

# OBHPC

Mesures de benchmark basé sur les différents méthodes de multiplication de matrices,  
comparaison des MiB/s entre les différents flags et différents compilateurs comme gcc et clang.

Gülçin GEDİK  
M1 CHPS

Sommaire:

Presentation de Rapport

Presentation de la Machine

Information sur les Methodes

Prise des Mesures

Explication détaillée sur les methodes

Explication détaillée sur les flags d'optimisation

Comparaison entre les methodes pour O3

Comparaison entre les methodes pour les différents flags

References

## Presentation de Rapport

Dans ce rapport de benchmark, on présente des mesures de benchmark pour différentes méthodes de matrice solvers codés en langage C, compilés avec clang et gcc, en utilisant les bibliothèques de math et de blas avec différents flags d'optimisation. On compare les différentes variations de toutes les combinaisons de ces choix par rapport à leurs résultats de bandwidth en MiB/s, la quantité maximale de données transmise par seconde, et on examine les déviations standards liés à ces résultats.

## Presentation de la Machine

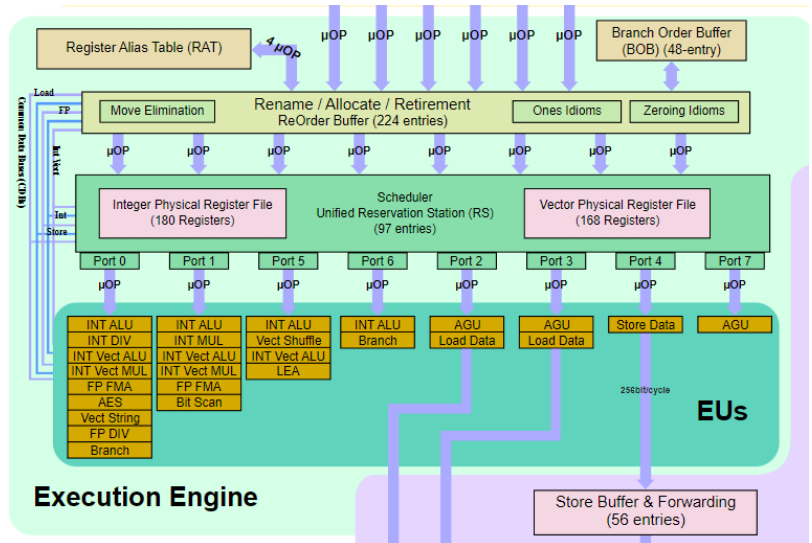
La machine utilisée lors de la prise des résultats possède une CPU de modèle Intel Core i5-8250 U CPU @ 1.60 GHz avec une architecture x86\_64 basée sur les 8 cœurs et 3 lignes de cache, L1 est 32K, L2 est 256K et L3 est 6144K, l'information détaillée est fournie dans les fichiers `lscpu.txt`, `cpuinfo.txt` et `cat_proc_cpuinfo.txt`.

## Informations sur les Methodes

La raison pour laquelle on a choisi de faire les mesures avec un code qui calcule des différentes méthodes de multiplication de matrices, la réduction de matrice et le produit scalaire est que chaque méthode mentionnée met du stress sur un aspect différent du CPU. Par exemple, la méthode de réduction met le stress sur les opérations load, store et addition. Le produit scalaire joue quant à lui sur les opérations de load, store, multiplication et addition ; ici, il faut faire bien attention aux portes 0 et 1, qui donnent la liberté de faire une multiplication et une addition en un seul cycle grâce à FMA. La méthode unroll x4 de dgemmm met du stress sur les mêmes opérations que le produit scalaire, mais avec une seule différence : cette fois-ci, ces opérations sont censées être exécutées en bloc de 4, donc cela met aussi du stress sur la durée d'attente d'opération. La méthode IJK met du stress sur les mêmes opérations encore, mais avec un nombre d'accès au mémoire maximale, ce qui demande plus de load et store.

## Prise des Mesures

Pour avoir des résultats assez stables, on a pris les mesures quand la machine était branchée sur le secteur, on a utilisé un CPU governor qui est fourni par intel pstate et on a mis tous les CPUs en mode performance. Les informations détaillées sur les données de CPU governor sont fournies dans le fichier `cible`.



