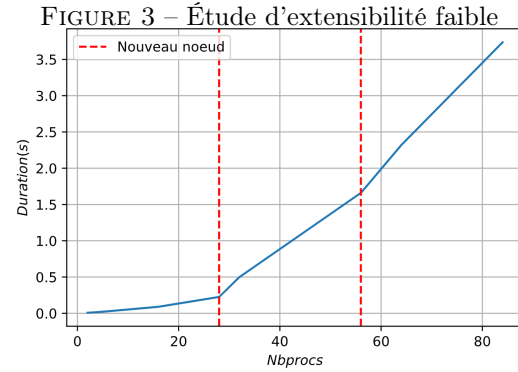


Une première chose assez flagrante que l'on peut remarquer ici est que dès que l'on sort du même noeud de calcul, et que les communications MPI se font entre différents noeuds, le temps de calcul augmente. De plus, on peut voir une perte de performance notable lorsqu'on passe de 1 à 2 processus MPI. Cette étude a été réalisée avec les paramètres par défaut du solveur. Notons que nous avons pris soin de réserver trois noeuds qui se trouvent côte à côte sur le cluster.

## 4 Étude d'extensibilité faible

Voici ci-après une étude d'extensibilité faible du programme. Une fois de plus, les paramètres utilisés ici sont ceux par défauts : Cycle V, coarsening CLJP, interpolation classique, un seul balayage par niveau, pas de coarsening agressif.

Vous trouverez toutes les informations sur les paramètres par défaut dans le code, et plus en détail sur le manuel de référence HYPRE.



Une fois de plus, nous pouvons constater qu'il y a une divergence lorsque l'on sort d'un seul et même noeud de calcul. Nous étudierons brièvement plus tard ce phénomène. D'abord, nous allons jouer sur les paramètres de résolution du problème.

## 5 Changement des paramètres de base

De nombreux paramètres sont disponibles dans la librairie BoomerAMG. Entre autres, nous pouvons choisir la méthode de coarsening et d'interpolation. Nous avons essayé d'utiliser des méthodes qui admettent possiblement une plus grande marge d'erreur, mais qui sont tournées vers la performance. Voici quelques temps d'exécutions en fonction de différents paramètres. Les benchmarks de cette parties ont été réalisés sur 28 coeurs en parallèle, tous sur un seul et même noeud. La taille du problème est fixé à  $8096^2$ .

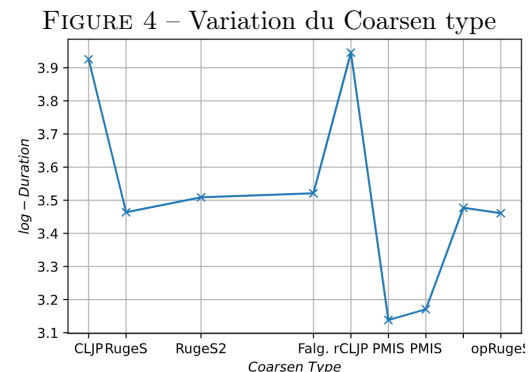


FIGURE 5 – Variation du aggressive coarsing

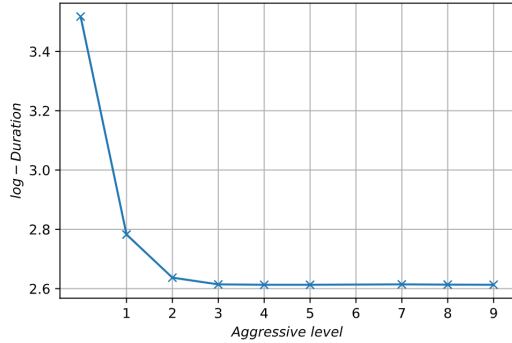
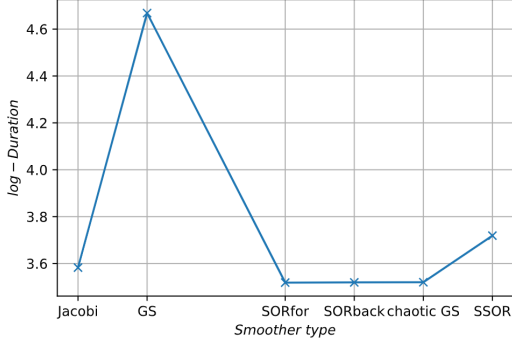


