



ORDONNANCEMENT DES OPÉRATIONS DANS UNE UNITÉ D'EXTRUSION

Mémoire

DHIAEDDINE ZAATOUR

Maitrise en sciences de l'administration (opérations et systèmes de décision)

Maitre ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Dhiaeddine ZAATOUR, 2016

ORDONNANCEMENT DES OPÉRATIONS DANS UNE UNITÉ D'EXTRUSION

Mémoire

Dhiaeddine Zaatour

Sous la direction de :

Fayez Fouad Boctor, directeur de recherche
Jacques Renaud, codirecteur de recherche

Résumé

Les travaux de ce mémoire traitent du problème d'ordonnancement et d'optimisation de la production dans un environnement de plusieurs machines en présence de contraintes sur les ressources matérielles dans une usine d'extrusion plastique. La minimisation de la somme pondérée des retards est le critère économique autour duquel s'articule cette étude car il représente un critère très important pour le respect des délais. Dans ce mémoire, nous proposons une approche exacte via une formulation mathématique capable de donner des solutions optimales et une approche heuristique qui repose sur deux méthodes de construction de solution sérielle et parallèle et un ensemble de méthodes de recherche dans le voisinage (recuit-simulé, recherche avec tabous, GRASP et algorithme génétique) avec cinq variantes de voisinages.

Pour être en totale conformité avec la réalité de l'industrie du plastique, nous avons pris en considération certaines caractéristiques très fréquentes telles que les temps de changement d'outils sur les machines lorsqu'un ordre de fabrication succède à un autre sur une machine donnée. La disponibilité des extrudeuses et des matrices d'extrusion représente le goulot d'étranglement dans ce problème d'ordonnancement. Des séries d'expérimentations basées sur des problèmes tests ont été effectuées pour évaluer la qualité de la solution obtenue avec les différents algorithmes proposés. L'analyse des résultats a démontré que les méthodes de construction de solution ne sont pas suffisantes pour assurer de bons résultats et que les méthodes de recherche dans le voisinage donnent des solutions de très bonne qualité. Le choix du voisinage est important pour raffiner la qualité de la solution obtenue.

Mots-clés : ordonnancement, optimisation, extrusion, formulation mathématique, heuristique, recuit-simulé, recherche avec tabous, GRASP, algorithme génétique

Abstract

The thesis deals with the optimization of the production on a number of machines subject to limited availability of the resources in an extrusion facility. Because of its importance to meet deadlines, the objective is to minimize the sum of weighted tardiness. This work presents a linear formulation of the problem and a number of heuristic solution methods. The proposed heuristic solution methods can be divided into two main groups: construction methods and neighborhood search methods. Also solution construction methods are divided in two sub-groups: parallel construction heuristics and serial construction heuristics. Adaptations of the simulated annealing algorithm (SA), the genetic algorithm (GA), the Tabu search (TS) method and the Greedy randomized adaptive search procedure (GRASP) are developed. Five neighborhood structures are used within the four tested neighborhood search algorithms. In our problem, setup times are sequence dependent. Also, extruders and dies are the bottleneck piece of equipment in this industrial setting.

Several problem instances were generated for the evaluation of heuristic scheduling algorithms. The experimental study shows that the construction heuristics are not sufficient to ensure good results, however the proposed neighborhood search methods perform very well. Also, the structure of neighborhoods plays an important role to guarantee better results.

Keywords: scheduling, optimization, extrusion, mathematical formulation, heuristic, simulated-annealing, tabu-search, GRASP, genetic algorithm

TABLES DES MATIERES

Résumé	iii
Abstract.....	iv
TABLES DES MATIERES	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
REMERCIEMENT.....	xi
Chapitre I.....	1
INTRODUCTION	1
1.1. Contexte industriel.....	2
1.2. Objectifs de la recherche.....	5
1.3. Organisation du mémoire.....	5
Chapitre II.....	7
LE PROCESSUS DE PRODUCTION PAR EXTRUSION	7
2.1. Le processus de production par extrusion.....	8
2.2. Nature des produits	9
2.3. Les types d'extrudeuses	11
2.4. Co-extrusion.....	12
2.5. Équipement de l'usine	12
2.6. Le temps de réglage et d'installation de la ligne d'extrusion	13
Chapitre III	14
DEFINITION DU PROBLEME ET FORMULATION MATHEMATIQUE.....	14
3.1. Définition du problème.....	15
3.2. La programmation mathématique	16
3.3. Notation	16
3.4. Formulation mathématique	17
3.5. Limites de la formulation mathématique proposée.....	19
Chapitre IV	20
REVUE DE LA LITTÉRATURE	20
4.1. Evaluation d'un problème d'ordonnancement.....	21
4.2. Méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement.....	22
4.2.1. Méthodes exactes.....	22
4.2.2. Heuristiques	23
4.3. Revue des principales contributions aux problèmes liés au problème étudié.....	25

4.4. Conclusion	28
Chapitre V	30
LES MÉTHODES HEURISTIQUES PROPOSÉES	30
5.1. Méthodes de construction de solution	31
5.1.1. L'heuristique parallèle	31
5.1.2. L'heuristique sérielle	32
5.2. Méthodes de recherche dans le voisinage	33
5.2.1. Codage des solutions	33
5.2.2. Définition des voisinages	34
5.2.3. Adaptation de la méthode du recuit-simulé	34
5.2.4. Adaptation de la méthode de recherche avec tabous	37
5.2.5. Adaptation de la méthode de recherche adaptative et gloutonne	39
5.2.6. Adaptation de l'algorithme génétique	41
Chapitre VI	44
EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS	44
6.1. Matériel de développement utilisé	45
6.2. Instances de test	46
6.3. Solutions optimales	47
6.4. Résultats des méthodes de construction de solution	48
6.5. Analyse des résultats des méthodes de construction de solution	49
6.6. Résultats des méthodes de recherche dans le voisinage	52
6.7. Analyse des résultats des méthodes de recherche dans le voisinage	53
6.8. Conclusion de l'analyse empirique des résultats des heuristiques proposées	66
Chapitre VII	68
CONCLUSION	68
BIBLIOGRAPHIE	71
ANNEXE 1 : Solutions optimales et temps de calcul par GUROBI 6.0.5	74
ANNEXE 2 : Résultats des méthodes de construction	76
ANNEXE 3 : Résultats des méthodes de recherche dans le voisinage en termes de valeurs de la fonction objectif	78
ANNEXE 4 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode $r1$	80
ANNEXE 5 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode $r2$	83

ANNEXE 6 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode <i>r3</i>	86
ANNEXE 7 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode <i>r4</i>	89
ANNEXE 8 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode <i>r5</i>	92
ANNEXE 9 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode <i>t1</i>	95
ANNEXE 10 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode <i>t2</i>	98
ANNEXE 11 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode <i>t3</i>	101
ANNEXE 12 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode <i>t4</i>	104
ANNEXE 13 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode <i>t5</i>	107
ANNEXE 14 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode <i>AG</i>	110
ANNEXE 15 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode <i>GRASP</i>	113
ANNEXE 16 : Résultats des méthodes de recherche dans le voisinage en termes de déviation par rapport à l'optimum	116
ANNEXE 17 : Temps de résolution du code pour les différentes méthodes de recherche dans le voisinage	119
ANNEXE 18 : Résultats du test de comparaison des moyennes pour les méthodes de recherche dans le voisinage	122
ANNEXE 19 : Résultats du test de Mann-Whitney pour les méthodes de recherche dans le voisinage	124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Domaines d'application du procédé d'extrusion.....	10
Tableau 5.1 : Définition des mouvements tabous pour les cinq voisinages testés	37
Tableau 6.1 : Temps de résolution du modèle mathématique par GUROBI 6.0.5.....	47
Tableau 6.2 : Résultats obtenus par les méthodes de construction.....	49
Tableau 6.3 : Résultats du test de comparaison des moyennes pour les méthodes de construction de solution	51
Tableau 6.4 : Résultats du test de Mann-Whitney pour les méthodes de construction de solution.....	52
Tableau 6.5 : Temps de calcul des méthodes de recherche dans le voisinage avec une limite de 2000 solutions visitées avant l'arrêt de la recherche dans le voisinage	55
Tableau 6.6 : Déviations par rapport à l'optimum obtenues par les méthodes de recherche dans le voisinage avec une limite de 2000 solutions visitées avant l'arrêt de la recherche dans le voisinage.....	55
Tableau 6.7 : Temps de calcul des méthodes de recherche dans le voisinage avec une limite de 5000 solutions visitées avant l'arrêt de la recherche dans le voisinage	56
Tableau 6.8 : Déviation par rapport à l'optimum obtenues par les méthodes de recherche dans le voisinage avec une limite de 5000 solutions visitées avant l'arrêt de la recherche dans le voisinage.....	56
Tableau 6.9 : Comparaison des méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère des moyennes des déviations.....	60
Tableau 6.10 : Comparaison des méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère de dominance empirique	63
Tableau 6.11 : Comparaison des méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère de dominance stochastique empirique du premier degré.....	65

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Marché de l'utilisation finale de l'industrie du plastique	2
Figure 1.2: Distribution régionale des établissements (en pourcentage du nombre total)	3
Figure 2.1 : Schéma d'une extrudeuse	9
Figure 5.1 : l'adaptation proposée de l'algorithme de du recuit-simulé	36
Figure 5.2 : l'adaptation proposée de la méthode de de recherche avec tabous	38
Figure 5.3 : l'adaptation proposée de l'algorithme GRASP	40
Figure 5.4 : Exemple de croisement à la position 2 avec la méthode des indices aléatoires	42
Figure 5.5 : l'adaptation proposée de l'algorithme génétique.....	43
Figure 6.1: Graphe des relations entre les méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère des moyennes des déviations	59
Figure 6.2 : Exemple d'application du test de dominance empirique	61
Figure 6.3 : Graphe des relations de préférence entre les méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère de dominance empirique	62
Figure 6.4 : Exemple d'application du test de dominance stochastique empirique du premier degré.....	64
Figure 6.5 : Graphe des relations de préférence entre les méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère de dominance stochastique empirique du premier degré ...	65

A ma famille

A mon amour

A tous mes anciens professeurs

REMERCIEMENT

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche Pr. Fayez Boctor, sans qui ce mémoire n'aurait pas eu lieu. J'ai eu la chance de le côtoyer dans le monde de la recherche, et ai toujours trouvé en lui une personne professionnellement, scientifiquement et humainement très riche et très enrichissante. Ses conseils avisés et sa confiance sans bornes ont permis à ce travail de commencer, progresser et aboutir.

Je remercie aussi chaleureusement mon codirecteur de recherche Pr. Jacques Renaud pour son apport à cette recherche et pour m'avoir fait profiter de son expérience, ses connaissances et de son expertise.

Je tiens à remercier les membres du jury, Pr. Daoud Ait-Kadi et Pr. André Gascon, qui me font l'honneur d'examiner mon travail. Je profite de l'occasion pour leur adresser mes sincères respects.

Ce mémoire a été aussi l'occasion de collaboration avec les membres du CIRRELT. J'espère que les relations que j'ai tissées avec eux s'approfondiront, et que la collaboration ne s'arrêtera pas après la maîtrise. L'équipe du CIRRELT m'a aimablement accueilli dans de très bonnes conditions. Je remercie tous ses membres pour leur amabilité et leur disponibilité.

Ce travail est dédié à ma famille, mon grand amour Jihène, et à mes anciens professeurs. J'espère qu'il est digne de ce qu'ils se sont efforcés de me transmettre.

Chapitre I

INTRODUCTION

1.1. Contexte industriel

L'industrie canadienne du plastique est détenue principalement par des PME dont la majorité est de propriété canadienne.

En 2012, le Canada comptait 2434 entreprises actives dans l'industrie plastique. 77400 employés travaillent dans ce secteur qui a engendré 7,4 milliards de dollars d'exportation et 8,5 milliards de dollars d'importation. L'industrie du plastique est partagée également par des entreprises dont la vocation n'est pas a fortiori la transformation du plastique mais qui sont plutôt actives dans d'autres domaines où la transformation du plastique est une activité secondaire (ex : pots en plastique fabriqués sur place dans une usine de yaourt).

Les échanges commerciaux se font principalement avec les États-Unis que ce soit en termes d'importation ou de ventes. Comme le démontre la Figure 1.1, l'emballage et la construction constituent les deux piliers des marchés de l'industrie du plastique.

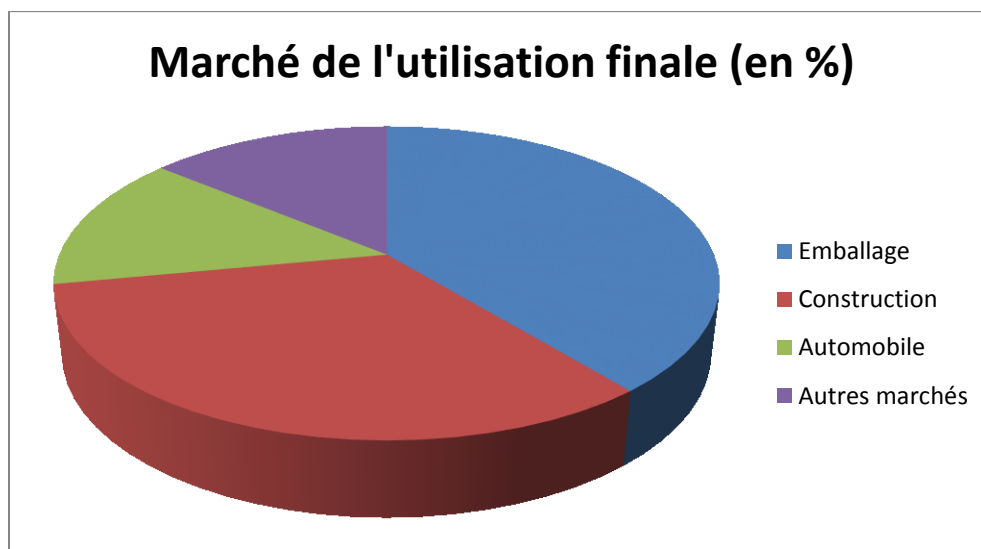


Figure 1.1: Marché de l'utilisation finale de l'industrie du plastique

Cette industrie reste tout de même concentrée en Ontario qui abrite 46,6 % des établissements tandis que 25 % des établissements sont au Québec comme le démontre la Figure 1.2.

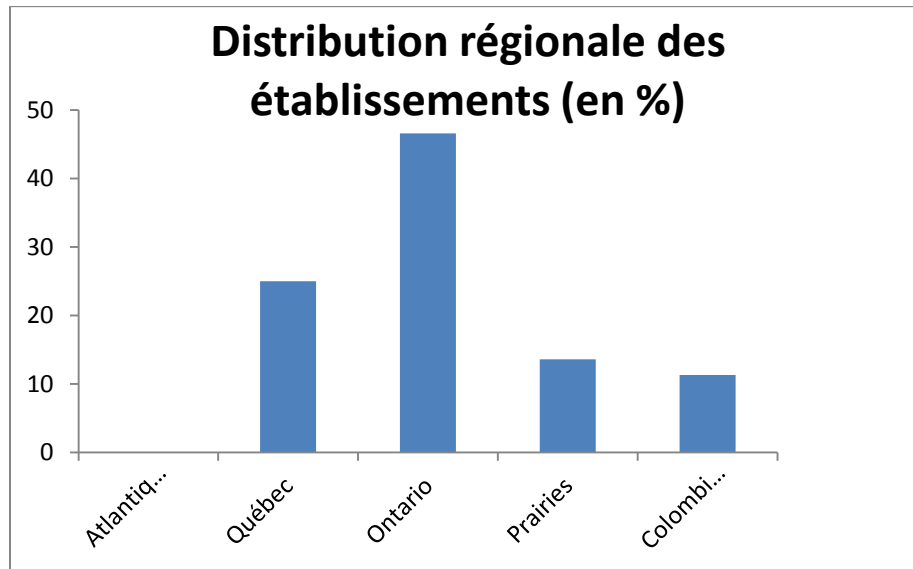


Figure 1.2: Distribution régionale des établissements (en pourcentage du nombre total)

En ce qui concerne la province du Québec, l'industrie du plastique est marquée par un ralentissement du marché américain. En effet, depuis la crise économique de 2009 aux États-Unis, les exportations des plastiques du Québec vers les États-Unis ont nettement diminué.

Il est à noter aussi que la présence du marché asiatique ne cesse d'augmenter. Depuis 2002, les importations de la Chine et de l'Inde vers le Québec ont augmenté. En effet, beaucoup d'entreprises asiatiques viennent prendre des parts de marchés aux entreprises québécoises qui rencontrent des problèmes à rester compétitives à cause du coût élevé de la main-d'œuvre. Voir <https://www.ic.gc.ca/eic/site/plastics-plastiques.nsf/fra/pl01383.html> pour plus de détails.

Le Québec souffre d'un problème de diminution de la balance commerciale car il y a de plus en plus d'importations de plastique alors que les exportations connaissent une baisse. Malgré cette baisse de la balance commerciale, cette dernière se maintient dans le positif. En plus, les fluctuations des prix des matières premières exercent une forte influence sur le secteur. Lorsqu'il y a une hausse des prix des matières premières, les usines de transformation du plastique ne peuvent pas toujours faire absorber immédiatement les hausses par leurs clients, ce qui a des effets néfastes sur les marges bénéficiaires.

Plusieurs géants de l'industrie du plastique tendent à délocaliser leurs usines vers des marchés où la main-d'œuvre est moins chère et où il y a moins d'exigence sur la protection de l'environnement.

Comparée aux différentes composantes du secteur manufacturier, l'industrie du plastique mobilise peu de fonds dans la recherche et le développement. Très peu de PME ont collectivement rassemblé des fonds pour investir dans l'amélioration des procédés, l'utilisation de la technologie et le rehaussement de la productivité. En absence d'initiatives collectives des PME, le Conseil National de Recherche du Canada (CNRC) reste l'agent principal pour la recherche et le développement. Au Québec, le Centre de Recherche Industrielle du Québec (CRIQ) est le cadre qui assure la mise en relation de chercheurs universitaires ainsi que des acteurs industriels ayant des besoins scientifiques et techniques.

Outre ce constat, l'industrie du plastique souffre d'une pénurie d'ingénieurs des procédés, de réparateurs de moules ainsi que de personnel d'entretien. Le manque de compétence chez les opérateurs de machines est assez répandu chez un grand nombre de PME. Ceci s'explique par le fait que peu d'entreprises s'engagent dans la formation professionnelle. Le roulement des ouvriers est très élevé.

L'amélioration de la productivité doit être inscrite dans le cœur des préoccupations stratégiques de l'industrie du plastique qui doit relever les défis de la compétitivité qui dépasse largement les frontières canadiennes.

1.2. Objectifs de la recherche

Les travaux de ce mémoire sont consacrés à l'ordonnancement de la production dans un environnement de machines multiples et en présence de contraintes sur les ressources matérielles dans une usine d'extrusion plastique. La minimisation de la somme pondérée des retards est le critère économique autour duquel s'articule cette étude car il représente un critère très important pour le respect des délais. Pour être en totale conformité avec la réalité de l'industrie du plastique, nous avons pris en considération certaines caractéristiques très fréquentes telles que les temps de changement d'outils sur les machines lorsqu'un ordre de fabrication succède à un autre sur une machine donnée. Il s'agit donc de développer des méthodes approchées qui aboutissent à des solutions aussi proches que possible de l'optimum qui sera obtenu via une formulation mathématique. Ce travail fait suite au travail par Boctor et Renaud (2015).

1.3. Organisation du mémoire

Le reste du présent mémoire est organisé comme suit. Dans le chapitre II nous allons exposer comment se déroule un processus de production par extrusion. Ce chapitre comportera la définition de la transformation du plastique par extrusion, les produits que l'on peut obtenir via cette méthode, quelles types d'extrudeuses peut-on avoir dans un atelier de production par extrusion et quels sont les différents réglages à effectuer pour le lancement ou le changement d'un produit. Le chapitre III sera consacré à la définition du problème où nous allons exposer la problématique. Nous allons également expliquer en détails notre modèle mathématique et décrire ses limites. Le chapitre IV comprendra une synthèse des travaux les plus pertinents qui touchent de près ou de loin notre problématique. Le chapitre V sera dédié aux méthodes heuristiques que nous avons développées dans le cadre de cette étude. Ce chapitre comportera deux volets, le premier décrira les méthodes de construction de solution, et le deuxième décrira les méthodes de recherche dans le voisinage avec les variantes de recherche tabou, du recuit-simulé, de l'algorithme génétique et de GRASP pour lesquelles nous avons optées dans cette étude. Le chapitre VI sera consacré à l'évaluation des heuristiques proposées où nous développerons

la méthodologie adoptée, la génération des instances de test, les résultats obtenus et leur analyse. Enfin, un dernier chapitre VII conclut en offrant un aperçu général des résultats obtenus ainsi que des recommandations et perspectives pour des travaux futurs.

Chapitre II

LE PROCESSUS DE PRODUCTION PAR EXTRUSION

2.1. Le processus de production par extrusion

Les procédés de fabrication des produits en plastique sont assez variés et dépendent généralement de la nature des polymères et de l'utilisation des produits finis. Plusieurs techniques sont suivies pour la fabrication des pièces et des objets en polymère. Les plus répandues dans l'industrie du plastique sont l'injection, l'injection-soufflage, le calandrage, le roto moulage, le thermoformage et l'extrusion.

L'extrusion est une technique de transformation en continu (voir la Figure 2.1). La matière plastique sous forme de granulés est versée dans un tube chauffé muni d'une vis sans fin. Homogénéisé par malaxation, la matière molle est poussée comprimée et contrainte de passer à travers une filière pour sortir sous la forme désirée. Via cette technique, on obtient des profilés de grande longueur (tube, tuyau, ...). Elle permet aussi d'obtenir des formes complexes.

Une extrudeuse comprend une chambre chauffée, généralement horizontale, appelée fourreau dans lequel tournent une ou plusieurs vis entraînées par un réducteur motorisé. Ces vis tournent dans une chemise en acier durci avec un jeu inférieur à quelques dixièmes de millimètres, provoquent un mélange, une chaleur de friction et une homogénéisation. Ces vis forcent la matière à travers des zones de chauffage graduelles, soigneusement contrôlées.

A l'entrée du fourreau, est située une trémie qui permet l'alimentation de la machine en matière à extruder. Cette matière peut être amenée réchauffée ou non, soit sous forme de granulés, soit sous forme de poudre, préparés à l'avance. A la sortie du fourreau se trouve une tête qui permet le raccordement de la filière.

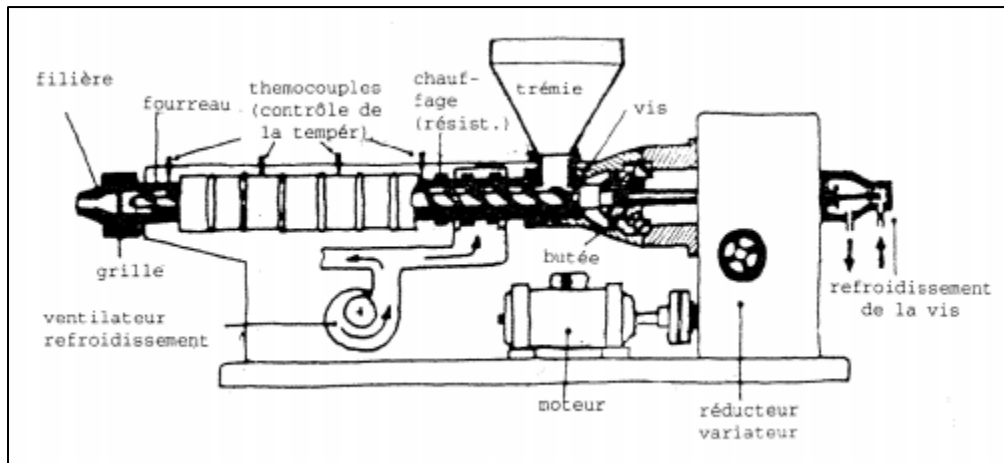


Figure 2.1 : Schéma d'une extrudeuse

A la sortie de la filière le profilé obtenu est chaud et déformable. Il doit être refroidi pendant sa mise en forme définitive, opérations pour lesquelles des systèmes différents sont utilisés. Le profilé est souvent calibré lors de son refroidissement pour assurer le respect des formes imposées. Le profilé refroidi est entraîné au moyen d'un dispositif de tirage réglable, puis stocké en rouleaux ou en longueur après le sectionnement.

Différentes technologies s'appliquent à l'extrusion telles que l'extrusion-gainage qui s'applique pour le revêtement des câbles et fils, l'extrusion-formage très utilisée dans la fabrication de pièces de grandes dimensions (bateaux, éléments de carrosserie, valises, ...), l'extrusion-gonflage qui consiste à dilater avec de l'air comprimé à la sortie de l'extrudeuse une gaine polymère précédemment formée, une technique qui permet de fabriquer des films en plastique. Il y a aussi l'extrusion-calandrage, une autre variante de l'extrusion qui sert à fabriquer des feuilles et des plaques.

2.2. Nature des produits

Le procédé de transformation par extrusion permet la fabrication d'une large gamme de produits tels que les profilés plastiques pour différentes applications dans les domaines comme l'automobile, le bâtiment, le paramédical, le bricolage, les sports et loisirs, l'emballage, etc. Il permet également la fabrication de tubes plastiques en polystyrène, polyéthylène, polychlorure de vinyle, et de joncs qui sont caractérisés par leur structure

totalelement pleine. Les diamètres des produits extrudés et leur matériau peuvent varier selon l'exigence des secteurs comme le médical, l'alimentaire, la pharmacie, l'électronique et bien d'autres. Le Tableau 2.1 résume les principaux domaines d'application du procédé d'extrusion.

Automobile	Bâtiment	Stockage dynamique	Paramédical
<ul style="list-style-type: none"> - Profilés d'habillage - Profilés bi-composant textile - Tubes de transport des fluides - Profilés de renfort sécuritaires - Profilés plastiques divers 	<ul style="list-style-type: none"> - Joncs de façade - Profilés d'étanchéité - Tubes de transport des fluides - Tubes plongeurs - Produits de signalisation - Profilés et tubes d'habillage 	<ul style="list-style-type: none"> - Rails de guidage - Profilés et tubes de structure - Profilés et tubes de protection - Profilés et tubes d'habillage - Seuils d'étanchéité 	<ul style="list-style-type: none"> - Profilés de maintien et renfort - Tubes d'application médicale - Tubes d'enroulement - Profilés et tubes d'habillage

Publicité	Emballage	Sport et loisirs	Aéronautique
<ul style="list-style-type: none"> - Porte étiquette - Pince affiche - Tubes fendus de présentation - Kit de présentation - Profilés d'habillage 	<ul style="list-style-type: none"> - Tubes d'emballage alimentaire - Tubes d'emballage de pièces électroniques - Consommables divers - Tubes d'habillage divers 	<ul style="list-style-type: none"> - Piscines - Jouets - Produits de collectivité 	<ul style="list-style-type: none"> - Gaines d'étanchéité - Co-extrusion bi-composant - Renforts de faisceaux - Profilés et tubes d'habillage

Tableau 2.1 : Domaines d'application du procédé d'extrusion

2.3. Les types d'extrudeuses

On distingue plusieurs types d'extrudeuses. Les extrudeuses peuvent différer selon qu'elles possèdent une ou deux vis. Une extrudeuse mono-vis est caractérisée par le diamètre et la longueur de la vis. Cette longueur est exprimée en multiples du diamètre. Habituellement, les longueurs de vis se situent entre 15 et 30 fois son diamètre. Les vis des mono-vis sont interchangeables en fonction de la nature et des caractéristiques des matières thermoplastiques.

Les extrudeuses double-vis sont particulièrement bien adaptées à la transformation de matières thermoplastiques pulvérulentes. La double vis à filet interpénétrant agit alors comme une pompe à vis. Les double-vis sont d'un usage de plus en plus répandu, en particulier pour la transformation du PVC rigide.

A capacité équivalente, la puissance-moteur est moins importante sur les double-vis que sur les mono-vis du fait que les frictions internes sur la matière sont moins élevées. Par contre, l'apport thermique du chauffage est supérieur pour assurer une même gélification.

Il existe également des extrudeuses dites spéciales comme les extrudeuses verticales et les extrudeuses à étages. Beaucoup de procédés d'extrusion classiques obligent le flux de matières à changer de direction entre la vis et la filière. Par exemple, pour la fabrication des films tubulaires, la sortie de filière est souvent à 90° par rapport à l'axe de la vis. Ces extrudeuses ont l'avantage d'occuper moins de place que les extrudeuses classiques.

Quant aux extrudeuses à étages, elles présentent deux organes d'extrusion, reliés l'un à l'autre par une chambre de transfert, et comportent des vis dont les vitesses peuvent être réglées de façon indépendante.

2.4. Co-extrusion

La co-extrusion consiste à assembler deux matières plastiques ou polymères par accroche chimique. Deux extrudeuses sont nécessaires pour ce type de procédé permettant par exemple de réaliser des pièces en matière rigide et souple ou de 2 couleurs différentes par l'intermédiaire d'une filière adaptée avec deux canaux d'alimentation matière. Ce procédé spécifique a le plus souvent pour principal objectif de créer une double fonctionnalité par rapport à des contraintes de cahier des charges. Le profilé sera ensuite calibré et refroidi selon le principe classique d'extrusion.

2.5. Équipement de l'usine

L'usine que nous considérons dans cette étude est équipée de plusieurs extrudeuses. Elle dispose de 4 extrudeuses de diamètre 3,5 pouces, deux de diamètre 2,5 pouces, deux de diamètre 1,75 pouces et trois de diamètre 1,5 pouces. La plupart des ordres de fabrication à traiter ne requièrent qu'une seule extrudeuse. Cependant, certains requièrent une opération de co-extrusion, donc font appel à deux extrudeuses. L'usine utilise 16 types de matériaux en 60 couleurs. Chaque ordre nécessite une matrice spécifique qui doit être montée sur l'extrudeuse. L'usine possède 20 matrices dont 10 qui ne peuvent être montées que sur les co-extrudeuses quand un ordre requiert une opération de co-extrusion.

Chaque ordre peut être traité par l'un ou l'autre d'un ensemble d'extrudeuses mais pas sur toutes les extrudeuses. Chaque extrudeuse de cet ensemble permet de traiter l'ordre à une vitesse donnée. Dans le cas où un ordre requiert une co-extrudeuse, c'est-à-dire, deux extrudeuses pour un seul ordre, c'est l'extrudeuse principale qui détermine le temps de traitement. Aussi, si un ordre peut être traité sur une extrudeuse ayant un diamètre donné, cela n'implique pas nécessairement qu'une autre machine ayant le même diamètre peut le traiter. De même, les extrudeuses qui sont de même diamètre n'ont pas nécessairement la même vitesse de traitement. On peut également avoir deux machines de différents diamètres mais avec une même vitesse de traitement pour un ordre donné.

2.6. Le temps de réglage et d'installation de la ligne d'extrusion

Le temps de réglage est le temps requis pour qu'un opérateur fasse les opérations de réglage sur la machine pour exécuter un ordre après avoir terminé d'en traiter un autre. Ce temps de réglage est symétrique, c'est-à-dire que le temps de réglage sur une machine donnée si l'ordre i succède à l'ordre j est le même que si l'ordre j succède à l'ordre i .

Le temps de réglage dépend de la nature des produits à fabriquer et de ce qu'ils requièrent pour être traités. Généralement, il est fonction de cinq paramètres principaux : la matrice à utiliser, la couleur de la matière première, la composition de la matière première, la forme du produit à la sortie de l'extrudeuse (forme droite ou embobinée) et de la nécessité ou non d'une seconde opération tel que l'impression de certaines informations sur le produit final.

Le changement de matrice nécessite 45 minutes. Le changement de la matière nécessite un nettoyage de la machine et il prend 120 minutes. Le changement de couleur dans le cas où l'on utilise la même matière requiert 30 minutes, mais si on change de matière, le temps de changement de couleur n'est pas pris en compte. La modification de la forme du produit dure 15 minutes. Quant à l'installation d'une perceuse ou une imprimante au bout de l'extrudeuse en cas de seconde opération, elle nécessite 15 minutes. Il est à noter que le temps requis pour régler une extrudeuse pour traiter le premier ordre est estimé à 60 minutes.

Les réglages ne sont effectués que par un seul opérateur. Ainsi, le temps total de réglage requis pour passer d'un ordre à un autre est la somme de tous les temps de réglages nécessaires. Dans le cas où un ordre de fabrication requiert une co-extrudeuse, le même opérateur effectue le réglage sur la deuxième machine qui consiste uniquement à un changement de matrice si nécessaire.

Chapitre III

DEFINITION DU PROBLEME ET FORMULATION MATHEMATIQUE

3.1. Définition du problème

Le problème que nous nous proposons de formuler consiste à céduer l'exécution d'un certain nombre d'ordres de fabrication sous contraintes de disponibilité des extrudeuses et des matrices. Chaque ordre peut être assigné à un sous-ensemble d'extrudeuses. Un ordre présente une date due, un poids qui définit son importance vis-à-vis du client et un temps de traitement qui dépend de la vitesse de l'extrudeuse à laquelle il serait assigné. Rappelons que chaque extrudeuse a besoin d'un temps de réglage avant d'exécuter son premier ordre. En plus, la succession des ordres sur une extrudeuse donnée nécessite également un temps de réglage qui dépend de la séquence des ordres et qui peut aussi dépendre de si l'extrudeuse est une extrudeuse principale ou co-extrudeuse. Les caractéristiques des extrudeuses n'influent pas sur le temps de réglage. L'objectif de notre problème est de minimiser la somme pondérée des retards.

Notons que la disponibilité des extrudeuses et des matrices représente le goulot d'étranglement dans ce problème d'ordonnancement. Tous les autres équipements nécessaires au traitement des ordres tels que les bassins de refroidissement, les perceuses, et autres sont disponibles en quantités suffisantes. Par conséquent, seule la disponibilité des extrudeuses et des matrices est à prendre en compte dans la formulation mathématique.

Afin de modéliser ce problème, nous avons ajouté un ordre fictif pour tout ordre nécessitant une co-extrudeuse pour être traité. Cet ordre fictif doit être opéré en même temps que l'ordre réel. Ce dernier sera assigné à l'une des extrudeuses principales qui peuvent le traiter. Quant à l'ordre fictif, il sera assigné à l'une des co-extrudeuses pouvant traiter l'ordre réel.

Le temps de réglage requis avant de traiter l'ordre réel est la somme de tous les temps requis pour les opérations de changement de matrice, de couleur, de forme, etc., auxquels nous ajoutons éventuellement le temps nécessaire à la mise en place de la matrice sur la co-extrudeuse.

3.2. La programmation mathématique

La programmation mathématique englobe un ensemble de techniques d'optimisation sous contraintes qui permet de déterminer dans quelles conditions on peut maximiser ou minimiser une fonction objectif $Z(X_j)$ de n variables X_j liées par m relations ou contraintes de type $H_i(X_j) \leq 0$.

La plus classique des méthodes de programmation mathématique est la programmation linéaire. La résolution d'un problème d'optimisation avec la programmation linéaire comporte 3 phases essentielles.

- 1- La détection du problème et l'identification des variables. Ces variables doivent correspondre exactement aux préoccupations du responsable de la décision. En programmation mathématique, les variables sont des variables de décision.
- 2- La formulation de la fonction objectif qui traduit les exigences du décideur exprimées sous la forme d'une fonction des variables identifiées.
- 3- La formulation des contraintes. Il est bien rare qu'un responsable dispose de toute liberté d'action. Le plus souvent il existe des limites à ne pas dépasser qui revêtent la forme d'égalités ou d'inégalités mathématiques.