Pour calculer les résultats de benchmark, on utilise RDTSC instruction pour mesurer la performance pour chaque itération. Cette instruction retourne le nombre de cycles complétés lors de l'exécution de fonction donc cette instruction est vraiment dépendant à la fréquence de CPU et on peut seulement obtenir les résultats stables si la cible mesurée prend au moins 500 cycles.\* On répète l'exécution de la fonction  $r$  fois pour construire un échantillon de données. Il faut préciser que  $r$  doit être plus grand que 31 à cause de la méthode de calcul choisie pour calculer standard variation, celle-ci doit être inférieure à 5% pour qu'on puisse faire confiance à nos données. Elle nous donne la distance moyenne entre la moyenne et les éléments de l'échantillon. Lors des benchmarks, on a pris  $r$  égale à 35.

La sortie de l'exécution des mesures de benchmark fournit l'information sur KiB, MiB, GiB produits par la fonction simulée, la taille de matrice, le nombre d'échantillons, le minimum valeur de cycles elapsed, le maximum valeur de cycles elapsed, la valeur moyenne de cycles elapsed, la déviation pour la méthode de réduction et produit scalaire, la déviation standard et le bandwidth en MiB/s.

### Explication détaillée sur les méthodes

On a pris les mesures de benchmark pour différentes méthodes de multiplication de matrices.

- Première méthode IJK: c'est l'algorithme avec la complexité en nombre d'accès au mémoire le plus haut,  $O(n^3)$ . La boucle interne est le produit scalaire et l'accès à la mémoire se fait sur les lignes et les colonnes. Quand on parle de l'accès à la mémoire, il faut se rappeler que le langage C favorise row-major layout pour accéder aux éléments de la matrice.
- Deuxième méthode IKJ : la boucle interne est une AXPY, donc la complexité en nombre d'accès au mémoire est plus basse que celle de IJK. L'accès à la mémoire se fait sur les lignes.
- Troisième méthode IEX : On a encore un AXPY dans la boucle interne, mais cette fois-ci l'accès à l'array se fait en dehors de la boucle interne, ce qui diminue la complexité en nombre d'accès à la mémoire qui se fait sur les lignes.
- Quatrième méthode UNROLL 4: La boucle interne est encore un AXPY mais cette fois-ci l'accès à la mémoire se fait par les blocs de 4. En déroulant la boucle, on veut optimiser le temps d'exécution de boucle aux dépens de la taille de fichier binaire.
- Cinquième méthode CBLAS : Dans cette méthode, on fait appel à la méthode cblas\_dgemm de la librairie cblas.
- Sixième méthode UNROLL x8 : Même chose que quatrième méthode sauf qu'ici, on accède à la mémoire par les blocs de 8.
- La méthode de réduction : il s'agit de réduire l'array à une seule valeur en accumulant. La complexité en nombre d'accès au mémoire est linéaire, on fait seulement l'addition.
- La méthode de produit scalaire : on fait le produit scalaire, et on utilise la possibilité de faire une multiplication et une addition en un seul cycle, ce qui nous amène de la complexité en nombre d'accès en mémoire linéaire.

## Explication détaillée sur les flags d'optimisation

On profite des flags d'optimisation fournis par les compilateurs pour comparer les performances des différentes méthodes de matrice multiplication compilées avec différents flags.\*

- Avec O1: le gcc et le clang essayent de réduire la taille de code et le temps d'exécution. Le manuel de gcc indique que l'optimisation de la compilation peut prendre un peu plus de temps et plus de mémoire pour les grandes fonctions.
- Avec O2, le gcc essaye d'optimiser encore plus, mais il n'augmente pas le déroulage des loop ou l'inlining. O2 hérite les flags d'optimisations fournis par O et O1, et pour clang aussi l'héritage marche de la même manière que gcc. Selon les versions, clang peut ajouter : -vectorize-loops, -vectorize-slp flags aussi.
- O3 a aussi hérité des flags d'optimisation précédentes, mais il fournit en plus : -finline-functions, -funswitch-loops and -fgcse-after-reload options pour gcc. Et pour clang les options -callsite-splitting -argpromotion sont ajoutées selon les versions.
- Enfin, avec Ofast le compiler fait tout pour obtenir le programme le plus optimisé possible en négligeant la précision numérique. Il fait l'optimisation agressive qui peut être non conforme aux standards de langage.

