

# Rapport de projet

## Implémentation de méthodes heuristiques pour le partitionnement de graphes

Paul-Emile Boutilie

Claire Pennarun

Tatiana Rocher

Bordeaux 1

Graphes et Recherche Opérationnelle

8 janvier 2013

# Table des matières

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Présentation du programme</b>                    | <b>3</b>  |
| 1.1      | But . . . . .                                       | 3         |
| 1.2      | Mode d'emploi du programme . . . . .                | 3         |
| <b>2</b> | <b>Choix généraux</b>                               | <b>5</b>  |
| 2.1      | Choix des algorithmes implémentés . . . . .         | 5         |
| 2.2      | Langage de programmation . . . . .                  | 5         |
| 2.3      | Structures de données . . . . .                     | 5         |
| 2.4      | Voisinages implémentés . . . . .                    | 5         |
| 2.5      | Solution initiale . . . . .                         | 6         |
| 2.6      | Evaluation . . . . .                                | 6         |
| 2.7      | Lanceur . . . . .                                   | 6         |
| 2.8      | Tests . . . . .                                     | 7         |
| <b>3</b> | <b>Algorithme exhaustif - Enumération explicite</b> | <b>8</b>  |
| 3.1      | Description . . . . .                               | 8         |
| 3.2      | Paramètres . . . . .                                | 8         |
| 3.3      | Tests effectués . . . . .                           | 8         |
| 3.3.1    | Graphe à 5 sommets . . . . .                        | 8         |
| 3.3.2    | Graphe à 10 sommets . . . . .                       | 8         |
| 3.3.3    | Graphe à 15 sommets . . . . .                       | 8         |
| 3.4      | Résultats . . . . .                                 | 9         |
| <b>4</b> | <b>Descente de gradient</b>                         | <b>10</b> |
| 4.1      | Description . . . . .                               | 10        |
| 4.2      | Paramètres . . . . .                                | 10        |
| 4.3      | Tests . . . . .                                     | 10        |
| 4.4      | Résultats . . . . .                                 | 10        |
| <b>5</b> | <b>Recuit simulé</b>                                | <b>11</b> |
| 5.1      | Description . . . . .                               | 11        |
| 5.2      | Paramètres . . . . .                                | 11        |
| 5.3      | Choix d'implémentation . . . . .                    | 11        |
| 5.4      | Tests effectués . . . . .                           | 12        |
| 5.5      | Résultats . . . . .                                 | 13        |
| <b>6</b> | <b>Algorithme Tabou</b>                             | <b>14</b> |
| 6.1      | Description . . . . .                               | 14        |
| 6.2      | Paramètres . . . . .                                | 14        |
| 6.3      | Tests effectués . . . . .                           | 14        |
| 6.4      | Résultats . . . . .                                 | 15        |

|          |                              |           |
|----------|------------------------------|-----------|
| <b>7</b> | <b>Méthode de travail</b>    | <b>17</b> |
| 7.1      | Utilisation de git . . . . . | 17        |
| <b>8</b> | <b>Conclusion</b>            | <b>17</b> |

# 1 Présentation du programme

## 1.1 But

Le but de notre projet est d'implémenter plusieurs algorithmes d'heuristiques pour la résolution du problème de partitionnement d'un graphe. Il faudra séparer en un nombre donné de classes de sommets en coupant en minimum d'arêtes et en ayant au maximum des classes de tailles équivalentes.

Ce programme permet ainsi de faire des tests de rapidité et de comparer la vitesse des algorithmes en fonction du nombre de sommets du graphe et du nombre de classes.

## 1.2 Mode d'emploi du programme

Le programme doit être utilisé sur des fichiers de la forme suivante :

```
# nbSommets nbAretes
4 4
# dmin dmax
1 3
# source but valeur
1 2 1
1 3 1
2 3 1
3 4 1
# sommet degre
1 2
2 2
3 3
4 1
```

La dernière partie du fichier (qui donne les degrés de chaque sommet) n'est pas nécessaire car elle n'est pas utilisée par notre programme.

Notre programme se lance avec les arguments suivants :

*<fichier> <algorithme> <nbClasse> <nbLancements> <option1> <option2>*

Les deux derniers arguments ne sont nécessaires que dans certains cas, mais ne font pas planter le programme si ils sont présents.