3.3. Notation

i ou j	Indice de l'ordre
I	L'ensemble des ordres originaux à céduer
I'	L'ensemble des ordres originaux qui requièrent une co-extrudeuse
J	L'ensemble des ordres fictifs
D	L'ensemble des matrices, indexées d
K	L'ensemble de toutes les extrudeuses, indexées k
K_i	L'ensemble des extrudeuses qui peuvent traiter l'ordre i
K_{ij}	L'ensemble des extrudeuses qui peuvent traiter les ordres i et j ; $K_{ij} = K_i \cap K_j$
N_d	L'ensemble des ordres (originaux et fictifs) qui requièrent la matrice d

I_k	L'ensemble des ordres (originaux et fictifs) que peuvent être traités par l'extrudeuse k
l_i	La date due de l'ordre i
w_i	Le poids associé au retard de l'ordre i
p_{ik}	Le temps de traitement de l'ordre i s'il est traité par l'extrudeuse k
j_i	L'ordre fictif associé à l'ordre i qui sera traité par une co-extrudeuse
s	Le temps requis pour changer une matrice
s_{ij}	Le temps de réglage requis pour passer de l'ordre i à l'ordre j s'ils sont assignés à la même extrudeuse
s_{0j}	Le temps de réglage requis avant de traiter l'ordre j s'il est le premier ordre cédulé sur son extrudeuse
u_k	Borne sur le nombre d'ordres qui peuvent être assignés à l'extrudeuse k ; $u_k \leq I_k $
M	Un nombre très grand

Les variables de décision suivantes sont aussi utilisées dans notre modèle.

x_{ikp}	Variable binaire qui prend la valeur de 1 si l'ordre i est assigné à l'extrudeuse k à la position p ; 0 sinon
y_{ij}	Variable binaire qui prend la valeur de 1 si l'ordre i est cédulé pour être fini avant le début de traitement de l'ordre j , 0 sinon
z_{ij}	Variable binaire qui prend la valeur de 1 si les ordres i et j sont assignés à la même extrudeuse et requièrent aussi la même matrice, 0 sinon. Elle prend aussi la valeur de 0 si $K_{ij} = \emptyset$
c_i	Date de fin de l'exécution de l'ordre i
r_i	Retard de l'ordre i

3.4. Formulation mathématique

Dans notre modèle mathématique, il s'agit de trouver :

$$x_{ikp} \in \{0,1\}; i \in I \cup J; k \in K_i; p=1, \dots, u_k$$

$$r_i \geq 0; i \in I$$

$$c_i \geq 0; i \in I \cup J$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}$$

$$z_{ij} \geq 0; i, j \in N_d, d \in D, j \neq i; \text{ qui}$$

$$\text{minimisent: } \sum_{i \in I} w_i r_i$$

Sous les contraintes:

- (1) $r_i \geq c_i - l_i$; $\forall i \in I$
- (2) $c_i \leq c_j - p_{jk} - s_{ij} + M(2 - x_{jpk} - x_{ik,p-1})$; $\forall i \in I \cup J, \forall k \in K_i, \forall j \in I_k, j \neq i$
- (3) $\sum_{k \in K_i} \sum_{p \leq u_k} x_{ikp} = 1$; $\forall i \in I \cup J$
- (4) $\sum_{i \in I_k} x_{ikp} \leq 1$; $\forall k \in K, p \leq u_k$
- (5) $\sum_{i \in I_k} x_{ikp} \leq \sum_{i \in I_k} x_{ikp-1}$; $\forall k \in K, 2 \leq p \leq u_k$
- (6) $c_i \geq (p_{ik} + s_{0i})x_{ik1}$; $\forall i \in I, k \in K_i$
- (7) $c_i = c_{j_i}$; $\forall i \in I'$
- (8) $z_{ij} \geq \left\{ \sum_{p \leq u_k} (x_{ikp} - x_{jpk}) \right\} - 1$; $\forall i, j \in N_d, i \neq j, d \in D,$
 $k \in K_{ij} \text{ if } K_{ij} \neq \emptyset$
- (9) $c_i \leq c_j - \sum_{k \in K_j} \sum_{p \leq u_k} p_{jk} x_{jpk} - s(1 - z_{ij}) + M(1 - y_{ij})$; $\forall i, j \in N_d, i \neq j, d \in D$
- (10) $y_{ij} + y_{ji} = 1$; $\forall i, j \in N_d, i \neq j, d \in D$

La fonction objectif à minimiser est la somme des retards pondérés des ordres de fabrication. Les contraintes (1) définissent la variable de retard r_i et les contraintes (2) garantissent que si l'ordre i est assigné à la position $p-1$ et l'ordre j est assigné à la position p sur l'extrudeuse k , alors i doit être complété avant que l'on commence à régler l'extrudeuse k pour traiter j . Les contraintes (3) assurent que chaque ordre ne sera assigné qu'à une et une seule position sur une et une seule machine. Les contraintes (4) impliquent que toute extrudeuse ne traitera qu'au plus un ordre à la fois. Les contraintes (5) assurent que si aucun ordre n'est assigné à la position $p-1$, alors aucun ordre ne peut être assigné à la position p sur la même machine. Les contraintes (6) assurent que si un ordre est assigné à la

première position d'une machine donnée, alors son temps de fin d'exécution doit être supérieur ou égal à son temps de traitement auquel on ajoute le temps de réglage requis. Les contraintes (7) assurent que l'ordre original qui est traité sur l'extrudeuse principale et l'ordre fictif auquel il est associé et qui requiert une co-extrudeuse sont traités en même temps. Les contraintes (8) donnent la valeur de 1 à z_{ij} si les ordres i et j sont assignés à la même extrudeuse et la valeur de 0 sinon. Les contraintes (9) garantissent que si les ordres i et j requièrent la même matrice, alors ils ne peuvent être exécutés en même temps. Quant aux contraintes (10), elles impliquent que si deux ordres i et j utilisent la même matrice, alors soit c'est le traitement de i qui précède le traitement de j soit c'est l'inverse.

3.5. Limites de la formulation mathématique proposée

Certes, la programmation linéaire en nombres entiers rend des services au décideur en générant des stratégies optimales pour un ensemble donné de paramètres. Elle est plus adaptée que toute autre méthode pour exploiter des problèmes avec de multiples contraintes en fournissant des solutions optimales pour un ensemble donné de conditions. Cependant, la résolution d'un modèle mathématique peut prendre beaucoup de temps sans la garantie d'atteindre l'optimalité quand le nombre de variables et de contraintes augmente. En effet, l'optimisation linéaire est essentiellement appliquée pour résoudre des problèmes d'optimisation à court et à moyen terme.

Dans notre étude, nous nous sommes limités à des problèmes tests de 15 ordres de fabrication qui peuvent être résolus dans un temps raisonnable et dont les résultats peuvent être exploités, car au-delà de cette valeur, le temps de résolution augmente d'une manière exponentielle et l'optimalité peut ne pas être atteinte.

Chapitre IV

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La littérature sur l'ordonnancement est très riche. Cependant, au meilleur de notre connaissance, aucune autre étude n'a été faite sur un problème d'ordonnancement dans une usine d'extrusion. Dans ce qui suit, nous allons faire un survol des recherches les plus pertinentes qui touchent de près ou de loin notre problématique.

Rappelons d'abord que le livre de Pinedo (2002) présente la plupart des problèmes classiques d'ordonnancement et leurs approches de résolution.

Le problème d'ordonnancement d'ordres de fabrication avec contraintes de ressources a été étudié pour la première fois dans les années 60 (voir par exemple Wiest 1963, Kelly 1963 et Pritsker et al. 1969). Ce problème consiste à organiser dans le temps la réalisation de tâches d'un projet dans le but de minimiser sa durée totale tout en respectant les contraintes de ressources et les contraintes de précédence.

Les problèmes d'ordonnancement avec des contraintes de ressources ont été abondamment étudiés dans la littérature. Ces problèmes sont NP-difficile au sens fort. Un grand nombre de méthodes ont également été proposées. Durant les dernières décennies, les chercheurs ont accordé beaucoup d'attention sur le traitement des conflits au niveau des ressources humaines. Aussi, le problème d'ordonnancement avec contraintes de ressources est devenu un problème classique en gestion de projets (Hartmann et Briskorn, 2010). Les méthodes proposées varient selon la fonction objectif (minimiser la durée totale des opérations, minimiser la somme des retards, minimiser le temps de séjour dans le système, ...).

Dans ce qui suit, nous allons faire un survol des méthodes les plus pertinentes dans la résolution des problèmes d'ordonnancement.

4.1. Evaluation d'un problème d'ordonnancement

Dans un problème d'ordonnancement, un ou plusieurs objectifs peuvent être pris en considération. Les objectifs que l'on peut associer à un problème d'ordonnancement sont nombreux et Mellor (1966) en dénombre 27 différents. Il s'agit de minimiser ou de

maximiser des objectifs qui peuvent être liés au temps, aux ressources ou à des coûts. Ces objectifs font intervenir, par exemple, la durée totale, le temps de présence des travaux dans le système de production (en-cours) et les retards. Ainsi, nous pouvons, par exemple, chercher à :

- minimiser le temps total d'exécution des tâches noté C_{\max} (*Makespan*) qui est égal au temps de fin de l'exécution de la dernière tâche.
- minimiser le temps moyen de complétion des tâches.
- minimiser le retard total (*Tardiness*) qui est égal à la somme des retards de toutes les tâches.
- minimiser le retard maximum des tâches noté T_{\max}
- minimiser le nombre de tâches en retard noté U .

4.2. Méthodes de résolution des problèmes d'ordonnement

4.2.1. Méthodes exactes

Ce sont Pritsker et al. (1969) qui ont modélisé pour la première fois un problème d'ordonnement avec des contraintes de ressources. Ce modèle a été résolu par une méthode de séparation et d'évaluation progressive (*branch and bound*). Cette méthode présente l'inconvénient majeur d'être difficilement utilisable pour résoudre des problèmes de grande taille. En effet, l'ajout de contraintes de ressource rend plus complexe le problème et la résolution optimale n'est plus possible qu'aux instances de quelques dizaines de tâches.

La programmation dynamique est aussi une des approches exactes. Il s'agit d'une méthodologie générale de conception d'algorithmes qui permettent de résoudre efficacement certains problèmes d'optimisation. Un problème d'optimisation admet un grand nombre de solutions. Chaque solution a une certaine valeur et on veut identifier une solution dont la valeur est optimale (minimale ou maximale). Il s'agit de mettre en place un processus de décision séquentiel où, à chaque étape, on prend une décision selon l'information disponible. Ce concept a été introduit en 1954 par Bellman. Cette

méthodologie s'applique avec succès lorsque le problème d'optimisation peut être décomposé en plusieurs sous-problèmes de même nature. La programmation dynamique permet aux sous-problèmes de se superposer. Ainsi, une solution optimale du problème global s'obtient à partir de solutions optimales des sous-problèmes.

Ainsi, les méthodes exactes sont principalement recommandées pour résoudre des problèmes de petite taille dans le but de tester la qualité des solutions obtenues à l'aide d'autres méthodes dites « heuristiques ». Plus récemment, des résultats intéressants ont été obtenus en utilisant des approches hybrides qui combinent la méthode de séparation et d'évaluation progressive et des heuristiques (Cheng et Wu, 2006).

Au niveau optimal, notons l'algorithme de Mokotoff (2004), basé sur la génération d'inégalités valides, qui a permis de résoudre des problèmes ayant jusqu'à 100 machines et 1 000 commandes.

4.2.2. Heuristiques

Pour remédier aux problèmes liés aux approches exactes, les chercheurs ont développé des méthodes heuristiques qui utilisent diverses règles de priorité pour générer des échéanciers réalisables dans un délai acceptable. Ce sont des algorithmes construits dans l'objectif de donner une bonne solution en un temps raisonnable mais sans pouvoir garantir l'optimalité. Différents schémas de génération d'échéanciers peuvent être utilisés. Les deux principaux schémas, sériel et parallèle, construisent la solution en planifiant l'exécution d'un seul ordre de fabrication à chaque itération. Pour le schéma sériel, l'ordre dans lequel les ordres de fabrication sont planifiés est déterminé d'avance, alors que le schéma parallèle choisit l'ordre de fabrication à planifier au fur et à mesure. Ce choix est fait donc de façon dynamique en fonction des choix passés.

Rappelons que les algorithmes du temps d'opération le plus long (LTP – Graham, 1969) et le *MultiFit* de Coffman *et al.* (1978) sont considérés comme des travaux fondamentaux.

Développée pour un problème de machines parallèles, l'heuristique *MultiFit* commence par trier les commandes à traiter par ordre décroissant de temps de traitement. Ensuite, elle assigne chaque tâche à la première machine capable de la traiter avant une date de fin cible choisie au préalable. Cette heuristique a pour objectif de minimiser le temps total des opérations.

Quant à l'algorithme LPT, il trie les quantités à produire selon un ordre décroissant de temps de production, puis il assigne chaque quantité à la première machine disponible. Ainsi cette méthode tente d'équilibrer les charges sur les différentes machines parallèles.

4.2.3. Méthodes itératives de recherche dans le voisinage (Méta-heuristiques)

Durant ces dernières décennies, les méta-heuristiques ont largement été appliquées comme techniques de résolution des problèmes NP-difficiles. De nombreux auteurs les suggèrent comme des approches appropriées et elles génèrent de bons résultats pour les problèmes d'ordonnement à machines multiples.

La méthode de recherche avec tabous et les algorithmes génétiques font partie des méta-heuristiques ayant suscité un grand intérêt dans la communauté scientifique pour résoudre les problèmes d'ordonnement. Le principe de l'algorithme génétique repose sur la simulation des mécanismes naturels de l'évolution des espèces en fonction de leur capacité à s'adapter au milieu dans lequel elles évoluent. Les individus les mieux adaptés ont plus de chance de survivre et donc de se reproduire. Quant à la méthode de recherche avec tabous, proposée par Glover en 1986, elle repose sur le principe de la recherche locale avec une partition du voisinage en voisinage admissible et voisinage tabou. L'originalité de cette méthode est la construction d'une liste de mouvements tabous déduits des solutions trouvées antérieurement et sur lesquelles on ne doit plus revenir avant un certain temps. Certains chercheurs ont prouvé que l'utilisation d'algorithmes génétiques hybrides sur des instances comprenant plus de 100 tâches donne de meilleurs résultats que les meilleures méthodes heuristiques connues pour les problèmes d'ordonnement avec contraintes de

ressources. Le développement de nouvelles méthodes de recherche dans le voisinage est en plein essor actuellement, comme l'optimisation par essaim particulaire (Zhang et al, 2005; Tang et Tang, 2008). Plus récemment, Chen et al. (2010) proposent la méthode ACOSS (*Ant Colony Optimization with Scatter Search*) qui combine une approche de colonies de fourmis et la méthode dite de recherche dispersée pour résoudre des problèmes d'ordonnancement avec contraintes de ressources comprenant jusqu'à 120 tâches.

4.3. Revue des principales contributions aux problèmes liés au problème étudié

L'ordonnancement de la production avec temps de réglage a été l'objet de plusieurs publications récemment. Allahverdi et al. (1999) présentent une revue de 194 articles traitant des problèmes d'ordonnancement avec temps de réglage ainsi qu'une autre revue en 2008 de plus de 300 articles. Ils présentent une revue de la littérature portant sur les problèmes dynamiques et stochastiques tels que les problèmes à machine unique, les problèmes à machines parallèles, les problèmes dits de « flow-shops » et de « job-shops ».

Glass et al. (1994) ont comparé un algorithme génétique résolvant un problème d'ordonnancement sur des machines parallèles non identiques sans temps de réglage minimisant le temps total de complétion avec les résultats d'une méthode de recherche avec tabous et d'un algorithme de recuit-simulé. Ils ont conclu que les solutions de l'algorithme génétiques sont médiocres. Par contre, les résultats d'une méthode hybride incorporant un algorithme génétique étaient aussi satisfaisants que ceux des deux autres méthodes.

Lee et Pinedo (1997) ont présenté une heuristique à trois phases qui minimise la somme des retards pondérés. Les auteurs ont mis en œuvre une méthode basée sur le recuit-simulé qui prend comme solution initiale une séquence obtenue par une règle dont les paramètres varient selon l'instance.

Bilge et al. (2004) ont considéré le problème d'ordonnancement sur des machines identiques avec un temps de réglage qui dépend de la séquence des ordres. L'objectif de ce travail était de minimiser la somme des retards. Dans cette étude, les ordres de fabrication étaient caractérisés par des dates dues et des dates de disponibilité. Etant donné que le problème est complexe, les auteurs ont développé une méthode de recherche avec tabous qui prend comme solution initiale une séquence d'ordres de fabrication triés par ordre croissant des dates dues. Ensuite, chaque ordre de fabrication sera affecté à la machine qui le termine le plus tôt possible. Pour la recherche dans le voisinage, les auteurs ont considéré uniquement les permutations de deux ordres de fabrication qui sont affectés à deux machines différentes. Les permutations qui impliquent deux ordres sur la même machine ne sont pas considérées. Ainsi, ce type de voisinage ne fait pas varier le nombre d'ordres sur chaque machine. Le choix des ordres à permuter se fait selon 3 stratégies. La première stratégie consiste à permuter deux ordres ayant été affectés l'un à la machine qui contribue le plus à la somme des retards et l'autre à la machine qui contribue le moins à la somme des retards. La deuxième stratégie consiste à permuter deux ordres dont l'un a été assigné à la machine qui contribue le plus à la somme des retards et l'autre a été assigné à n'importe quelle autre machine. Les auteurs se sont également intéressés à la taille de la liste de mouvements tabous. En effet, en la faisant varier dynamiquement au cours de l'algorithme, un équilibre s'établit entre la stratégie d'intensification et celle de diversification. Les méthodes de recherche avec tabous ont été testées sur des instances de la littérature. Les résultats ont été jugés très satisfaisants et meilleurs que ceux déjà établis dans la littérature.

Dastidar et Nagi (2005) ont travaillé sur un problème d'ordonnancement dans un atelier de moulage par injection. Le problème consistait à céduer un ensemble d'ordres sur des machines parallèles sous contraintes de capacité des ressources avec des temps de réglage qui dépendent de la séquence d'exécution des ordres. L'objectif est de minimiser la somme des retards et des coûts relatifs au stockage et aux réglages. Pour ce faire, les auteurs ont développé un modèle mathématique qui permet de résoudre les problèmes de petite taille dans un temps raisonnable. Pour les grandes instances, une méthode de décomposition en deux phases a été élaborée. L'idée consiste à décomposer le problème en sous-problèmes que l'on peut résoudre facilement. Les résultats expérimentaux donnent une déviation de

moins de 2 % par rapport à l'optimum. L'algorithme est ainsi applicable dans un contexte industriel réel où l'on cherche à avoir des solutions fiables en un temps raisonnable.

Logendran et al. (2007) ont développé 6 algorithmes basés sur la recherche avec tabous pour résoudre un problème d'ordonnancement sur des machines indépendantes impliquant des temps de réglage qui dépendent de la séquence d'exécution. Dans ces 6 méthodes, les auteurs ont varié la taille de la liste taboue statiquement et dynamiquement. Ils ont également développé 4 règles de séquençement servant à donner des solutions initiales pour les algorithmes de recherche tabou. Les auteurs recommandent une méthode de recherche avec tabous avec une liste de petite taille fixe pour les petites instances. Pour les grandes instances, ils recommandent des listes taboues de plus grande taille et qui varient dynamiquement. Quant aux règles de séquençement à utiliser pour obtenir une solution initiale, aucune recommandation n'a été faite.

Dans un contexte industriel, Rocha et al. (2008) ont traité un problème d'ordonnancement sur des machines indépendantes avec des temps de réglage qui dépendent de la machine et de la séquence des ordres avec comme objectif de minimiser la somme des retards pondérés et du temps de complétion total. Ils ont développé une méthode exacte basée sur le *branch and bound* avec comme borne supérieure des solutions obtenues par une procédure GRASP. Cette dernière consiste en une construction de solution suivie d'une amélioration par recherche locale. L'efficacité de cette méthode a été démontrée sur un ensemble d'instances comptant plus de 25 ordres.

Tavakkoli-Moghaddam et al. (2009) ont proposé une formulation mixte en nombres entiers pour un problème d'ordonnancement sur des machines indépendantes avec comme objectif de minimiser deux critères : le nombre d'ordres en retard et la date de fin de tous les ordres. Chaque ordre a une date de disponibilité et une date due. En plus, une relation de précedence est imposée comme contrainte selon laquelle un ordre ne peut être cédulé que si son prédécesseur est complété. Le modèle qui a été développé inclut également des temps de réglage dépendant de la séquence. Le problème que les auteurs ont défini est très difficile à résoudre en un temps raisonnable. L'étude a donc porté sur le développement d'un algorithme génétique qui permet de résoudre des problèmes de plus grande taille. La

performance de cet algorithme génétique a été vérifiée sur un ensemble d'instances de test. Les résultats démontrent une déviation de 12 % par rapport au nombre optimal d'ordres en retard et une déviation de 8 % par rapport au temps optimal de fin.

Ko et al. (2010) ont présenté une méthode qui garantit un niveau de qualité prédéterminé pour un problème d'ordonnancement d'ordres de plusieurs types sur des machines parallèles non identiques. L'objectif de ce travail est de minimiser les retards de livraison auprès des clients. Les règles de répartition des ordres de fabrication sur les machines ont été évaluées par des méthodes de simulation.

Unlu et Mason (2010) ont présenté quatre formulations mathématiques pour plusieurs variantes de problèmes d'ordonnancement sur des machines parallèles, identiques et indépendantes. Les auteurs ont testé leurs modèles pour différentes fonctions objectifs telles que la somme pondérée des retards et le temps total des opérations. La date de disponibilité des ordres a été prise en considération dans certains problèmes test. Les auteurs recommandent l'utilisation de l'un de leurs modèles pour la résolution du problème d'ordonnancement sur deux machines parallèles quand les temps de traitement des ordres de fabrication sont petits. Dans le cas où les temps de traitement des ordres sont grands et/ou les dates de disponibilité des ordres ne sont pas nulles, ils recommandent d'utiliser un second modèle.

4.4. Conclusion

La revue de la littérature présentée dans ce chapitre permet de conclure que :

- Le problème d'ordonnancement des opérations dans une unité d'extrusion est un problème NP-dur car il peut être vu comme une généralisation du problème d'ordonnancement des opérations sur des machines parallèles et identiques qui est un problème NP-dur. Par conséquent, il est difficile de trouver des solutions

optimales à des instances de grande taille de notre problème. Le recours à des méthodes heuristiques est donc nécessaire,

- Aucune méthode, optimale ou heuristique pour résoudre notre problème, ne se trouve dans la littérature. Nous devons donc nous inspirer des méthodes proposées pour résoudre d'autres problèmes d'ordonnement des opérations sur un ensemble de machines et pour développer des méthodes de résolution pour notre problème.
- La littérature montre que les heuristiques de recherche dans le voisinage, tels que l'algorithme du recuit-simulé, la méthode de recherche avec tabous, ou l'algorithme génétique, sont des méthodes relativement efficaces pour la résolution des problèmes d'ordonnement des opérations.

Dans ce mémoire, nous essayerons de résoudre optimalement les instances de petite taille en utilisant une formulation mathématique du problème. Ensuite, nous proposerons quatre méthodes de recherche dans le voisinage pour résoudre les problèmes de taille industrielle. La performance de ces méthodes sera par la suite analysée à l'aide d'un ensemble d'instances de test.

Chapitre V

LES MÉTHODES HEURISTIQUES PROPOSÉES

D'abord, il convient de mentionner que, dans les heuristiques que nous avons développées, les ordres de fabrication qui requièrent deux extrudeuses ne sont pas remplacés par une paire d'ordres, réel et fictif, comme nous l'avons proposé dans la formulation mathématique. Ces ordres, gardés tels quels, seront assignés aux extrudeuses primaire et secondaire simultanément.

Les méthodes heuristiques que nous allons exposer dans ce mémoire peuvent être divisées en deux catégories : la première catégorie regroupe les méthodes de construction de solution et la deuxième regroupe les méthodes de recherche dans le voisinage. Deux méthodes de construction sont proposées : l'heuristique parallèle et l'heuristique sérielle. Pour l'heuristique parallèle, nous utilisons un critère de décision (par exemple le temps de fin au plus tôt pour les ordres non cédulés) pour choisir et cédule le premier ordre, puis recalculer les valeurs de ce critère et choisir le deuxième ordre et ainsi de suite. Quant à l'heuristique sérielle, elle part d'une séquence initiale des ordres basée sur une règle de séquençement, puis elle cédule les ordres un par un dans cet ordre préétabli de façon à ce que l'ordre considéré finisse au plus tôt possible.

Les méthodes de recherche dans le voisinage que nous avons testées dans cette étude sont une adaptation de l'algorithme du recuit-simulé, de l'algorithme génétique, de la méthode de recherche avec tabous et de l'algorithme GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*).

5.1. Méthodes de construction de solution

Dans ce qui suit, nous allons décrire les méthodes de construction de solution parallèle et sérielle. Pour chacune de ces deux méthodes, nous allons présenter l'algorithme à suivre et ses étapes.

5.1.1. L'heuristique parallèle

Comme nous l'avons décrit précédemment, l'heuristique parallèle consiste à choisir et cédule les ordres un par un selon le temps de fin au plus tôt des ordres non cédulés. La valeur de ce critère est recalculée à chaque itération.

Les étapes de l'heuristique parallèle sont les suivantes :

- 1- Calculer la valeur du critère de décision, à savoir la date de fin au plus tôt, pour chaque ordre non cédulé en l'assignant à l'extrudeuse (et à la co-extrudeuse éventuellement) qui permet la plus proche date de fin. Dans le cas où deux extrudeuses ou plus permettent de compléter l'ordre à la même date, assigner l'ordre à l'extrudeuse la moins sollicitée soit celle qui présente le plus petit nombre d'ordres non cédulés qu'elle peut traiter.
- 2- Sélectionner l'ordre qui engendre le plus grand retard pondéré et le céduler comme décrit à l'étape 1.
- 3- Arrêter la boucle quand tous les ordres sont cédulés. Sinon, recalculer les valeurs du critère de décision pour chaque ordre non encore cédulé et revenir à l'étape 2.

Ainsi, la règle de décision utilisée pour sélectionner l'ordre à céduler à chaque itération est le retard pondéré maximal.

5.1.2. L'heuristique sérielle

L'heuristique sérielle se distingue de l'heuristique parallèle par le fait que la séquence des ordres à céduler est déterminée à l'avance.

Les étapes de cette heuristique sérielle sont les suivantes :

- 1- Trier tous les ordres de fabrication dans une séquence en se basant sur une règle de priorité.
- 2- Céduler les ordres de la séquence préétablie un par un en tenant compte de la disponibilité des extrudeuses et des matrices, de telle sorte que l'ordre soit complété le plus tôt possible, c'est-à-dire, assigner l'ordre à l'extrudeuse (et éventuellement à la co-extrudeuse) qui permet la plus proche date de fin. Dans le cas où deux extrudeuses ou plus permettent de compléter l'ordre à la même date, assigner l'ordre à l'extrudeuse la moins sollicitée soit celle qui présente le plus petit nombre d'ordres non cédulés qu'elle peut traiter.

Pour cette heuristique sérielle, nous proposons 4 règles de priorité bien qu'il puisse y en avoir d'autres. La première règle de séquençement, la règle de la date due au plus tôt (EDD – *Earliest Due Date*), trie les ordres selon leurs dates dues, de la plus proche à la plus lointaine. La deuxième règle de séquençement est la règle de la date due pondérée au plus tôt (EWDD – *Earliest Weighted Due Date*). Elle trie les ordres selon un ordre croissant de leurs ratios d_i/w_i où d_i est la date due de l'ordre et w_i est son poids. La troisième règle de séquençement est la règle de la date due réduite (ERDD – *Earliest Reduced Due Date*). Elle trie les ordres par ordre croissant selon leur ratio $(d_i - \max_k p_{i,k})$ où $\max_k p_{i,k}$ est le plus long temps de traitement de l'ordre i . Enfin, la dernière règle est la règle de la date due réduite et pondérée (EWRDD – *Earliest Weighted Reduced Due Date*). Elle trie les ordres selon leurs e_i par ordre croissant où $e_i = w_i(d_i - \max_k p_{i,k})$ si $d_i - \max_k p_{i,k} \leq 0$ et $e_i = (d_i - \max_k p_{i,k})/w_i$ sinon.

Ces quatre règles sont des règles de priorité qui permettent de donner une séquence initiale des ordres et de les céduer un par un de telle sorte que chaque ordre soit complété le plus tôt possible.

5.2. Méthodes de recherche dans le voisinage

Nous avons opté pour des adaptations de quatre méthodes de recherche dans le voisinage, à savoir : la méthode de recherche avec tabou, l'algorithme de recuit-simulé, l'algorithme génétique et la méthode de recherche adaptative et gloutonne (GRASP).

Dans ce qui suit, nous allons présenter les adaptations que nous proposons. Tout d'abord, nous allons décrire certains aspects communs à ces méthodes heuristiques comme le codage des solutions et les voisinages à examiner.

5.2.1. Codage des solutions

Dans toutes ces méthodes heuristiques, une solution est représentée sous la forme d'une séquence, c'est-à-dire une liste ordonnée qui regroupe tous les ordres de fabrication. Ces séquences peuvent être obtenues par des règles de séquençement à l'instar de celles utilisées par l'heuristique sérielle.

5.2.2. Définition des voisinages

On définit le voisinage $V(s_{(i)})$ d'une solution $s_{(i)}$ par une transformation élémentaire permettant de passer d'une solution $s_{(i)}$ à une autre solution $s_{(j)}$ avec une faible modification de la structure de la solution $s_{(i)}$. Cinq différents types de voisinage ont été testés avec les heuristiques de recherche dans le voisinage proposées.

Le premier voisinage (V1) consiste à permuter deux ordres de fabrication adjacents, il s'agit de choisir au hasard un ordre de fabrication et de le faire avancer d'une position. Le deuxième voisinage (V2) est défini par la génération au hasard de deux entiers p et q , avec p compris entre 1 et $n-8$ et q compris entre $p+1$ et $p+8$, n étant le nombre total des ordres de fabrication. Par la suite, nous permutons les deux ordres de fabrication dont les positions sont p et q . Nous avons choisi la valeur de 8 pour avoir un voisinage plus ou moins large.

Le troisième voisinage (V3) est défini par le déplacement au hasard d'un ordre de fabrication d'un nombre x de positions dans la séquence, où x est un entier choisi au hasard et compris entre 1 et 8. Nous avons choisi cet intervalle pour avoir un voisinage plus ou moins large. Le quatrième voisinage (V4) est défini par la génération au hasard de deux entiers distincts p et q , où p et q sont compris entre 1 et n . Par la suite, nous permutons les deux ordres de fabrication dont les positions dans la séquence sont p et q . Il s'agit d'une extension du deuxième voisinage.

Le cinquième et dernier voisinage (V5) consiste à déplacer un ordre de fabrication choisi au hasard d'un nombre x de positions, où x est un entier choisi au hasard et compris entre 1 et $n-1$. Il s'agit également d'une extension du troisième voisinage.

5.2.3. Adaptation de la méthode du recuit-simulé

Cet algorithme a été développé en 1982 par deux équipes de recherche au États-Unis (Kirkpatrick et al. 1983) et en Slovaquie (Cerny, 1985). Le principe est assez simple et il repose sur une analogie avec les techniques de traitement par la chaleur et particulièrement

la technique dite du recuit des métaux. L'application de ce principe à l'optimisation est comme suit : contrairement à un algorithme de recherche locale, il est possible d'accepter une dégradation de la fonction objectif avec une certaine probabilité, en espérant que cette dégradation pourra entraîner une amélioration ultérieurement. Le principal avantage du recuit-simulé est donc de pouvoir échapper à un minimum local.

La technique du recuit simulé choisit au hasard une solution s' dans le voisinage $V(s)$ de la solution courante s . Cette solution voisine à s est acceptée comme nouvelle solution courante si elle est meilleure que s . Dans le cas contraire, la solution s' n'est acceptée comme nouvelle solution courante qu'avec une certaine probabilité.

- Si la solution s' est refusée, une nouvelle solution est tirée au hasard dans $V(s)$, etc.
- Le processus s'arrête lorsque le critère d'arrêt est rencontré.
- La probabilité d'accepter une solution voisine s' comme nouvelle solution courante est régie par une fonction donnée.

La version de recuit-simulé que nous proposons dans cette étude est composée par un certain nombre de cycles de réchauffement, un certain nombre d'étapes de refroidissement dans chaque cycle de réchauffement et repose aussi sur une vitesse de refroidissement variable. Ces paramètres ont été utilisés pour la première fois par Boctor en 1996 dans le cadre de ses travaux de recherche.

Pour pouvoir appliquer cette adaptation, nous avons besoin de fixer certains paramètres. Ces paramètres sont : la température maximale T_{max} , le nombre de cycles de réchauffement H_{max} , le nombre d'étapes de refroidissement C_{max} , le coefficient de réduction de la température α et le nombre de répétitions pour chaque cycle de refroidissement N_c .

Dans nos essais, nous avons fixé $C_{max} = 4$, $T_{max} = 32$, $\alpha = 0.25$ et $N_c = 100, 75, 75$ et 250 pour les 4 cycles de refroidissement respectivement. La valeur de H_{max} est fixée selon le nombre total des solutions que nous voulons visiter avant d'arrêter la recherche dans le voisinage. Ainsi, nous fixons $H_{max} = 4$ pour que le nombre de solutions explorées soit 2 000 et $H_{max} = 10$ pour que ce nombre soit 5 000. La figure 5.1 donne de plus amples détails sur l'adaptation proposée de l'algorithme du recuit-simulé.

Trouver une solution initiale en utilisant la méthode heuristique de construction et la séquence EWRDD)

$s \leftarrow$ la solution initiale sera considérée comme solution courante.

$s^* \leftarrow$ la solution initiale sera considérée comme meilleure solution à date.

$h := 0$ (initialisation du compteur des cycles de chauffage)

Répéter jusqu'à $h = H_{MAX}$

$T := T_{MAX}$ (Initialisation de la température)

$c := 0$ (initialisation du compteur des étapes de refroidissement)

Répéter jusqu'à $c = C_{MAX}$

$r := 0$ (initialisation du compteur des répétitions)

$R := N_c$

Répéter jusqu'à $r = R$

$s' \leftarrow N(s)$ (s' solution voisine à s tirée au hasard dans $V(s)$)

$d := f(s') - f(s)$

$n :=$ valeur décimale aléatoire comprise entre 0 et 1

Si $d < 0$ ou $n < \exp(-d/T)$ alors

$s \leftarrow s'$ (la solution voisine devient la solution courante)

Si valeur de la solution courante $<$ valeur de la meilleure solution

alors

$s^* \leftarrow s$ (la meilleure solution devient la solution courante)

FIN SI

FIN SI

FIN REPETER

$T := \alpha T$ (réduire la température)

FIN REPETER

FIN REPETER

Figure 5.1 : l'adaptation proposée de l'algorithme de du recuit-simulé

5.2.4. Adaptation de la méthode de recherche avec tabous

La méthode de recherche avec tabous a été proposée par Glover en 1986. Elle repose sur le même principe de la recherche locale avec une partition du voisinage en voisinage admissible et voisinage tabou. L'originalité de cette méthode c'est la construction d'une liste de mouvements tabous déduits des solutions trouvées antérieurement et sur lesquelles on ne doit plus revenir. La difficulté réside dans la gestion de cette liste tabou. La différence avec le recuit-simulé est que la recherche tabou possède une mémoire.

La solution initiale et les voisinages utilisés pour cette méthode sont ceux que nous avons choisis pour notre adaptation du recuit-simulé. La liste tabou a une longueur variable et contient entre 6 et 10 mouvements tabous. Le caractère tabou attribué à un mouvement dépend du voisinage utilisé. Nous avons regroupé dans le tableau ci-dessous les cinq types de voisinage que nous avons utilisés et les mouvements tabous qui leurs correspondent.

