TP5 Mandelbrot Set Computation with OpenMP

Michel Donnet

December 5, 2023

Contents

1 Introduction

Dans ce travail pratique, nous allons utiliser openmp et C++ pour calculer l'ensemble de Mandelbrot, qui est une fractal célèbre en mathématique. L'objectif de ce travail pratique est de paralléliser le code permettant de calculer l'ensemble de Mandelbrot et de varier le nombre de threads s'exécutant pour calculer cet ensemble. Afin de faire un petit rappel, un processus est un programme qui est en cours d'exécution, et chaque processus possède sa propre mémoire virtuelle. Les threads composent un processus, ils se partagent la mémoire virtuelle du processus, mais chacun possède sa propre pile d'exécution. On va donc faire varier le nombre de threads du processus et observer les différences du temps d'exécution du programme.

2 Methodologie (Brief explanation of your code structure and OpenMP implementation)

Voici la structure de mon code:

```
├── Makefile
└── src
    ├── main.cpp
    ├── writer.cpp
    └── writer.hpp
```

Lorsque l'on compile et exécute le code, on obtient la structure suivante:

```
├── Makefile
├── src
│   ├── main.cpp
│   ├── writer.cpp
│   └── writer.hpp
├── T_0256.bmp
└── tp5
```

On a tp5 qui est notre exécutable, et le résultat de notre fractal est enregistré dans le fichier `.bmp`, qui possède dans son nom le nombre d'itérations utilisé. J'ai réutilisé le writer.cpp du travail pratique 3 afin de créer le fichier `.bmp` pour visualiser le résultat obtenu.

Dans une première partie de mon code, je m'occupe de traiter les informations données par l'utilisateur afin de bien initialiser notre fractal. Pour cela, j'utilise la fonction getopt définie dans `unistd.h`. Cette fonction détecte les options données à notre programme.

```
while ((option = getopt(argc, argv, "i:n:c:h")) != -1) {
        switch (option) {
            // Look after options here
```

```
        }
}
```

Ici, on boucle sur `getopt` tant que celui-ci trouve des options (qui sont toujours précédées par `-`). Quand `getopt` ne trouve plus d'options, il renvoie `-1`. À ce moment, on quitte la boucle. Les options acceptées sont données par `"i:n:c:h"`. Le `:` après l'option signifie que celle-ci prend au moins un paramètre. C'est uniquement utile pour récupérer directement le paramètre de la fonction dans la variable `optarg` de `getopt`. Avant d'appeler `getopt`, je met la variable `opterr` de `getopt` à 0, ce qui évite que `getopt` affiche des commentaires sur la sortie standard.

On peut donner comme option le nombre d'itérations:

```
./tp5 -i 256
```

On peut également donner comme option le nombre de threads actifs en section parallèle:

```
./tp5 -n 16
```

On peut donner comme option les coordonnées du `top left` (`tl`) et du `bottom right` (`br`) de la vue de notre fractal.

```
./tp5 -c -1 -1 1 1
```

Enfin, on peut afficher une aide:

```
./tp5 -h
```

```
Usage: ./tp5 -i [iterations] -n [number of threads] -c [tl_x tl_y br_x br_y]
```

Si on donne aucun paramètre, le nombre d'itérations par défaut est 100, et la vue par défaut de notre fractal est `tl(-2, -2)` et `br(2, 2)`. Le nombre par défaut de thread est donné par notre machine.

On peut combiner les paramètres entre eux... Voici le résultat de cette exécution:

```
./tp5 -i 250 -n 16 -c -1 -1 1 1
```

```
Execution time: 0.871114
Number of threads: 16
Number of iterations: 250
```

Dans le `switch`, si l'option `n` est donnée, alors on met à jour le nombre de threads qui seront actifs en section parallèle. Pour ce faire, on utilise la primitive `omp_set_num_threads(nthreads)`, et on lui donne en paramètre un nombre qui sera le nombre de threads actifs en section parallèle.