- *<fichier>* : Le chemin du fichier sur lequel on veut travailler. Chaque fichier représentant un graphe.
- *<algorithme>* : L'algorithme que l'on veut utiliser : "ex" pour l'algorithme exhaustif, "grad" pour l'algorithme de descente de gradient, "recuit" pour l'algorithme du recuit simulé et "tabou" pour l'algorithme tabou.

- *<nbClasse>* : Le nombre de classes voulu pour le partitionnement.
- *<nbLancements>* : Le nombre de lancements l’algorithme choisi (avec les mêmes paramètres).
- *<option1>* : Représente le voisinage que l’on veut utiliser : “PnD” pour le voisinage Pick and Drop, “Swap” pour le voisinage swap. Cet argument n’est pas nécessaire pour lancer l’algorithme exhaustif mais obligatoire pour les autres.
- *<option2>* : Est lié à l’algorithme :
  - La température initiale pour l’algorithme du Recuit Simulé (un double)
  - La taille du tableau des mouvements tabou pour l’algorithme Tabou (int supérieur à 0).
  - Inutile pour les autres algorithmes

## 2 Choix généraux

### 2.1 Choix des algorithmes implémentés

Nous avons implémenté quatre algorithmes :

- Algorithme exhaustif
- Algorithme avec descente de gradient
- Algorithme de recuit simulé
- Algorithme Tabou

Les trois premiers algorithmes étaient obligatoires, et nous avons choisi comme quatrième algorithme l'algorithme Tabou, car la gestion d'un tableau de mouvements interdits nous paraissait intéressante. Les trois derniers algorithmes sont lancés plusieurs fois sur plusieurs solutions initiales. Nous détaillons plus loin cette fonctionnalité.

### 2.2 Langage de programmation

Nous avons choisi de programmer en Java, car c'est un langage que nous connaissons et qu'un langage objet nous paraissait pertinent pour gérer des objets comme des solutions ou des graphes. De plus, Java nous permet d'utiliser les fonctions liées à ses bibliothèques qui sont déjà optimisées. Nous savions donc que si un algorithme s'exécutait dans un temps supérieur à la normale, ce serait de la faute de l'algorithme et non des fonctions Java.

### 2.3 Structures de données

Pour stocker le graphe en mémoire, nous avons choisi d'utiliser une liste d'adjacence qui est remplie à la lecture du fichier par le programme. Cette liste est ensuite traitée par le programme pour créer un premier partitionnement (stocké dans l'objet GraphePartition), qui est la base de notre programme et sur lequel toutes les méthodes seront appliquées. Cet objet GraphePartition représente un graphe partitionné et contient notamment le numéro de classe attribué à chaque sommet, le nombre de classes prévues et l'évaluation de la solution courante.

### 2.4 Voisinages implémentés

Nous avons décidé d'implémenter deux voisinages, le Pick'n'Drop et le Swap. Ainsi l'utilisateur pourra choisir entre eux. Nous n'avons pas implémenté le voisinage par Sweep car il revient à effectuer plusieurs Swap d'affilée.

## 2.5 Solution initiale

Pour la solution initiale, chaque sommet du graphe est placé dans l'une des classes aléatoirement. Nous avons implémenté deux fonctions différentes suivant le voisinage utilisé : pour le voisinage Swap, on choisit un écart maximal pour le nombre de sommets par classe. Pour le voisinage Pick'n'Drop, la répartition des sommets dans les classes est totalement aléatoire.

## 2.6 Evaluation

La fonction d'évaluation se présente en deux étapes. Notre démarche a été de calculer une première évaluation simpliste (on ajoute 1 par arête interclasse) puis d'appliquer un malus correspondant au respect de l'égalité des classes.

Pour une première évaluation de  $x$ , si l'écart moyen des classes est de 13%, on ajoutera à  $x$  ces 13%. Ainsi :

1. Calcul de  $I1$  : La première évaluation est le nombre arêtes interclasses, cette étape ne sera effectuée qu'une seule fois. *Cette évaluation sera ensuite mise à jour pour chaque sommet déplacé pour économiser du temps.*
2. Calcul de  $I2$  : La deuxième évaluation est calculée en fonction de  $I1$  et de  $e$ , l'écart moyen du cardinal des classes (en pourcentage du nombre de sommets). On aura  $I2 = (100 + I1) * (1 + e * a)$ . Nous avons ajouté 100 pour minorer l'évaluation, et ne pas avoir  $I2 = I1$  quand  $I1 = 0$ . Le coefficient  $a$  sera réglé pour donner plus ou moins d'importance à l'égalité des classes (un  $a$  grand fera un grand malus). *Cette évaluation sera recalculée en fonction de  $I1$  à chaque fois que l'utilisateur la demandera.*