Voisinage	Définition du voisinage	Mouvement tabou correspondant
V1	Sélectionner un ordre au hasard à une position p et le permuter avec l'ordre qui le succède dans la séquence	L'ordre i qui a été déplacé à la position p sera considéré comme tabou.
V2	Sélectionner deux positions p et q au hasard tels que $1 \leq p \leq n-8$ et $p+1 \leq q \leq p+8$ et permuter les ordres de positions p et q	Les ordres aux positions p et q seront considérés comme tabous
V3	Sélectionner un ordre au hasard à une position p et un entier x entre 1 et 8, puis déplacer l'ordre sélectionné à la position $p+x$	L'ordre sélectionné sera considéré comme tabou
V4	Sélectionner deux positions distinctes p et q au hasard tels que $1 \leq p \leq n$ et $1 \leq q \leq n$ et permuter les ordres de positions p et q	Les ordres aux positions p et q seront considérés comme tabous
V5	Sélectionner un ordre au hasard à une position p et un entier x entre 1 et n , puis déplacer l'ordre sélectionné à la position $p+n-1$	L'ordre sélectionné sera considéré comme tabou

Tableau 5.1 : Définition des mouvements tabous pour les cinq voisinages testés

Un critère d'aspiration est utilisé dans cette adaptation. En effet, si une solution taboue est meilleure que la meilleure solution courante, alors le caractère « tabou » lui sera révoqué et elle sera acceptée comme meilleure solution courante. Le nombre total de solutions explorées est limité à 2 000 ou 5 000 afin de pouvoir comparer les résultats obtenus par cette méthode avec ceux des autres méthodes de recherche dans le voisinage. D'autres limites ont également été testées. La figure 5.2 décrit les différentes étapes de l'adaptation utilisée de la méthode de recherche avec tabous.

Trouver une solution initiale en utilisant la méthode heuristique de construction et la séquence EWRDD
 $s \leftarrow$ la solution initiale sera considérée comme solution courante.
 $s^* \leftarrow$ la solution initiale sera considérée comme meilleure solution à date.
 $L_T := []$ (initialisation de la liste taboue)
 Répéter jusqu'à satisfaction du critère d'arrêt
 $k := k+ 1$
 Générer $V_A \subseteq V(s,k)$ et $V_T \subseteq V(s,k)$ (V_A voisinage autorisé et V_T voisinage tabou)
 $v_a \leftarrow$ Choisir la meilleure solution voisine autorisée dans V_A
 $v_t \leftarrow$ Choisir la meilleure solution voisine taboue dans V_T
 $s \leftarrow v_a$
 SI $f(s) < f(s^*)$ ALORS
 $s^* \leftarrow s$ (la meilleure solution devient la solution courante)
 FIN SI
 SI valeur de la solution $v_t <$ valeur de la meilleure solution ALORS (critère d'aspiration)
 $s^* \leftarrow v_t$
 $s \leftarrow v_t$
 FIN SI
 Mettre à jour la liste taboue en lui ajoutant en fin de liste le mouvement lié à la solution courante tout en tenant compte de sa taille.
 FIN REPETER

Figure 5.2 : l'adaptation proposée de la méthode de de recherche avec tabous

5.2.5. Adaptation de la méthode de recherche adaptative et gloutonne

La méthode de recherche adaptative et gloutonne GRAPS (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) commence par générer un certain nombre de séquences de production, elle améliore chaque séquence et retourne la meilleure. La figure 5.3 décrit en détails les différentes étapes de cet algorithme qui repose essentiellement sur deux procédures : une pour la construction de solutions et l'autre pour l'amélioration.

Chaque solution est construite par une heuristique qui, pour chaque ordre i et chaque extrudeuse k permettant de le traiter, calcule la pénalité $PEN_i = \min_k \{PEN_{ik}\}$, construit une liste restreinte de candidats (RCL) qui inclut tous les ordres tel que $PEN_i \leq PEN_{min} + \beta(PEN_{max} - PEN_{min})$ avec β un nombre décimal choisi aléatoirement à chaque itération entre 0 et 1. L'ordre qui sera rajoutée à la séquence en cours de construction sera sélectionné aléatoirement de la liste restreinte des candidats RCL. Il s'agit de construire à chaque itération une cédule partielle à laquelle, à chaque étape de l'algorithme, nous ajoutons un ordre non cédulé à l'extrudeuse adéquate tout en tenant compte des ordres déjà cédulés et assignés jusqu'à ce que tous les ordres soient cédulés.

Dans leurs travaux de recherche en 2003, Resende et Ribeiro ont affirmé que la qualité de la solution dépend fortement du choix de la valeur de β . Les auteurs ont défendu l'idée qui consiste à choisir cette valeur aléatoirement entre 0 et 1 à chaque fois que l'on veut céduler un ordre. Selon eux, ce choix donnerait de bons résultats. Nous avons opté pour cette méthode de construction de séquences de production dans notre adaptation de la méthode de GRASP. Comme pour les autres méthodes de recherche dans le voisinage que nous avons proposées, nous nous sommes limités à 2 000 ou 5 000 solutions explorées.

PROCEDURE GENERALE DE GRASP

REPETER jusqu'à satisfaction du critère d'arrêt

 Construire une séquence de production s (PROCEDURE DE CONSTRUCTION DE SEQUENCE)

 Améliorer la séquence construite jusqu'à l'obtention d'un minimum local s_{Local} (PROCEDURE D'AMELIORATION DE SEQUENCE)

 SI (le coût s_{Local} est inférieur à celui de la meilleure solution trouvée s_{Best}) ALORS

$s_{Best} \leftarrow s_{Local}$

 FIN SI

FIN REPETER

RETOURNER s_{Best}

PROCEDURE DE CONSTRUCTION DE SEQUENCE

Répéter jusqu'à ce que tous les ordres soient cédulés

 Déterminer la date t à laquelle au moins un ordre peut être cédulé.

 Etablir la liste des ordres candidats qui peuvent être traités à la date t .

 Evaluer la pénalité $PEN_i = \min_k \{PEN_{ik}\}$ pour chacun de ces ordres.

 Déterminer PEN_{min} et PEN_{max} , la plus petite et la plus grande pénalité qu'engendrent les candidats.

 Choisir une valeur aléatoire β dans une distribution uniforme entre 0 et 1.

 Mettre tous les ordres i tels que $PEN_i \leq PEN_{min} + \beta (PEN_{max} - PEN_{min})$ dans une liste restreinte de candidats (RCL).

 Choisir au hasard un ordre de la liste RCL et le céduler.

FIN REPETER

PROCEDURE D'AMELIORATION DE SEQUENCE

Amélioration \leftarrow VRAI

TANT QUE *Amélioration* = VRAI

Amélioration \leftarrow FAUX

 POUR tout ordre j

 POUR toute position p dans $\{1, 2, \dots, \text{nombre total des ordres}\}$

 Calculer D_{jp} le coût de changement si l'on déplace l'ordre j à la position p dans la séquence s .

 SI $D_{jq} = \min_p \{D_{jp}\} < 0$ ALORS

Amélioration \leftarrow VRAI.

 Déplacer l'ordre j à la position correspondante q .

 FIN SI

FIN TANT QUE

Figure 5.3 : l'adaptation proposée de l'algorithme GRASP

5.2.6. Adaptation de l'algorithme génétique

Les algorithmes génétiques ont été proposés au début des années 70 par John Holland (Holland 1975, 1992). Le principe de cette méthode repose sur la reproduction des mécanismes naturels de l'évolution des espèces en fonction de leur capacité à s'adapter au milieu dans lequel elles évoluent. Les individus les mieux adaptés ont plus de chance de survivre et donc de se reproduire. A chaque génération, les chromosomes des individus les mieux adaptés seront gardés dans la population.

Le problème que l'on peut rencontrer est la convergence vers une même caractéristique génétique. Pour contourner ce problème, certains individus auront à subir une mutation et n'hériteront pas de toutes les caractéristiques de leurs parents. Cette mutation pourrait conférer une certaine résistance et leur permettrait de survivre à une évolution brutale de leur milieu naturel, là où les autres individus disparaîtraient.

Dans notre adaptation de l'algorithme génétique, chaque solution est codée par une séquence de production. La séquence est par la suite transformée en une cédule par le biais de la méthode heuristique sérielle décrite précédemment. La population initiale est composée de N solutions par la procédure de constructions de solutions qu'utilise GRASP. Le croisement des parents s'effectue par le mécanisme de croisement d'indices aléatoires développé par Bean en 1994 où l'on associe à chaque ordre de fabrication de la séquence un indice compris entre 0 et 1. L'attribution de ces indices aléatoires doit refléter les positions des ordres de fabrication dans la séquence de sorte que, si un ordre i précède un ordre j dans la séquence, alors son indice doit être inférieur à celui de j . Un premier enfant est généré suite à la concaténation de la première partie des indices du parent 1 avec la deuxième partie de ceux du parent 2 autour d'une position choisie au hasard. Le deuxième enfant s'obtient par la concaténation de la deuxième partie des indices du parent 1 avec la première partie de ceux du parent 2 autour de cette même position. La séquence d'ordres que produit chaque enfant est générée par le tri de ses indices dans un ordre croissant.

La figure 5.4 illustre un exemple de croisement par la méthode des indices aléatoires. Dans cet exemple, le croisement des vecteurs d'indices se fait à la position 2.

	Séquence du parent 1 : 4-2-5-3-6-1					
Parent 1	1	2	3	4	5	6
	Indices aléatoires du parent 1					
Parent 1	0,82	0,15	0,53	0,06	0,31	0,74
	Séquence du parent 2 : 2-4-3-5-1-6					
Parent 2	1	2	3	4	5	6
	Indices aléatoires du parent 2					
Parent 2	0,63	0,11	0,37	0,28	0,04	0,7
	Séquence de l'enfant 1 : 2-4-3-5-6-1					
Enfant 1	1	2	3	4	5	6
	Indices aléatoires de l'enfant 1 après concaténation à la position 2					
Enfant 1	0,82	0,15	0,37	0,28	0,04	0,7
	Séquence de l'enfant 2 : 4-2-5-3-1-6					
Enfant 2	1	2	3	4	5	6
	Indices aléatoires de l'enfant 2 après concaténation à la position 2					
	0,63	0,11	0,53	0,06	0,31	0,74

Figure 5.4 : Exemple de croisement à la position 2 avec la méthode des indices aléatoires

Le bassin de croisement est composé des u meilleures solutions de la génération courante et d'une copie des $(N - u)$ solutions restantes. La mutation est effectuée par le choix au hasard

d'un certain nombre de solutions m auxquelles nous appliquons la procédure d'amélioration qu'utilise la méthode GRASP.

Le nombre de solutions explorées est limité à 2 000 ou 5 000 dans cette adaptation de l'algorithme génétique. Pour visiter 5000 solutions, nous avons fixé N à 200, u à 40 et m à 2. La figure 5.5 décrit en détails les différentes étapes de notre adaptation de l'algorithme génétique.

Générer avec la procédure de construction de solution de GRASP une population de N individus.

Évaluer la fonction d'adaptation $f(x)$ de chaque individu x dans la population.

REPETER jusqu'à satisfaction du critère d'arrêt

nouvelle population $\leftarrow \emptyset$.

Ajouter les u meilleurs individus de la population courante à la nouvelle population.

Créer un bassin de croisement composé des $N-u$ individus restants.

REPETER les étapes suivantes jusqu'à ce que la population soit complète.

Sélectionner deux parents du bassin de croisement.

Appliquer l'opérateur de croisement sur les parents

Placer les enfants dans la nouvelle population

FIN REPETER

Appliquer l'opérateur de mutation sur m individus de la nouvelle génération choisis au hasard

Utiliser la nouvelle population comme population courante.

FIN REPETER

Retourner la meilleure solution

Figure 5.5 : Adaptation proposée de l'algorithme génétique

Chapitre VI

EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS

Rappelons que l'objectif des méthodes heuristiques détaillées dans le chapitre précédent est de proposer des approches de résolution capables de donner une solution de bonne qualité qui soit la plus proche possible de l'optimum. Dans ce chapitre, nous nous proposons d'évaluer l'ensemble des heuristiques développées (sérielle, parallèle et méthodes de recherche dans le voisinage) via une série d'expérimentations utilisant un ensemble de 100 instances de test. Dans un premier temps, nous allons exposer les résultats des méthodes heuristiques de construction de solution (méthode sérielle et méthode parallèle) puis nous procéderons à l'analyse des résultats des méthodes de recherche dans le voisinage et comparerons les résultats des quatre adaptations proposées dans le chapitre précédent. L'étude comparative se fera également au niveau du temps de résolution. Nous étudierons finalement l'impact du choix de voisinage utilisé sur la qualité des solutions obtenues et leur déviation par rapport aux résultats optimaux obtenus via le modèle mathématique.

Avant de procéder à l'étude comparative, nous allons tout d'abord détailler le langage de programmation utilisé, la méthode suivie dans la génération des problèmes tests et exposer les paramètres.

6.1. Matériel de développement utilisé

Pour le développement des heuristiques, nous avons utilisé le langage de programmation « Python 2.7.10 ». Quant au modèle mathématique, il a été résolu pour les différentes instances de test avec « GUROBI 6.0.5 ».

Nous avons utilisé un ordinateur avec les caractéristiques suivantes :

- Système d'exploitation : Windows 7 professionnel (SP1) ;
- Processeur : Intel Core 2 Quad @ 2.40 GHz ;
- Mémoire RAM : 4 Go ;
- Type du système : 64 bits.

6.2. Instances de test

Pour l'évaluation des différentes méthodes heuristiques proposées, compte tenu de l'originalité du problème étudié, nous avons développé un générateur d'instances de test aléatoires. Ce générateur tire ses valeurs aléatoires d'un ensemble d'intervalles de données qui concernent la matrice à utiliser, les machines qui peuvent traiter chaque ordre, la couleur du matériau, la composition du matériau, la forme du produit à la sortie de l'extrudeuse (forme droite ou embobinée) et la nécessité ou non d'une seconde opération telle que l'impression sur le produit final.

Les paramètres fixes et communs à tous les problèmes tests sont le nombre total de machines (principales et co-extrudeuses) qui est de 11 machines et le nombre d'ordres de fabrication à traiter qui est de 15 ordres.

Pour générer des instances qui ont les mêmes caractéristiques que les problèmes rencontrés dans l'industrie, le générateur des instances développé choisit au hasard (selon une probabilité uniforme à moins que cela soit spécifié autrement) pour chaque ordre :

- Une matrice principale parmi 10
- Une matrice secondaire parmi 10 sachant que les matrices principales sont uniquement réservées pour les extrudeuses et que les matrices secondaires sont uniquement réservées pour les co-extrudeuses.
- Une couleur parmi 60 couleurs, dont 5 couleurs ont une probabilité de tirage de 0.15 car elles sont les plus utilisées.
- Une forme du produit parmi 7
- Un matériau parmi 17
- Une opération secondaire parmi 5
- Entre une et trois extrudeuses pouvant traiter l'ordre, avec une probabilité de 0.25 pour une seule extrudeuse, 0.5 pour deux extrudeuses et 0.25 pour trois extrudeuses, sachant que les machines sont choisies parmi 11 machines disponible dans l'atelier de production.
- Entre une et trois co-extrudeuses pouvant assurer l'opération de co-extrusion avec la même distribution de probabilité que pour les machines principales, sachant que

pour chaque ordre, la probabilité qu'il requière une opération de co-extrusion est de 0,2.

- Une quantité à produire entre 1200 et 3000.
- Un taux de production pour chaque machine pouvant traiter l'ordre entre 120 et 160 produits par heure si la quantité demandée est comprise entre 1200 et 2000, et entre 190 et 250 produits par heure si la quantité demandée est comprise entre 2000 et 3000.
- Une date due en multiple de 8 heures (8, 16, 24, 32 ou 40).
- Un poids qui traduit l'importance de l'ordre entre 1 et 3 avec une probabilité de 0,5 pour un poids de 1, une probabilité de 0,25 pour un poids de 2 et une probabilité de 0,25 pour un poids de 3 car les ordres les moins prioritaires sont les plus fréquents.

Ainsi, nous avons généré 100 instances de test qui nous ont servis de support pour notre série d'expérimentations.

6.3. Solutions optimales

Le tableau de l'annexe 1 donne les résultats obtenus par le code commercial GUROBI 6.0.5 en termes de temps de résolution et de valeur de la fonction objectif pour chaque instance résolue. Les statistiques relatives au temps de résolution du modèle mathématique sont données dans le tableau ci-dessous.

	Statistiques
Temps Moyen (sec)	179,37
Temps Maximal (sec)	2364,62
Temps Minimal (sec)	0,67
Ecart-type (sec)	382,13

Tableau 6.1 : Temps de résolution du modèle mathématique par GUROBI 6.0.5

Les temps de résolution du modèle mathématique sont très variés avec une moyenne de 179,37 secondes et un écart-type de 382,13 secondes. Certains problèmes tests peuvent être résolus en un temps très court tandis que d'autres peuvent prendre autour de 40 minutes. Rappelons que nous nous sommes limités à des instances de test à 15 ordres de fabrication car le temps de résolution augmente d'une manière exponentielle et l'optimalité peut ne pas être atteinte si l'on dépasse ce nombre d'ordres de fabrication.

Les résultats de la méthode exacte vont nous servir par la suite de référence pour évaluer la qualité des méthodes heuristiques en termes de déviation des solutions qu'elles donnent par rapport à l'optimum.

6.4. Résultats des méthodes de construction de solution

Dans cette partie, nous allons exposer les résultats donnés par les méthodes de construction de solution, à savoir la méthode sérielle avec ses quatre variantes de séquençement d'ordres et la méthode parallèle. Le tableau de l'annexe 2 illustre les résultats obtenus par application de ces méthodes sur l'ensemble des 100 instances de test que nous avons générés. Pour chaque instance, nous avons la valeur de la somme des retards pondérés donnée par chaque méthode heuristique. Les méthodes étudiées sont la méthode sérielle avec les règles de séquençement EDD, EWDD, ERDD et EWDD. Les colonnes $\Delta\%$ donnent le pourcentage de déviation par rapport à la solution optimale.

Pour chaque méthode de construction, le tableau 6.2 donne la déviation moyenne par rapport à la solution optimale, l'écart-type, les déviations maximale et minimale, le nombre de meilleurs résultats et le nombre de solutions optimales générées par la méthode en question. L'analyse de ces résultats sera abordée dans la partie suivante.

	Méthodes sérielles				Méthode parallèle
	EDD	EWDD	ERDD	EWRDD	
Déviatiion moyenne	77,04	57,72	86,52	67,29	129,20
Ecart type	54,61	56,54	69,84	53,03	146,92
Déviatiion maximale	289,88	423,83	378,68	296,96	989,65
Déviatiion minimale	0	0	0	0	0
Nombre de meilleurs résultats	21	45	17	25	12
Nombre des solutions optimales	1	1	2	2	1

Tableau 6.2 : Résultats obtenus par les méthodes de construction

6.5. Analyse des résultats des méthodes de construction de solution

A la lumière des résultats obtenus dans la partie 6.4, une étude comparative s'impose. L'analyse des résultats va se baser essentiellement sur les moyennes des déviations par rapport à l'optimum de chaque méthode. Nous analyserons également la déviation minimale, maximale ainsi que le nombre de fois où chaque méthode donne le meilleur résultat. Nous allons également effectuer des tests statistiques tels que le test de comparaison des moyennes et le test des rangs de Mann-Whitney.

Commençons d'abord par comparer les méthodes au niveau des indicateurs de performance choisis dans la partie 6.4.

Bien que la résolution des instances de test s'effectue d'une manière quasi instantanée en termes de temps de résolution, les résultats du tableau 6.2 montrent que les heuristiques de construction de solutions ne sont pas performantes car elles donnent des résultats très médiocres. En effet, les moyennes des déviations des 5 méthodes, sérielles et parallèles, sont très élevées avec une grande dispersion comme le montre l'écart-type. Le maximum des déviations dépasse souvent 100 %. Quant au nombre de solutions optimales trouvées par ces méthodes, dans le meilleur des cas, il est de 2 seulement. Cependant, il semble que la règle de séquençement EWDD donne de meilleurs résultats que les autres règles de séquençement et de meilleures solutions que l'heuristique parallèle.

Les deux tests que nous nous proposons d'effectuer sont : test de comparaison des moyennes (appelé aussi test de Student) et test des rangs pour échantillons indépendants de Mann-Whitney.

Pour le test de Student (t-test en anglais), il s'agit d'un test de comparaison de deux moyennes provenant de deux échantillons tirés de deux populations indépendantes. On a donc l'hypothèse nulle H_0 et l'hypothèse alternative H_1 suivantes:

H_{0t} : Les deux échantillons appartiennent à une seule population de référence ayant la même moyenne; donc $\mu_1 = \mu_2$.

H_{1t} : Les deux échantillons appartiennent à deux populations distinctes. La population 1 a une moyenne μ_1 différente la moyenne μ_2 de la population 2.

Dans le cas où l'hypothèse nulle est rejetée, un autre test de comparaison des moyennes sera effectué pour trouver laquelle des deux populations possède la plus grande moyenne. On aura alors :

H_{0t} : La population 1 possède une plus grande moyenne que la population 2 : $\mu_1 > \mu_2$.

H_{1t} : La population 1 possède une plus petite moyenne que la population 2 : $\mu_1 < \mu_2$.

Quant au test de Mann-Whitney, il s'agit d'un test non paramétrique qui teste l'hypothèse selon laquelle la distribution des données est la même dans les deux groupes. Ce test peut servir d'alternative au test de comparaison des moyennes dans le cas où les données ne sont pas distribuées selon une loi normale. Nous avons donc l'hypothèse nulle H_{0m-w} et l'hypothèse alternative H_{1m-w} définies comme suit :

H_{0m-w} : Les données des deux échantillons proviennent de la même distribution.

H_{1m-w} : Les données des deux échantillons ne proviennent pas de la même distribution.

Ainsi, les résultats de ce test peuvent servir à valider les résultats du test de comparaison des moyennes.

Pour le test des rangs de Mann-Whitney, le rejet ou non des hypothèses nulles se basera sur la valeur-p qui est la probabilité d'obtenir la même valeur (ou une valeur encore plus extrême) du test si l'hypothèse nulle était vraie. Nous avons travaillé avec un degré de

signification de $\alpha = 0,05$. En effet, si la valeur-p est inférieure à α , nous jugeons qu'il y a une forte présomption contre l'hypothèse nulle que nous rejetons. Sinon, nous jugeons que nous n'avons pas assez de preuves pour rejeter l'hypothèse nulle.

Le tableau 6.3 expose les résultats du test de comparaison des moyennes. Quant au tableau 6.4, il présente les résultats du test des rangs de Mann-Whitney.

Méthodes	statistique t	Décision
EDD vs EWDD	2,458	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
EDD vs ERDD	-1,069	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
EDD vs EWRDD	1,281	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
EDD vs Parallel	-3,328	$H_{0_ttest} M1 > M2$ rejetée
EWDD vs ERDD	-3,205	$H_{0_ttest} M1 > M2$ rejetée
EWDD vs EWRDD	-1,234	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
EWDD vs Parallel	-4,54	$H_{0_ttest} M1 > M2$ rejetée
ERDD vs EWRDD	2,193	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
ERDD vs Parallel	-2,623	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
EWRDD vs Parallel	-3,963	$H_{0_ttest} M1 > M2$ rejetée

Tableau 6.3 : Résultats du test de comparaison des moyennes pour les méthodes de construction de solution

Méthodes	valeur-p	Décision
EDD vs EWDD	0,002	H_{0_M-W} rejetée
EDD vs ERDD	0,552	H_{0_M-W} non rejetée
EDD vs EWRDD	0,147	H_{0_M-W} non rejetée
EDD vs Parallel	0,002	H_{0_M-W} rejetée
EWDD vs ERDD	0	H_{0_M-W} rejetée
EWDD vs EWRDD	0,098	H_{0_M-W} non rejetée
EWDD vs Parallel	0	H_{0_M-W} rejetée
ERDD vs EWRDD	0,051	H_{0_M-W} non rejetée
ERDD vs Parallel	0,014	H_{0_M-W} non rejetée
EWRDD vs Parallel	0	H_{0_M-W} rejetée

Tableau 6.4 : Résultats du test de Mann-Whitney pour les méthodes de construction de solution

D'après ces résultats, nous pouvons suggérer d'opter pour les règles de séquençement EWDD ou EWRDD. En effet, ces deux méthodes sont statistiquement supérieures aux autres. De plus, elles se valent au seuil de signification de 0,05 car l'hypothèse nulle n'est pas rejetée. L'une ou l'autre peut être utilisée comme règle de séquençement pour trouver une solution initiale pour les méthodes de recherche dans le voisinage de recherche avec tabous et recuit-simulé.

Notons que, pour les méthodes de construction de solution, nous avons fait abstraction du temps de résolution du code car il est quasi-instantané.

6.6. Résultats des méthodes de recherche dans le voisinage

Dans cette partie, nous allons exposer les résultats donnés par les méthodes de recherche dans le voisinage, à savoir la méthode de recherche avec tabous, la méthode du recuit-simulé, l'algorithme génétique et GRASP. Le tableau 6.5 donne le temps de calcul des différentes méthodes testées en imposant une limite de 2 000 solutions à visiter avant d'arrêter la recherche. Les différences entre ces temps ne semblent pas être statistiquement significatives. Ainsi, nous pouvons conclure que le temps de résolution n'est pas un critère

discriminatoire pour défavoriser telle ou telle méthode. Le tableau 6.6 donne la déviation des solutions obtenues par rapport à l'optimum avec cette même limite de 2000 solutions à visiter.

Pour voir l'effet du critère d'arrêt de la recherche sur la qualité des solutions obtenues, la limite de nombre de solutions à visiter a été augmentée jusqu'au 5 000. Les tableaux 6.7 et 6.8 donnent les résultats obtenus avec cette limite augmentée. De ces tableaux, nous verrons que, pour ces instances de 15 ordres de fabrication, l'augmentation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche dans le voisinage n'a qu'un effet marginal sur la qualité de la solution. Par contre le temps de calcul est en moyenne multiplié par 2,5.

Les tableaux de l'annexe 3 et 4 présentent les résultats obtenus par application de ces méthodes sur l'ensemble des 100 instances de test que nous avons générés en variant le nombre de solutions visitées. Pour chaque instance, nous avons la valeur de la somme des retards pondérés donnée par chaque méthode.

6.7. Analyse des résultats des méthodes de recherche dans le voisinage

Comme pour les méthodes de construction de solution, l'analyse des méthodes de recherche dans le voisinage va se baser sur les tests statistiques (test de comparaison des moyennes et test des rangs de Mann-Whitney). Cette analyse portera uniquement sur les solutions obtenues en appliquant les différentes méthodes de recherche dans le voisinage avec une limite de 5 000 solutions visitées.

Tout d'abord, nous allons commenter les statistiques des méthodes de recherche dans le voisinage en relation avec le temps de résolution. Par la suite, nous allons analyser les résultats obtenus en comparant les moyennes des déviations de chaque méthode, le minimum et le maximum des déviations et le nombre de fois où chaque méthode donne le meilleur résultat et/ou le résultat optimal. Pour les déviations par rapport à l'optimum, nous allons également effectuer des tests statistiques tels que le test de comparaison des moyennes et le test des rangs de Mann-Whitney

Puis, nous allons comparer toutes les méthodes deux à deux en réalisant deux tests de dominance à savoir : le test de dominance empirique et le test de dominance stochastique empirique du premier degré que nous allons définir dans ce qui suit.

Commençons d'abord par les temps de résolution des méthodes de recherche dans le voisinage. Les tableaux 6.5 et 6.7 relatifs respectivement aux critères de 2000 et 5000 solutions visitées illustrent les différentes statistiques basées sur les indicateurs de moyenne du temps de résolution, écart type et de temps minimal et maximal pris par l'algorithme jusqu'à son critère d'arrêt. Quant aux tableaux 6.6 et 6.8 relatifs respectivement aux critères de 2000 et 5000 solution visitées, ils illustrent les statistiques liées aux déviations par rapport à l'optimum en termes de déviations moyenne, maximale et minimale, écart-type, nombre de meilleurs solutions générées par la méthode et de nombre de solutions optimales trouvées.

	Recuit-simulé					Recherche avec tabous					AG	GRASP
	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5		
Temps Moyen (sec.)	139,69	141,14	138,14	138,15	111,80	148,63	144,90	149,94	149,11	154,07	164,68	159,48
Temps Minimal (sec.)	32,08	31,62	30,27	33,74	26,69	37,44	33,96	34,89	38,69	33,39	39,86	36,35
Temps Maximal (sec.)	408,93	404,91	436,87	394,69	320,07	401,54	452,74	443,35	499,91	618,29	470,19	491,06
Ecart-type	85,64	84,85	84,40	78,58	65,59	87,73	92,55	96,04	94,21	102,63	96,94	96,19

Tableau 6.5 : Temps de calcul des méthodes de recherche dans le voisinage avec une limite de 2000 solutions visitées avant l'arrêt de la recherche dans le voisinage

	Recuit-simulé					Recherche avec tabous					AG	GRASP
	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5		
Déviati on Moyenne (%)	6,53	2,51	2,12	2,13	1,95	11,69	3,1	2,58	1,97	2,13	2,55	2,71
Déviati on Maximale (%)	47,2	14,8	12,1	12,1	12,1	63,23	20,25	15,53	12,1	12,1	13,56	15,18
Déviati on Minimale (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ecart type	8,41	2,8	2,25	2,25	2,23	11,59	3,77	2,83	2,3	2,25	2,75	3,15
Nombre de meilleures solutions	39	75	87	86	95	24	66	75	97	86	75	77
Nombre des solutions optimales	13	26	26	26	30	8	20	25	30	26	25	24

Tableau 6.6 : Déviati ons par rapport à l'optimum obtenues par les méthodes de recherche dans le voisinage avec une limite de 2000 solutions visitées avant l'arrêt de la recherche dans le voisinage

	Recuit-simulé					Recherche avec tabous					AG	GRASP
	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5		
Temps Moyen (sec.)	374,47	370,13	370,25	355,41	361,71	348,23	350,52	344,96	352,82	364,71	400,12	379,65
Temps Maximal (sec.)	1110,4	1008,12	916,83	980,68	997,7	998,36	1064,55	923,25	1110,88	1181,66	1101,15	968,57
Temps Minimal (sec.)	86,26	85,88	116,88	87,37	87,26	90,02	88,19	103,04	88,97	82,5	96,98	115,2
Ecart-type	219,22	210,1	179	208,09	213,44	209,16	220,41	181,95	227,72	235,79	231,6	188,42

Tableau 6.7 : Temps de calcul des méthodes de recherche dans le voisinage avec une limite de 5000 solutions visitées avant l'arrêt de la recherche dans le voisinage

	Recuit-simulé					Recherche avec tabous					AG	GRASP
	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5		
Déviations Moyenne (%)	6,37	2,22	1,97	2,03	1,92	11,98	2,95	2,26	2,1	2,05	2,64	2,69
Déviations Maximales (%)	47,2	12,1	12,1	12,1	12,1	68,9	21,59	12,1	12,1	12,1	15,18	15,18
Déviations Minimales (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ecart type	8,29	2,52	2,3	2,25	2,23	11,92	3,64	2,47	2,32	2,26	3,01	3,24
Nombre de meilleures solutions	47	88	99	96	99	27	74	85	93	95	74	81
Nombre des solutions optimales	16	28	30	28	30	8	23	27	28	28	25	24

Tableau 6.8 : Déviations par rapport à l'optimum obtenues par les méthodes de recherche dans le voisinage avec une limite de 5000 solutions visitées avant l'arrêt de la recherche dans le voisinage

Dans ce qui suit, toutes les analyses effectuées seront basées sur les résultats relatifs au critère d'arrêt de 5 000 solutions visitées. En effet, dans la littérature, il est courant d'utiliser ce critère d'arrêt pour étudier la performance des algorithmes de recherche dans le voisinage.

D'après ces résultats, il est clair que le voisinage V1 défini par la permutation de deux ordres adjacents de la séquence, qu'il soit appliqué avec la méthode de recherche avec tabous ou avec la méthode du recuit-simulé, donne de moins bons résultats que les autres types de voisinage. En effet, pour la méthode du recuit-simulé et la méthode de recherche avec tabous, les moyennes des déviations sont respectivement 6,37 % et 11,98 % avec des déviations maximales qui peuvent dépasser 50 %. Ces valeurs sont largement supérieures à celles des autres méthodes de recherche dans le voisinage. Cependant, il nous est difficile de conclure avec certitude laquelle des autres méthodes donnent les meilleures statistiques car les résultats sont très rapprochés au niveau des autres indicateurs.

Il semble que la méthode du recuit-simulé avec le voisinage V5 donne les meilleurs résultats en termes de moyennes de déviations (1,92 % pour 5 000 solutions visitées et 1,95 % pour 2 000 solutions visitées), nombre de solutions optimales (30 pour 5 000 solutions visitées et 30 pour aussi pour 2 000 solutions visitées), écart-type (2,23 pour 5 000 solutions visitées et 2,23 aussi pour 2 000 solutions visitées), déviation maximale (12,1 % pour 5 000 solutions visitées et 12,1 % aussi pour 2 000 solutions visitées) et nombre de meilleurs résultats (99 pour 5 000 solutions visitées et 95 pour 2 000 solutions visitées). Par contre, on est incapable de déterminer à première vue si la différence des résultats donnés par ces méthodes est statistiquement significative ou elle est simplement due à l'effet du hasard.

Pour déterminer si la différence est statistiquement significative ou non, une série de tests d'hypothèse s'impose. Dans ce qui suit, nous allons essayer d'établir une relation d'ordre strict et total entre les différentes méthodes. Considérant l'ensemble de toutes les méthodes de recherche dans le voisinage avec les différents types de voisinages, il s'agit d'ordonner toutes les méthodes selon un critère de préférence en se basant sur les résultats des tests que l'on va effectuer, à savoir le test de comparaison des moyennes, le test de Mann-Whitney, le test de dominance empirique et le test de dominance stochastique empirique du premier degré.

Il est peu probable de trouver un ordre complet qui englobe toutes les méthodes testées. Par contre nous serons en mesure d'identifier des chaînes de relations de classement telles que la chaîne : $m_1 > m_2 > m_3$ qui équivaut à dire que la méthode m_1 est préférée à la méthode m_2 , m_2 est préférée à m_3 et m_1 est préférée à m_3 .

Commençons d'abord par le test de comparaison des moyennes et le test des rangs de Mann-Whitney afin de juger de la significativité ou non des différences dans les résultats. Le tableau de l'annexe 18 donne les résultats du test de comparaison des moyennes, tel qu'il a été défini à la partie 6.7, à un niveau de signification $\alpha = 0.01$.

Dans ce qui suit, nous allons utiliser les abréviations suivantes :

- « r » pour désigner « recuit-simulé »
- « t » pour désigner « recherche avec tabous »
- « AG » pour désigner « Algorithme génétique »
- « $GRASP$ » pour désigner « GRASP »
- 1, 2, ..., 5 pour désigner le type de voisinage choisi
- « $M1$ » pour désigner la moyenne des déviations de la méthode 1
- « $M2$ » pour désigner la moyenne des déviations de la méthode 2

Les méthodes ordonnées sont représentées par des nœuds dans le graphe orienté de la figure 6.1. La relation entre deux méthodes est représentée par un segment orienté entre deux nœuds. Si une méthode m_1 est préférée à une méthode m_2 , alors le sens de la flèche (représentée par un trait gras) est dirigé du nœud m_2 vers le nœud m_1 . S'il n'y pas de préférence entre les deux méthodes, aucun segment ne relie les deux nœuds.