FIGURE 6 – Variation du smoother



Il existe de nombreux autres paramètres qu'il faudrait étudier selon le profil de la matrice que nous essayons de résoudre. Mais avec ce que nous avons testé, et notre profil de matrice (symétrique définie positive), nous allons combiner les paramètres qui semblent minimiser le temps de calcul en se basant sur les trois précédents graphiques, nous allons donc utiliser :

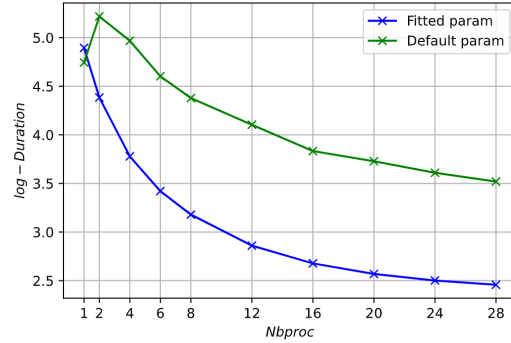
**Coarsening type** - Méthode utilisée pour réaliser le maillage grossier : **PMIS**

**Aggressive coarsing** - Utilisé pour faire un maillage grossier de manière agressive, ce qui peut réduire les allocations mémoire et la complexité. Ici, nous allons réaliser un *coarsing* agressif sur 3 niveaux.

**Relaxation type** - Le lisseur à utiliser pour la phase de pré-lissage : hybride Gauss-Seidel ou SOR, avec une résolution ascendante (*forward solve*).

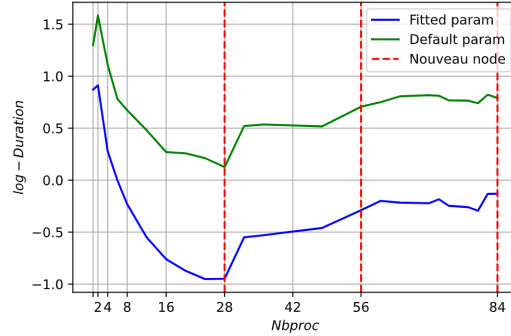
Voici une comparaison entre le temps d'exécution du solveur avec les paramètres par défaut de HYPRE et les paramètres que nous avons choisis. Il s'agit d'une étude d'extensibilité forte, nous gardons la même taille de problème que pour les graphiques précédents.

FIGURE 7 – Comparaison des paramètres



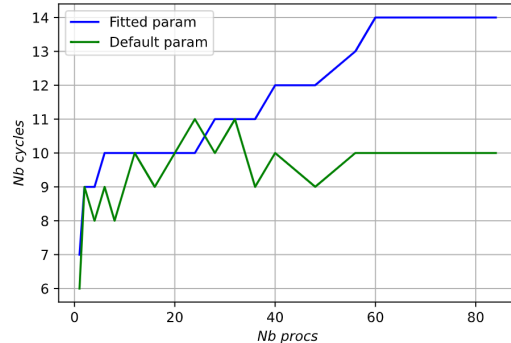
La combinaison de ces trois paramètres semble donc être efficace sur ce type de problème. Essayons maintenant de l'utiliser pour la résolution du problème Emilia923, sur un plus grand nombre de coeurs :

FIGURE 8 – Comparaison des paramètres sur Emilia923



Les résidus en fin de résolution sont du même ordre de grandeur tout le temps ( $10^{-9}$ ), cependant, on peut constater avec le graphique suivant que le nombre d'itérations par résolution augmente avec les paramètres fixés. Cela pourrait être une piste pour essayer d'utiliser au mieux la librairie.