Exemple : Pour un graphe  $G$  de 1000 sommets ayant une solution avec trois classes de taille 320, 335, 345 et 712 arêtes interclasses (on suppose  $a = 1$ ) :

- $I1$  : Pour 712 arêtes interclasses, la première évaluation sera  $I1 = 712$
- $I2$  :
  - Ecart moyen :  $E = ((345-335)+(345-320)+(335-320))/3 = 13.33$ .
  - Ecart moyen en pourcentage :  $e = E / nbSommet = 13.33/1000 = 0.013$  (1.3%)
  - Calcul final :  $I2 = (100 + I1) * (1+e) = (100 + 712) * 1.013 = 822.556$

## 2.7 Lanceur

Ce module sert à lancer en boucle un algorithme, en utilisant le multi-threading. Quand il est instancié, il aura comme paramètres :

- Le graphe initial (sur lequel travailler)
- Le type de voisinage (PnD ou swap)
- Le nombre de classes désirées

NB : On peut noter que ces paramètres sont les mêmes que ceux pour instancier un algorithme, le lanceur en aura besoin puisque qu'il créera des algorithmes en boucle.

Ensuite, on utilisera la fonction `run()` du lanceur pour démarrer les test. Cette dernière à plusieurs arguments :

- Un string représentant le nom de l'algorithme à tester
- Le nombre de lancements à effectuer
- L'argument optionnel de l'algorithme. *NB : Cet argument est optionnel pour `run()`, et il sera ignoré s'il doit lancer la descente de gradient (qui n'a pas besoin d'argument)*

Il lance alors `n` fois algorithme en parallèle, et indiquera à la fin :

- Chacun des algorithmes lancé avec :
  - Leur solution initiale, et leur évaluation
  - Leur temps d'exécution.
  - Leur solution finale, et leur évaluation
- La meilleur solution trouvée (et son évaluation)
- L'évaluation moyenne
- Le temps total d'exécution
- Le temps moyen d'exécution d'un algorithme.

NB : Les temps relatifs à chacun des algorithmes (et par conséquents le temps moyen) sont altérés. En effet, le multi-threading rend le calcul du temps faux (entre le début de l'algorithme et sa fin, d'autre processus on eu la main). Pour un meilleur temps moyen approximatif, nous avons divisé le temps total par le nombre d'algorithme lancés.

## 2.8 Tests

Nous avons choisis de tester (principalement) le PnD et de comparer avec quelques résultats du swap. Nous avons fait varier les nombres de sommets, les nombres de classes et effectué une annalyse critique des résultats. Nos tests ont été effectués sur les machines du Cremi, ce sont des machines 4 coeurs.



## 3 Algorithme exhaustif - Enumération explicite

### 3.1 Description

Cet algorithme va examiner toutes les solutions possibles. Nous avons choisi d'effectuer un parcours en profondeur. Nous avons considéré le tableau des sommets, avec pour valeur un entier représentant leur classes.

Nous l'avons ensuite initialisée à 0, et "compté" en base n (n étant le nombre de classe). Exemple pour 2 classes et 4 sommets :

[0, 0, 0, 0]  
[1, 0, 0, 0]  
[0, 1, 0, 0]  
[1, 1, 0, 0]  
(...)

De cette manière nous sommes sûr de tout tester, nous pouvons cependant remarquer que nous testons des solutions équivalentes :  $[0, 0, 1, 1] \Leftrightarrow [1, 1, 0, 0]$ .

### 3.2 Paramètres

Il n'est donc pas nécessaire de choisir un voisinage. La solution initiale est une solution avec tous les sommets dans la première classe (0).

### 3.3 Tests effectués

#### 3.3.1 Graphe à 5 sommets

|               |    |    |     |
|---------------|----|----|-----|
| nb de classes | 2  | 3  | 4   |
| temps (ms)    | 17 | 28 | 101 |

#### 3.3.2 Graphe à 10 sommets

|               |       |   |    |    |
|---------------|-------|---|----|----|
| nb de classes | 2     | 3 | 4  | 5  |
| temps (s)     | 0.113 | 1 | 10 | 75 |

#### 3.3.3 Graphe à 15 sommets

|               |       |    |
|---------------|-------|----|
| nb de classes | 2     | 3  |
| temps (s)     | 0.152 | 60 |

Graphe à 20 sommets / 2 classes : 17s

Graphe à 22 sommets / 2 classes : 46s

### 3.4 Résultats

C'est un algorithme qui devient très rapidement long, mais qui donne toujours la meilleure solution pour les petits graphes.