Pour obtenir ces résultats le plus vite possible et avec le moins d'erreur humaine, comme des fautes de frappes, et pour bien organiser les données obtenues, on a profité d'un script qui :

- prend les valeurs nécessaires par l'utilisateur, comme la taille de matrice, la quantité d'échantillon des samples, le nom de compiler, et le flag d'optimisation voulu. On les prends séparamment pour qu'on puisse reproduire les résultats si on obtiens des variations standards élevés.
- fait les changements nécessaires dans les Makefile des programmes.
- met les CPU à la fréquence voulue, et colle le programme sur le cœur 1 de la machine.
- rend les données en un format facilement utilisable par gnuplot.
- fait l'organisation des fichiers dans les files.

Dans la suite, on examinera les graphes pour :

Les methodes de dgemm, reduction et produit scalaire compliés avec gcc et clang, avec des differents flags d'optimisation et leurs comparaisons.

Touts les mesures sont pris en utilisant une matrice carré de taille 60, s'ils ne sont pas précisés autrement.

## Comparaison entre les methodes pour O3

### Clang avec dgemm avec le flag d'optimisation O3:

*flags\_clang\_2x2.png* ; 4eme case

On voit que CBLAS a le bandwidth le plus élevé, on continuera de voir ce trend dans les autres graphes aussi. L'efficacité d'accéder aux sub-level programmes montre à quels points ils sont forts.

On voit que IJK a le bandwidth le plus bas, on peut lier cela au fait qu'il possède une complexité en nombre d'accès à la mémoire la plus élevée.

On voit que Unrollx4 et Unrollx8 ne donnent pas le résultat attendu, on attendait un trade-off entre la taille de fichier binaire et le bandwidth..

### **Gcc avec dgemm avec le flag d'optimisation O3:**

*flags\_gcc\_2x2.png* ; 4eme case

Même raisonnement que la même version avec clang.

### **La comparaison entre gcc et clang avec dgemm pour O3:**

*flags\_gcc\_vs\_clang\_2x2.png* ; 4eme case

On peut constater que gcc est plus efficace avec la méthode unroll x4 alors que ce n'est plus le cas pour unroll x8.

Pour IJK, on voit que clang est plus efficace que gcc et le bandwidth de IJK compilé avec clang est vraiment proche au bandwidth de IEX compilé avec clang. En connaissant la différence entre les deux méthodes, on peut se demander si clang a pris la liberté de faire sortir array en dehors de la boucle interne quand il compilait IJK, ce qui constitue la différence principale entre ces deux méthodes de multiplication.

### **Les méthodes de dgemm, reduc et dotprod de taille 60 et de taille 100 compilées avec gcc avec le flag d'optimisation O3:**

*gcc\_dif\_size\_flagsO3.png*

On peut observer le trend que le bandwidth diminue quand la quantité de données augmente, ce qui est le résultat attendu, vu que le nombre d'accès à mémoire augmente quand la taille de données augmentent.

### **Les méthodes de dgemm reduc et dotprod de taille 60 et de taille 100 compilées avec gcc avec le flag d'optimisation O3:**

*clang\_dif\_size\_flagsO3.png*

On voit le même trend obtenu avec le gcc compiler sur les bandwidth. Par contre on constate que les déviations standards varient, qui peut être lié à plusieurs raisons, on ne peut pas faire une hypothèse en regardant seulement ces deux stats.

### **Les méthodes de dgemm reduc et dotprod de taille 60 et de taille 100 compilées avec gcc et clang avec le flag d'optimisation O3:**

*gcc\_clang\_dif\_size\_flagsO3.png*

Sur l'ensemble, on peut observer que clang a donné les meilleurs résultats de bandwidth pour chaque taille de données.

### **Gcc avec dgemm avec différents flags d'optimisation examinés séparément:**

*flags\_gcc\_2x2.png* ;

On peut observer que O1 suit le même trend que O2, et O3 suit le même trend que Ofast.

Cela peut être lié au fait que les flags d'optimisations sont hérités.

On peut aussi constater que IEX est considérablement plus performante que IKJ quand elle est compilée avec O3 et Ofast, cela peut être lié au fait que les flags de vectorisation sont inclus dans O3 et Ofast mais pas dans O1 et O2.