Le coeur de mon code se passe dans ces lignes:

```
// Define scale
double x_scale = (br[0] - tl[0]) / 1000.;
```

```
double y_scale = (br[1] - tl[1]) / 1000.;

// Calculate our fractal. Collapse is used to merge the two for loop.
#pragma omp parallel
{
    nthreads = omp_get_num_threads();

    #pragma omp for collapse(2)
    for (int y = 0; y < 1000; y++) {
        for (int x = 0; x < 1000; x++) {
            complex<double> c(x * x_scale + tl[0], y * y_scale + tl[1]);
            complex<double> z(0, 0);
            int n = 0;
            while (abs(z) < 2. && n < iterations) {
                z = (z * z) + c;
                n++;
            }
            pFractal[y * 1000 + x] = (double) n / (double) iterations;
        }
    }
}
```

J'ai réutilisé le code donné dans l'énoncé. Cependant, à la place de `fractal_tl.x` etc, j'ai créé un vecteur `tl` et `br` qui possèdent les coordonnées `x` et `y`. Ainsi, on a:

`fractal_tl.x == tl[0] && fractal_tl.y == tl[1] && fractal_br.x == br[0] && fractal_br.y == br[1]`

Puis j'ai parallélisé le code donné dans l'énoncé. Je commence par utiliser la primitive `#pragma omp parallel` indiquant que le code s'exécutant entre `{` et `}` va s'exécuter avec le nombre de threads donné par la primitive `omp_set_num_threads(nthreads)`, ou alors avec un nombre de threads défini par la machine si la primitive `omp_set_num_threads(nthreads)` n'a pas été appelée.

Ensuite, j'ai appelé la primitive `omp_get_num_threads()` afin de savoir combien de threads sont actifs dans la région parallèle. (Cette primitive retourne uniquement le nombre de threads actifs, donc si on l'utilise en dehors d'une région parallèle, elle retournera 1 car seulement 1 thread sera actif)

Puis j'ai exécuté les boucles for en parallèle grâce à la primitive `#pragma omp for collapse(2)`. Au fait, il s'agit ici de 2 primitives utilisées: La primitive `collapse(2)` ajouté à la primitive `#pragma omp for` permet de prendre les 2 boucles for, et le les rassembler dans une grosse boucle for. Ensuite, la primitive `#pragma omp for` divise cette grosse boucle for entre tous les threads actifs, qui auront donc chacun un bout de la boucle for à exécuter.

Ensuite, chaque thread stocke son résultat dans le vecteur `pFractal` qui est

partagé entre tous les threads. Notons que nous n'avons pas de problème d'accès concurrent à la mémoire car chaque thread va écrire à un endroit différent dans le vecteur `pFractal`, utilisé pour stocker le résultat. Notons également que je divise `n` par le nombre d'itérations maximal `iterations`, car cela me permet d'avoir un nombre compris entre 0 et 1, ce qui est nécessaire plus tard pour créer l'image `.bmp`

Enfin, lorsqu'on est sorti de la section parallèle délimitée par les `{}`, il n'y a de nouveau qu'un seul thread d'actif qui continue à exécuter la suite du code.

On écrit alors le résultat dans un fichier `.bmp` afin de pouvoir visualiser notre fractal obtenue.

```
write_to_bmp(1000, pFractal, iterations, 0, 1);
```

La fonction prend en paramètre la taille du vecteur 2D, un vecteur 1D qui sera interprété comme un vecteur 2D, le nombre d'itérations qui sera utiliser pour nommer le fichier, le minimum que je défini à 0 et le maximum que je défini à 1 car, comme je l'ai expliqué précédement, toutes les valeurs de `pFractal` sont comprises entre 0 et 1.