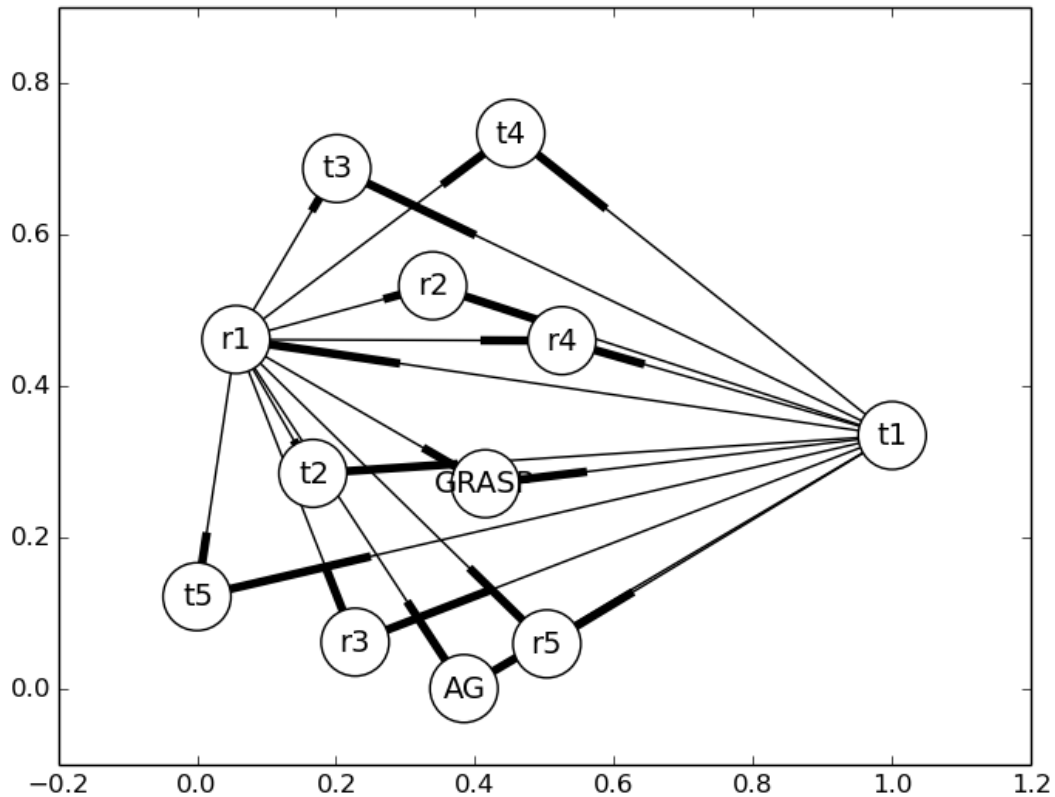


Figure 6.1 : Graphe des relations entre les méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère des moyennes des déviations

Ces résultats concordent avec ceux du test des rangs de Mann-Whitney qui nous fait savoir si les déviations des deux méthodes proviennent ou non de la même distribution. Le tableau de l'annexe 7 présente les résultats de ce test.

D'après les résultats des tests d'hypothèse, le tableau 6.9 illustre les relations de préférence entre les méthodes selon le critère de comparaison des moyennes des déviations par rapport à l'optimum. On peut conclure que t1 est inférieure à toutes les autres méthodes. De même, aucune autre méthode ne se démarque statistiquement des autres.

vs M2 M1	r1	r2	r3	r4	r5	t1	t2	t3	t4	t5	AG	GRASP
r1		<	<	<	<	>	<	<	<	<	<	<
r2	>		-	-	-	>	-	-	-	-	-	-
r3	>	-		-	-	>	-	-	-	-	-	-
r4	>	-	-		-	>	-	-	-	-	-	-
r5	>	-	-	-		>	-	-	-	-	-	-
t1	<	<	<	<	<		<	<	<	<	<	<
t2	>	-	-	-	-	>		-	-	-	-	-
t3	>	-	-	-	-	>	-		-	-	-	-
t4	>	-	-	-	-	>	-	-		-	-	-
t5	>	-	-	-	-	>	-	-	-		-	-
AG	>	-	-	-	-	>	-	-	-	-		-
GRASP	>	-	-	-	-	>	-	-	-	-	-	

Tableau 6.9 : Comparaison des méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère des moyennes des déviations

D'après les résultats des tests de Mann-Whitney et de comparaison des moyennes, seul le voisinage V1 donne de moins bons résultats que tous les autres voisinages car les moyennes de déviations pour les méthodes r1 et t1 sont significativement supérieures aux moyennes des déviations des autres méthodes. Ces dernières présentent des moyennes de déviation très proches, avec de légères différences dues au hasard.

Les résultats des tests d'hypothèses ne nous permettent pas d'établir une relation d'ordre totale car nous ne sommes pas en mesure d'ordonner toutes les méthodes dans une seule chaîne.

Passons maintenant au test de dominance empirique. Il s'agit de comparer les méthodes deux à deux selon un critère bien déterminé.

Pour l'ensemble des instances de test, on dit qu'une méthode m_1 domine une autre méthode m_2 s'il existe au moins une instance de test pour laquelle la méthode m_1 donne une meilleure solution que la méthode m_2 et que pour toutes les autres instances la méthode m_1 donne au moins une aussi bonne solution que la méthode m_2 .

Comme l'illustre la figure 6.2, la méthode r_5 domine la méthode t_1 empiriquement car la courbe de r_5 des valeurs de la fonction objectif en fonction des instances de test est en dessous de celle de t_1 .

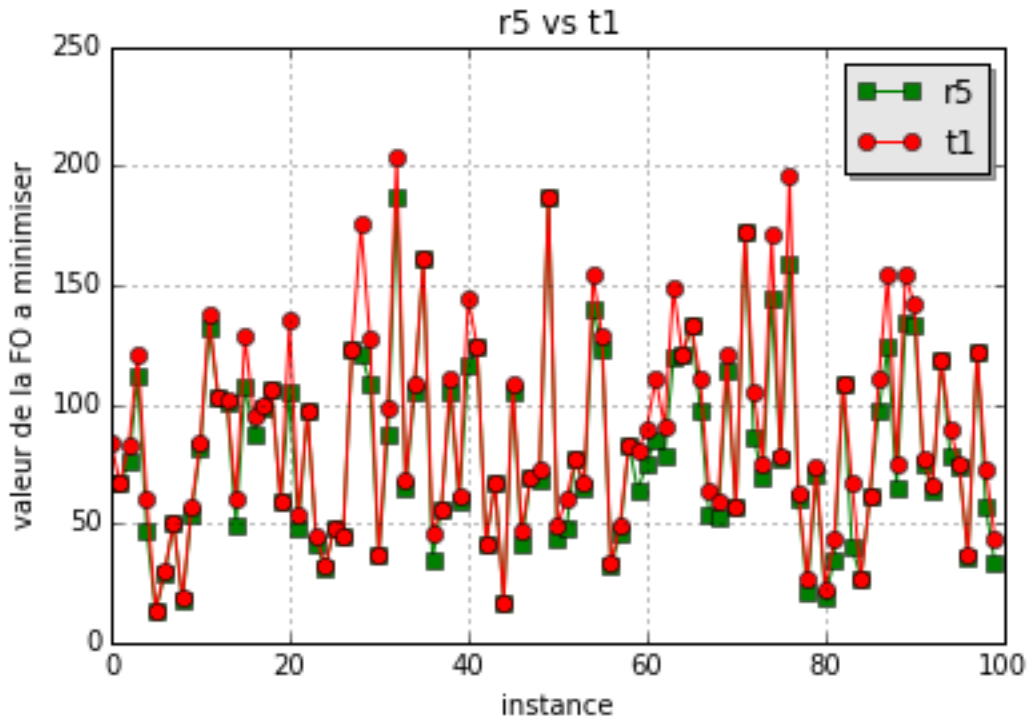


Figure 6.2 : Exemple d'application du test de dominance empirique

Pour une meilleure analyse des résultats du test de dominance empirique, nous avons tracé le graphe orienté ci-dessous. Les méthodes sont représentées par des nœuds. La relation de dominance empirique est représentée par un segment gras dirigé vers la méthode qui domine empiriquement. Si pour deux méthodes données il n'y a pas de relation de dominance, alors aucun segment ne relie les deux nœuds.

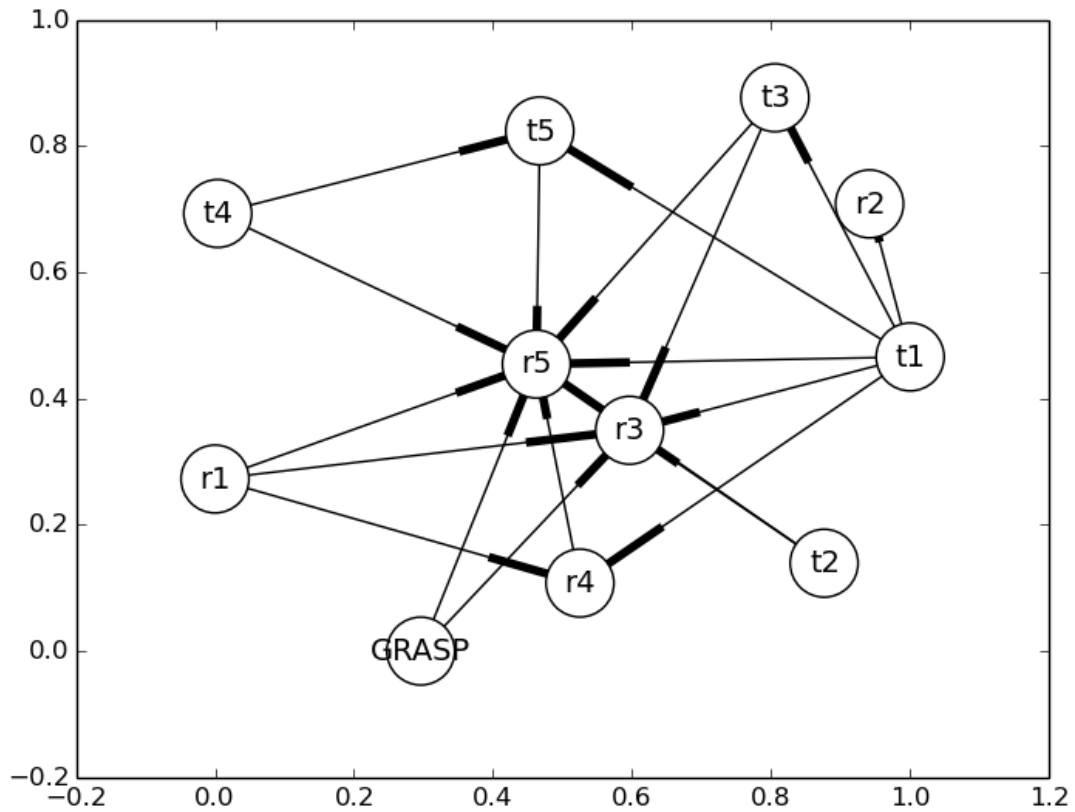


Figure 6.3 : Graphe des relations de préférence entre les méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère de dominance empirique

D'après les résultats précédents, le tableau 6.10 récapitule les relations de préférence établies entre les méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère de dominance empirique.

vs M2 M1	r1	r2	r3	r4	r5	t1	t2	t3	t4	t5	AG	GRASP
r1		-	<	<	<	-	-	-	-	-	-	-
r2	-		-	-	-	>	-	-	-	-	-	-
r3	>	-		-	<	>	>	>	-	-	-	>
r4	>	-	-		<	>	-	-	-	-	-	-
r5	>	-	>	>		>	>	>	>	>	-	>
t1	-	<	<	<	<		-	<	-	<	-	-
t2	-	-	<	-	<	-		-	-	-	-	-
t3	-	-	<	-	<	>	-		-	-	-	-
t4	-	-	-	-	<	-	-	-		<	-	-
t5	-	-	-	-	<	>	-	-	>		-	-
AG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-
GRASP	-	-	<	-	<	-	-	-	-	-	-	

Tableau 6.10 : Comparaison des méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère de dominance empirique

Les résultats du test de dominance empirique ne nous permettent pas d'établir une relation d'ordre totale car nous ne sommes pas en mesure d'ordonner toutes les méthodes dans une seule chaîne. Selon le critère de dominance empirique, seul un ordre partiel peut être établi. Dans ce cas, la plus longue chaîne de méthodes ordonnées est de longueur 4, cette chaîne est :

$$t1 < t3 < r3 < r5.$$

Passons maintenant au dernier test de dominance qui est le test de dominance stochastique empirique du premier degré. Il s'agit de comparer les méthodes deux à deux selon un critère bien déterminé. Pour un ensemble d'instances de test, on dit qu'une méthode m_1 domine de façon stochastique empirique une autre méthode m_2 si, pour chaque valeur α , le nombre (le pourcentage) d'instances pour lesquelles la méthode m_1 donne une solution dont la déviation par rapport à l'optimum est inférieure ou égale à α , est supérieur ou égal à celui de la méthode m_2 .

Comme l'illustre la figure 6.4, la méthode r_5 domine la méthode r_1 de façon stochastique empirique du premier degré car la courbe de r_5 des pourcentages d'instances en fonction des déviations par rapport au minimum est au-dessus de celle de t_1 .

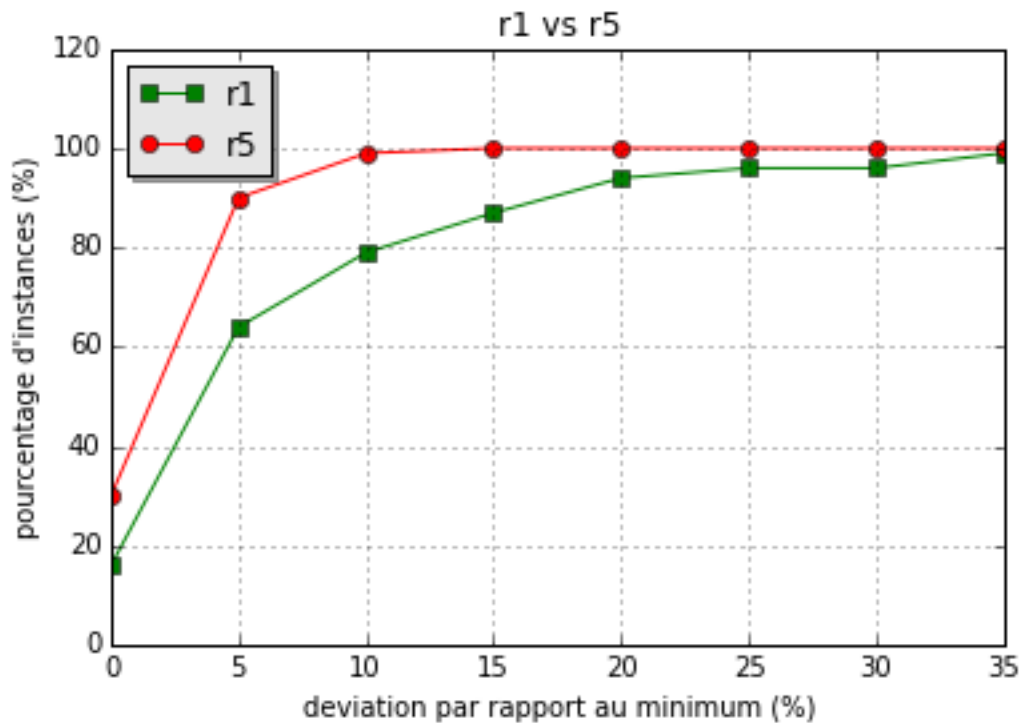


Figure 6.4 : Exemple d'application du test de dominance stochastique empirique du premier degré

Les résultats du test de dominance stochastique empirique du premier degré nous permettent de tracer le graphe orienté ci-dessous. Les méthodes sont représentées par des nœuds. La relation de dominance stochastique empirique du premier degré est représentée par un arc dirigé vers la méthode qui domine. Si pour deux méthodes données il n'y a pas de relation de dominance, alors aucun segment ne relie les deux nœuds.

D'après les résultats précédents, le tableau 6.6 récapitule les relations de préférence entre les méthodes de recherche dans le voisinage deux à deux selon le critère de dominance stochastique empirique du premier degré.

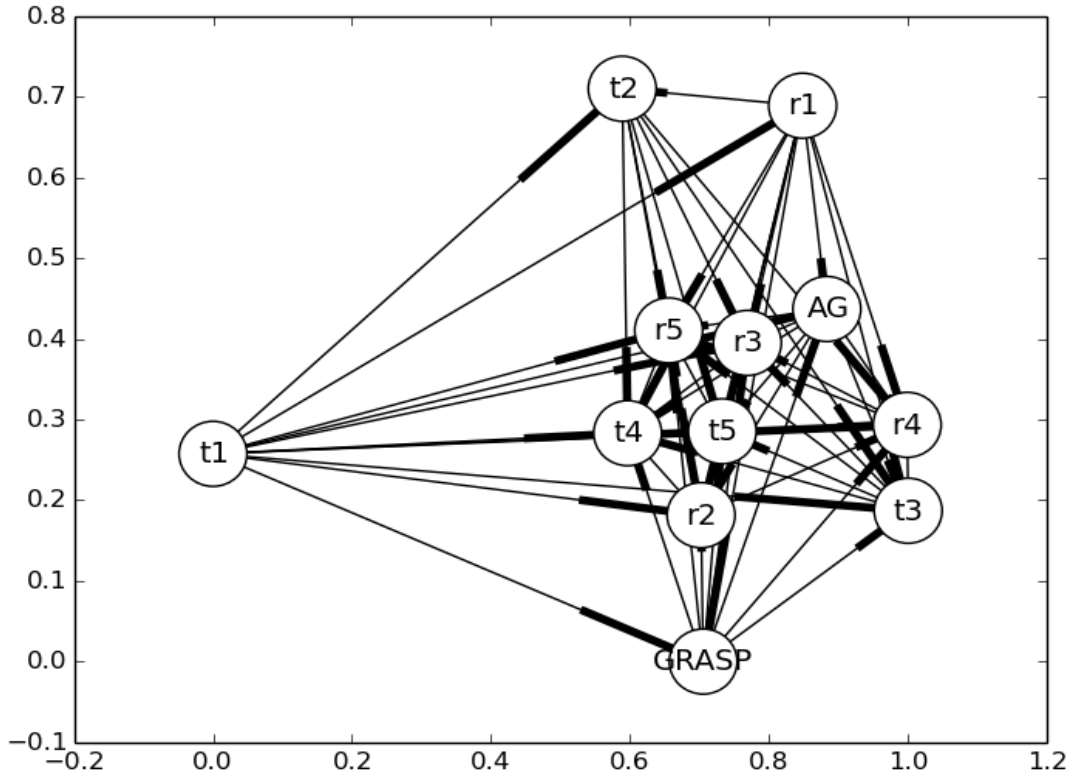


Figure 6.5 : Graphe des relations de préférence entre les méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère de dominance stochastique empirique du premier degré

vs M2 M1	r1	r2	r3	r4	r5	t1	t2	t3	t4	t5	AG	GRASP
r1		<	<	<	<	>	<	<	<	<	<	<
r2	>		<	<	<	>	>	-	<	<	>	>
r3	>	>		>	<	>	>	>	>	>	>	>
r4	>	>	<		<	>	>	>	>	>	>	>
r5	>	>	>	>		>	>	>	>	>	>	>
t1	<	<	<	<	<		<	<	<	<	<	<
t2	>	<	<	<	<	>		<	<	<	-	-
t3	>	-	<	<	<	>	>		<	<	>	>
t4	>	>	<	<	<	>	>	>		<	>	>
t5	>	>	<	<	<	>	>	>	>		>	>
AG	>	<	<	<	<	>	-	<	<	<		>
GRASP	>	<	<	<	<	>	-	<	<	<	<	

Tableau 6.11 : Comparaison des méthodes de recherche dans le voisinage selon le critère de dominance stochastique empirique du premier degré

Bien que le graphe du test de dominance stochastique empirique soit surchargé suggérant ainsi l'existence d'une relation d'ordre totale, nous ne pouvons établir une relation d'ordre totale car nous ne sommes pas en mesure d'ordonner toutes les méthodes dans une seule chaîne. Selon le critère de dominance stochastique empirique du premier degré, seul un ordre partiel peut être établi. Dans ce cas, la plus longue chaîne de méthodes ordonnées est de longueur 10. Nous allons présenter les deux plus longues chaînes de méthode que nous avons réussi à trouver. Les méthodes seront placées dans un ordre de préférence croissant :

Chaîne 1 : $t1 < r1 < GRASP < AG < r2 < t4 < t5 < r4 < r3 < r5$

Chaîne 2 : $t1 < r1 < GRASP < AG < t3 < t4 < t5 < r4 < r3 < r5$

6.8. Conclusion de l'analyse empirique des résultats des heuristiques proposées

L'analyse des résultats des méthodes de construction de solution nous a montré que leurs performances ne sont pas satisfaisantes et que les solutions données par ces méthodes ne peuvent pas servir de solutions finales malgré leurs temps de résolution très courts. Ces méthodes ne peuvent être utilisées que dans la génération de solutions initiales pour certaines méthodes de recherche dans le voisinage comme la méthode du recuit-simulé et la méthode de recherche avec tabous. Nous recommandons alors la méthode sérielle avec l'une des règles de séquençement EWRDD ou ERDD pour générer des séquences initiales.

Quant aux résultats des méthodes de recherche dans le voisinage, le critère du temps de résolution ne permet pas de favoriser ni de défavoriser telle ou telle méthode car la différence entre les temps que met l'algorithme avant d'atteindre son critère d'arrêt n'est pas significative. Cependant, les critères de moyennes des déviations par rapport à l'optimal, de dominance empirique et de dominance stochastique empirique du premier degré nous ont permis d'établir des relations d'ordre partielles et de trouver des chaînes de méthodes ordonnées.

Bien que ces relations d'ordre préférentielles ne soient pas totales, une lecture des chaînes de méthodes ordonnées selon les trois critères de comparaison nous révèlent que la méthode « r5 » (cinquième voisinage associé à la méthode du recuit-simulé) semble être la meilleure. En effet, seule la méthode r5 parmi l'ensemble des méthodes de recherche dans le voisinage apparaît comme méthode préférée selon chacun des trois critères. Nous recommandons ainsi d'opter pour cette méthode pour avoir les meilleures solutions à notre problème d'ordonnancement. Pour r5, le pourcentage d'écart moyen par rapport à l'optimum est de 1,92.

Chapitre VII

CONCLUSION

Le présent mémoire aborde un problème d'ordonnancement et d'optimisation de la production dans un environnement de machines multiples et en présence de contraintes sur les ressources matérielles dans une usine d'extrusion plastique. Il s'agit d'un problème de minimisation de la somme pondérée des retards. Ce travail tire son originalité du fait qu'il est l'un des premiers à aborder un problème d'ordonnancement dans une usine d'extrusion. Nous avons pris en considération certaines caractéristiques très fréquentes dans un atelier d'extrusion de plastique telle que les temps de changement d'outils sur les machines lorsqu'un ordre succède à un autre sur une machine donnée. Ce temps de changement d'outils dépend de plusieurs facteurs liés à l'ordre à exécuter comme le matériau utilisé, la matrice à utiliser, la couleur de la matière première, la composition de la matière première, la forme du produit à la sortie de l'extrudeuse (forme droite ou embobinée) et de la nécessité ou non d'une seconde opération tel que l'impression sur le produit final. La difficulté de ce problème réside non seulement dans le temps de réglage qui dépend de la séquence des ordres sur l'extrudeuse mais aussi dans la contrainte de disponibilité des ressources matérielles à savoir les extrudeuses et les matrices.

Dans le cadre de cette recherche, nous avons proposé une approche exacte via une formulation mathématique capable des donner des solutions optimales et une approche heuristique qui repose sur deux méthodes de construction de solution dont une méthode sérielle pour laquelle nous avons construit quatre règles de séquençement, et une autre méthode parallèle, et un ensemble de méthodes de recherche dans le voisinage (recuit-simulé, recherche avec tabous, GRASP et algorithme génétique) avec cinq variantes de voisinage utilisés.

Pour tester les heuristiques développées, nous avons généré un ensemble d'instances tests au nombre de 100 suivant certaines règles de paramétrage dont chacune compte 15 ordres de fabrication. Dans un premier lieu, ces instances de test ont été résolues avec un modèle mathématique, ensuite nous avons appliqué l'ensemble des méthodes heuristiques afin d'évaluer leurs performances en termes de temps de résolution et de déviation par rapport à l'optimum. Pour ce qui est des méthodes de construction de solution, il s'est avéré que les résultats sont de qualité insuffisante et que, à elles seules, ces méthodes ne peuvent donner de bons résultats. Par contre, les solutions des méthodes de recherche dans le voisinage sont de bonne qualité. Pour analyser ces résultats, nous avons opté pour des méthodes statistiques de comparaison à savoir le test de comparaison des moyennes, le test de Mann-Whitney, le test de dominance empirique et le

test de dominance stochastique empirique du premier degré. L'objectif était de trouver une relation d'ordre complète qui nous permet de classer les méthodes avec le type de voisinage associé selon un critère de dominance. Au terme de cette analyse, il n'était pas possible de trouver une relation d'ordre complète car plusieurs méthodes se valaient, cependant une lecture de l'ensemble des résultats des trois tests nous a permis de conclure qu'il est préférable d'opter pour la méthode du recuit-simulé à laquelle nous associons le voisinage V5 tel qu'il est décrit dans la partie 5.2.2 car c'est la seule méthode que l'on trouve en bout de chaîne ordonnée dans les différents tests statistiques de comparaison. Il est à noter aussi que le choix du voisinage est important pour raffiner la qualité de la solution obtenue. Cette méthode a, en effet, généré des résultats plus prometteurs en termes de performances de résolution à savoir la qualité de la solution obtenue. Rappelons que pour la méthode $r5$ nous avons la plus basse moyenne de déviation par rapport à l'optimum qui est de 1,92.

Cependant, il serait plus intéressant d'essayer d'être plus en conformité avec la réalité de l'industrie en ajoutant l'arrivée des ordres de fabrication urgents rendant ainsi le problème de planification des opérations plus dynamique. Nous pouvons aussi penser à la possibilité de défaillance de certaines machines et à la contrainte de la nécessité de finir tous les ordres de fabrication en cours d'exécution avant la fin de la journée de travail de l'usine.

BIBLIOGRAPHIE

- Allahverdi A, J N D Gupta & T Aldowaisan (1999) A review of scheduling research involving setup considerations. *Omega*, 27, 219-239.
- Allahverdi A, C T Ng, T C E Cheng & M Y Kovalyov (2008) A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research*, 187, 985–1032.
- Bean J C (1994) Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization. *ORSA J. on Computing*, 6, 154–160.
- Bellman R (1954) Some applications of the Theory of dynamic programming - a review. *Journal of the Operational Research Society of America*, 2, 275-288.
- Bilge Ü, F Kiraç, M Kurtulan & P Peküing (2004) A Tabu search algorithm for parallel machine total tardiness problem. *Computers and operations research*, 31, 397-414.
- Boctor F F (1996) Resource-constrained project scheduling by simulated annealing. *International Journal of Production Research*, 34, 2335–2351.
- Boctor F F & J Renaud (2015) Scheduling jobs of an extrusion facility, compte rendu de la 11^e conférence internationale de génie industriel. Québec, Canada.
- Cerny V (1985) Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45, 41-51.
- Chen W, Y J Shi, H F Teng, X P Lan, & L C Hu (2010) An efficient hybrid algorithm for resource-constrained project scheduling. *Information Sciences*, 180, 1031-1039.
- Cheng X & C Wu (2006) Hybrid algorithm for complex project scheduling. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 12, 585-589.
- Coffman E G, M R Garey & D S Johnson (1978) An Application of bin-packing to multiprocessor scheduling. *SIAM Journal on Computing*, 7, 1-17.
- Dastidar S G & R Nagi (2005) Scheduling injection molding operations with multiple resource constraints and sequence dependent setup times and costs. *Computers and operations research*, 32, 2987-3005.

- Glass C A, Potts C N & Shade P (1994) Unrelated parallel machine scheduling using local search, *Mathematical and computer modelling* 20 (2), 41-52.
- Glover F (1986) Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. *Computers and operations research*, 13, 533–549.
- Graham R L (1969) Bounds on the performance of scheduling algorithms. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 17, 263-269.
- Hartmann S, D Briskorn (2010) A Survey of Variants and Extensions of the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, 207, 1, 1-14.
- Holland, J H (1975/1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Cambridge, MA: MIT Press. Second edition (1992). (First edition, *University of Michigan Press*, 1975).
- Kelly J E Jr. (1963) The critical path method: Resource planning and scheduling, Ch. 21 in *Industrial Scheduling*, J.F. Muth and G.L. Thompson (eds.), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 347-365.
- Kirkpatrick S, Gelatt C, & Vecchi M (1983) Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671–680
- Ko H H, J Kim, S S Kim & J G Beak (2010) Dispatching rule for non-identical parallel machines with sequence dependent setups and quality restrictions. *Computers and Industrial Engineering*, 59, 448-457.
- Lee Y H & Pinedo M (1997) Scheduling jobs on parallel machines with sequence dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 100, 464-474.
- Logendrana R, B McDonell & B Smucker (2007) Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setups. *Computers and operations research*, 34, 3420 – 3438.
- Mellor P (1966) A Review of Job Shop Scheduling. *Operations Research Quarterly*, 17, 161-171.
- Mokotoff E (2004) An exact algorithm for the identical parallel machine scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 152, 758-769.
- Pinedo M (2002) *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. Springer.

- Pritsker A, L Watters & P Wolfe (1969) Multi-project scheduling with limited resources: a zero-one programming approach. *Management Science*, 16, 93-108.
- Resende Mauricio G C & Celso C. Ribeiro (2003) Handbook of Metaheuristics, chapter Greedy randomized adaptive search procedures, pages 219–249. Kluwer Academic Publishers.
- Rocha PL, M G Ravetti, G R Mateus & P M Pardalos (2008) Exact algorithms for a scheduling problem with unrelated parallel machines and sequence and machine-dependent setup times. *Computers and operations research*, 35, 1250 – 1264.
- Tang Q & L Tang (2008) Heuristic particle swarm optimization for resourceconstrained project scheduling problem in chemical industries. *Chinese Control and Decision Conference*, 1475-1480.
- Tavakkoli-Moghaddam R, F Taheri, M Bazzazi, M Izbad & F Sassani (2009) Design of a genetic algorithm for bi-objective unrelated parallel machines scheduling with sequence-dependent setup time and precedence constraints. *Computers and operations research*, 36, 3224-3230.
- Unlu Y & Mason SJ (2010) Evaluation of mixed integer programming formulations for non-preemptive parallel machine scheduling problems. *Computers and Industrial Engineering*, 58, 785-800.
- Wiest J D (1963) The scheduling of large projects with limited resources. Ph.D. dissertation. Carnegie Institute of Technology.
- Zhang H, X Li, H Li & F Huang (2005) Particle swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling. *Automation in Construction*, 14(3), 393-404.