### **Clang avec dgemv avec différents flags d'optimisation examinés séparément:**

*flags\_clang\_2x2.png*

On voit pas une IEX plus performante que IKJ comme on voit dans la version compilée avec gcc avec les flags d'optimisations de O3 et Ofast.

### **Clang avec dgemv avec la comparaisons entre les différents flags**

*clang\_flags.png*

Il est intéressant de constater que pour unroll x4 toutes les optimisations donnent des résultats proches, on peut alors se dire que même avec les flags d'optimisations, on n'arrive pas à obtenir un bandwidth plus grand. Donc pour notre cas, il faut se demander si cela vaut le coût de l'implémenter aux dépens de la taille de fichier binaire.

### **Gcc avec dgemv avec différents flags d'optimisation examinés séparément**

*flags\_gcc\_2x2.png*

On voit que Ofast et O3 suivent un même trend et que O1 et O2 en suivent une autre. Comme on le sait, les flags hérités de leurs précédents, et O3 et Ofast possèdent les flags d'optimisations de inlining, loop switch et unrolling. Ces trois flags peuvent être la cause du fait qu'ils suivent le même trend.

### **Gcc avec dgemv avec la comparaisons entre les différents flags**

*gcc\_flags.png*

le trend qu'on a vu dans la graphe précédente se montre à part d'une seule méthode qui est IJK, si on regarde les flags d'optimisation de Ofast, on peut constater que Ofast possède 3 flags d'optimisation plus que O3, ce qui peut être la raison pour laquelle on a un meilleur bandwidth.

### **Gcc et Clang avec dgemv avec la comparaison entre les mêmes flags**

*flags\_gcc\_vs\_clang\_2x2.png*

Si on fait la comparaison seulement pour le flag O3, on voit que gcc est plus performante que clang pour Unroll x4, alors que ce n'est pas le cas pour Unroll x8.

Et on voit que le binaire fournit par clang pour IKJ est assez performante que celui fournit par IEX, mais gcc ne montre pas le même trend de mesure pour ces deux fonctions. Le fait de séparer le variable indépendant de boucle interne joue sur la performance de gcc pour cette fonction.

### **Gcc, Clang, Gcc et Clang avec dot product avec la comparaison entre les différents flags**

*dotprod\_clang\_vs\_gcc\_2x2.png*

*dotprod\_gcc\_vs\_clang\_flags.png*

Produit scalaire, comme expliqué précédemment, profite du fait qu'on peut faire multiplication et addition en même temps. Dans ces graphes on peut constater que O1, O2 et O3 pour chaque compiler produisent des bandwidth qui sont assez proches. Il y a seulement Ofast de chaque

compilateur qui differe. En meme temps on peut voir que Ofast de clang est plus performante que celui de gcc.

### **Gcc, Clang, Gcc et Clang avec réduction avec la comparaison entre les différents flags**

*reduc\_clang\_vs\_gcc\_2x2.png*

*reduc\_gcc\_vs\_clang\_xflags.png*

code d'assembly: *assemblyO1gccreduc.txt*

*assemblyO1clangreduc.txt*

A part des mesures qui sont prises avec Ofast pour la methode de reduction de base, tous les mesures sont stables. Comme on a vu dans les autres graphes, unrollx4 et unrollx8 ne performe pas comme attendus. Si on examine le code d'assembly généré par ce code en utilisant le commande objdump pour le flag O1, on voit que ni clang ni gcc utilise les instructions pour les packed values, ce qui peut etre la raison qu'elle ne performent pas comme attendu.

En plus, on constate qu'il n'y a presque pas difference de performance et les flags d'optimisation pour cette methode.

### **Gcc, Clang, Gcc et Clang avec chaque méthode de dgemv avec la comparaison entre les différents flags**

*/gcc\_vs\_clang\_flags\_6\_types*

### **Gcc vs Clang avec différents flags d'optimisation pour IJK:**

*gcc\_vs\_clang\_flags\_IJK.png*

Dans cette partie on voit que la deviation standart pour gcc avec O2 est %12.7, avec O3 est %5.177 donc on ne peut dire les mesures pour cette benchmark ne sont pas stables. Et avec O1 la déviation standart est %3.5, qui peut etre considéré comme dans la limite. On obtient une mesure de benchmark stable pour cette methode seulement avec Ofast, qui est inferieure à %1. Par contre on ne voit pas le meme type de comportement avec les binaires produit par clang avec les quatres flags d'optimization.