Il est utilisable quelque soit le nombre de classes jusqu'à 10 sommets et pour 2 classes jusqu'à 22 sommets.

## 4 Descente de gradient

### 4.1 Description

Cet algorithme part d'une solution initiale aléatoire et tourne tant qu'une solution meilleure a été trouvée dans son voisinage. On cherche à chaque tour de boucle la meilleure solution voisine. Si celle-ci est meilleure que la solution courante, elle devient solution courante. Sinon, l'algorithme s'arrête.

### 4.2 Paramètres

Cet algorithme dépend du type de voisinage de la solution.

### 4.3 Tests

| nb de classes | nb de Sommets | nb de lancers | tps moyen | tps total | eval min | ecart moyen |
|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|----------|-------------|
| 2             | 20            | 20            | 150 ms    | 3 s 17 ms | 140      | 7.5         |
| 2             | 50            | 50            | ms        | s ms      |          |             |
| 2             | 100           | 100           | ms        | s ms      |          |             |
| 2             | 500           | 500           | ms        | s ms      |          |             |
| 2             | 1000          | 1000          | ms        | s ms      |          |             |
| 5             | 20            | 20            | ms        | s ms      |          |             |
| 5             | 50            | 50            | ms        | s ms      |          |             |
| 5             | 100           | 100           | ms        | s ms      |          |             |
| 5             | 500           | 500           | ms        | s ms      |          |             |
| 5             | 1000          | 1000          | ms        | s ms      |          |             |

### 4.4 Résultats

Nous avons testé l'algorithme de gradient avec beaucoup plus de lancements que les deux algorithmes suivants (recuit simulé et tabou), car il était beaucoup plus rapide. En effet, il ne cherche pas à sortir des minima.

## 5 Recuit simulé

### 5.1 Description

Cet algorithme est basé sur la physique. On utilise la température comme paramètre. Pour chaque baisse de température, on cherche une solution courante optimale. A la température minimale, la solution trouvée doit être optimale.

### 5.2 Paramètres

Cet algorithme dépend du voisinage. De plus, nous laissons à l'utilisateur le choix de la température initiale, c'est un double qui doit être supérieure à la température minimale.

### 5.3 Choix d'implémentation

**Taille du problème** Dans cet algorithme nous utilisons  $N$ , la taille du problème. Nous avons décidé de prendre le nombre d'arêtes comme taille. Le nombre d'arêtes majore le nombre de sommets car nous sommes sur des graphes simples. Donc le nombre d'arêtes est plus représentatif des problèmes appliqués aux graphes simples.

**Solution initiale** Comme pour les autres algorithmes, la solution initiale est aléatoire.

**Température initiale** Elle est donnée au choix à l'utilisateur. Celle-ci est un double qui doit être supérieure à la température minimale,  $0.1^\circ$ . Sachant que la baisse de température est assez rapide (voir suite) la température doit être assez conséquente, supérieure à  $20^\circ$  pour que l'algorithme tourne suffisamment longtemps.

**Choix condition 1** Afin de sortir de la boucle, l'algorithme doit répondre à l'une des deux conditions suivantes :

- soit on a atteint la température minimale, fixée à  $0.1^\circ$
- soit la température a changé 5 fois et la solution courante n'a pas changé.

Nous pensons que ces deux conditions sont importantes car cela permet d'arrêter plus rapidement l'algorithme, et donc d'optimiser les temps d'exécution. Si l'utilisateur choisit une température extrêmement élevée par rapport au problème, la condition sur  $k$  permet tout de même une réponse rapide.

**Choix condition 2** Afin de sortir de cette deuxième boucle, l'algorithme doit répondre à l'une des trois conditions suivantes :

- soit on a fait  $N*N$  tours de boucle
- soit on a tiré  $10*N$  solutions dont l'évaluation est plus grande que la solution courante

- soit on a accepté  $10 \cdot N$  solutions dont l'évaluation est plus grande que la solution courante

Ces trois conditions nous paraissaient nécessaires dans le cas des grands graphes. Dans les petits graphes la boucle s'arrête quasi-systématiquement après accomplissement de la première condition, dans le cas des grands graphes, l'une des deux conditions est prévalente, ce qui est du à la croissance moins rapide de la borne maximale.