Notez ici que j'ai légèrement modifié la fonction `write_to_bmp` car je lui ai passé en paramètre un vecteur 1D et non pas un vecteur 2D, comme la fonction était écrite pour le travail pratique 3. Pour cela, j'ai simplement changé la signature de la fonction et également une ligne de la fonction. Il s'agit de cette ligne :

```
double value = ((data[iY][iX] - minval) / (maxval - minval));
```

qui a été remplacée par cette ligne:

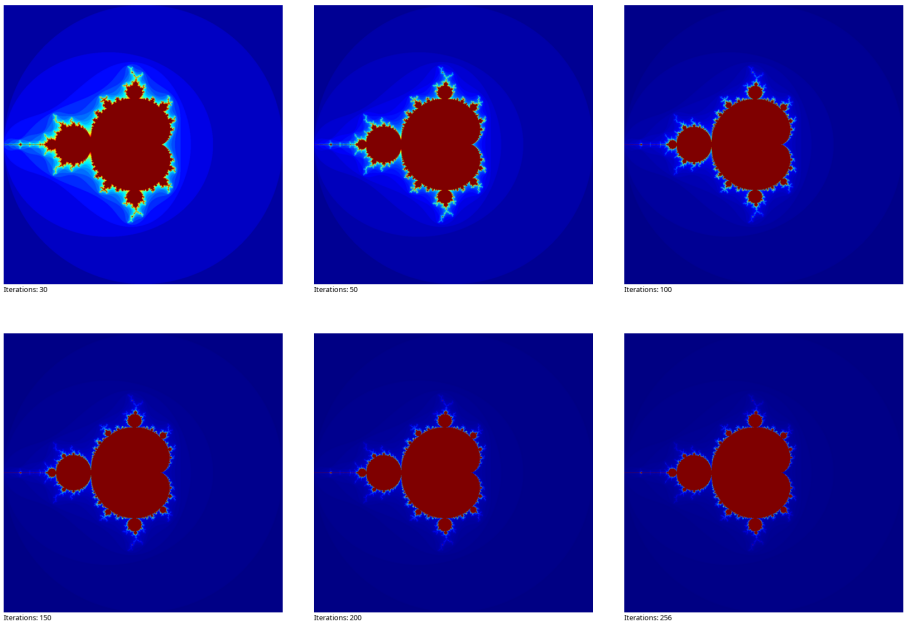
```
double value = ((data[iY * N + iX] - minval) / (maxval - minval));
```

afin d'accéder aux éléments de `data` comme si c'était un vecteur 2D alors que c'est un vecteur 1D.

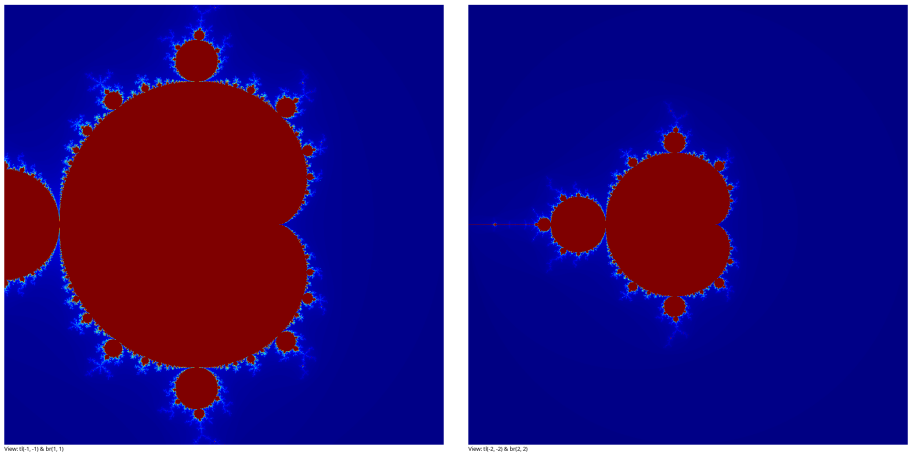
Enfin, à la fin du code, on affiche les différents résultats, comme le temps d'exécution du programme (donné en secondes), le nombre de threads et le nombre d'itérations utilisé.

3 Résultats (Include execution time graphs for different thread configurations)

J'ai exécuté mon programme en variant la région où on calcule notre fractal (en changeant les coordonnées de `top left` et de `bottom right`), en variant le nombre d'itérations et en variant le nombre de threads utilisés pour effectuer le calcul. Voici les résultats que j'ai pu obtenir en variant le nombre d'itérations:



Et voici le résultat obtenu en variant la région:



4 Discussion (Explain any observed scaling behavior and performance differences)

5 Conclusion