FIGURE 9 – Nombre d'itérations sur Emilia923



Nous pouvons constater que ces paramètres fonctionnent donc aussi bien sur ce problème réel .mtx. De plus, le pic que nous avons obtenu en passant de 1 processus à 2 tend à s'effacer,

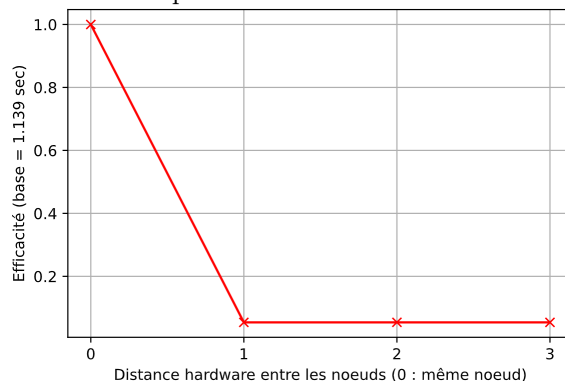
probablement dû au fait de l' *aggressive coarsening*. Malgré tout, les communications entre nœuds semblent impacter grandement les performances.

## 6 Étude de l'impact de la distance entre deux nœuds sur le cluster CEMEF

Nous avons mis un certain temps avant de réaliser que certains de nos calculs devenaient longs à cause de la séparation des CPUs sur plusieurs nœuds. En effet, en augmentant d'un le nombre de processus MPI, les calculs devenaient parfois 100x plus lents.

Nous avons d'abord pensé que la distance physique qui sépare les nœuds dans lesquels se trouvent les différents CPU utilisés par MPI impactait les performances. Pour en avoir le cœur net, nous avons décidé de réaliser l'étude suivante : Il s'agit du temps de calcul pour un problème de taille fixe et pour 2 processus MPI. L'idée est d'avoir deux CPUs qui sont bien sur deux nœuds différents, et de faire varier la distance entre ces nœuds (i.e. de choisir des nœuds plus éloignés physiquement sur le cluster à chaque itération). Voici les résultats que nous avons obtenus :

FIGURE 10 – Impact de la distance entre les nœuds sur la performance



Comme nous pouvons le constater, notre hypothèse était fautive. La distance physique qui sépare deux nœuds n'impacte pas de manière significative les performances. Cependant, nous pouvons voir que les performances sont grandement affectées par le fait de sortir du même nœud de calcul. Notre hypothèse est la suivante : comme les processus travaillent sur une même mémoire RAM physique (au niveau hardware), malgré le fait que nous utilisons de la programmation en mémoire distribuée, les communications MPI sont largement optimisées. Entre

autres, nous n'avons pas besoin d'accéder au réseau. En conclusion, si notre problème peut rentrer dans la mémoire RAM d'un seul nœud, il vaut mieux favoriser l'utilisation de tous les cœurs de ce nœud plutôt que d'ajouter des cœurs de calculs qui seraient sur des nœuds différents. Bien sûr, pour être sûr de cela, il faudrait faire une étude plus approfondie, notamment en mesurant le temps des communications par rapport au temps de calcul.

## Conclusions

Les courbes que nous obtenons avec les profilings d'extensibilité forte et faible correspondent à ce que nous avons vu en cours. L'étude "approfondie" que nous avons menée nous a permis de découvrir de nouveaux aspects de la programmation haute performance. Entre autres, nous avons pu clairement ressentir l'impact des communications réseaux sur les performances. Une fois les outils et les concepts (un peu) appropriés, nous nous sommes aussi rendus compte du confort qu'apporte l'utilisation d'une librairie telle que HYPRE, qui masque l'implémentation des communications MPI. C'est quand même un niveau d'abstraction qui rend la programmation assez agréable et rassurante, tout en nous permettant de garder un contrôle sur la performance car nous restons dans un langage bas niveau avec le C/C++.

## Pistes d'amélioration

- Réaliser un découpage des matrices CSR par valeurs et non par lignes, afin d'être sûr d'avoir une charge de calcul équilibrée entre les processeurs. De plus, rendre le code plus générique en permettant de résoudre des systèmes qui ne sont pas des matrices carrées.
- Donner la possibilité d'importer le vecteur solution en entrée du programme, comme pour la matrice de départ.
- Étude plus approfondie sur le coût des communications MPI.
- HYPRE donne la possibilité d'être utilisé sur GPU. Il aurait été intéressant de comparer les performances entre une version CPU et une version GPU. Malgré nos efforts, les versions de CUDA qui font tourner HYPRE sont anciennes et ne tournent que sur des "vieux" systèmes d'exploitations (e.g. Ubuntu 16.04). Ces versions ne sont pas disponibles sur les machines que nous avons à disposition à l'école.