**Choix de la solution voisine** La solution voisine doit être aléatoire. On effectue simplement un mouvement du voisinage en cours.

**Choix de la fonction g** La fonction g est la fonction de chute de la température. Celle-ci est simple : on multiplie la température actuelle par la raison r. Au début de l'algorithme, r est choisie au hasard entre 0.7 et 0.9 pour que l'algorithme de Métropolis puisse accepter suffisamment de solutions supérieures pour pouvoir sortir d'un minimum local.

## 5.4 Tests effectués

Voici quelques tests effectués. Afin de les comparer nous utilisons un test témoin, le premier puis nous faisons varier un paramètre à la fois.

Température initiale : 20°C

Voisinage : PnD

Nombre de classes : 2

| sommets | lancers | tps moyen  | tps total  | ecart moyen | eval min |
|---------|---------|------------|------------|-------------|----------|
| 20      | 20      | 150 ms     | 3 s 100 ms | 2           | 140      |
| 50      | 50      | 130 ms     | 6 s 300 ms | 6.26        | 315      |
| 100     | 75      | 423 ms     | 32 s       | 10          | 1025     |
| 500     | 100     | 2 min 40 s | 3 min 30 s | 54          | 3635     |

### Changement du voisinage

Température initiale : 20°C

Voisinage : Swap

Nombre de classes : 2

| sommets | lancers | tps moyen  | tps total   | ecart moyen | eval min |
|---------|---------|------------|-------------|-------------|----------|
| 20      | 20      | 37 ms      | 750 ms      | 35          | 140      |
| 50      | 50      | 210 ms     | 10 s 500 ms | 75          | 301      |
| 100     | 75      | 1 s 150 ms | 1 min 26 s  | 144         | 1003     |
| 500     | 100     | 3 s 800 ms | 6 min 25 s  | 290         | 3482     |

### Changement de la température

Température initiale : 40°C

Voisinage : PnD

Nombre de classes : 2

| sommets | lancers | tps moyen | tps total  | ecart moyen | eval min |
|---------|---------|-----------|------------|-------------|----------|
| 20      | 20      | 153 ms    | 3 s 100 ms | 1           | 140      |
| 50      | 50      | 138 ms    | 7 s        | 7           | 315      |
| 100     | 75      | 465 ms    | 35 s       | 8           | 1028     |
| 500     | 100     | ms        | s ms       |             |          |

### Changement du nombre de classes

Température initiale : 20°C

Nombre de sommets : 50

Voisinage : PnD

| nb classes | tps moyen | tps total   | ecart moyen | eval min |
|------------|-----------|-------------|-------------|----------|
| 5          | 187 ms    | 9 s 400 ms  | 5           | 479      |
| 10         | 250 ms    | 12 s 600 ms | 5           | 537      |
| 20         | 360 ms    | 18 s 200 ms | 6           | 562      |
| 30         | 300 ms    | 15 s 300 ms | 33          | 536      |

Température initiale : 20°

Nombre de sommets : 100

Voisinage : PnD

| nb classes | tps moyen  | tps total   | ecart moyen | eval min |
|------------|------------|-------------|-------------|----------|
| 5          | 245 ms     | 18 s 400 ms | 15          | 1655     |
| 10         | 332 ms     | 25 s        | 11          | 1874     |
| 35         | 1 s 250 ms | 1 min 35 s  | 6           | 2039     |
| 50         | 3 s        | 3 min 20 s  | 16          | 203      |
| 75         | 6 s 700 ms | 8 min 21 s  | 17          | 2025     |

(Ce dernier test a été effectué sur un autre ordinateur, c'est pour cela que les vitesses sont plus petites que les témoins)

## 5.5 Résultats

## 6 Algorithme Tabou

### 6.1 Description

Cet algorithme est une heuristique qui utilise un tableau de mouvements interdits (ou tabous) pour pouvoir sortir des minima locaux. On stocke les mouvements interdits plutôt que les solutions interdites par souci d'économie de la mémoire.

### 6.2 Paramètres

Le tableau de mouvements interdits (ou tableau tabou) est un tableau d'objets de type Mouvement. Sa taille est fixée par l'utilisateur à l'appel de l'algorithme.

Un mouvement est un objet qui contient plusieurs champs : deux champs représentant des sommets, un champ représentant une classe et un champ représentant le timestamp associé à ce mouvement. Cette représentation permet de gérer des mouvements de type Pick'n'Drop (en instanciant seulement un des deux sommets et le numéro de la classe) et des mouvements de type swap (en instanciant les champs correspondant aux deux sommets à échanger). Le timestamp de chaque mouvement, qui correspond à la durée de présence du mouvement dans le tableau des mouvements tabous, est incrémenté à chaque tour de boucle et le mouvement est retiré du tableau quand son timestamp atteint la valeur de la taille du tableau.