ANNEXE 1 : Solutions optimales et temps de calcul par GUROBI 6.0.5

Instance	Temps de résolution (en Sec)	Valeur de l'Optimum
1	12,8	66,94
2	3,97	66,37
3	266,79	74,34
4	42,3	109,98
5	150,4	45,88
6	7,55	12,85
7	4,91	27,15
8	14,24	50,13
9	1,84	17,37
10	40,59	52,31
11	1,97	78,27
12	26,56	128,97
13	134,33	99,86
14	32,9	95,74
15	158,06	47,98
16	118,57	105,14
17	542,29	87,26
18	81,87	98,2
19	1,73	106,33
20	19,2	56,96
21	52,97	105,26
22	228,89	44,55
23	48,24	95,6
24	115,33	39
25	50,5	31,57
26	11,5	48,28
27	7,2	45,14
28	4,28	122,16
29	111,46	116,78
30	1002,52	107,7
31	1,49	36,5
32	47,7	87,55
33	276,28	186,62
34	44,75	61,98
35	203,92	101,92
36	1039,52	155,49
37	7,75	34,95
38	5,96	55,81
39	1528,93	100,24
40	81,99	58,61
41	192,69	116,27
42	342,83	121,04
43	168,27	40,26
44	225,87	66,55
45	1,32	17,1
46	791,34	102,12
47	177,25	41,63
48	44,23	65,47
49	169,75	68,49

Instance	Temps de résolution (en Sec)	Valeur de l'Optimum
50	64,55	184,86
51	5,57	43,65
52	29,26	48,08
53	33,97	76,96
54	28,43	64,1
55	381,1	137,54
56	1,25	123,47
57	6,38	31,92
58	3,37	45,37
59	27,51	74,4
60	103,19	63,37
61	0,67	75,16
62	2364,62	84,04
63	75,75	78,7
64	455,53	117,53
65	82,62	113,36
66	20,16	132,25
67	154,21	95,66
68	91,47	51,32
69	60,64	51,66
70	206,91	105,69
71	44,34	55,18
72	34,47	168,44
73	126,98	85,55
74	331,74	69,2
75	9,72	144,25
76	22,65	77,29
77	1809,95	157,66
78	27,09	60,8
79	33,82	20,94
80	17,22	70,05
81	2,88	19,41
82	6,31	33,79
83	10,76	109,07
84	150,49	39,81
85	22,58	27,03
86	25,23	61,34
87	2,24	95,53
88	238,68	119,58
89	6,52	64,06
90	28,49	132,56
91	194,71	128,78
92	6,91	73,81
93	1407,74	62,36
94	277,63	114,91
95	53,22	78,47
96	62,05	72,65
97	51,8	35,63
98	73,7	122,52
99	3,17	56,72
100	10,06	32,33

ANNEXE 2 : Résultats des méthodes de construction

Instance	Méthode sérielle								Méthode parallèle	
	EDD	Δ%	EWDD	Δ%	ERDD	Δ%	EWRDD	Δ%	Parallèle	Δ%
1	121,06	80,85	94,58	41,29	141,29	111,07	97,04	44,97	131,88	97,01
2	139,12	109,61	69,36	4,51	129,8	95,57	134,85	103,18	104,61	57,62
3	138,25	85,97	116,43	56,62	143,29	92,75	143,29	92,75	119,43	60,65
4	139,4	26,75	120,72	9,77	139,14	26,51	126,72	15,22	152,1	38,3
5	90,22	96,64	91,33	99,06	90,37	96,97	90,91	98,15	100,74	119,57
6	40,97	218,83	17,76	38,21	61,51	378,68	34,9	171,6	140,02	989,65
7	49,6	82,69	59,34	118,56	47,27	74,11	42,93	58,12	66,39	144,53
8	115,38	130,16	101,45	102,37	64,71	29,08	138,98	177,24	122,15	143,67
9	37,46	115,66	90,99	423,83	35,51	104,43	35,51	104,43	188,5	985,2
10	85,78	63,98	58,06	10,99	96,32	84,13	68,3	30,57	77,79	48,71
11	121,02	54,62	83,85	7,13	83,85	7,13	83,85	7,13	107,91	37,87
12	189,93	47,27	157,54	22,15	189,93	47,27	189,93	47,27	157,54	22,15
13	173,82	74,06	123,16	23,33	144,66	44,86	132,49	32,68	168,45	68,69
14	145,27	51,73	107,89	12,69	101,56	6,08	108,15	12,96	104,91	9,58
15	87,26	81,87	50,53	5,31	63,15	31,62	60,87	26,87	145,56	203,38
16	230,54	119,27	184,83	75,79	201,34	91,5	183,06	74,11	256,85	144,29
17	93,06	6,65	129,25	48,12	98,82	13,25	135,01	54,72	148,88	70,62
18	137,47	39,99	131,57	33,98	137,47	39,99	136,58	39,08	125,19	27,48
19	156,22	46,92	112,57	5,87	137,43	29,25	114,1	7,31	171,16	60,97
20	69,52	22,05	79,78	40,06	59,21	3,95	65,3	14,64	128,95	126,39
21	204,33	94,12	120,27	14,26	168,13	59,73	153,33	45,67	233	121,36
22	126,96	184,98	94,84	112,88	137,01	207,54	91,72	105,88	85,98	93
23	267,88	180,21	135,32	41,55	265,26	177,47	143,72	50,33	193,44	102,34
24	108,6	178,46	116,21	197,97	116,09	197,67	94,61	142,59	119,09	205,36
25	43,37	37,38	52,58	66,55	43,37	37,38	52,58	66,55	61,07	93,44
26	91,85	90,24	84,17	74,34	104,36	116,16	65,44	35,54	63,28	31,07
27	113,92	152,37	79,55	76,23	118,67	162,89	118,67	162,89	145,03	221,29
28	180,28	47,58	183,91	50,55	181,89	48,89	168,5	37,93	188,87	54,61
29	140,62	20,41	170,12	45,68	236,94	102,89	236,94	102,89	184,43	57,93
30	141,91	31,76	157,35	46,1	150,78	40	157,35	46,1	175,42	62,88
31	36,5	0	36,5	0	36,5	0	36,5	0	50,26	37,7
32	163,56	86,82	98,27	12,24	112,84	28,89	112,84	28,89	112,84	28,89
33	362,99	94,51	275,81	47,79	409,2	119,27	300,43	60,98	363,63	94,85
34	146,27	136	102,61	65,55	139,33	124,8	102,61	65,55	159,68	157,63
35	173,94	70,66	158,94	55,95	173,94	70,66	172,26	69,01	161,47	58,43
36	191,53	23,18	184,43	18,61	220,79	42	207,64	33,54	218,1	40,27
37	107,54	207,7	107,5	207,58	94,05	169,1	90,19	158,05	101,18	189,5
38	65,66	17,65	62,21	11,47	65,66	17,65	55,81	0	76,69	37,41
39	173,95	73,53	166,95	66,55	149,16	48,8	166,95	66,55	303,49	202,76
40	61,94	5,68	61,94	5,68	81,17	38,49	61,94	5,68	201,85	244,4
41	199,23	71,35	216,92	86,57	266,97	129,61	215,8	85,6	166,89	43,54
42	168,86	39,51	132,8	9,72	168,86	39,51	126,4	4,43	207,55	71,47
43	68,45	70,02	47,18	17,19	112,85	180,3	47,18	17,19	88,81	120,59
44	99,57	49,62	108,05	62,36	99,57	49,62	107,23	61,13	136,82	105,59
45	66,67	289,88	34,23	100,18	70,87	314,44	67,88	296,96	72,03	321,23
46	158,48	55,19	133,64	30,87	146,38	43,34	146,38	43,34	213,67	109,23
47	61,05	46,65	47,23	13,45	67,23	61,49	54,16	30,1	134,58	223,28
48	70,72	8,02	93,29	42,49	103,71	58,41	93,29	42,49	90,31	37,94
49	84,1	22,79	84,1	22,79	73,01	6,6	73,01	6,6	150,22	119,33

Instance	Méthode sérielle								Méthode parallèle	
	EDD	$\Delta\%$	EWDD	$\Delta\%$	ERDD	$\Delta\%$	EWRDD	$\Delta\%$	Parallèle	$\Delta\%$
50	458,81	148,19	258,4	39,78	396,75	114,62	298,99	61,74	465,63	151,88
51	48,42	10,93	91,22	108,98	106,91	144,93	82,66	89,37	93,84	114,98
52	119,12	147,75	88,44	83,94	88,11	83,26	91,58	90,47	90,52	88,27
53	85,01	10,46	98,72	28,27	76,96	0	78,03	1,39	158,73	106,25
54	76,48	19,31	110,67	72,65	75,93	18,46	67,01	4,54	83,1	29,64
55	170,75	24,15	177,43	29	240,57	74,91	240,57	74,91	173,74	26,32
56	271,45	119,85	219,17	77,51	189,87	53,78	192,45	55,87	192,45	55,87
57	63,06	97,56	65,3	104,57	76,47	139,57	68,07	113,25	147,83	363,13
58	89,89	98,13	105,78	133,15	107,65	137,27	127,93	181,97	112,77	148,56
59	142,65	91,73	117,83	58,37	148,72	99,89	89,47	20,26	191,7	157,66
60	157,99	149,31	95,96	51,43	124,84	97	124,84	97	219,97	247,12
61	106,33	41,47	127,64	69,82	81,22	8,06	118,74	57,98	160,76	113,89
62	114,92	36,74	122,81	46,13	139,61	66,12	119,34	42	162,38	93,22
63	216,34	174,89	163,84	108,18	216,34	174,89	177,34	125,34	185,6	135,83
64	209,71	78,43	278,23	136,73	201,79	71,69	209,71	78,43	201,79	71,69
65	228,39	101,47	141,41	24,74	215,65	90,23	182,81	61,26	130,36	15
66	156,41	18,27	151,82	14,8	172,01	30,06	155,38	17,49	224,99	70,12
67	198,11	107,1	135,47	41,62	242,49	153,49	210,46	120,01	185,58	94
68	69,87	36,15	71,88	40,06	127,98	149,38	127,98	149,38	127,98	149,38
69	83,35	61,34	104,88	103,02	83,35	61,34	94,64	83,2	97,79	89,3
70	192,62	82,25	150,37	42,27	181,34	71,58	208,92	97,67	175,46	66,01
71	74,75	35,47	74,18	34,43	56,68	2,72	72,75	31,84	81,35	47,43
72	192,45	14,25	192,45	14,25	210,98	25,26	190,93	13,35	242,47	43,95
73	107,5	25,66	107,5	25,66	109,1	27,53	107,5	25,66	124,55	45,59
74	110,58	59,8	109,95	58,89	115,26	66,56	95,52	38,03	121,57	75,68
75	232,72	61,33	168,75	16,98	220,29	52,71	221,04	53,23	272,21	88,71
76	78,79	1,94	87,61	13,35	122,45	58,43	78,37	1,4	247,2	219,83
77	317,58	101,43	235,09	49,11	212,89	35,03	197,14	25,04	212,89	35,03
78	119,28	96,18	109,09	79,42	114,94	89,05	107,55	76,89	91,41	50,35
79	53,3	154,54	42,39	102,44	52,97	152,96	45,37	116,67	90,83	333,76
80	80,43	14,82	86,47	23,44	119,31	70,32	80,43	14,82	223,44	218,97
81	34,1	75,68	59,02	204,07	32,05	65,12	50,36	159,45	29,49	51,93
82	79,54	135,4	70,31	108,08	74,79	121,34	86,62	156,35	110,78	227,85
83	111,01	1,78	115,83	6,2	111,01	1,78	111,01	1,78	109,07	0
84	69,46	74,48	51,06	28,26	134,89	238,83	123,28	209,67	67,7	70,06
85	68,37	152,94	52,25	93,3	112,83	317,43	52,25	93,3	82,63	205,7
86	100,11	63,21	140,52	129,08	130,36	112,52	87,98	43,43	215,14	250,73
87	117,92	23,44	132,15	38,33	142,99	49,68	142,99	49,68	159,88	67,36
88	222,04	85,68	159,86	33,68	222,04	85,68	176,53	47,63	164,03	37,17
89	108,34	69,12	108,34	69,12	207,64	224,13	101,05	57,74	260,45	306,57
90	154,01	16,18	171,77	29,58	162,76	22,78	162,76	22,78	301,76	127,64
91	278,72	116,43	161,39	25,32	255,77	98,61	232,28	80,37	416,88	223,71
92	162,4	120,02	98,22	33,07	162,4	120,02	162,4	120,02	184,07	149,38
93	83,47	33,85	115,73	85,58	107,15	71,82	117,67	88,69	104,15	67,01
94	183,05	59,3	171,25	49,03	183,05	59,3	174,94	52,24	200,49	74,48
95	138,72	76,78	119,24	51,96	187,2	138,56	187,2	138,56	189,4	141,37
96	179,8	147,49	73,41	1,05	179,8	147,49	116,61	60,51	186,81	157,14
97	60,43	69,6	55,92	56,95	56,26	57,9	56,26	57,9	151,47	325,12
98	210,3	71,65	177,64	44,99	210,3	71,65	193,95	58,3	233,24	90,37
99	110,31	94,48	76,6	35,05	108,05	90,5	108,05	90,5	71,56	26,16
100	49,93	54,44	43,4	34,24	43,6	34,86	43,6	34,86	41,99	29,88

ANNEXE 3 : Résultats des méthodes de recherche dans le voisinage en termes de valeurs de la fonction objectif

Instance	Optimum	Recuit-simulé avec le voisinage					Recherche tabous avec le voisinage					AG	GRASP
		V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5		
1	66,94	73,61	66,94	66,94	66,94	66,94	84,02	68,56	66,94	66,94	66,94	68,56	68,56
2	66,37	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84
3	74,34	78,48	75,78	75,78	75,78	75,78	82,65	76,03	76,03	75,78	75,78	78,92	78,92
4	109,98	113,01	112,21	111,46	111,46	111,46	121,09	111,46	111,69	112,21	112,21	120,72	111,46
5	45,88	60	47,38	47,38	47,38	47,38	60	47,38	47,38	47,38	47,38	47,38	47,38
6	12,85	13,85	13,85	13,85	13,2	13,2	13,85	13,85	13,85	13,2	13,2	13,85	14,7
7	27,15	29,55	28,65	28,65	28,65	28,65	29,98	28,65	29,55	28,65	28,65	28,65	28,65
8	50,13	52,06	50,49	50,13	50,13	50,13	50,49	50,13	50,13	50,13	50,13	50,13	50,13
9	17,37	17,37	17,37	17,37	17,37	17,37	18,78	17,37	17,37	17,37	17,37	17,37	17,37
10	52,31	54,32	54,32	54,32	54,32	54,32	56,69	56,69	54,32	54,32	54,32	54,32	55,31
11	78,27	81,27	81,27	81,27	81,27	81,27	83,85	81,27	81,27	81,27	81,27	81,27	81,27
12	128,97	132,72	132,72	132,72	132,72	132,72	137,73	132,72	132,72	132,72	132,72	132,72	132,72
13	99,86	103,46	103,46	103,46	103,46	103,46	103,46	103,46	103,46	103,46	103,46	105,49	103,46
14	95,74	101,11	100,99	100,99	100,99	100,99	101,56	100,99	100,99	100,99	100,99	100,99	100,99
15	47,98	50,77	49,5	49,5	49,5	49,5	60,87	49,5	49,52	49,5	49,5	49,52	49,5
16	105,14	109,2	107,66	107,66	107,66	107,66	128,41	118,51	107,66	107,66	107,66	110,2	110,2
17	87,26	87,26	87,26	87,26	87,26	87,26	95,65	89,23	89,63	87,26	87,26	87,26	87,26
18	98,2	99,95	98,95	98,95	98,95	98,95	99,95	99,95	99,7	98,95	98,95	99,95	99,95
19	106,33	111,55	106,33	106,33	106,33	106,33	106,33	106,33	106,33	106,33	106,33	106,33	106,33
20	56,96	63,66	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21
21	105,26	107,85	107,96	105,29	105,29	105,29	135,06	107,96	105,29	105,29	105,29	105,29	105,36
22	44,55	50,59	48,3	48,3	48,3	48,3	53,45	48,3	48,3	48,3	48,3	50,59	48,3
23	95,6	97,21	97,21	97,21	97,21	97,21	97,21	97,21	97,21	97,21	97,21	97,21	97,21
24	39	41,21	41,21	41,21	41,21	41,21	44,29	41,21	41,21	41,21	41,21	41,21	41,21
25	31,57	31,57	31,57	31,57	31,57	31,57	32,13	31,57	31,57	31,57	31,57	32,13	31,57
26	48,28	50,93	48,49	48,49	48,49	48,49	48,49	48,49	48,49	48,49	48,49	48,49	48,49
27	45,14	45,14	45,14	45,14	45,14	45,14	45,14	45,14	45,14	45,14	45,14	45,14	45,14
28	122,16	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66
29	116,78	121,46	122,08	121,46	121,46	121,46	175,37	121,46	121,46	121,46	121,46	121,69	121,46
30	107,7	109,2	109,2	109,2	109,2	109,2	127,7	109,2	109,2	109,2	109,2	110,3	109,2
31	36,5	36,5	36,5	36,5	36,5	36,5	36,5	36,5	36,5	36,5	36,5	36,5	36,5
32	87,55	87,55	87,55	87,55	87,55	87,55	98,27	87,55	87,55	87,55	87,55	87,55	96,91
33	186,62	188,05	187,41	187,41	187,41	187,41	203,69	188,05	187,41	187,41	187,41	188,05	188,05
34	61,98	75,71	64,98	64,98	64,98	64,98	67,98	64,98	64,98	64,98	64,98	67,74	64,98
35	101,92	105,14	105,14	105,14	105,14	105,14	108,69	105,14	106,3	105,14	105,14	105,14	105,14
36	155,49	160,74	160,74	160,74	160,74	160,74	160,74	160,74	160,74	160,74	160,74	160,74	160,74
37	34,95	46,28	34,95	34,95	34,95	34,95	46,28	34,95	34,95	34,95	34,95	34,95	34,95
38	55,81	55,81	55,81	55,81	55,81	55,81	55,81	55,81	55,81	55,81	55,81	55,81	55,81
39	100,24	106,89	105,39	105,39	105,39	105,39	110,84	111,22	105,39	106,89	105,39	106,89	105,39
40	58,61	59,62	59,62	59,62	59,62	59,62	61,94	59,62	59,62	59,62	59,62	59,62	59,62
41	116,27	116,33	116,33	116,33	116,33	116,33	144,57	117,59	116,33	116,33	116,33	116,33	116,33
42	121,04	124,61	124,61	124,61	124,61	124,61	124,61	124,61	124,61	124,61	124,61	124,61	124,61
43	40,26	41,13	41,48	41,13	41,13	41,13	41,87	41,13	41,13	41,13	41,13	42,81	41,48
44	66,55	73,49	67,3	67,3	67,3	67,3	67,3	67,3	67,3	67,3	67,3	67,3	67,3
45	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1
46	102,12	108,2	105,53	105,53	105,53	105,53	108,2	106,12	105,53	108,83	105,53	106,12	106,12
47	41,63	41,63	41,63	41,63	41,63	41,63	47,23	41,63	41,63	41,63	41,63	41,63	41,63
48	65,47	70,62	69,97	69,97	69,97	69,97	69,97	69,97	69,97	69,97	69,97	69,97	69,97

Instance	Optimum	Recuit-simulé avec le voisinage					Recherche tabous avec le voisinage					AG	GRASP
		V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5		
49	68,49	70,15	68,49	68,49	68,49	68,49	73,01	71,71	68,49	71,71	71,71	68,49	70,95
50	184,86	192,56	187,39	187,39	187,39	187,39	187,39	190,25	187,39	187,39	187,39	191,34	187,39
51	43,65	50,21	43,65	43,65	43,65	43,65	49,26	43,65	43,65	43,65	43,65	43,65	43,65
52	48,08	48,08	48,08	48,08	48,08	48,08	60,27	48,08	48,08	48,08	48,08	48,08	48,08
53	76,96	76,96	76,96	76,96	76,96	76,96	76,96	76,96	76,96	76,96	76,96	76,96	76,96
54	64,1	64,85	64,85	64,85	64,85	64,85	67,01	67,01	64,85	64,85	64,85	64,85	64,85
55	137,54	140,11	140,11	140,11	140,11	140,11	154,32	140,11	140,11	140,11	140,11	140,11	140,11
56	123,47	127,89	123,47	123,47	123,47	123,47	128,63	128,63	123,47	123,47	123,47	127,89	128,63
57	31,92	33,05	32,3	32,3	32,3	32,3	33,05	33,05	32,3	32,3	32,3	33,05	32,3
58	45,37	51,56	45,37	45,37	45,37	45,37	49,47	45,37	45,37	45,37	45,37	45,37	45,37
59	74,4	85,46	83,4	83,4	83,4	83,4	83,4	83,4	83,4	83,4	83,4	83,4	83,4
60	63,37	74,29	63,87	63,87	63,87	63,87	80,83	63,87	63,87	63,87	63,87	63,87	63,87
61	75,16	75,66	75,66	75,16	75,16	75,16	89,64	75,16	75,16	75,16	75,16	75,66	75,16
62	84,04	95,53	85,54	85,54	85,54	85,54	110,79	85,54	85,54	85,54	85,54	85,54	93,53
63	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	91,03	78,7	78,7	78,7	78,7	79,67	80,16
64	117,53	126,79	119,78	119,78	119,78	119,78	148,85	119,78	119,78	119,78	119,78	119,78	119,78
65	113,36	120,86	120,86	120,86	120,86	120,86	120,86	120,86	120,86	120,86	120,86	120,86	120,86
66	132,25	133,53	133,53	133,53	133,53	133,53	133,53	133,53	133,53	133,53	133,53	133,53	133,53
67	95,66	110,44	97,75	97,75	97,75	97,75	110,44	98,09	97,75	97,75	97,75	97,75	97,75
68	51,32	59,11	54,9	54,32	54,32	54,32	63,81	59,11	54,32	54,32	54,32	59,11	59,11
69	51,66	59,74	52,41	52,41	52,41	52,41	59,74	53,16	56,22	52,41	52,41	53,16	52,41
70	105,69	114,54	113,94	113,94	113,94	113,94	121,13	113,94	114,54	113,94	113,94	113,94	114,54
71	55,18	56,68	56,68	56,68	56,68	56,68	56,68	56,68	56,68	56,68	56,68	56,68	56,68
72	168,44	172,66	172,66	172,66	172,66	172,66	172,66	172,66	172,66	172,66	172,66	172,66	172,66
73	85,55	86,32	86,32	86,32	86,32	86,32	104,83	86,32	86,32	86,32	86,32	86,32	86,32
74	69,2	74,21	69,2	69,2	69,2	69,2	75,17	70,63	71,06	69,2	69,2	69,2	69,2
75	144,25	144,94	144,94	144,94	144,94	144,94	171,48	144,94	144,94	144,94	144,94	144,94	144,94
76	77,29	78,37	77,36	77,36	77,36	77,36	78,37	77,36	77,36	77,36	77,36	77,36	77,36
77	157,66	164,28	159,16	159,16	159,16	159,16	196,55	159,16	163,82	159,16	159,16	159,16	159,16
78	60,8	62,3	60,8	60,8	60,8	60,8	62,3	60,8	60,8	60,8	60,8	61,99	60,8
79	20,94	25,71	22,6	21,69	21,69	21,69	26,98	25,46	21,69	21,69	21,69	21,69	21,69
80	70,05	70,05	70,05	70,05	70,05	70,05	74,17	71,55	72,8	70,05	70,05	70,05	70,05
81	19,41	19,41	19,41	19,41	19,41	19,41	22,85	19,41	19,41	19,41	19,41	19,41	19,41
82	33,79	40,34	34,54	34,54	34,54	34,54	43,55	34,54	34,54	34,54	34,54	34,54	34,54
83	109,07	109,07	109,07	109,07	109,07	109,07	109,07	109,07	109,07	109,07	109,07	109,07	109,07
84	39,81	58,6	39,81	39,81	42,06	39,81	67,24	45,1	39,81	42,06	42,06	39,81	39,81
85	27,03	36,02	27,03	27,31	27,31	27,31	27,31	27,31	27,31	27,31	27,31	27,03	27,31
86	61,34	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	63,7	61,45
87	95,53	99,24	97,72	97,72	97,72	97,72	110,9	97,72	99,24	97,72	97,72	97,72	97,72
88	119,58	124,08	124,08	124,08	124,08	124,08	154,2	124,08	124,08	124,08	124,08	124,08	124,08
89	64,06	75,43	66,31	65,2	66,31	65,2	75,43	66,31	65,56	66,31	66,31	65,2	65,2
90	132,56	134,81	134,81	134,81	134,81	134,81	154,01	134,81	134,81	134,81	134,81	134,81	134,81
91	128,78	146,86	133,59	133,59	133,59	133,59	141,73	133,59	133,59	133,59	133,59	133,59	133,59
92	73,81	74,88	74,88	74,88	74,88	74,88	77,01	74,88	74,88	74,88	74,88	74,88	74,88
93	62,36	65,12	64,4	63,86	63,86	63,86	65,82	63,86	63,86	63,86	63,86	63,86	63,86
94	114,91	119,41	118,66	118,66	118,66	118,66	118,66	118,66	118,66	118,66	118,66	118,66	118,66
95	78,47	89,76	86,45	78,47	80,95	78,47	89,76	78,47	78,47	78,47	78,47	78,47	87,78
96	72,65	73,4	73,4	73,4	73,4	73,4	74,98	73,4	73,4	73,4	73,4	73,4	73,4
97	35,63	37,13	36,98	36,38	36,38	36,38	37,13	36,98	36,38	36,38	36,38	36,98	36,38
98	122,52	122,52	122,52	122,52	122,52	122,52	122,52	122,52	122,52	122,52	122,52	122,52	122,52
99	56,72	58,18	56,72	56,72	56,72	56,72	72,44	56,72	56,72	56,72	56,72	56,72	56,72
100	32,33	33,48	33,48	33,48	33,48	33,48	43,6	33,48	33,48	33,48	33,48	33,48	33,48

ANNEXE 4 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode r1

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	78,79	78,79	78,79	73,61	17,7	17,7	17,7	9,96	33,9	70,62	91,14	130,21
2	66,84	66,84	66,84	66,84	0,71	0,71	0,71	0,71	23,38	38,31	59,86	82,58
3	117,55	94,63	80,42	80,42	58,12	27,29	8,18	8,18	117,87	221,3	331,33	408,93
4	112,21	112,21	112,21	112,21	2,03	2,03	2,03	2,03	49,74	82,04	131,23	172,94
5	50,72	48,88	48,88	47,38	10,55	6,54	6,54	3,27	23,47	48,34	72,65	91,51
6	15,42	15,42	15,42	15,42	20	20	20	20	36,21	81,91	120,92	148,62
7	29,55	29,55	29,55	29,55	8,84	8,84	8,84	8,84	38,33	86,44	137,39	194,84
8	76,3	75,25	70,44	52,6	52,2	50,11	40,51	4,93	26,55	51,04	72,22	101,66
9	18,95	18,95	17,37	17,37	9,1	9,1	0	0	13,22	24,61	38,08	49,78
10	55,31	54,44	54,44	54,44	5,74	4,07	4,07	4,07	52,25	94,28	138,86	171,49
11	83,85	83,85	83,85	81,27	7,13	7,13	7,13	3,83	8,31	16,97	26,38	35,41
12	137,73	137,73	137,73	132,72	6,79	6,79	6,79	2,91	56,55	84,74	128,22	174,75
13	124,63	121,37	121,37	103,46	24,8	21,54	21,54	3,61	44,15	101,63	149,25	196,59
14	103	103	103	103	7,58	7,58	7,58	7,58	19,78	48,49	65,09	79,63
15	60,87	60,87	60,87	50,77	26,87	26,87	26,87	5,81	21,22	44,52	82,04	107,42
16	147,87	138,34	138,34	109,2	40,64	31,58	31,58	3,86	33,4	75,44	122,87	176,95
17	96,73	96,73	96,73	96,73	10,85	10,85	10,85	10,85	76,65	181,85	269,68	323,82
18	128,8	128,8	128,8	99,95	31,16	31,16	31,16	1,78	49,98	85,18	134,72	191,2
19	107,83	107,83	106,33	106,33	1,41	1,41	0	0	40,55	91,42	142,52	179,07
20	59,21	59,21	59,21	59,21	3,95	3,95	3,95	3,95	21,94	46,96	71,3	98,95
21	114,79	114,79	113,11	108,03	9,05	9,05	7,46	2,63	30,26	61,12	91,47	119,8
22	59,01	59,01	59,01	50,59	32,46	32,46	32,46	13,56	37,63	61,68	97,07	135,64
23	97,9	97,9	97,21	97,21	2,41	2,41	1,68	1,68	12,76	24,54	35,7	47,57
24	68,63	44,29	44,29	41,21	75,97	13,56	13,56	5,67	74,15	121,38	168,91	224,35
25	48,63	43,54	43,43	33,97	54,04	37,92	37,57	7,6	18,95	34,78	50,91	69,68
26	48,49	48,49	48,49	48,49	0,43	0,43	0,43	0,43	9,79	19,66	29,24	39,41
27	69,87	64,49	57,67	45,14	54,79	42,87	27,76	0	8,94	17,76	26,68	35,74
28	166,58	123,66	123,66	123,66	36,36	1,23	1,23	1,23	9,87	27,36	40,88	58,48
29	131,72	131,72	131,72	131,72	12,79	12,79	12,79	12,79	29,17	44,7	64,04	87,57
30	115,44	115,44	115,44	110,3	7,19	7,19	7,19	2,41	107,59	207,61	296,18	392,84
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	17,8	32,07	47,19	66,86
32	112,84	98,27	98,27	87,55	28,89	12,24	12,24	0	19,54	33,1	51,69	69,08
33	192,62	192,62	192,62	188,05	3,22	3,22	3,22	0,77	41,58	89,51	139,61	193,26

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	83,14	83,14	70,9	70,9	34,14	34,14	14,39	14,39	40,67	87,4	141,83	184,19
35	105,14	105,14	105,14	105,14	3,16	3,16	3,16	3,16	17,07	45,28	81,88	116,12
36	162,17	160,74	160,74	160,74	4,3	3,38	3,38	3,38	77,84	149,64	273,43	389,85
37	53,8	53,8	46,28	46,28	53,93	53,93	32,42	32,42	15,42	35,14	58,02	79,89
38	55,81	55,81	55,81	55,81	0	0	0	0	14,3	24,01	35,81	46,54
39	137,7	137,7	108,99	107,91	37,37	37,37	8,73	7,65	62,35	132,53	195,4	251,81
40	61,94	61,94	61,94	61,94	5,68	5,68	5,68	5,68	21,53	41,19	83,03	104,13
41	152,65	152,65	152,65	122,4	31,29	31,29	31,29	5,27	51,79	95,18	135,55	170,15
42	126,4	126,4	126,29	124,61	4,43	4,43	4,34	2,95	13,01	28,27	43,64	58,79
43	41,87	41,87	41,87	41,87	4	4	4	4	81,04	164,58	232,3	311,49
44	90,29	90,29	67,84	67,84	35,67	35,67	1,94	1,94	30,29	64,47	92,54	128,82
45	32,96	32,96	17,85	17,85	92,75	92,75	4,39	4,39	19,82	56,89	87,31	124,82
46	111,32	108,83	108,2	108,2	9,01	6,57	5,95	5,95	94,02	183,21	254,84	348,03
47	41,63	41,63	41,63	41,63	0	0	0	0	42,13	78,41	125,11	171,41
48	71,69	69,97	69,97	69,97	9,5	6,87	6,87	6,87	13,48	27,21	40,28	54,16
49	73,01	71,71	71,71	71,71	6,6	4,7	4,7	4,7	25,55	77,96	109,06	173,49
50	200,33	200,33	198,8	198,8	8,37	8,37	7,54	7,54	60,47	117,52	160,63	208,01
51	47,83	47,83	47,83	47,83	9,58	9,58	9,58	9,58	10,41	21,76	34,46	49,81
52	78,56	64,1	64,1	64,1	63,39	33,32	33,32	33,32	21,66	47,82	71,02	92,75
53	78,03	78,03	76,96	76,96	1,39	1,39	0	0	11,38	23,37	40,01	57,11
54	67,01	66,08	66,08	66,08	4,54	3,09	3,09	3,09	23,58	37,89	51,51	71,87
55	140,11	140,11	140,11	140,11	1,87	1,87	1,87	1,87	68,29	143,54	215,98	299,22
56	161,65	161,65	160,28	133,66	30,92	30,92	29,81	8,25	9,59	23,38	37,12	47,84
57	33,05	33,05	33,05	33,05	3,54	3,54	3,54	3,54	43,13	82,37	133,94	164,92
58	69,22	69,22	51,56	45,37	52,57	52,57	13,64	0	13,67	28,3	45,82	57,54
59	87,58	87,58	87,58	83,4	17,72	17,72	17,72	12,1	38,4	103,45	170,69	200,1
60	91,79	91,79	91,79	74,29	44,85	44,85	44,85	17,23	33,73	65,11	105,52	135,44
61	75,91	75,91	75,91	75,91	1	1	1	1	32,2	61,81	88,1	104,27
62	109,8	109,8	103,83	103,83	30,65	30,65	23,55	23,55	61,99	126,35	171,69	228
63	86,1	86,1	86,1	81,13	9,4	9,4	9,4	3,09	12,18	26,16	38,9	53,16
64	127,91	124,93	124,93	124,93	8,83	6,3	6,3	6,3	33,6	60,19	81,02	97,57
65	135,36	120,86	120,86	120,86	19,41	6,62	6,62	6,62	16,08	28,46	44,3	57
66	137,15	137,15	137,15	137,15	3,71	3,71	3,71	3,71	10,04	19,37	28,22	37,03
67	119,19	110,44	98,09	98,09	24,6	15,45	2,54	2,54	34,28	55,23	86,92	104,13
68	59,11	59,11	59,11	59,11	15,18	15,18	15,18	15,18	71,77	131,73	195,08	264,61
69	84,08	67,56	67,56	67,56	62,76	30,78	30,78	30,78	14,94	32,18	49,08	69,59
70	121,13	115,69	115,69	113,94	14,61	9,46	9,46	7,81	43,99	106,64	132,83	180,05

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	61,66	56,68	56,68	56,68	11,74	2,72	2,72	2,72	35,13	65,98	103,44	143,39
72	181,58	176,36	174,13	173,6	7,8	4,7	3,38	3,06	22,73	59,12	104,28	153,04
73	104,83	86,32	86,32	86,32	22,54	0,9	0,9	0,9	18,54	42,52	63,54	86,65
74	69,2	69,2	69,2	69,2	0	0	0	0	45,54	95,77	136,05	175,09
75	195,99	169,16	149,27	149,27	35,87	17,27	3,48	3,48	40,64	59,92	92,35	129,72
76	78,37	78,37	78,37	77,36	1,4	1,4	1,4	0,09	24,49	47,19	71,24	91,92
77	178,16	168,2	168,2	168,2	13	6,69	6,69	6,69	64,54	101,77	144,44	172,48
78	62,3	62,3	62,3	62,3	2,47	2,47	2,47	2,47	28,58	66,15	98,07	123,78
79	26,32	26,32	25,46	25,46	25,69	25,69	21,59	21,59	35,66	63,22	106,55	159,37
80	74,3	70,8	70,8	70,8	6,07	1,07	1,07	1,07	39,49	79,5	117,38	150,6
81	19,41	19,41	19,41	19,41	0	0	0	0	21,2	41	54,98	72,57
82	44,58	44,58	38,63	35,5	31,93	31,93	14,32	5,06	11,24	22,05	32,69	44,47
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	8,28	16,14	23,75	32,08
84	60,56	60,56	60,56	58,6	52,12	52,12	52,12	47,2	41,73	77,54	148,37	182,27
85	47,69	47,03	36,02	36,02	76,43	73,99	33,26	33,26	44,24	77,45	128,29	160,11
86	80,63	61,45	61,45	61,45	31,45	0,18	0,18	0,18	31,9	86,98	104,86	128,77
87	110,9	99,24	99,24	99,24	16,09	3,88	3,88	3,88	10,83	21,66	31,8	42,15
88	139,75	139,75	124,08	124,08	16,87	16,87	3,76	3,76	56,03	126,08	182,21	253,41
89	101,05	82,3	75,43	75,43	57,74	28,47	17,75	17,75	44,15	88,76	120,32	147,56
90	149,43	141,95	141,95	134,81	12,73	7,08	7,08	1,7	33,64	73,9	96,03	122,55
91	133,59	133,59	133,59	133,59	3,74	3,74	3,74	3,74	43,17	69,24	110,78	200,63
92	87,92	87,92	87,92	76,44	19,12	19,12	19,12	3,56	35,26	71,68	106,77	138,58
93	77,54	77,54	72,61	66,53	24,34	24,34	16,44	6,69	31,82	53,61	81,4	113,99
94	119,41	119,41	119,41	119,41	3,92	3,92	3,92	3,92	24,86	40,75	65,57	82,9
95	95,73	95,73	95,73	89,76	22	22	22	14,39	35,36	66,34	111,26	152,48
96	77,8	75,94	75,94	73,4	7,09	4,53	4,53	1,03	20,86	38,97	53,11	66,4
97	37,13	37,13	37,13	37,13	4,21	4,21	4,21	4,21	95,33	199,66	273,21	356,61
98	146	122,52	122,52	122,52	19,16	0	0	0	37,23	90,94	155,68	195,43
99	66,64	66,64	62,54	58,18	17,49	17,49	10,26	2,57	12,2	34,78	51,08	63,88
100	40,31	40,31	33,48	33,48	24,68	24,68	3,56	3,56	12,88	25,35	51,09	76,21

ANNEXE 5 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode r2

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	73,61	73,61	73,61	66,94	9,96	9,96	9,96	0	29,76	54,92	90,01	117,54
2	111,32	66,84	66,84	66,84	67,73	0,71	0,71	0,71	16,14	37,69	59,36	81,76
3	83,38	83,38	79,51	79,51	12,16	12,16	6,95	6,95	116,68	203,09	305,9	404,91
4	113,01	113,01	113,01	113,01	2,76	2,76	2,76	2,76	38,23	91,88	147,42	195,8
5	66,75	49,5	48,88	48,88	45,49	7,89	6,54	6,54	30,54	60,56	90,57	116,74
6	22,56	13,2	13,2	13,2	75,56	2,72	2,72	2,72	36,61	66,24	98,11	128,8
7	29,65	29,65	28,65	28,65	9,21	9,21	5,52	5,52	43,86	96,98	145,21	187,04
8	57,2	57,2	50,49	50,49	14,1	14,1	0,72	0,72	19,04	43,85	64,66	87,06
9	18,78	18,78	17,37	17,37	8,12	8,12	0	0	13,09	27,03	37,87	54
10	56,69	56,69	56,69	54,32	8,37	8,37	8,37	3,84	25,01	56,64	91,83	128,31
11	81,27	81,27	81,27	81,27	3,83	3,83	3,83	3,83	7,56	15,85	24,12	32,17
12	137,73	132,72	132,72	132,72	6,79	2,91	2,91	2,91	35,69	58,77	110,09	166,04
13	103,46	103,46	103,46	103,46	3,61	3,61	3,61	3,61	23,52	45,37	59,21	77,79
14	100,99	100,99	100,99	100,99	5,48	5,48	5,48	5,48	21,22	41,13	64,17	86,56
15	49,52	49,52	49,52	49,52	3,21	3,21	3,21	3,21	25,43	54,43	77,93	98,57
16	128,93	116,38	115,6	107,66	22,63	10,69	9,95	2,4	86,29	145,3	201,91	280,87
17	97,89	89,61	89,61	87,26	12,18	2,69	2,69	0	54,85	115	178,7	241,68
18	100,03	100,03	100,03	98,95	1,86	1,86	1,86	0,76	61,48	101,96	146,12	206,92
19	106,33	106,33	106,33	106,33	0	0	0	0	46,14	86,09	119,33	158,12
20	65,3	63,66	63,66	59,21	14,64	11,76	11,76	3,95	28,61	56,44	78,56	105,92
21	107,96	107,96	107,96	107,96	2,57	2,57	2,57	2,57	23,27	49,63	70,88	91,94
22	50,7	50,59	48,3	48,3	13,8	13,56	8,42	8,42	44,16	74,96	105,62	149,08
23	98,58	98,58	98,58	97,85	3,12	3,12	3,12	2,35	13,53	24,98	37,24	50,13
24	41,21	41,21	41,21	41,21	5,67	5,67	5,67	5,67	73,56	141,39	237,62	330,71
25	32,13	32,13	31,57	31,57	1,77	1,77	0	0	19,88	38,33	55,06	71,25
26	48,49	48,49	48,49	48,49	0,43	0,43	0,43	0,43	8,98	18,48	27,24	36,99
27	57,34	45,14	45,14	45,14	27,03	0	0	0	9,91	18,42	28,1	38,63
28	123,66	123,66	123,66	123,66	1,23	1,23	1,23	1,23	14,1	29,86	44,31	62,56
29	121,69	121,46	121,46	121,46	4,2	4,01	4,01	4,01	24,39	56,32	76,25	106,22
30	109,2	109,2	109,2	109,2	1,39	1,39	1,39	1,39	93,84	190,66	295,03	398,84
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	14,14	38,43	49,81	70,42
32	96,91	96,91	96,91	87,55	10,69	10,69	10,69	0	17,25	34,94	49,86	65,74
33	205,16	203,69	188,42	188,42	9,93	9,15	0,96	0,96	50,35	101,7	159,7	215,78