### **Gcc vs Clang avec différents flags d'optimisation pour Unrollx8:**

*gcc\_vs\_clang\_flags\_Unrollx8.png*

Avec clang Ofast on voit que la deviation standart est plus grand que %5, donc on peut dire que nos mesures ne sont pas assez stables pour cette methode avec clang Ofast.

Avec gcc O1 on obtient une deviation standard à la limite acceptable, %4.6 et avec le flag Ofast on obtient %5.6. Donc on ne peut pas commenter sur les mesures qui ne sont pas stables.

On peut dire que de O1 à O2, clang a dupliqué sa performance pour cette methode et il reste plus performant que leurs équivalents de gcc.

### **Gcc vs Clang avec différents flags d'optimisation pour IKJ:**

*gcc\_vs\_clang\_flags\_IKJ.png*

Chaque mesures prises pour cette methode possèdent une deviation standart inferieure à %1 à part le binaire produit par clang avec O2, qui est %16.33, donc pas fiable.

On voit que clang O1, O3 et Ofast de clang restent encore plus performante que leur équivalent de gcc. On peut facilement remarquer l'augmentation de performance de O1 à O3 de gcc et de clang.

#### **Gcc vs Clang avec différents flags d'optimisation pour IEX:**

*gcc\_vs\_clang\_flags\_IEX.png*

Ici on constate que la deviation standart pour gcc avec O2 et avec clang O1 sont plus grande que %5, donc nos mesures ne sont pas stables pour ces flags.

Comme déjà expliqué, IEX est IKJ sont des methodes similaires et quand on regarde le graph de IEX on peut voir qu'il suit le meme trend que IKJ.

#### **Gcc vs Clang avec différents flags d'optimisation pour Unrollx4:**

*gcc\_vs\_clang\_flags\_Unrollx4.png*

Tous les mesures prises pour cette methode possèdent une standart deviation inferieure à %5, ont peut dire que nos mesures sont stables.

On constate que le compiler clang n'est pas aussi performante que le gcc pour les flags O3 et Ofast.

#### **Gcc vs Clang avec différents flags d'optimisation pour CBLAS:**

*gcc\_vs\_clang\_flags\_CBLAS.png*

Le reultat le plus interessant de ce rapport. On voit que la performance de CBLAS n'augmente pas linéairement contrairement à ce qui est attendu avec les flags d'optimisation. Cela peut etre liée au fait que les mesures prises pour cette comparaison posèdent des déviations standard entre %2.177 et %3.030, ils sont encore inferieure à %5 donc on peut dire que nos mesures sont encore assez stables, par contre il faut encore faire attention quand les differences de bandwidth entre les methodes sont assez petites, meme ces deviations standards ont des grands effets sur les resultats.

#### **Gcc et Clang avec dgemm reduc et dotprod avec la comparaison entre les mêmes flags**

*gcc\_vs\_clang\_flags\_reduc\_dotprod.png*

Pour dotprod compilé avec clang O2 on obtient pas les mesures fiable, la devation standard est plus grande que %5. Mais meme avec les mesures qui ne sont pas stables, on peut constater que la redusction et le produit scalaire sont plus vite que les methodes de multiplication de matrices. Cela peut etre lié eu fait que ces deux possèdent les complexités linéaires en nombre d'accès au memoire.



## References

\* is inspired by nbody project readme section.

\*[https://wiki.gentoo.org/wiki/GCC\\_optimization/fr](https://wiki.gentoo.org/wiki/GCC_optimization/fr)

\*information about the CPU: \*[https://en.wikichip.org/wiki/intel/microarchitectures/skylake\\_\(client\)](https://en.wikichip.org/wiki/intel/microarchitectures/skylake_(client))

\*L'information détaillée sur les flags d'optimisations est fournie par **gcc.gnu.org**.

\*l'information sur les flags d'optimisation de clang

<https://clang.llvm.org/docs/CommandGuide/clang.html> et <https://llvm.org/docs/Passes.html>