### 6.3 Tests effectués

Pour effectuer les tests, nous avons pris comme témoin un tableau tabou de taille 5 et un partitionnement en deux classes.

Taille du tableau Tabou : 5

Voisinage : PnD

Nombre de classes : 2

| sommets | lancers | tps moyen          | tps total         | ecart moyen | eval min |
|---------|---------|--------------------|-------------------|-------------|----------|
| 20      | 20      | 31 ms              | 75 ms             | 1.2         | 140      |
| 50      | 50      | 49 ms              | 283 ms            | 7.74        | 291      |
| 100     | 75      | 3 s 27 ms          | 4 s 401 ms        | 16.49       | 935      |
| 500     | 100     | 10 min 55 s 624 ms | 11 min 6 s 733 ms | 39.78       | 2952     |

Changement de la taille du tableau Tabou :

Taille du tableau Tabou : 8

Voisinage : PnD

Nombre de classes : 2

| sommets | lancers | tps moyen         | tps total          | ecart moyen | eval min |
|---------|---------|-------------------|--------------------|-------------|----------|
| 20      | 20      | 73 ms             | 131 ms             | 1.05        | 140      |
| 50      | 50      | 89 ms             | 365 ms             | 8.6         | 291      |
| 100     | 75      | 4 s 89 ms         | 4 s 856 ms         | 13.84       | 937      |
| 500     | 100     | 11 min 4 s 350 ms | 11 min 15 s 518 ms | 73.11       | 2923     |

Changement du nombre de classes :

Taille du tableau Tabou : 5

Voisinage : PnD

Nombre de classes : 5

| sommets | lancers | tps moyen   | tps total   | ecart moyen | eval min |
|---------|---------|-------------|-------------|-------------|----------|
| 20      | 20      | 105 ms      | 180 ms      | 2.1         | 172      |
| 50      | 50      | 907 ms      | 1 s 262 ms  | 10.5        | 443      |
| 100     | 75      | 22 s 524 ms | 24 s 351 ms | 24.84       | 1519     |
| 500     | 100     |             |             |             |          |

Changement du voisinage utilisé :

Taille du tableau Tabou : 5

Voisinage : Swap

Nombre de classes : 5

| sommets | lancers | tps moyen         | tps total        | ecart moyen | eval min |
|---------|---------|-------------------|------------------|-------------|----------|
| 20      | 20      | 46 ms             | 172 ms           | 12          | 206      |
| 50      | 50      | 8 s 401 ms        | 9 s 591 ms       | 82.92       | 336      |
| 100     | 75      | 6 min 58 s 772 ms | 7 min 8 s 746 ms | 196.68      | 1092     |
| 500     | 100     |                   |                  |             |          |

## 6.4 Résultats

En augmentant la taille du tableau Tabou, le temps de calcul augmente mais le pourcentage d'augmentation tend vers zéro avec l'augmentation de la taille du problème :

- 20 sommets / 20 lancers : 108 % d'augmentation
- 50 sommets / 50 lancers : 81 % d'augmentation
- 100 sommets / 75 lancers : 35 % d'augmentation
- 500 sommets / 100 lancers : 1,3 % d'augmentation

En augmentant le nombre de classes, le temps de calcul moyen augmente fortement :

- 20 sommets / 20 lancers : 238 % d'augmentation
- 50 sommets / 50 lancers : 1751 % d'augmentation
- 100 sommets / 75 lancers : 644 % d'augmentation



Ceci est normal, puisque la taille du voisinage augmente aussi considérablement.

En changeant de voisinage (Swap au lieu de Pick'n'Drop), les temps de calcul moyens augmentent également, car la taille du voisinage est plus importante.

## **7 Méthode de travail**

### **7.1 Utilisation de git**

Pour travailler sur ce projet, nous avons utilisé le logiciel de gestion de versions Git et sa plateforme d'hébergement web GitHub. Nous avons travaillé en mettant en place des branches de travail, qui étaient ensuite intégrées au code principal. Nous avons également utilisé le système des “issues” de GitHub, qui nous ont permis de lister les tâches à effectuer et donc d’avoir un suivi global du projet.

## **8 Conclusion**