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	67,74	67,74	67,74	64,98	9,29	9,29	9,29	4,84	57,68	109,48	148,76	200,59
35	105,14	105,14	105,14	105,14	3,16	3,16	3,16	3,16	21,07	38,6	57,88	76,22
36	162,67	160,74	160,74	160,74	4,62	3,38	3,38	3,38	66,77	159,96	256,77	351,41
37	37,59	37,59	34,95	34,95	7,55	7,55	0	0	25,19	51,79	84,67	110,28
38	55,81	55,81	55,81	55,81	0	0	0	0	11,28	22,97	36	48,18
39	106,89	106,89	106,89	105,39	6,63	6,63	6,63	5,14	56,11	104,78	146,58	189,66
40	59,62	59,62	59,62	59,62	1,72	1,72	1,72	1,72	60,91	121,48	172,92	209,98
41	139,64	117,59	117,59	116,33	20,1	1,14	1,14	0,05	50,58	110,87	161,45	208,13
42	126,4	126,29	124,61	124,61	4,43	4,34	2,95	2,95	20,49	33,71	47,88	61,07
43	45,1	41,87	41,87	41,87	12,02	4	4	4	74,32	138,02	199,32	260,25
44	78,89	67,84	67,84	67,84	18,54	1,94	1,94	1,94	31,12	51,06	86,65	114,71
45	17,1	17,1	17,1	17,1	0	0	0	0	44,72	92,97	127,29	166,87
46	108,08	108,08	106,12	105,53	5,84	5,84	3,92	3,34	67,29	146,6	231,54	304,98
47	41,63	41,63	41,63	41,63	0	0	0	0	34,9	78,41	119,79	157,45
48	70,62	70,62	70,62	69,97	7,87	7,87	7,87	6,87	24,43	46,84	73,45	87,12
49	71,71	71,71	71,71	68,49	4,7	4,7	4,7	0	50,21	119,55	168,1	197,89
50	187,39	187,39	187,39	187,39	1,37	1,37	1,37	1,37	51,92	103,8	148,85	200,34
51	47,39	46,49	46,49	43,65	8,57	6,51	6,51	0	8,94	19,24	29,45	42,66
52	59,04	59,04	59,04	48,08	22,8	22,8	22,8	0	30,5	57,76	92,44	124,83
53	76,96	76,96	76,96	76,96	0	0	0	0	18,23	32,31	45,81	59,02
54	66,08	66,08	66,08	64,85	3,09	3,09	3,09	1,17	19,46	45,49	80,47	102,84
55	151,95	140,11	140,11	140,11	10,48	1,87	1,87	1,87	83,32	162,06	232,15	316,52
56	123,47	123,47	123,47	123,47	0	0	0	0	9,63	18,95	28,21	37,4
57	33,05	33,05	33,05	33,05	3,54	3,54	3,54	3,54	48,41	92,55	140,85	182,11
58	51,56	45,37	45,37	45,37	13,64	0	0	0	16,6	29,48	39,29	49,82
59	83,4	83,4	83,4	83,4	12,1	12,1	12,1	12,1	38,02	94,17	133,1	170,14
60	88,86	63,87	63,87	63,87	40,22	0,79	0,79	0,79	26	50,28	73,7	104,27
61	75,66	75,66	75,66	75,66	0,67	0,67	0,67	0,67	29,98	52,27	73,28	99,11
62	92,86	92,86	92,86	92,86	10,5	10,5	10,5	10,5	54,43	93,28	136,27	185,04
63	79,67	78,7	78,7	78,7	1,23	0	0	0	11,19	23,38	34,27	48,5
64	126,79	119,78	119,78	119,78	7,88	1,91	1,91	1,91	26,04	50,71	71,86	95,2
65	120,86	120,86	120,86	120,86	6,62	6,62	6,62	6,62	20,28	43,96	64,84	82,17
66	133,53	133,53	133,53	133,53	0,97	0,97	0,97	0,97	9,05	18,16	28,08	36,92
67	98,09	98,09	98,09	98,09	2,54	2,54	2,54	2,54	28,49	56,96	89,28	123,11
68	59,11	59,11	59,11	54,9	15,18	15,18	15,18	6,98	52,52	118,4	168,06	217,7
69	59,61	59,61	59,61	53,16	15,39	15,39	15,39	2,9	16,26	34,19	53,38	75,6
70	113,94	113,94	113,94	113,94	7,81	7,81	7,81	7,81	44,2	86,46	129,8	159,76

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	56,68	56,68	56,68	56,68	2,72	2,72	2,72	2,72	28,08	68,25	99,75	136,7
72	172,66	172,66	172,66	172,66	2,51	2,51	2,51	2,51	41,56	79,21	116,51	153,09
73	86,32	86,32	86,32	86,32	0,9	0,9	0,9	0,9	35,35	59,3	84,86	107,34
74	71,06	70,63	70,63	69,2	2,69	2,07	2,07	0	50,39	115,38	177,66	224,61
75	159,23	147,82	144,94	144,94	10,38	2,47	0,48	0,48	32,34	62,34	100,07	125,06
76	78,37	78,37	78,37	77,36	1,4	1,4	1,4	0,09	24,7	48,26	71,37	94,16
77	159,16	159,16	159,16	159,16	0,95	0,95	0,95	0,95	41,63	110,55	176,46	243,35
78	74,19	74,19	61,99	61,99	22,02	22,02	1,96	1,96	22,11	47,58	70,68	95,97
79	24,04	24,04	24,04	24,04	14,8	14,8	14,8	14,8	43,47	84,36	131,62	164,25
80	70,05	70,05	70,05	70,05	0	0	0	0	36,93	71,63	99,21	123,26
81	26,11	22,85	22,85	19,41	34,52	17,72	17,72	0	19,01	38,34	54,83	70,61
82	39,17	37,67	35,5	35,5	15,92	11,48	5,06	5,06	10,06	19,19	28,18	39,01
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	8,02	15,18	22,63	31,62
84	42,06	42,06	42,06	42,06	5,65	5,65	5,65	5,65	24,18	86,97	130,13	190,02
85	31,87	27,31	27,31	27,31	17,91	1,04	1,04	1,04	64,22	144,67	192,2	261,46
86	83,27	61,45	61,45	61,45	35,75	0,18	0,18	0,18	17,06	58,17	94,92	149,74
87	110,9	97,72	97,72	97,72	16,09	2,29	2,29	2,29	11,12	21,92	32,85	42,25
88	124,08	124,08	124,08	124,08	3,76	3,76	3,76	3,76	62,33	108,58	161,33	213,13
89	76,35	66,31	66,31	66,31	19,19	3,51	3,51	3,51	34,39	65,56	104,37	142,63
90	134,81	134,81	134,81	134,81	1,7	1,7	1,7	1,7	24,82	59,36	93,15	126,41
91	133,59	133,59	133,59	133,59	3,74	3,74	3,74	3,74	79,29	121,61	201,08	281,39
92	74,88	74,88	74,88	74,88	1,45	1,45	1,45	1,45	34,27	69,19	105,41	137,54
93	65,12	65,12	65,12	64,82	4,43	4,43	4,43	3,94	24,58	59,05	81,94	103,94
94	118,66	118,66	118,66	118,66	3,26	3,26	3,26	3,26	20	41,1	57	73,8
95	78,47	78,47	78,47	78,47	0	0	0	0	44,4	79,3	109,55	137,63
96	73,83	73,4	73,4	73,4	1,62	1,03	1,03	1,03	17,14	37,31	54,49	69,69
97	39,91	39,91	39,91	37,13	12,01	12,01	12,01	4,21	82,14	145,4	236,01	320,41
98	122,52	122,52	122,52	122,52	0	0	0	0	60,34	108,05	161,32	204,18
99	58,18	56,72	56,72	56,72	2,57	0	0	0	18,2	44,49	58,92	76,28
100	33,48	33,48	33,48	33,48	3,56	3,56	3,56	3,56	15,88	37,4	50,4	71,77

ANNEXE 6 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode r3

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	68,56	68,56	68,56	66,94	2,42	2,42	2,42	0	40,03	85,4	116,86	155,08
2	66,84	66,84	66,84	66,84	0,71	0,71	0,71	0,71	23,23	48,67	68,74	85,88
3	78,92	78,48	78,48	75,78	6,16	5,57	5,57	1,94	105,32	197,08	282,65	357,42
4	112,21	112,21	112,21	111,46	2,03	2,03	2,03	1,35	41,83	82,95	128,45	174,81
5	47,38	47,38	47,38	47,38	3,27	3,27	3,27	3,27	23,72	46,09	70,02	95,43
6	22,68	13,85	13,85	13,2	76,5	7,78	7,78	2,72	35,86	66,69	97,21	124,14
7	28,65	28,65	28,65	28,65	5,52	5,52	5,52	5,52	52,45	100,71	149,77	199,76
8	50,13	50,13	50,13	50,13	0	0	0	0	25,43	51,03	79,44	109,49
9	18,78	17,37	17,37	17,37	8,12	0	0	0	12,04	24,86	37,01	47,9
10	54,44	54,44	54,32	54,32	4,07	4,07	3,84	3,84	33,3	64,54	104,58	145,83
11	81,27	81,27	81,27	81,27	3,83	3,83	3,83	3,83	7,29	15,24	22,96	30,74
12	132,72	132,72	132,72	132,72	2,91	2,91	2,91	2,91	35,76	68,78	109,51	144,97
13	103,46	103,46	103,46	103,46	3,61	3,61	3,61	3,61	26,02	46,95	67,92	102,35
14	100,99	100,99	100,99	100,99	5,48	5,48	5,48	5,48	20,05	43,7	65,28	95,03
15	50,77	50,77	50,77	49,5	5,81	5,81	5,81	3,17	33,52	70,1	95,13	125,6
16	110,7	110,7	110,7	107,66	5,29	5,29	5,29	2,4	81,14	167,85	218,11	291,64
17	94,28	89,23	89,23	87,26	8,04	2,26	2,26	0	72,09	135,55	190,13	261,59
18	115	105,45	105,45	99,95	17,11	7,38	7,38	1,78	37,03	86,86	137,57	190,75
19	106,33	106,33	106,33	106,33	0	0	0	0	38,22	71,04	108,4	147,91
20	59,21	59,21	59,21	59,21	3,95	3,95	3,95	3,95	30,34	60,1	88,25	112,22
21	116,32	116,32	114,31	105,29	10,51	10,51	8,6	0,03	25,67	51,58	69,39	90,8
22	48,3	48,3	48,3	48,3	8,42	8,42	8,42	8,42	36,96	76,09	111,56	148,86
23	98,58	97,77	97,77	97,21	3,12	2,27	2,27	1,68	13,96	27,13	38,72	52,2
24	41,21	41,21	41,21	41,21	5,67	5,67	5,67	5,67	69,62	165,25	254,23	348,8
25	32,13	32,13	31,57	31,57	1,77	1,77	0	0	20,67	36,96	56,73	77,2
26	48,49	48,49	48,49	48,49	0,43	0,43	0,43	0,43	11,6	23,31	34,85	47,06
27	45,14	45,14	45,14	45,14	0	0	0	0	8,17	17,07	25,39	34,55
28	123,66	123,66	123,66	123,66	1,23	1,23	1,23	1,23	18,66	35,11	51,11	64,86
29	122,08	121,46	121,46	121,46	4,54	4,01	4,01	4,01	20,24	46,23	68,01	91,79
30	110,3	110,3	109,2	109,2	2,41	2,41	1,39	1,39	109,7	221,06	334,51	436,87
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	19,5	35,5	52,77	70,59
32	87,55	87,55	87,55	87,55	0	0	0	0	18,84	40,59	59,84	77,61
33	188,05	188,05	188,05	188,05	0,77	0,77	0,77	0,77	43,17	84,11	136,04	184,78

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	70,36	64,98	64,98	64,98	13,52	4,84	4,84	4,84	46,46	97,65	150,04	201,12
35	105,14	105,14	105,14	105,14	3,16	3,16	3,16	3,16	21,15	45,46	68,78	88,41
36	160,74	160,74	160,74	160,74	3,38	3,38	3,38	3,38	88,44	175,39	266,08	350,42
37	34,95	34,95	34,95	34,95	0	0	0	0	30,71	57,49	84,73	109,17
38	55,81	55,81	55,81	55,81	0	0	0	0	12,99	25,56	38,17	50,96
39	106,89	106,89	106,89	105,39	6,63	6,63	6,63	5,14	52,93	118,33	167,32	203,33
40	61,94	61,94	59,62	59,62	5,68	5,68	1,72	1,72	44,35	98,26	142,62	205,9
41	144,57	122,4	117,59	116,33	24,34	5,27	1,14	0,05	56,28	110,44	163,35	213,54
42	124,61	124,61	124,61	124,61	2,95	2,95	2,95	2,95	15,33	30,53	46,09	61,9
43	43,35	43,35	43,35	41,13	7,68	7,68	7,68	2,16	62,04	121,66	180,65	229,56
44	67,84	67,3	67,3	67,3	1,94	1,13	1,13	1,13	30,06	60,48	92,84	127,64
45	17,1	17,1	17,1	17,1	0	0	0	0	33,21	70,99	105,88	144,5
46	106,12	106,12	106,12	106,12	3,92	3,92	3,92	3,92	85,06	178,41	263,15	326,94
47	47,23	41,63	41,63	41,63	13,45	0	0	0	27,84	64,59	105,99	144,48
48	69,97	69,97	69,97	69,97	6,87	6,87	6,87	6,87	13,82	26,75	39,08	55,83
49	70,2	70,15	68,49	68,49	2,5	2,42	0	0	55,87	109,64	136,78	185,8
50	191,34	191,34	191,34	187,39	3,51	3,51	3,51	1,37	43,41	103,78	147,07	190,65
51	43,65	43,65	43,65	43,65	0	0	0	0	11,49	20,95	33,32	43
52	48,08	48,08	48,08	48,08	0	0	0	0	16,9	41,4	60,27	81,47
53	76,96	76,96	76,96	76,96	0	0	0	0	16,54	31,72	46,25	62,64
54	67,01	64,85	64,85	64,85	4,54	1,17	1,17	1,17	16,41	39,37	58,58	77,14
55	140,11	140,11	140,11	140,11	1,87	1,87	1,87	1,87	91	174,83	251,37	338,71
56	128,63	128,63	128,63	128,63	4,18	4,18	4,18	4,18	9,48	18,56	30,17	41,4
57	48,94	33,05	33,05	32,3	53,32	3,54	3,54	1,19	47,28	95,2	142,58	189,6
58	51,56	51,56	45,37	45,37	13,64	13,64	0	0	13,52	25,72	35,04	44,3
59	83,4	83,4	83,4	83,4	12,1	12,1	12,1	12,1	30,46	59,72	95,7	129
60	63,87	63,87	63,87	63,87	0,79	0,79	0,79	0,79	25,48	50,05	85,17	114,7
61	75,66	75,66	75,66	75,66	0,67	0,67	0,67	0,67	28,98	65,11	96,95	127,44
62	100,25	95,53	85,54	85,54	19,29	13,67	1,78	1,78	55,73	87,01	139,17	191,77
63	81,13	80,91	80,16	80,16	3,09	2,81	1,86	1,86	14,46	26,68	40,65	55,97
64	119,78	119,78	119,78	119,78	1,91	1,91	1,91	1,91	23,51	43,99	63,11	83,9
65	120,86	120,86	120,86	120,86	6,62	6,62	6,62	6,62	16,78	33,37	55,23	68,01
66	133,53	133,53	133,53	133,53	0,97	0,97	0,97	0,97	9,31	19,26	28,51	37,33
67	133,48	98,09	98,09	98,09	39,54	2,54	2,54	2,54	24,31	48,97	80,59	112,91
68	60,68	60,68	54,32	54,32	18,24	18,24	5,85	5,85	50,75	100,75	155,95	205,4
69	53,16	53,16	53,16	53,16	2,9	2,9	2,9	2,9	17,27	35,71	54,63	74,01
70	114,54	113,94	113,94	113,94	8,37	7,81	7,81	7,81	49,2	91,05	126,13	162,81

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	56,68	56,68	56,68	56,68	2,72	2,72	2,72	2,72	34,58	70,21	104,35	143,5
72	172,66	172,66	172,66	172,66	2,51	2,51	2,51	2,51	36,81	68,5	105,19	141,24
73	86,32	86,32	86,32	86,32	0,9	0,9	0,9	0,9	32,36	60,11	86,12	109,37
74	69,2	69,2	69,2	69,2	0	0	0	0	45,04	84,63	131,12	173,69
75	144,25	144,94	144,94	144,94	0	0,48	0,48	0,48	26,16	62,02	98,67	123
76	78,37	78,37	77,36	77,36	1,4	1,4	0,09	0,09	21,76	45,74	70,94	96,63
77	159,16	159,16	159,16	159,16	0,95	0,95	0,95	0,95	66,24	132,41	177,03	229,11
78	62,3	62,3	62,3	60,8	2,47	2,47	2,47	0	32,43	66,54	95,16	128,51
79	26,19	23,31	23,31	21,69	25,07	11,32	11,32	3,58	45,05	81,88	116,78	158,06
80	70,05	70,05	70,05	70,05	0	0	0	0	28,53	61,09	80,6	100,93
81	19,41	19,41	19,41	19,41	0	0	0	0	18,72	39,27	60,13	75,19
82	34,54	34,54	34,54	34,54	2,22	2,22	2,22	2,22	10,93	20,94	30,29	40,44
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	7,72	14,78	22,14	30,27
84	42,06	42,06	42,06	42,06	5,65	5,65	5,65	5,65	32,4	67,51	99,75	131,12
85	33,92	33,92	33,92	27,31	25,49	25,49	25,49	1,04	37,64	93,9	138,8	177,03
86	61,45	61,45	61,45	61,45	0,18	0,18	0,18	0,18	41,13	88,05	137,7	175,71
87	97,72	97,72	97,72	97,72	2,29	2,29	2,29	2,29	8,99	18,22	26,95	35,69
88	124,08	124,08	124,08	124,08	3,76	3,76	3,76	3,76	46,28	92,47	133,33	197,57
89	69,6	66,31	66,31	66,31	8,65	3,51	3,51	3,51	29,1	62,8	84,61	118,08
90	134,81	134,81	134,81	134,81	1,7	1,7	1,7	1,7	27,64	55,42	86,37	115,58
91	133,59	133,59	133,59	133,59	3,74	3,74	3,74	3,74	62,3	132,03	201,24	280,46
92	74,88	74,88	74,88	74,88	1,45	1,45	1,45	1,45	28,45	58,39	92,44	120,7
93	65,63	65,63	65,12	65,12	5,24	5,24	4,43	4,43	26,14	52,62	74,24	96,87
94	118,66	118,66	118,66	118,66	3,26	3,26	3,26	3,26	19,15	39,94	60,38	84,07
95	78,47	78,47	78,47	78,47	0	0	0	0	40,61	73,85	121,77	162,24
96	73,4	73,4	73,4	73,4	1,03	1,03	1,03	1,03	15,05	30,89	44,83	57,59
97	37,13	36,38	36,38	36,38	4,21	2,1	2,1	2,1	100,11	163,08	248,52	331,71
98	122,82	122,52	122,52	122,52	0,24	0	0	0	50,03	105,85	145,73	187,68
99	56,72	56,72	56,72	56,72	0	0	0	0	19,5	33,04	49,44	65,99
100	33,48	33,48	33,48	33,48	3,56	3,56	3,56	3,56	13,79	29,76	48,9	69,38

ANNEXE 7 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode r4

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	73,61	68,56	68,56	66,94	9,96	2,42	2,42	0	30,55	64,5	100,45	128,24
2	66,84	66,84	66,84	66,84	0,71	0,71	0,71	0,71	20,52	38,71	58,1	78,15
3	79,23	78,48	78,48	75,78	6,58	5,57	5,57	1,94	99,29	205,88	293,08	394,69
4	112,21	112,21	112,21	112,21	2,03	2,03	2,03	2,03	48,97	92,42	140,23	190,81
5	48,8	47,38	47,38	47,38	6,36	3,27	3,27	3,27	27,14	54,12	82,4	113,69
6	14,7	13,2	13,2	13,2	14,4	2,72	2,72	2,72	32,32	63,61	96,18	126,22
7	28,65	28,65	28,65	28,65	5,52	5,52	5,52	5,52	41,6	90,35	128,98	171,78
8	50,13	50,13	50,13	50,13	0	0	0	0	24,01	46,63	68,25	95,51
9	17,37	17,37	17,37	17,37	0	0	0	0	12,22	25,79	39,13	51,8
10	55,43	55,43	54,32	54,32	5,96	5,96	3,84	3,84	45,8	85,98	128,9	173,32
11	81,27	81,27	81,27	81,27	3,83	3,83	3,83	3,83	8,97	18,37	27,58	37,27
12	132,72	132,72	132,72	132,72	2,91	2,91	2,91	2,91	42,94	88,48	128,69	175,13
13	105,49	103,46	103,46	103,46	5,64	3,61	3,61	3,61	23,05	48,27	89,99	119,52
14	100,99	100,99	100,99	100,99	5,48	5,48	5,48	5,48	22,33	44,85	67,42	88,19
15	55,88	55,88	55,88	49,5	16,47	16,47	16,47	3,17	29,45	60,17	91,15	116,31
16	137,83	115,55	109,2	107,66	31,09	9,9	3,86	2,4	38,06	98,66	163,96	228,62
17	90,65	87,26	87,26	87,26	3,88	0	0	0	59,87	132,02	197,62	251
18	105,45	99,95	99,95	98,95	7,38	1,78	1,78	0,76	51,74	105,43	160,51	202,64
19	106,33	106,33	106,33	106,33	0	0	0	0	39,6	74,86	116,74	150,97
20	59,21	59,21	59,21	59,21	3,95	3,95	3,95	3,95	25,54	51,68	77	103,73
21	105,29	105,29	105,29	105,29	0,03	0,03	0,03	0,03	27,43	54,09	74,94	99
22	50,7	48,3	48,3	48,3	13,8	8,42	8,42	8,42	30,46	65,22	102,6	139,04
23	97,21	97,21	97,21	97,21	1,68	1,68	1,68	1,68	11,98	24,35	36,5	48,76
24	40,56	41,21	41,21	41,21	4	5,67	5,67	5,67	78,58	152,12	210,98	253,8
25	32,13	31,57	31,57	31,57	1,77	0	0	0	20,28	40,52	61,11	79,74
26	48,72	48,72	48,72	48,49	0,91	0,91	0,91	0,43	10,03	20,36	31,24	41,42
27	45,14	45,14	45,14	45,14	0	0	0	0	8,74	17,28	26,36	35,17
28	123,66	123,66	123,66	123,66	1,23	1,23	1,23	1,23	16,7	33,09	48,82	63,65
29	121,46	121,46	121,46	121,46	4,01	4,01	4,01	4,01	23,06	51,73	70,82	99,33
30	109,2	109,2	109,2	109,2	1,39	1,39	1,39	1,39	100,88	197,49	282,58	367,94
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	15,99	31,21	46,34	60,43
32	87,55	87,55	87,55	87,55	0	0	0	0	16,47	37,17	54,82	71,73
33	189,16	189,16	189,16	187,41	1,36	1,36	1,36	0,42	49,27	97,75	141,95	197,15

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	64,98	64,98	64,98	64,98	4,84	4,84	4,84	4,84	43,53	89,62	133,43	173,43
35	108,13	106,3	105,14	105,14	6,09	4,3	3,16	3,16	23,07	44,56	65,79	85,65
36	160,74	160,74	160,74	160,74	3,38	3,38	3,38	3,38	69,91	146,91	214,26	316,83
37	34,95	34,95	34,95	34,95	0	0	0	0	24,96	54,26	78,08	104,6
38	55,81	55,81	55,81	55,81	0	0	0	0	11,39	22,65	34,57	46,32
39	106,89	106,89	106,89	105,39	6,63	6,63	6,63	5,14	51,2	93	150,58	199,01
40	61,94	59,62	59,62	59,62	5,68	1,72	1,72	1,72	54,08	100,99	152,55	198,88
41	116,33	116,33	116,33	116,33	0,05	0,05	0,05	0,05	50,22	98,22	146,16	187,95
42	126,29	124,61	124,61	124,61	4,34	2,95	2,95	2,95	17,71	33,09	48,45	67,13
43	41,13	41,13	41,13	41,13	2,16	2,16	2,16	2,16	59,6	114,79	184,04	247,28
44	67,3	67,3	67,3	67,3	1,13	1,13	1,13	1,13	33,25	69,17	102,42	129,63
45	17,1	17,1	17,1	17,1	0	0	0	0	45,79	88,68	127,53	166,29
46	106,12	106,12	106,12	106,12	3,92	3,92	3,92	3,92	92,78	183,47	270,05	340,53
47	41,63	41,63	41,63	41,63	0	0	0	0	35,72	74,35	117,94	161,39
48	69,97	69,97	69,97	69,97	6,87	6,87	6,87	6,87	16,06	39,39	54,73	72,21
49	71,71	71,71	68,49	68,49	4,7	4,7	0	0	37,37	85	128,22	153,83
50	187,39	187,39	187,39	187,39	1,37	1,37	1,37	1,37	48,15	97,78	153,32	206,31
51	46,49	43,65	43,65	43,65	6,51	0	0	0	13,74	27,41	38,38	51,35
52	48,08	48,08	48,08	48,08	0	0	0	0	25,59	54,52	76,81	96,39
53	76,96	76,96	76,96	76,96	0	0	0	0	16,26	31,42	46,75	62,2
54	66,08	64,85	64,85	64,85	3,09	1,17	1,17	1,17	21,2	41,35	61,16	79,29
55	140,11	140,11	140,11	140,11	1,87	1,87	1,87	1,87	77,23	161,14	235,38	313,01
56	128,63	123,47	123,47	123,47	4,18	0	0	0	14,48	25,45	37,66	48,02
57	33,05	33,05	33,05	33,05	3,54	3,54	3,54	3,54	48,79	94,11	137,04	177,75
58	45,37	45,37	45,37	45,37	0	0	0	0	11,97	23,69	36,5	48,1
59	85,35	85,35	85,35	83,4	14,72	14,72	14,72	12,1	39,15	70,99	118,93	167,1
60	63,87	63,87	63,87	63,87	0,79	0,79	0,79	0,79	27,18	55,94	86,34	114,77
61	88	75,66	75,66	75,66	17,08	0,67	0,67	0,67	26,39	55,82	78,09	101,76
62	97,61	93,53	93,53	85,54	16,15	11,29	11,29	1,78	40,37	81,91	128,65	180,85
63	80,16	80,16	80,16	80,16	1,86	1,86	1,86	1,86	13,79	27,67	41,64	55,45
64	119,78	119,78	119,78	119,78	1,91	1,91	1,91	1,91	21,49	42,6	63,16	85,77
65	120,86	120,86	120,86	120,86	6,62	6,62	6,62	6,62	17,85	38,68	59,78	78,84
66	133,53	133,53	133,53	133,53	0,97	0,97	0,97	0,97	10,04	19,79	29,97	39,25
67	98,09	98,09	98,09	98,09	2,54	2,54	2,54	2,54	25,19	53,67	82,09	111,27
68	62,24	60,68	59,11	54,32	21,28	18,24	15,18	5,85	61,45	118,81	173,5	219,17
69	53,16	53,16	53,16	53,16	2,9	2,9	2,9	2,9	20,21	38,3	56,18	74,22
70	114,54	113,94	113,94	113,94	8,37	7,81	7,81	7,81	40,44	79,28	125,22	170,59

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	56,68	56,68	56,68	56,68	2,72	2,72	2,72	2,72	33,61	65,73	98,77	135,47
72	172,66	172,66	172,66	172,66	2,51	2,51	2,51	2,51	42,33	78,45	121,59	159,2
73	86,32	86,32	86,32	86,32	0,9	0,9	0,9	0,9	34,66	65,49	88,28	114,2
74	69,2	69,2	69,2	69,2	0	0	0	0	47,62	93,48	134,32	178,49
75	144,94	144,94	144,94	144,94	0,48	0,48	0,48	0,48	35,77	68,12	100,5	136,57
76	77,36	77,36	77,36	77,36	0,09	0,09	0,09	0,09	24,93	49,18	69,61	93,85
77	159,16	159,16	159,16	159,16	0,95	0,95	0,95	0,95	62,14	128,41	181,94	224,3
78	62,3	61,99	61,99	61,99	2,47	1,96	1,96	1,96	30,6	62,41	97,2	129,33
79	25,46	25,46	25,46	21,69	21,59	21,59	21,59	3,58	49,26	96,36	140,51	174,87
80	70,8	70,05	70,05	70,05	1,07	0	0	0	34,16	60,26	82,82	108,45
81	22,85	20,5	19,41	19,41	17,72	5,62	0	0	16,4	34,21	54,64	70,04
82	34,54	34,54	34,54	34,54	2,22	2,22	2,22	2,22	11,21	22,51	33,9	44,77
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	8,7	16,97	25,49	33,74
84	54,74	47,07	47,07	42,06	37,5	18,24	18,24	5,65	42,82	77,4	113,38	147,82
85	33,92	27,31	27,31	27,31	25,49	1,04	1,04	1,04	57,74	112,98	153,75	204,83
86	60,07	61,45	61,45	61,45	-2,07	0,18	0,18	0,18	49,55	82,09	125,55	168,18
87	99,24	97,72	97,72	97,72	3,88	2,29	2,29	2,29	10,85	21,65	32,28	42,61
88	124,08	124,08	124,08	124,08	3,76	3,76	3,76	3,76	50,27	108,76	147,91	206,3
89	66,31	66,31	66,31	66,31	3,51	3,51	3,51	3,51	42,29	70,44	104,77	137,04
90	141,06	140,56	134,81	134,81	6,41	6,04	1,7	1,7	31,23	66,33	91,25	120,72
91	133,59	133,59	133,59	133,59	3,74	3,74	3,74	3,74	58,22	127,47	213,19	277,61
92	74,88	74,88	74,88	74,88	1,45	1,45	1,45	1,45	30,48	61,71	88,63	120,91
93	65,12	65,12	65,12	65,12	4,43	4,43	4,43	4,43	22,1	50,26	76,6	105,22
94	118,66	118,66	118,66	118,66	3,26	3,26	3,26	3,26	20,41	38,55	57,14	79,34
95	99,02	95,78	79,96	78,47	26,19	22,06	1,9	0	34,32	69,1	112,77	162,57
96	73,4	73,4	73,4	73,4	1,03	1,03	1,03	1,03	16,79	35,17	51,33	68,53
97	45,56	37,13	36,98	36,98	27,87	4,21	3,79	3,79	85,14	168,92	260,15	329,29
98	122,52	122,52	122,52	122,52	0	0	0	0	54,85	98,87	148,25	195,01
99	58,18	58,18	58,18	56,72	2,57	2,57	2,57	0	19,51	38,8	55,39	72,66
100	33,48	33,48	33,48	33,48	3,56	3,56	3,56	3,56	22,29	42,81	62,81	85,81

ANNEXE 8 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode r5

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	73,61	68,56	66,94	66,94	9,96	2,42	0	0	25,87	52,36	77,68	103,44
2	66,84	66,84	66,84	66,84	0,71	0,71	0,71	0,71	16,4	32,19	48,37	65,05
3	78,48	78,48	76,03	75,78	5,57	5,57	2,27	1,94	62,91	133,89	203,75	278,72
4	121,09	112,21	111,69	111,46	10,1	2,03	1,55	1,35	34,6	73,14	109,06	147,44
5	47,38	47,38	47,38	47,38	3,27	3,27	3,27	3,27	21,29	42,18	63,4	85,32
6	22,56	14,7	13,85	13,2	75,56	14,4	7,78	2,72	24,38	54,19	75,79	105,95
7	28,65	28,65	29,55	28,65	5,52	5,52	8,84	5,52	31,03	72,19	113,11	149,52
8	50,13	50,13	50,13	50,13	0	0	0	0	20,79	45,76	65,81	86,45
9	17,37	17,37	17,37	17,37	0	0	0	0	10,43	21,33	31,57	41,68
10	54,44	54,44	54,32	54,32	4,07	4,07	3,84	3,84	35,84	72,39	103,27	138,7
11	81,27	81,27	81,27	81,27	3,83	3,83	3,83	3,83	7,39	15,04	22,84	29,75
12	132,72	132,72	132,72	132,72	2,91	2,91	2,91	2,91	32,67	64,79	101,65	132,24
13	103,46	103,46	103,46	103,46	3,61	3,61	3,61	3,61	17,81	37,14	69,26	86,46
14	100,99	100,99	100,99	100,99	5,48	5,48	5,48	5,48	18,18	35,54	52,38	69,4
15	49,5	49,5	49,52	49,5	3,17	3,17	3,21	3,17	21,69	41,49	63,83	83,5
16	112,47	112,47	107,66	107,66	6,97	6,97	2,4	2,4	49,69	85,45	122,54	177,68
17	89,63	88,92	89,63	87,26	2,72	1,9	2,72	0	59,13	109,38	169,33	216,36
18	99,95	99,95	99,7	99,95	1,78	1,78	1,53	1,78	39,02	79,57	118,67	160,25
19	106,33	106,33	106,33	106,33	0	0	0	0	29,7	57,1	86,44	115,03
20	59,65	59,65	59,21	59,21	4,72	4,72	3,95	3,95	19,86	42,43	62,31	83,85
21	105,29	105,29	105,29	105,29	0,03	0,03	0,03	0,03	15,47	29,39	47,83	67,69
22	48,3	48,3	48,3	48,3	8,42	8,42	8,42	8,42	32,24	63,49	82,49	111,79
23	97,77	97,77	97,21	97,21	2,27	2,27	1,68	1,68	10,05	19,94	29,62	39,12
24	45,52	45,52	41,21	41,21	16,72	16,72	5,67	5,67	48,52	98,54	156,35	187,33
25	31,57	31,57	31,57	31,57	0	0	0	0	16,35	33,2	49,66	66,13
26	48,49	48,49	48,49	48,49	0,43	0,43	0,43	0,43	8,3	17,05	25,48	33,62
27	45,14	45,14	45,14	45,14	0	0	0	0	7,14	14,44	21,53	29,19
28	123,66	123,66	123,66	123,66	1,23	1,23	1,23	1,23	10,71	23,5	34,73	47,72
29	135,65	124,38	121,46	121,46	16,16	6,51	4,01	4,01	16,42	32,13	48,54	69,04
30	109,2	109,2	109,2	109,2	1,39	1,39	1,39	1,39	79,94	160,74	239,09	320,07
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	12,58	22,75	36,64	47,8
32	87,55	87,55	87,55	87,55	0	0	0	0	14,72	30,59	45,51	59,84
33	189,22	188,05	187,41	187,41	1,39	0,77	0,42	0,42	40,25	82,12	127,16	169,32

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	64,98	64,98	64,98	64,98	4,84	4,84	4,84	4,84	33,14	65,05	104,39	135,68
35	105,14	105,14	105,14	105,14	3,16	3,16	3,16	3,16	17,28	32,06	49,7	68,03
36	160,74	160,74	160,74	160,74	3,38	3,38	3,38	3,38	77,05	158,1	227,84	304,66
37	34,95	34,95	34,95	34,95	0	0	0	0	19,68	41,98	63,05	85,37
38	55,81	55,81	55,81	55,81	0	0	0	0	9,82	19,27	27,76	36,86
39	106,89	106,89	105,39	105,39	6,63	6,63	5,14	5,14	40,05	80,39	127,62	176,28
40	59,62	59,62	59,62	59,62	1,72	1,72	1,72	1,72	40,96	83,46	109,83	153,71
41	116,33	116,33	116,33	116,33	0,05	0,05	0,05	0,05	38,14	68,79	103,98	143,57
42	124,61	124,61	124,61	124,61	2,95	2,95	2,95	2,95	12	24,74	36,8	48,22
43	41,48	41,48	41,13	41,48	3,03	3,03	2,16	3,03	51,38	95,88	145,5	196,26
44	67,3	67,3	67,3	67,3	1,13	1,13	1,13	1,13	26,35	52,87	76,64	105,45
45	17,1	17,1	17,1	17,1	0	0	0	0	35,75	69,46	101,98	139,73
46	108,08	108,08	105,53	106,12	5,84	5,84	3,34	3,92	57,58	126,57	182,84	251,87
47	41,63	41,63	41,63	41,63	0	0	0	0	27,55	57,1	90,27	123
48	69,97	69,97	69,97	69,97	6,87	6,87	6,87	6,87	11,53	22,21	33,01	45,89
49	70,15	70,15	68,49	68,49	2,42	2,42	0	0	51	100,39	127,99	180,68
50	187,39	187,39	187,39	187,39	1,37	1,37	1,37	1,37	50,79	99,07	138,3	168,16
51	46,49	46,49	43,65	43,65	6,51	6,51	0	0	10,68	20,62	31,08	40,85
52	48,08	48,08	48,08	48,08	0	0	0	0	20,84	38,22	56,17	71,48
53	76,96	76,96	76,96	76,96	0	0	0	0	12,99	24,58	37,17	50,24
54	64,85	64,85	64,85	64,85	1,17	1,17	1,17	1,17	13,82	34,58	52,3	68,58
55	140,11	140,11	140,11	140,11	1,87	1,87	1,87	1,87	71,94	139,72	212,26	278,82
56	123,47	123,47	123,47	123,47	0	0	0	0	8,57	16,82	24,63	32,42
57	33,05	33,05	32,3	32,3	3,54	3,54	1,19	1,19	39,74	72,44	109,47	148,19
58	45,37	45,37	45,37	45,37	0	0	0	0	9,05	17,9	26,89	36,31
59	83,4	83,4	83,4	83,4	12,1	12,1	12,1	12,1	25,22	59,32	95,05	123,59
60	83,64	63,87	63,87	63,87	31,99	0,79	0,79	0,79	21,38	46,48	69,26	91,42
61	75,66	75,66	75,16	75,16	0,67	0,67	0	0	23,8	49,65	75,7	97,4
62	93,53	93,53	85,54	85,54	11,29	11,29	1,78	1,78	34,56	77,47	113,08	149,02
63	80,16	79,67	78,7	78,7	1,86	1,23	0	0	11,4	21,68	32,57	43,89
64	119,78	119,78	119,78	119,78	1,91	1,91	1,91	1,91	21,95	38,87	55,19	74,6
65	120,86	120,86	120,86	120,86	6,62	6,62	6,62	6,62	16,12	31,72	48,11	64,02
66	133,53	133,53	133,53	133,53	0,97	0,97	0,97	0,97	8,35	16,17	24,46	32,54
67	98,09	98,09	97,75	97,75	2,54	2,54	2,18	2,18	26,89	51,56	77,63	100,31
68	60,68	60,68	54,32	54,32	18,24	18,24	5,85	5,85	46	86,73	136,76	175,55
69	54,67	53,16	52,41	52,41	5,83	2,9	1,45	1,45	16,59	32,67	46,62	63,28
70	113,94	113,94	114,54	113,94	7,81	7,81	8,37	7,81	33,49	71,13	100,54	136,49

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	56,68	56,68	56,68	56,68	2,72	2,72	2,72	2,72	24,78	49,56	77,88	104,83
72	172,66	172,66	172,66	172,66	2,51	2,51	2,51	2,51	25,78	59,01	90,81	123,9
73	86,32	86,32	86,32	86,32	0,9	0,9	0,9	0,9	18,71	44,93	60,04	86,83
74	70,63	70,63	71,06	69,2	2,07	2,07	2,69	0	38,27	77,38	118,04	161,57
75	144,94	144,94	144,94	144,94	0,48	0,48	0,48	0,48	27,85	50,07	69,45	101,38
76	77,36	77,36	77,36	77,36	0,09	0,09	0,09	0,09	17,95	36,95	57,13	76,62
77	163,82	163,82	163,82	159,16	3,91	3,91	3,91	0,95	46,99	86,63	132,26	153,37
78	62,3	62,3	60,8	60,8	2,47	2,47	0	0	25,9	50,86	76,91	103,39
79	23,19	23,19	21,69	21,69	10,74	10,74	3,58	3,58	28,73	60,14	102,33	140,23
80	72,8	72,8	72,8	70,05	3,93	3,93	3,93	0	25,21	45,18	76,66	101,68
81	19,41	19,41	19,41	19,41	0	0	0	0	13,8	27,59	43,94	60,85
82	34,54	34,54	34,54	34,54	2,22	2,22	2,22	2,22	9,03	18,66	27,55	35,8
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	6,71	13,37	20,06	26,69
84	46,94	46,94	39,81	39,81	17,91	17,91	0	0	23,79	58,59	81,9	107,09
85	34,8	27,31	27,31	27,31	28,75	1,04	1,04	1,04	47,96	89,25	139,77	190,51
86	61,45	61,45	61,45	61,45	0,18	0,18	0,18	0,18	36,65	68,37	107,16	123,27
87	97,72	97,72	99,24	97,72	2,29	2,29	3,88	2,29	8,58	17,14	25,21	33,72
88	124,08	124,08	124,08	124,08	3,76	3,76	3,76	3,76	40,04	79,44	126,09	169,97
89	66,31	66,31	65,56	65,2	3,51	3,51	2,34	1,78	33,19	62,51	86,46	116,2
90	134,81	134,81	134,81	134,81	1,7	1,7	1,7	1,7	21,48	45,73	65,64	90,6
91	133,59	133,59	133,59	133,59	3,74	3,74	3,74	3,74	59,68	122,68	187,25	243,38
92	74,88	74,88	74,88	74,88	1,45	1,45	1,45	1,45	28,98	54,13	78,51	104,28
93	65,12	65,12	63,86	63,86	4,43	4,43	2,41	2,41	21,05	42,49	60,58	81,56
94	118,66	118,66	118,66	118,66	3,26	3,26	3,26	3,26	16,87	31,55	49,34	68,55
95	95,78	95,78	95,78	78,47	22,06	22,06	22,06	0	28,98	57,99	83,98	113,02
96	73,4	73,4	73,4	73,4	1,03	1,03	1,03	1,03	11,76	24,95	36,76	50,35
97	37,13	37,13	36,38	36,38	4,21	4,21	2,1	2,1	64,71	133,9	198,69	270,75
98	122,52	122,52	122,52	122,52	0	0	0	0	37,74	78,59	120,27	163,19
99	56,72	56,72	56,72	56,72	0	0	0	0	15,99	31,93	48,99	66,12
100	33,48	33,48	33,48	33,48	3,56	3,56	3,56	3,56	17,29	34,22	45,01	62,66

ANNEXE 9 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode t1

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	84,02	84,02	84,02	84,02	25,52	25,52	25,52	25,52	43,2	94,14	144,27	194,94
2	83,88	83,88	66,84	66,84	26,38	26,38	0,71	0,71	24,19	47,07	70,99	97,8
3	82,65	82,65	82,65	82,65	11,18	11,18	11,18	11,18	61,04	121,13	184,44	243,54
4	124,31	121,88	121,88	121,88	13,03	10,82	10,82	10,82	54,51	105,91	157,53	208,08
5	47,75	47,75	47,75	47,75	4,08	4,08	4,08	4,08	38,72	77,69	115,17	150,73
6	15,42	15,42	15,42	14,7	20	20	20	14,4	27,32	52,19	74,34	96,12
7	30,9	30,9	30,9	30,9	13,81	13,81	13,81	13,81	47,43	95,18	147,46	203,46
8	68,39	68,39	68,39	54,31	36,43	36,43	36,43	8,34	21,23	46,5	69,36	96,48
9	18,78	18,78	18,78	18,78	8,12	8,12	8,12	8,12	12,24	23,82	35,38	47,18
10	56,69	56,69	56,69	56,69	8,37	8,37	8,37	8,37	43,32	89,32	135,56	178,26
11	81,65	81,65	81,65	81,65	4,32	4,32	4,32	4,32	10,33	21,01	31,75	42,36
12	157,54	157,54	137,73	137,73	22,15	22,15	6,79	6,79	23,02	49,87	80,72	130,07
13	103,46	103,46	103,46	103,46	3,61	3,61	3,61	3,61	17,2	37,92	56,49	75,72
14	100,99	100,99	100,99	100,99	5,48	5,48	5,48	5,48	24,52	47,92	71,44	94,84
15	60,87	60,87	60,87	60,87	26,87	26,87	26,87	26,87	19,73	40,38	60,54	81,88
16	135,98	118,51	118,51	118,51	29,33	12,72	12,72	12,72	40,69	95,52	147,39	204,18
17	97,89	97,89	97,89	97,89	12,18	12,18	12,18	12,18	71,83	136,96	196,87	269,9
18	100,03	99,95	99,95	99,95	1,86	1,78	1,78	1,78	80,1	140,02	195,14	252,42
19	106,33	106,33	106,33	106,33	0	0	0	0	50,23	101,66	145,88	196,15
20	65,3	59,21	59,21	59,21	14,64	3,95	3,95	3,95	22,41	44,62	67,64	94,8
21	113,11	113,11	113,11	113,11	7,46	7,46	7,46	7,46	30,44	57,64	84,6	111,15
22	55,77	55,77	55,77	53,45	25,19	25,19	25,19	19,98	37,51	88,71	136,98	190,92
23	116,51	116,51	97,21	97,21	21,87	21,87	1,68	1,68	14,28	29,1	43,93	59,23
24	44,29	44,29	44,29	44,29	13,56	13,56	13,56	13,56	36,9	72,88	109,57	146,88
25	38,8	38,8	38,8	32,13	22,9	22,9	22,9	1,77	20,91	40,96	60,91	81,56
26	48,49	48,49	48,49	48,49	0,43	0,43	0,43	0,43	10,88	21,31	31,64	42,38
27	76,69	76,69	76,69	45,14	69,89	69,89	69,89	0	11,54	22,78	34,02	45,44
28	157,79	157,79	123,66	123,66	29,17	29,17	1,23	1,23	14,33	27,44	41,53	55,57
29	140,62	140,62	140,62	140,62	20,41	20,41	20,41	20,41	23,2	46,42	69,71	93,79
30	132,31	132,31	132,31	132,31	22,85	22,85	22,85	22,85	87,64	183,29	268,65	372,31
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	13,91	27,66	41,25	55,3
32	98,27	98,27	98,27	98,27	12,24	12,24	12,24	12,24	13,48	24,65	35,82	47,27
33	215,35	207,32	207,32	207,32	15,39	11,09	11,09	11,09	49,29	111,7	163,66	219,89

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	70,9	70,9	70,9	67,98	14,39	14,39	14,39	9,68	52,13	107,98	158,7	211,19
35	128,03	128,03	113,23	113,23	25,62	25,62	11,1	11,1	30,33	67,86	106,97	145,24
36	190,2	190,2	160,74	160,74	22,32	22,32	3,38	3,38	68,39	131	191,75	250,79
37	46,28	46,28	46,28	46,28	32,42	32,42	32,42	32,42	35,96	69,39	101,21	135,02
38	55,81	55,81	55,81	55,81	0	0	0	0	12,36	25,77	39,14	52,87
39	111,59	111,59	111,59	111,59	11,32	11,32	11,32	11,32	80	159,88	241,58	324,72
40	61,94	59,62	59,62	59,62	5,68	1,72	1,72	1,72	64,56	118,96	181,64	251,39
41	147,24	147,24	147,24	147,24	26,64	26,64	26,64	26,64	65,88	134,11	202,86	279,23
42	126,4	126,4	126,4	126,4	4,43	4,43	4,43	4,43	19,65	36,99	54,47	72,49
43	43,35	43,35	43,35	41,13	7,68	7,68	7,68	2,16	67,61	136,39	205,05	276,28
44	79,92	73,49	67,3	67,3	20,09	10,43	1,13	1,13	29,07	65,45	101,84	135,98
45	47,3	47,3	17,1	17,1	176,61	176,61	0	0	59,34	118,07	177,59	237,07
46	113,85	113,85	113,85	108,2	11,49	11,49	11,49	5,95	74,4	141,28	224,88	294,84
47	47,23	47,23	47,23	47,23	13,45	13,45	13,45	13,45	49,01	86,41	126,83	168,92
48	71,57	71,57	71,57	71,57	9,32	9,32	9,32	9,32	20,27	36,25	52,01	68,32
49	73,01	73,01	73,01	73,01	6,6	6,6	6,6	6,6	90,8	165,3	237,16	307,56
50	209,44	209,44	200,33	200,33	13,3	13,3	8,37	8,37	74,38	146,58	211,65	272,81
51	66,69	66,69	66,69	49,26	52,78	52,78	52,78	12,85	14,07	28,45	42,89	57,7
52	70,06	70,06	70,06	60,27	45,72	45,72	45,72	25,35	41,57	68,07	92,57	123,22
53	76,96	76,96	76,96	76,96	0	0	0	0	21,5	42,8	59,5	76,57
54	67,01	67,01	67,01	67,01	4,54	4,54	4,54	4,54	18,83	37,02	56,55	75,02
55	154,32	154,32	154,32	154,32	12,2	12,2	12,2	12,2	101,73	179,44	248,72	319,97
56	143,71	127,89	127,89	127,89	16,39	3,58	3,58	3,58	14,74	25,26	35,02	45,1
57	48,94	48,94	33,05	33,05	53,32	53,32	3,54	3,54	62,98	123,71	185,41	249,3
58	51,56	51,56	51,56	51,56	13,64	13,64	13,64	13,64	13,69	25,29	37,04	49,05
59	85,35	85,35	85,35	85,35	14,72	14,72	14,72	14,72	35,25	67,46	100,25	133,25
60	94,54	80,83	80,83	80,83	49,19	27,55	27,55	27,55	24,89	49,21	76,83	104,07
61	78,43	78,43	78,43	78,43	4,35	4,35	4,35	4,35	32,14	69,78	96,81	127,63
62	113,83	113,83	113,83	113,83	35,45	35,45	35,45	35,45	57,3	103,57	149,08	200,03
63	91,03	86,1	86,1	86,1	15,67	9,4	9,4	9,4	20,6	35,21	47,31	60,01
64	151,53	151,53	151,53	146,27	28,93	28,93	28,93	24,45	27,71	52,28	76,81	99,98
65	174,28	174,28	174,28	120,86	53,74	53,74	53,74	6,62	23,46	51,21	81,56	111,98
66	155,38	155,38	155,38	155,38	17,49	17,49	17,49	17,49	10,61	21,02	31,25	41,94
67	110,69	110,44	108,92	108,92	15,71	15,45	13,86	13,86	25,77	60,65	98,66	139,12
68	66,62	60,68	60,68	60,68	29,81	18,24	18,24	18,24	79,74	146,59	207,63	263,95
69	83,74	83,74	81,99	59,74	62,1	62,1	58,71	15,64	22,26	43,46	60,95	79,44
70	114,54	114,54	114,54	114,54	8,37	8,37	8,37	8,37	50,43	83,22	121,48	163,66

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	63,69	57,44	57,44	57,44	15,42	4,1	4,1	4,1	48,24	88,58	132,94	177,23
72	172,66	172,66	172,66	172,66	2,51	2,51	2,51	2,51	49,78	104,2	158,87	208,24
73	107,5	107,5	107,5	107,5	25,66	25,66	25,66	25,66	18,68	36,26	53,85	71,94
74	75,17	75,17	75,17	75,17	8,63	8,63	8,63	8,63	29,35	58,07	87,59	119,91
75	187,62	165,41	165,41	165,41	30,07	14,67	14,67	14,67	31,95	63,1	95,66	129,43
76	78,37	78,37	78,37	78,37	1,4	1,4	1,4	1,4	32,7	60,11	93,06	124,48
77	196,55	196,55	190,9	188,04	24,67	24,67	21,08	19,27	51,89	99,81	152,62	205,12
78	83,69	83,69	83,69	83,69	37,65	37,65	37,65	37,65	32,44	60,9	89,35	118,5
79	25,71	25,71	25,71	25,71	22,78	22,78	22,78	22,78	29,41	61,03	100,89	140,91
80	74,17	74,17	74,17	74,17	5,88	5,88	5,88	5,88	16,19	28,05	39,91	52,06
81	26,11	26,11	26,11	26,11	34,52	34,52	34,52	34,52	15,68	28,09	40,55	53,43
82	46,68	46,68	46,68	46,68	38,15	38,15	38,15	38,15	10,99	22,8	34,57	46,84
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	9,77	18,79	28,04	37,44
84	60,56	60,56	60,56	60,56	52,12	52,12	52,12	52,12	38,54	80,25	123,36	168,79
85	44,12	44,12	44,12	44,12	63,23	63,23	63,23	63,23	79,94	158,21	236,26	319,68
86	61,45	61,45	61,45	61,45	0,18	0,18	0,18	0,18	37,4	75,6	112,16	148,05
87	112,53	112,53	112,53	112,53	17,8	17,8	17,8	17,8	12,71	24,56	36,44	48,4
88	154,2	154,2	124,08	124,08	28,95	28,95	3,76	3,76	27,51	54,49	85,42	133,65
89	101,05	101,05	101,05	75,43	57,74	57,74	57,74	17,75	28,28	58,49	88,12	122,33
90	142,53	141,18	141,18	141,18	7,52	6,5	6,5	6,5	45,46	83,72	122	157,41
91	161,39	161,39	161,39	141,73	25,32	25,32	25,32	10,06	89,81	192,82	295,27	401,54
92	77,01	77,01	77,01	77,01	4,34	4,34	4,34	4,34	30,78	63,97	96,95	131,05
93	82,25	76,3	76,3	65,82	31,9	22,35	22,35	5,55	40,96	75,84	117,44	162,16
94	124,38	121,52	121,52	121,52	8,24	5,75	5,75	5,75	18,88	36,57	56,99	80,71
95	106,24	106,24	96,86	89,76	35,39	35,39	23,44	14,39	44,3	87,98	130,88	175,34
96	86,91	76,48	76,48	73,41	19,63	5,27	5,27	1,05	21,55	45,29	68,29	86,77
97	38,16	37,41	37,41	37,41	7,1	5	5	5	113,12	191,17	272,03	356,24
98	166,69	166,69	122,52	122,52	36,05	36,05	0	0	64,4	123,34	183,53	245,74
99	76,6	76,6	76,6	72,44	35,05	35,05	35,05	27,72	12,91	25,16	37,61	50,43
100	33,48	33,48	33,48	33,48	3,56	3,56	3,56	3,56	21,88	49,49	76,32	102,36

ANNEXE 10 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode *t2*

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	68,56	68,56	68,56	68,56	2,42	2,42	2,42	2,42	36,77	75,62	117,25	162,15
2	69,36	69,36	66,84	66,84	4,51	4,51	0,71	0,71	21,54	37,8	54,08	73,17
3	80,04	80,04	80,04	76,03	7,67	7,67	7,67	2,27	62,07	131,93	216,34	313,21
4	112,21	112,21	112,21	112,21	2,03	2,03	2,03	2,03	40,09	78,25	116,74	153,45
5	47,38	47,38	47,38	47,38	3,27	3,27	3,27	3,27	35,75	70,93	106,25	142,14
6	18,6	15,45	14,7	14,7	44,75	20,23	14,4	14,4	29,01	61,9	93,35	119,82
7	28,65	28,65	28,65	28,65	5,52	5,52	5,52	5,52	37,03	92,58	159,19	224,88
8	50,49	50,49	50,49	50,49	0,72	0,72	0,72	0,72	18,8	37,45	55,85	74,7
9	18,78	18,78	18,78	17,37	8,12	8,12	8,12	0	12,02	23,16	34,71	46,29
10	57,55	57,55	57,55	57,55	10,02	10,02	10,02	10,02	30,24	59,51	88,3	116,47
11	81,27	81,27	81,27	81,27	3,83	3,83	3,83	3,83	9,23	17,77	25,84	33,97
12	132,72	132,72	132,72	132,72	2,91	2,91	2,91	2,91	39,39	124,66	215,07	288,61
13	103,46	103,46	103,46	103,46	3,61	3,61	3,61	3,61	29,55	57,17	87,28	117,88
14	100,99	100,99	100,99	100,99	5,48	5,48	5,48	5,48	31,62	67,43	96,02	130,91
15	49,5	49,5	49,5	49,5	3,17	3,17	3,17	3,17	30,62	65,2	100,03	131,87
16	125,73	121,29	118,51	118,51	19,58	15,36	12,72	12,72	58,24	125,15	188,35	248,75
17	89,23	89,23	89,23	89,23	2,26	2,26	2,26	2,26	64,45	122,45	176,35	225,64
18	105,45	99,95	99,95	99,95	7,38	1,78	1,78	1,78	86,76	166,2	250,9	330,77
19	106,33	106,33	106,33	106,33	0	0	0	0	72,91	121,49	167,81	212,32
20	59,21	59,21	59,21	59,21	3,95	3,95	3,95	3,95	23,16	45,86	67,07	88,67
21	108,03	108,03	108,03	108,03	2,63	2,63	2,63	2,63	25,1	49,28	73,61	100,2
22	53,98	53,98	48,3	48,3	21,17	21,17	8,42	8,42	32,88	66,56	100,42	136,79
23	97,85	97,85	97,85	97,85	2,35	2,35	2,35	2,35	12,41	24,09	36,26	49,28
24	47,66	47,66	41,21	41,21	22,21	22,21	5,67	5,67	87,49	174,4	258,9	408,07
25	31,57	31,57	31,57	31,57	0	0	0	0	27,42	53,73	80,97	109,31
26	48,49	48,49	48,49	48,49	0,43	0,43	0,43	0,43	17,18	36,12	51,55	69,22
27	45,14	45,14	45,14	45,14	0	0	0	0	12,54	24,92	38,01	50,62
28	123,66	123,66	123,66	123,66	1,23	1,23	1,23	1,23	16,31	34,83	53,05	70,56
29	121,69	121,46	121,46	121,46	4,2	4,01	4,01	4,01	33,44	65,16	97,68	130,86
30	109,2	109,2	109,2	109,2	1,39	1,39	1,39	1,39	92,71	215,57	326,36	436,35
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	21,89	52,82	82,08	102,32
32	87,55	87,55	87,55	87,55	0	0	0	0	21,77	40,55	60,46	82,17
33	208,59	208,59	188,05	188,05	11,77	11,77	0,77	0,77	35,31	67,65	99,4	136,85

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	70,9	70,23	70,23	64,98	14,39	13,31	13,31	4,84	43,4	98,76	151,33	201,44
35	108,49	108,49	105,14	105,14	6,45	6,45	3,16	3,16	30,98	62,58	94,24	125,47
36	160,74	160,74	160,74	160,74	3,38	3,38	3,38	3,38	72,3	146,09	221,62	295,83
37	41,39	37,59	37,59	34,95	18,43	7,55	7,55	0	26,75	55,73	83,92	111,04
38	55,81	55,81	55,81	55,81	0	0	0	0	9,25	19,97	32,06	44,19
39	111,59	111,59	111,59	111,59	11,32	11,32	11,32	11,32	74,2	155,44	233,9	312,11
40	61,94	61,94	61,94	59,62	5,68	5,68	5,68	1,72	55,93	111,44	166,88	222,52
41	121,07	117,59	117,59	116,33	4,13	1,14	1,14	0,05	50,05	98,1	146,23	193,65
42	124,61	124,61	124,61	124,61	2,95	2,95	2,95	2,95	17,34	35,25	52,85	71,04
43	41,13	41,13	41,13	41,13	2,16	2,16	2,16	2,16	64,18	124,63	184,31	243,75
44	67,84	67,3	67,3	67,3	1,94	1,13	1,13	1,13	24,13	50,54	78,15	105,29
45	17,1	17,1	17,1	17,1	0	0	0	0	53,54	102,87	151,26	199,64
46	113,85	113,85	106,12	106,12	11,49	11,49	3,92	3,92	64,69	132,05	201,86	277,74
47	41,63	41,63	41,63	41,63	0	0	0	0	40,4	80,32	120	159,04
48	76,52	69,97	69,97	69,97	16,88	6,87	6,87	6,87	18,65	34,42	49,46	65,36
49	71,71	71,71	71,71	71,71	4,7	4,7	4,7	4,7	79,94	156,07	231,33	306,49
50	200,73	190,25	190,25	190,25	8,58	2,92	2,92	2,92	63,41	124,19	178,45	233,98
51	47,39	46,49	43,65	43,65	8,57	6,51	0	0	10,45	20,67	32,9	44,73
52	60,27	48,08	48,08	48,08	25,35	0	0	0	32,46	59,22	78,52	100,24
53	78,03	78,03	76,96	76,96	1,39	1,39	0	0	19,78	39,29	59,25	75,9
54	67,01	67,01	67,01	67,01	4,54	4,54	4,54	4,54	17,84	35,59	53,41	71,95
55	140,11	140,11	140,11	140,11	1,87	1,87	1,87	1,87	89,86	179,44	272,69	367,09
56	128,63	128,63	128,63	125,09	4,18	4,18	4,18	1,31	15,34	29,72	40,48	50,09
57	34,3	34,3	34,3	34,3	7,46	7,46	7,46	7,46	53,95	106,83	139,51	181,96
58	45,37	45,37	45,37	45,37	0	0	0	0	12,85	24,54	36,35	48,74
59	83,4	83,4	83,4	83,4	12,1	12,1	12,1	12,1	27,03	54,4	81,89	109,55
60	73,07	73,07	63,87	63,87	15,31	15,31	0,79	0,79	20,42	42,48	65,77	89,97
61	77,55	77,55	77,55	77,55	3,18	3,18	3,18	3,18	27,11	51,18	73,69	102,49
62	92,47	85,54	85,54	85,54	10,03	1,78	1,78	1,78	57,51	113,17	172,74	230,13
63	80,16	78,7	78,7	78,7	1,86	0	0	0	14,38	26,89	38,7	50,24
64	119,78	119,78	119,78	119,78	1,91	1,91	1,91	1,91	21,04	41,05	64,49	86,8
65	120,86	120,86	120,86	120,86	6,62	6,62	6,62	6,62	17,78	36,14	55,5	82,87
66	147,04	147,04	133,53	133,53	11,18	11,18	0,97	0,97	12,22	24,87	36,94	46,96
67	98,09	98,09	98,09	98,09	2,54	2,54	2,54	2,54	22,64	50,99	82,19	124,73
68	59,11	59,11	59,11	59,11	15,18	15,18	15,18	15,18	56,22	106,92	165,22	230,01
69	75,52	75,52	53,16	53,16	46,19	46,19	2,9	2,9	21,64	44,07	65,97	87,6
70	114,54	114,54	114,54	114,54	8,37	8,37	8,37	8,37	49,14	81,09	111,51	151,25

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	56,68	56,68	56,68	56,68	2,72	2,72	2,72	2,72	28,7	52,85	90,43	135,24
72	172,66	172,66	172,66	172,66	2,51	2,51	2,51	2,51	40,9	76,18	104,87	134,11
73	94,04	94,04	86,32	86,32	9,92	9,92	0,9	0,9	17,48	35,64	53,39	72,18
74	71,28	69,2	69,2	69,2	3,01	0	0	0	32,47	70,27	113,58	155,31
75	144,94	144,94	144,94	144,94	0,48	0,48	0,48	0,48	22,68	41,84	60,96	79,26
76	78,37	78,37	78,37	78,37	1,4	1,4	1,4	1,4	30,28	61,74	95,72	128,33
77	170,3	159,16	159,16	159,16	8,02	0,95	0,95	0,95	45,88	95,27	139,14	179,39
78	69,49	69,49	60,8	60,8	14,29	14,29	0	0	27,74	52,36	79,28	102,2
79	28,38	28,38	28,38	25,18	35,53	35,53	35,53	20,25	36,44	79,92	124,21	166,32
80	71,55	71,55	71,55	71,55	2,14	2,14	2,14	2,14	41,38	88,56	136,11	184,12
81	26,11	22,85	19,41	19,41	34,52	17,72	0	0	15,27	34,54	54,38	75,94
82	47,71	47,71	34,54	34,54	41,2	41,2	2,22	2,22	10	19,3	28,79	38,06
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	8,84	17,3	25,62	33,96
84	46,94	45,1	45,1	45,1	17,91	13,29	13,29	13,29	20,37	40,22	61,53	82,2
85	45,05	45,05	27,31	27,31	66,67	66,67	1,04	1,04	64,64	126,51	187,97	248,79
86	61,45	61,45	61,45	61,45	0,18	0,18	0,18	0,18	25,94	51,21	75,7	99,87
87	97,72	97,72	97,72	97,72	2,29	2,29	2,29	2,29	11,11	22,54	33,85	45,28
88	124,08	124,08	124,08	124,08	3,76	3,76	3,76	3,76	40,56	77,08	114,32	151,64
89	75,01	75,01	66,31	66,31	17,09	17,09	3,51	3,51	22	45,56	65,81	85,5
90	134,81	134,81	134,81	134,81	1,7	1,7	1,7	1,7	30,06	59,31	89,46	119,61
91	133,59	133,59	133,59	133,59	3,74	3,74	3,74	3,74	49,7	104,9	160,25	220,01
92	86,21	86,21	86,21	74,88	16,8	16,8	16,8	1,45	30,42	63,57	96,98	129,47
93	64,4	63,86	63,86	63,86	3,27	2,41	2,41	2,41	22,3	43,76	65,28	89,12
94	118,66	118,66	118,66	118,66	3,26	3,26	3,26	3,26	17,83	36,36	53,27	70,36
95	95,78	95,78	78,47	78,47	22,06	22,06	0	0	32,85	68,37	100,88	138,04
96	73,4	73,4	73,4	73,4	1,03	1,03	1,03	1,03	15,02	29,22	44,15	57,99
97	39,76	39,76	36,98	36,98	11,59	11,59	3,79	3,79	114,9	230,08	345,09	452,74
98	122,82	122,82	122,82	122,82	0,24	0,24	0,24	0,24	61,83	123,31	184,84	246,95
99	58,18	58,18	58,18	58,18	2,57	2,57	2,57	2,57	17,56	36,01	54,29	72,58
100	33,48	33,48	33,48	33,48	3,56	3,56	3,56	3,56	19,93	40,48	59,42	75,23

ANNEXE 11 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode t3

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	81,56	73,61	73,61	66,94	21,84	9,96	9,96	0	48,97	89,98	122,67	150,29
2	66,84	66,84	66,84	66,84	0,71	0,71	0,71	0,71	29,55	50,62	71,21	91,82
3	78,92	78,92	78,92	76,03	6,16	6,16	6,16	2,27	95,09	166,62	231,49	300,76
4	121,09	121,09	113,01	113,01	10,1	10,1	2,76	2,76	59,09	113,03	163,88	216,81
5	78,84	78,84	50,72	47,38	71,84	71,84	10,55	3,27	38,06	60,27	83,36	115,07
6	18,6	15,42	15,42	13,85	44,75	20	20	7,78	36,03	71,86	96,77	121,57
7	29,55	29,55	29,55	29,55	8,84	8,84	8,84	8,84	55,65	113,67	168,14	221,11
8	50,49	50,49	50,49	50,49	0,72	0,72	0,72	0,72	20,37	40,73	65,77	91,43
9	18,95	18,95	18,95	17,37	9,1	9,1	9,1	0	15,35	29,31	43,3	57,86
10	54,32	54,32	54,32	54,32	3,84	3,84	3,84	3,84	50,85	97,12	141,19	186,42
11	81,65	81,65	81,65	81,27	4,32	4,32	4,32	3,83	11,16	20,47	29,91	38,54
12	132,72	132,72	132,72	132,72	2,91	2,91	2,91	2,91	37,45	75,79	121,57	172,16
13	103,46	103,46	103,46	103,46	3,61	3,61	3,61	3,61	25,94	47,25	66,17	83,69
14	100,99	100,99	100,99	100,99	5,48	5,48	5,48	5,48	32,88	58,99	84,85	110,09
15	49,52	49,52	49,52	49,52	3,21	3,21	3,21	3,21	22,96	41,79	60,05	78,26
16	116,38	116,38	116,38	107,66	10,69	10,69	10,69	2,4	64,64	115,14	167,73	219,19
17	97,04	89,63	89,63	89,63	11,21	2,72	2,72	2,72	81,34	138,45	200,19	264,65
18	100,03	100,03	100,03	99,7	1,86	1,86	1,86	1,53	80,99	132,35	182,05	232,05
19	106,33	106,33	106,33	106,33	0	0	0	0	52,21	90,71	129,93	169,67
20	59,21	59,21	59,21	59,21	3,95	3,95	3,95	3,95	28,42	54,99	81,23	109,75
21	116,47	116,47	116,47	105,29	10,65	10,65	10,65	0,03	29,76	55,11	79,62	104,35
22	59,9	50,7	48,3	48,3	34,46	13,8	8,42	8,42	39,43	76,83	115,65	151,14
23	98,58	98,58	98,58	97,21	3,12	3,12	3,12	1,68	15,21	27,12	38,58	50,09
24	44,29	44,29	44,29	41,21	13,56	13,56	13,56	5,67	57,73	86,67	116,01	146,13
25	31,57	31,57	31,57	31,57	0	0	0	0	24,2	42,47	60,72	80,19
26	48,49	48,49	48,49	48,49	0,43	0,43	0,43	0,43	11,4	21,07	30,96	40,28
27	57,38	57,38	45,14	45,14	27,12	27,12	0	0	11,44	20,44	29,83	38,23
28	123,66	123,66	123,66	123,66	1,23	1,23	1,23	1,23	18,95	30,69	42,05	53,44
29	135,65	135,65	135,65	121,46	16,16	16,16	16,16	4,01	31,21	51	72,07	93,15
30	113,22	110,3	110,3	110,3	5,13	2,41	2,41	2,41	115,9	206,68	320,07	424,75
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	16,01	29,97	46,72	65,05
32	87,55	87,55	87,55	87,55	0	0	0	0	19,67	35,69	51,67	67,31
33	192,62	192,62	192,62	187,41	3,22	3,22	3,22	0,42	59,59	112,22	159,35	209,09

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	67,74	67,74	67,74	64,98	9,29	9,29	9,29	4,84	64,62	119,83	174,6	229,11
35	106,3	106,3	106,3	106,3	4,3	4,3	4,3	4,3	19,63	35,39	51,45	67,34
36	160,74	160,74	160,74	160,74	3,38	3,38	3,38	3,38	92,14	159,96	228,88	305,72
37	34,95	34,95	34,95	34,95	0	0	0	0	39,35	74,23	109,96	145,91
38	55,81	55,81	55,81	55,81	0	0	0	0	11,55	21,14	32,96	45,2
39	113,45	113,45	113,45	105,39	13,18	13,18	13,18	5,14	82,12	147,57	218,16	284,69
40	61,94	61,94	61,94	61,94	5,68	5,68	5,68	5,68	74,69	131,33	189,58	245,52
41	116,33	116,33	116,33	116,33	0,05	0,05	0,05	0,05	69,08	115,18	164,68	211,82
42	124,61	124,61	124,61	124,61	2,95	2,95	2,95	2,95	21	36,89	53,88	70,69
43	43,35	42,81	41,13	41,13	7,68	6,33	2,16	2,16	76,76	141,19	210,02	270
44	76,98	76,98	76,98	67,3	15,67	15,67	15,67	1,13	33,86	59,9	86,48	113,67
45	17,1	17,1	17,1	17,1	0	0	0	0	63,55	119,16	171,8	225,43
46	108,83	108,83	105,53	105,53	6,57	6,57	3,34	3,34	117,48	216,69	329,51	443,35
47	41,63	41,63	41,63	41,63	0	0	0	0	51,84	85,6	117,71	149,97
48	71,69	71,69	71,69	69,97	9,5	9,5	9,5	6,87	22,06	39,44	57,44	75,59
49	71,71	71,71	71,71	71,71	4,7	4,7	4,7	4,7	99,84	175,49	250,58	326,54
50	187,39	187,39	187,39	187,39	1,37	1,37	1,37	1,37	77,25	140,85	203,65	266,67
51	47,39	47,39	47,39	43,65	8,57	8,57	8,57	0	11,9	21,46	31,67	41,85
52	60,27	60,27	60,27	48,08	25,35	25,35	25,35	0	37,98	66,55	94,73	125,83
53	76,96	76,96	76,96	76,96	0	0	0	0	25,25	40,49	53,76	67,29
54	67,01	67,01	67,01	64,85	4,54	4,54	4,54	1,17	23,85	46,99	70,57	91,19
55	140,11	140,11	140,11	140,11	1,87	1,87	1,87	1,87	116,48	203,23	291,25	386,83
56	128,63	128,63	128,63	123,47	4,18	4,18	4,18	0	19,8	33,45	44,14	54,37
57	33,05	33,05	33,05	33,05	3,54	3,54	3,54	3,54	66,83	103,49	133,42	163,67
58	45,37	45,37	45,37	45,37	0	0	0	0	14,48	25,39	36,01	46,68
59	83,4	83,4	83,4	83,4	12,1	12,1	12,1	12,1	32,4	57,83	84,87	112,13
60	63,87	63,87	63,87	63,87	0,79	0,79	0,79	0,79	27,4	53,37	79,49	105,65
61	78,43	78,43	78,43	75,16	4,35	4,35	4,35	0	34,79	68,43	104,93	143,06
62	93,99	85,54	85,54	85,54	11,84	1,78	1,78	1,78	60,36	115,28	168,69	220,95
63	85,17	80,91	80,91	78,7	8,22	2,81	2,81	0	16,51	28,33	38,89	49,28
64	146,64	137,29	135,78	135,78	24,77	16,81	15,53	15,53	28,14	49,85	70,1	89,66
65	120,86	120,86	120,86	120,86	6,62	6,62	6,62	6,62	19,23	34,31	49,41	64,95
66	133,53	133,53	133,53	133,53	0,97	0,97	0,97	0,97	12,82	22,77	32,65	42,52
67	98,09	98,09	98,09	98,09	2,54	2,54	2,54	2,54	24,19	46,31	66,84	83,93
68	62,24	62,24	62,24	54,32	21,28	21,28	21,28	5,85	78,47	136,2	196,61	257,58
69	56,22	56,22	54,67	54,67	8,83	8,83	5,83	5,83	24,17	46,34	67,62	85,65
70	114,54	114,54	114,54	114,54	8,37	8,37	8,37	8,37	61,01	112,43	161,58	204,97

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	56,68	56,68	56,68	56,68	2,72	2,72	2,72	2,72	48,23	82,81	115,61	150,58
72	172,66	172,66	172,66	172,66	2,51	2,51	2,51	2,51	52,1	95,25	140,26	186,55
73	86,32	86,32	86,32	86,32	0,9	0,9	0,9	0,9	27,53	65,31	101,52	138,15
74	71,06	71,06	71,06	71,06	2,69	2,69	2,69	2,69	54,74	111,54	164,4	215,7
75	144,94	144,94	144,94	144,94	0,48	0,48	0,48	0,48	31,02	52,63	74,1	96,38
76	78,37	78,37	78,37	78,37	1,4	1,4	1,4	1,4	41,21	73,57	105,79	138,41
77	164,66	162,95	162,95	162,95	4,44	3,36	3,36	3,36	70,52	127,4	191,9	261,82
78	69,46	62,3	62,3	60,8	14,24	2,47	2,47	0	42,63	81,65	118,12	149,48
79	26,19	26,19	26,19	21,69	25,07	25,07	25,07	3,58	60,87	110,95	163,03	214,55
80	76,43	76,43	76,43	76,43	9,11	9,11	9,11	9,11	24,63	44,4	67,05	89,7
81	31,35	31,35	31,35	19,41	61,51	61,51	61,51	0	19,33	34,36	49,03	64,09
82	37,67	37,67	37,67	34,54	11,48	11,48	11,48	2,22	12,87	23,25	36,01	51,2
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	10,95	19,12	27,07	34,89
84	42,06	42,06	42,06	39,81	5,65	5,65	5,65	0	25,52	47,68	69,31	91,32
85	27,31	27,31	27,31	27,31	1,04	1,04	1,04	1,04	66,2	114,26	160,6	207,83
86	61,45	61,45	61,45	61,45	0,18	0,18	0,18	0,18	32,43	53,66	75,75	102,73
87	110,9	110,9	110,9	99,24	16,09	16,09	16,09	3,88	15,3	27,05	40,18	52,79
88	124,08	124,08	124,08	124,08	3,76	3,76	3,76	3,76	52,53	103,04	153,77	205,22
89	101,05	101,05	101,05	66,31	57,74	57,74	57,74	3,51	25,29	47,99	72,22	101,27
90	141,06	141,06	141,06	134,81	6,41	6,41	6,41	1,7	48,78	87,59	127,45	166,88
91	133,59	133,59	133,59	133,59	3,74	3,74	3,74	3,74	102,7	193,53	286,17	378,49
92	74,88	74,88	74,88	74,88	1,45	1,45	1,45	1,45	35,48	71,36	105,95	140,11
93	65,63	65,63	65,63	63,86	5,24	5,24	5,24	2,41	25,99	43,19	60,09	81,08
94	118,66	118,66	118,66	118,66	3,26	3,26	3,26	3,26	23,92	40,46	57,38	75,04
95	150,12	79,96	79,96	78,47	91,31	1,9	1,9	0	48,48	94,81	147,12	198,93
96	73,4	73,4	73,4	73,4	1,03	1,03	1,03	1,03	20,1	34,48	47,47	59,91
97	36,98	36,98	36,98	36,38	3,79	3,79	3,79	2,1	135,86	242,87	336,46	430,93
98	122,52	122,52	122,52	122,52	0	0	0	0	75,43	139,28	203,32	268,56
99	58,18	58,18	58,18	56,72	2,57	2,57	2,57	0	21,73	43,61	66,3	88,31
100	33,48	33,48	33,48	33,48	3,56	3,56	3,56	3,56	23,48	43,09	62,83	83,08

ANNEXE 12 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode t4

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	68,56	68,56	68,56	66,94	2,42	2,42	2,42	0	33,53	60,31	87,25	111,9
2	69,36	69,36	66,84	66,84	4,51	4,51	0,71	0,71	19,75	36,2	51,51	69,17
3	78,92	78,92	78,92	75,78	6,16	6,16	6,16	1,94	97,73	204,31	309,36	410,1
4	121,09	121,09	112,21	111,46	10,1	10,1	2,03	1,35	45,71	98,14	151,58	199,46
5	47,38	47,38	47,38	47,38	3,27	3,27	3,27	3,27	39,35	83,62	123,99	159,09
6	14,7	14,7	13,2	13,85	14,4	14,4	2,72	7,78	28,65	58,41	97,85	129,58
7	28,65	28,65	28,65	28,65	5,52	5,52	5,52	5,52	45,94	90,78	139,88	195,13
8	50,49	50,13	50,13	50,13	0,72	0	0	0	19,47	39,67	67,12	102,34
9	18,78	18,78	18,78	17,37	8,12	8,12	8,12	0	11,92	24,86	37,88	51,37
10	54,32	54,32	54,32	54,32	3,84	3,84	3,84	3,84	45,49	93,18	140,02	187,02
11	81,65	81,65	81,65	81,27	4,32	4,32	4,32	3,83	10,37	21,84	35,15	47,87
12	132,72	132,72	132,72	132,72	2,91	2,91	2,91	2,91	35,11	86,42	141,24	189,11
13	103,46	103,46	103,46	103,46	3,61	3,61	3,61	3,61	17,58	33,9	51,4	67,6
14	100,99	100,99	100,99	100,99	5,48	5,48	5,48	5,48	24,03	45,06	66,18	87,89
15	49,5	49,5	49,5	49,5	3,17	3,17	3,17	3,17	19	38,57	64,03	88,36
16	118,51	118,51	107,66	107,66	12,72	12,72	2,4	2,4	54,98	119,06	181,55	241,52
17	89,23	89,23	89,23	87,26	2,26	2,26	2,26	0	74,14	136,61	194,41	258,51
18	105,45	98,95	98,95	98,95	7,38	0,76	0,76	0,76	63,23	119,38	171,32	236,57
19	106,33	106,33	106,33	106,33	0	0	0	0	52,83	105,13	135,68	161,91
20	59,21	59,21	59,21	59,21	3,95	3,95	3,95	3,95	20,75	43,95	73,64	102,64
21	107,96	107,96	107,96	105,29	2,57	2,57	2,57	0,03	20,87	40,09	59,85	82,93
22	48,3	48,3	48,3	48,3	8,42	8,42	8,42	8,42	32,36	67,2	102,75	142,72
23	97,85	97,85	97,85	97,21	2,35	2,35	2,35	1,68	12,1	24,92	38,42	52,17
24	44,29	44,29	41,21	41,21	13,56	13,56	5,67	5,67	44,31	74,42	109,09	144,46
25	31,57	31,57	31,57	31,57	0	0	0	0	18,69	36,2	52,7	69,3
26	48,49	48,49	48,49	48,49	0,43	0,43	0,43	0,43	9,63	20,03	30,64	41,44
27	45,14	45,14	45,14	45,14	0	0	0	0	9,04	17,75	28,14	38,69
28	123,66	123,66	123,66	123,66	1,23	1,23	1,23	1,23	14,94	28,95	40,54	51,63
29	121,46	121,46	121,46	121,46	4,01	4,01	4,01	4,01	27,39	58,22	90,06	124,24
30	109,2	109,2	109,2	109,2	1,39	1,39	1,39	1,39	109,22	222,02	356,03	499,91
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	16,1	31,5	52,9	72,52
32	87,55	87,55	87,55	87,55	0	0	0	0	19,16	39,14	59,88	79,43
33	195,19	188,05	188,05	187,41	4,59	0,77	0,77	0,42	47,4	96,88	144,73	198,32

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	70,9	70,46	64,98	64,98	14,39	13,68	4,84	4,84	46,93	89,29	141,44	199,65
35	105,14	105,14	105,14	105,14	3,16	3,16	3,16	3,16	21,96	41,15	60,81	78,94
36	160,74	160,74	160,74	160,74	3,38	3,38	3,38	3,38	79,71	146	225,14	294,75
37	34,95	34,95	34,95	34,95	0	0	0	0	31,03	69,47	103,91	138,64
38	55,81	55,81	55,81	55,81	0	0	0	0	9,62	21,9	34,61	48,26
39	107,91	107,91	107,91	105,39	7,65	7,65	7,65	5,14	66,44	136,37	204,61	281,26
40	61,94	59,62	59,62	59,62	5,68	1,72	1,72	1,72	55,49	111,03	170,17	232,24
41	117,59	117,59	117,59	116,33	1,14	1,14	1,14	0,05	55,68	108,07	147,32	184,98
42	124,61	124,61	124,61	124,61	2,95	2,95	2,95	2,95	20,42	41,7	61,72	79,43
43	41,87	41,87	41,13	41,13	4	4	2,16	2,16	71,56	144,38	208,2	274,11
44	76,98	67,3	67,3	67,3	15,67	1,13	1,13	1,13	29,12	63,71	103,58	142,74
45	17,1	17,1	17,1	17,1	0	0	0	0	49,29	99,17	159,53	199,2
46	108,83	106,12	106,12	105,53	6,57	3,92	3,92	3,34	108,35	230,72	322,13	405,89
47	41,63	41,63	41,63	41,63	0	0	0	0	42,69	89,37	139,27	192,79
48	69,97	69,97	69,97	69,97	6,87	6,87	6,87	6,87	17,57	32,96	50,81	68,52
49	71,71	71,71	71,71	68,49	4,7	4,7	4,7	0	84,18	171,65	220,97	264,33
50	199,9	187,39	187,39	187,39	8,14	1,37	1,37	1,37	58,78	122,86	184,29	238,16
51	47,39	47,39	47,39	43,65	8,57	8,57	8,57	0	13,16	23,17	33,8	46,66
52	60,27	59,04	59,04	48,08	25,35	22,8	22,8	0	35,45	70,92	112,98	150,96
53	76,96	76,96	76,96	76,96	0	0	0	0	23,63	43,73	61,37	79,5
54	67,01	67,01	67,01	64,85	4,54	4,54	4,54	1,17	21,16	42,89	67,16	89,12
55	140,11	140,11	140,11	140,11	1,87	1,87	1,87	1,87	88,23	176,97	262,96	362,83
56	123,47	123,47	123,47	123,47	0	0	0	0	10,88	21,3	31,58	41,67
57	34,3	33,05	33,05	32,3	7,46	3,54	3,54	1,19	57,88	119,6	168,78	202,98
58	51,56	51,56	45,37	45,37	13,64	13,64	0	0	14,72	29,93	45,68	62,34
59	83,4	83,4	83,4	83,4	12,1	12,1	12,1	12,1	29,18	60,98	99,89	141,95
60	63,87	63,87	63,87	63,87	0,79	0,79	0,79	0,79	28,93	54,03	80,31	106,7
61	78,43	75,66	75,66	75,16	4,35	0,67	0,67	0	26,93	54,51	92,08	131,75
62	98,6	98,6	85,54	85,54	17,33	17,33	1,78	1,78	80,1	152,72	234,24	314,1
63	80,91	78,7	78,7	78,7	2,81	0	0	0	16,26	29,53	40,53	52,08
64	119,78	119,78	119,78	119,78	1,91	1,91	1,91	1,91	27,49	47,86	66,46	85,1
65	120,86	120,86	120,86	120,86	6,62	6,62	6,62	6,62	16,01	37,2	64,49	90,79
66	133,53	133,53	133,53	133,53	0,97	0,97	0,97	0,97	10,66	21,12	32,12	42,01
67	98,09	98,09	98,09	97,75	2,54	2,54	2,54	2,18	21,99	45,64	65,86	86,4
68	56,12	54,32	54,32	54,32	9,35	5,85	5,85	5,85	73,53	146,81	214,08	276,62
69	73,11	73,11	52,41	52,41	41,52	41,52	1,45	1,45	22,3	39,43	63,5	93,05
70	114,54	114,54	114,54	113,94	8,37	8,37	8,37	7,81	59,98	116,21	165,94	209,96

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	56,68	56,68	56,68	56,68	2,72	2,72	2,72	2,72	37,27	75,07	123,47	175,13
72	172,66	172,66	172,66	172,66	2,51	2,51	2,51	2,51	46,4	85,05	118,31	149,35
73	94,04	94,04	94,04	86,32	9,92	9,92	9,92	0,9	16,43	34,09	53,28	71,76
74	71,06	70,63	70,63	69,2	2,69	2,07	2,07	0	43,67	120,12	196,36	262,03
75	144,94	144,94	144,94	144,94	0,48	0,48	0,48	0,48	27,6	49,82	70,94	91,76
76	77,36	77,36	77,36	77,36	0,09	0,09	0,09	0,09	32,64	59,86	88,62	115,63
77	159,16	159,16	159,16	159,16	0,95	0,95	0,95	0,95	56,12	113,09	160,34	214,68
78	64,71	64,71	64,71	60,8	6,43	6,43	6,43	0	26,32	52,69	74,98	97,01
79	26,19	23,19	23,19	21,69	25,07	10,74	10,74	3,58	46,87	96,49	143,92	190,77
80	71,55	71,55	71,55	70,05	2,14	2,14	2,14	0	40,3	93,37	142,49	187,15
81	26,11	26,11	22,85	19,41	34,52	34,52	17,72	0	15,95	32,76	47,75	62,04
82	34,54	34,54	34,54	34,54	2,22	2,22	2,22	2,22	12,36	24,86	38,16	49,79
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	8,89	19,42	30,51	39,48
84	42,06	42,06	39,81	39,81	5,65	5,65	0	0	31,32	61,3	94,68	128,48
85	33,92	33,92	33,92	27,31	25,49	25,49	25,49	1,04	61,48	115,33	165,24	218,68
86	61,45	61,45	61,45	61,45	0,18	0,18	0,18	0,18	34,76	64,9	95,4	125,16
87	97,72	97,72	97,72	97,72	2,29	2,29	2,29	2,29	13,57	27,07	40,02	53,12
88	124,08	124,08	124,08	124,08	3,76	3,76	3,76	3,76	50,96	101,31	160,83	219,57
89	101,05	75,01	75,01	65,2	57,74	17,09	17,09	1,78	25,17	49,71	73,43	100,61
90	134,81	134,81	134,81	134,81	1,7	1,7	1,7	1,7	32,12	58,38	85,34	110,66
91	133,59	133,59	133,59	133,59	3,74	3,74	3,74	3,74	45,1	110,36	171,13	227,5
92	74,88	74,88	74,88	74,88	1,45	1,45	1,45	1,45	37,63	81,8	117,03	147,42
93	63,86	63,86	63,86	63,86	2,41	2,41	2,41	2,41	22,11	45,35	66,9	90,01
94	118,66	118,66	118,66	118,66	3,26	3,26	3,26	3,26	18,75	37,19	55	72,61
95	95,78	95,78	95,78	78,47	22,06	22,06	22,06	0	32,88	67,35	104,07	148,86
96	73,4	73,4	73,4	73,4	1,03	1,03	1,03	1,03	19,47	36,46	55,61	73,17
97	39,91	39,91	39,91	36,38	12,01	12,01	12,01	2,1	97,54	202,52	293,19	377,94
98	122,82	122,82	122,82	122,52	0,24	0,24	0,24	0	62,01	124,37	193,57	262,96
99	58,18	58,18	58,18	56,72	2,57	2,57	2,57	0	18,45	41,47	63,13	83,21
100	33,48	33,48	33,48	33,48	3,56	3,56	3,56	3,56	22,92	41,72	59,43	79,25

ANNEXE 13 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode t5

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	73,76	73,61	66,94	66,94	10,19	9,96	0	0	43,87	67,43	101,37	123,76
2	69,36	69,36	69,36	66,84	4,51	4,51	4,51	0,71	22,68	36,69	55,87	65,97
3	78,92	78,92	78,92	75,78	6,16	6,16	6,16	1,94	82,49	152,01	259,95	335,72
4	121,09	121,09	121,09	112,21	10,1	10,1	10,1	2,03	43,21	85,44	144,12	182,48
5	55,54	47,38	47,38	47,38	21,05	3,27	3,27	3,27	38,64	65,1	102,9	128,23
6	15,42	14,44	13,85	13,2	20	12,37	7,78	2,72	27,54	47,58	81,24	105,21
7	29,55	28,65	28,65	28,65	8,84	5,52	5,52	5,52	41,38	72,93	134,24	183,41
8	53,22	50,49	50,49	50,13	6,16	0,72	0,72	0	19,53	32,64	55,19	71,17
9	18,78	18,78	17,37	17,37	8,12	8,12	0	0	22,06	38,36	65,81	85,08
10	54,44	54,32	54,32	54,32	4,07	3,84	3,84	3,84	62,38	118,25	193,81	258,72
11	81,65	81,65	81,65	81,27	4,32	4,32	4,32	3,83	10,05	16,93	27,08	34,25
12	140,33	132,72	132,72	132,72	8,81	2,91	2,91	2,91	33,84	65,51	114,94	149,91
13	103,46	103,46	103,46	103,46	3,61	3,61	3,61	3,61	22,12	38,61	62,39	76,2
14	100,99	100,99	100,99	100,99	5,48	5,48	5,48	5,48	27	46,21	73,66	89,59
15	49,52	49,52	49,52	49,5	3,21	3,21	3,21	3,17	19,85	34,27	61,55	82,77
16	121,29	116,38	107,66	107,66	15,36	10,69	2,4	2,4	52,51	96,2	154,99	194,28
17	95,65	90,47	89,63	87,26	9,61	3,68	2,72	0	66,49	107,71	185,63	239,51
18	100,03	100,03	100,03	98,95	1,86	1,86	1,86	0,76	80,06	128,49	201,23	248,46
19	106,33	106,33	106,33	106,33	0	0	0	0	53,16	88,47	142,07	177,7
20	59,21	59,21	59,21	59,21	3,95	3,95	3,95	3,95	22	37,25	60,13	75,46
21	115,84	112,34	105,29	105,29	10,05	6,73	0,03	0,03	24,17	40,7	67,09	84,58
22	59,9	59,9	48,3	48,3	34,46	34,46	8,42	8,42	36,79	61,66	104,64	134,93
23	99,34	98,58	98,58	97,21	3,91	3,12	3,12	1,68	13,1	21,57	34,63	43,34
24	44,29	44,29	44,29	41,21	13,56	13,56	13,56	5,67	70,9	94,63	130,27	160,92
25	31,57	31,57	31,57	31,57	0	0	0	0	21,37	34,51	55,92	70,14
26	48,49	48,49	48,49	48,49	0,43	0,43	0,43	0,43	10,72	17,73	27,95	34,8
27	57,38	57,38	45,14	45,14	27,12	27,12	0	0	10,01	16,7	26,76	33,39
28	123,66	123,66	123,66	123,66	1,23	1,23	1,23	1,23	12,39	22,48	37,18	46,88
29	135,65	135,65	135,65	121,46	16,16	16,16	16,16	4,01	22,92	37,01	60,21	76,67
30	110,3	110,3	110,3	109,2	2,41	2,41	2,41	1,39	107,22	198,11	334,85	430,62
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	14,71	24,5	42,91	55,93
32	87,55	87,55	87,55	87,55	0	0	0	0	16,85	28,72	46,3	57,41
33	211,22	192,29	192,29	187,41	13,18	3,04	3,04	0,42	50,33	89,77	148,35	184,57

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	74,16	67,74	67,74	64,98	19,65	9,29	9,29	4,84	55,84	99,26	163,97	207,67
35	107,69	106,3	106,3	105,14	5,66	4,3	4,3	3,16	18,42	30,68	48,25	59,82
36	160,74	160,74	160,74	160,74	3,38	3,38	3,38	3,38	89,97	125,08	184,16	233,8
37	34,95	34,95	34,95	34,95	0	0	0	0	31,64	58,71	97,93	123,89
38	55,81	55,81	55,81	55,81	0	0	0	0	10,03	16,59	27,57	36,58
39	113,45	107,91	106,89	105,39	13,18	7,65	6,63	5,14	73,78	123,94	197,11	238,48
40	61,94	61,94	61,94	59,62	5,68	5,68	5,68	1,72	61,19	101,91	154,1	177,72
41	117,59	116,33	116,33	116,33	1,14	0,05	0,05	0,05	64,65	100,92	151,46	187,21
42	124,61	124,61	124,61	124,61	2,95	2,95	2,95	2,95	18,89	31,76	51,15	64,48
43	43,35	43,35	43,35	41,13	7,68	7,68	7,68	2,16	71,28	116,02	183,62	232,96
44	76,98	76,98	76,98	67,3	15,67	15,67	15,67	1,13	28,33	44,31	70,49	87,67
45	17,1	17,1	17,1	17,1	0	0	0	0	54,96	91,32	149,81	190,77
46	108,83	108,83	108,83	106,12	6,57	6,57	6,57	3,92	103,9	191,99	324,26	403,03
47	41,63	41,63	41,63	41,63	0	0	0	0	47,28	80,57	116,73	136,89
48	71,69	71,69	70,96	69,97	9,5	9,5	8,39	6,87	21,2	33,02	52,15	63,61
49	71,71	71,71	71,71	68,49	4,7	4,7	4,7	0	89,18	147,06	232,15	281,28
50	187,39	187,39	187,39	187,39	1,37	1,37	1,37	1,37	67,04	112,38	181,23	230,34
51	47,39	47,39	47,39	43,65	8,57	8,57	8,57	0	10,98	17,68	28,36	35,85
52	60,27	60,27	60,27	48,08	25,35	25,35	25,35	0	46,03	72,29	110,57	135,65
53	76,96	76,96	76,96	76,96	0	0	0	0	29,92	49,74	77,39	97,48
54	67,01	67,01	67,01	64,85	4,54	4,54	4,54	1,17	26,12	42,53	68,89	86,91
55	174,61	137,38	137,38	140,11	26,95	-0,12	-0,12	1,87	99,14	164,38	265,63	335,16
56	128,63	128,63	128,63	123,47	4,18	4,18	4,18	0	17,16	28,31	45,13	57,81
57	33,05	33,05	33,05	33,05	3,54	3,54	3,54	3,54	59,4	94,55	147,72	179,28
58	51,56	51,56	51,56	45,37	13,64	13,64	13,64	0	13,36	21,77	34,14	42,44
59	83,4	83,4	83,4	83,4	12,1	12,1	12,1	12,1	30,62	50,95	77,77	95,56
60	63,87	63,87	63,87	63,87	0,79	0,79	0,79	0,79	24,15	58,47	115,61	135,37
61	78,43	78,43	78,43	75,66	4,35	4,35	4,35	0,67	41,78	98,13	154,81	181,13
62	111,07	111,07	111,07	85,54	32,16	32,16	32,16	1,78	60,45	115,02	219,82	258,21
63	82,37	80,91	79,67	80,16	4,66	2,81	1,23	1,86	16,46	27,08	41,46	50,9
64	140,58	126,79	126,79	119,78	19,61	7,88	7,88	1,91	26,06	44,58	75,81	122,53
65	120,86	120,86	120,86	120,86	6,62	6,62	6,62	6,62	38,26	69,53	112,38	136,25
66	133,53	133,53	133,53	133,53	0,97	0,97	0,97	0,97	15,41	24,15	35,51	42,79
67	110,69	98,09	98,09	98,09	15,71	2,54	2,54	2,54	24,25	38,42	58,65	73,79
68	63,81	63,81	63,81	54,32	24,34	24,34	24,34	5,85	187,77	265,76	356,9	419,93
69	59,61	54,67	54,67	53,16	15,39	5,83	5,83	2,9	50,74	88,59	139,48	169,33
70	114,54	114,54	114,54	113,94	8,37	8,37	8,37	7,81	106,63	163,72	226,02	258,31

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	56,68	56,68	56,68	56,68	2,72	2,72	2,72	2,72	49,2	90,35	157,37	198,39
72	172,66	172,66	172,66	172,66	2,51	2,51	2,51	2,51	54,42	92,35	172,03	234,39
73	94,04	94,04	94,04	86,32	9,92	9,92	9,92	0,9	22,5	38,37	63,82	77,81
74	71,06	71,06	71,06	69,2	2,69	2,69	2,69	0	40,15	82,49	145,66	187,51
75	144,94	144,94	144,94	144,94	0,48	0,48	0,48	0,48	28,88	45,93	72,33	87,85
76	78,37	78,37	78,37	77,36	1,4	1,4	1,4	0,09	35,61	56,56	84,56	102,24
77	164,66	162,95	162,95	159,16	4,44	3,36	3,36	0,95	62,26	101,45	156	198,53
78	69,46	69,46	62,3	61,99	14,24	14,24	2,47	1,96	33,82	60,16	103,19	129,54
79	26,19	26,19	26,19	21,69	25,07	25,07	25,07	3,58	49,15	92,58	155,82	197,05
80	76,43	76,43	76,43	70,05	9,11	9,11	9,11	0	21,82	36,23	58,39	71,56
81	31,35	26,11	26,11	19,41	61,51	34,52	34,52	0	15,86	25,74	39,52	47,46
82	45,78	37,67	37,67	34,54	35,48	11,48	11,48	2,22	14,48	22,95	40,82	55,31
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	10,74	17,2	36,7	51,02
84	52,91	52,91	42,06	42,06	32,91	32,91	5,65	5,65	49,58	81,2	137	165,18
85	27,31	27,31	27,31	27,31	1,04	1,04	1,04	1,04	66	100,76	156,05	201,01
86	61,45	61,45	61,45	61,45	0,18	0,18	0,18	0,18	31,83	52,18	119,48	165,77
87	99,24	99,24	99,24	97,72	3,88	3,88	3,88	2,29	26,58	41,77	58,32	66,68
88	124,08	124,08	124,08	124,08	3,76	3,76	3,76	3,76	37,73	64,31	110,15	147,03
89	83,1	69,6	66,31	66,31	29,72	8,65	3,51	3,51	21,17	38,85	132,2	220,93
90	141,06	140,56	140,56	134,81	6,41	6,04	6,04	1,7	87,2	131,99	195,18	243,75
91	133,59	133,59	133,59	133,59	3,74	3,74	3,74	3,74	89,97	147,65	232,33	305,38
92	74,88	74,88	74,88	74,88	1,45	1,45	1,45	1,45	76,25	128,93	207,71	251,03
93	64,4	63,86	63,86	65,12	3,27	2,41	2,41	4,43	44,82	77,47	126,99	163,35
94	118,66	118,66	118,66	118,66	3,26	3,26	3,26	3,26	31,91	52,87	81,63	98,1
95	81,77	81,77	81,77	78,47	4,21	4,21	4,21	0	46,55	75,19	118,69	167,25
96	73,4	73,4	73,4	73,4	1,03	1,03	1,03	1,03	37,06	59,39	89,81	109,78
97	36,98	36,98	36,98	36,98	3,79	3,79	3,79	3,79	227,44	329,07	489,5	618,29
98	125,41	122,82	122,82	122,52	2,36	0,24	0,24	0	72,9	146,85	287,22	380,21
99	58,18	58,18	58,18	56,72	2,57	2,57	2,57	0	36,92	65,82	109,28	144,17
100	33,48	33,48	33,48	33,48	3,56	3,56	3,56	3,56	38,02	63,52	101,64	127,34

ANNEXE 14 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode *AG*

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	73,61	73,61	68,56	68,56	9,96	9,96	2,42	2,42	44,63	90,48	150,03	150,03
2	66,84	66,84	66,84	66,84	0,71	0,71	0,71	0,71	23,67	55,66	55,66	76,02
3	79,23	80,77	80,77	80,77	6,58	8,65	8,65	8,65	136,24	253,04	253,04	390,53
4	121,19	121,88	113,01	113,01	10,19	10,82	2,76	2,76	91,14	156,3	156,3	211,33
5	49,13	48,8	47,38	47,38	7,08	6,36	3,27	3,27	47,19	74,51	149,42	149,42
6	14,7	14,7	14,7	13,85	14,4	14,4	14,4	7,78	53,14	139,58	178,65	231,16
7	29,9	28,65	28,65	28,65	10,13	5,52	5,52	5,52	67,95	138,35	189,82	221,28
8	50,49	50,49	50,49	50,13	0,72	0,72	0,72	0	49,31	85,22	85,22	112,63
9	17,37	17,37	17,37	17,37	0	0	0	0	27,6	41,22	41,22	65,75
10	56,69	56,69	56,69	55,31	8,37	8,37	8,37	5,74	78,98	156,94	156,94	156,94
11	81,65	81,65	81,65	81,65	4,32	4,32	4,32	4,32	16,84	35	35	45,38
12	132,72	132,72	132,72	132,72	2,91	2,91	2,91	2,91	103,4	125,02	125,02	196,13
13	105,49	105,49	105,49	105,49	5,64	5,64	5,64	5,64	81,81	109,1	109,1	136,35
14	100,99	100,99	100,99	100,99	5,48	5,48	5,48	5,48	40,96	58,54	58,54	104,12
15	49,52	49,5	49,5	49,5	3,21	3,17	3,17	3,17	61,09	68,57	86,42	110,55
16	128,05	128,05	128,05	107,66	21,79	21,79	21,79	2,4	77,14	245,63	245,63	346,45
17	96,9	107,48	87,26	87,26	11,05	23,17	0	0	131,08	174,09	230,45	304,45
18	99,95	105,45	99,95	99,95	1,78	7,38	1,78	1,78	109,77	148,32	206,52	293,54
19	106,33	106,33	106,33	106,33	0	0	0	0	52,66	122,71	122,71	188,85
20	63,66	59,21	59,21	59,21	11,76	3,95	3,95	3,95	59,67	78,22	123,3	140,46
21	113,11	112,13	112,13	105,29	7,46	6,53	6,53	0,03	37,16	71,35	71,35	103,44
22	50,7	50,59	50,59	50,59	13,8	13,56	13,56	13,56	96,84	101,21	101,21	149,58
23	98,58	98,4	97,21	97,21	3,12	2,93	1,68	1,68	19,64	40,3	40,3	70,46
24	44,81	40,75	40,75	40,75	14,9	4,49	4,49	4,49	82,9	182,72	293,5	370,02
25	32,13	31,57	31,57	31,57	1,77	0	0	0	31,71	55,6	55,6	77,16
26	48,49	48,49	48,49	48,49	0,43	0,43	0,43	0,43	16,2	35,98	35,98	47,92
27	45,14	45,14	45,14	45,14	0	0	0	0	18,58	24,21	35,12	45,71
28	123,66	123,66	123,66	123,66	1,23	1,23	1,23	1,23	26,08	37,49	53,02	66,61
29	121,69	121,46	121,46	121,46	4,2	4,01	4,01	4,01	52,92	65,65	90,92	111,69
30	111,36	110,3	110,3	110,3	3,4	2,41	2,41	2,41	121,19	246,42	470,19	470,19
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	25,32	36,55	53,72	67,45
32	87,55	96,91	96,91	96,91	0	10,69	10,69	10,69	23,07	44,45	44,45	72,58
33	188,05	188,05	188,05	188,05	0,77	0,77	0,77	0,77	74,87	121,23	157,55	234,08

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	66,12	70,9	67,74	66,12	6,68	14,39	9,29	6,68	94,6	107,49	164,25	215,25
35	106,3	106,3	106,3	106,3	4,3	4,3	4,3	4,3	37,06	83,25	83,25	109,33
36	160,74	160,74	160,74	160,74	3,38	3,38	3,38	3,38	131,22	244,3	355,77	447,75
37	41,39	34,95	34,95	34,95	18,43	0	0	0	48,1	86,87	86,87	121,11
38	57,24	55,81	55,81	55,81	2,56	0	0	0	19,09	37,03	37,03	52,31
39	106,89	106,89	106,89	106,89	6,63	6,63	6,63	6,63	77,79	161,05	223,54	307,65
40	59,62	59,62	59,62	59,62	1,72	1,72	1,72	1,72	66,71	151,03	151,03	218,22
41	129,11	119,25	116,33	116,33	11,04	2,56	0,05	0,05	85,78	110,1	218,55	218,55
42	124,61	124,61	124,61	124,61	2,95	2,95	2,95	2,95	27,9	52,39	52,39	84,59
43	42,81	45,1	45,1	41,87	6,33	12,02	12,02	4	88,13	144,34	191,06	261,21
44	71,13	67,84	67,84	67,3	6,88	1,94	1,94	1,13	64,34	77,96	118,3	158,29
45	17,85	17,1	17,1	17,1	4,39	0	0	0	63,57	124,9	124,9	188,63
46	108,08	106,12	106,12	106,12	5,84	3,92	3,92	3,92	201,87	324,96	324,96	434,75
47	41,63	41,63	41,63	41,63	0	0	0	0	92,86	115,48	158,41	213,7
48	69,97	69,97	69,97	69,97	6,87	6,87	6,87	6,87	22,93	39,08	56,21	67,99
49	73,5	71,14	68,49	68,49	7,31	3,87	0	0	67,01	126,23	152,23	277,07
50	191,34	187,39	187,39	187,39	3,51	1,37	1,37	1,37	83,04	150,29	150,29	226,8
51	43,65	43,65	43,65	43,65	0	0	0	0	23,31	53,11	53,11	69,11
52	48,08	49,31	49,31	48,08	0	2,56	2,56	0	36,24	56,04	71,03	96,46
53	76,96	76,96	76,96	76,96	0	0	0	0	28,68	47,99	47,99	68,09
54	66,08	66,08	64,85	64,85	3,09	3,09	1,17	1,17	26,2	56,83	93,04	93,04
55	151,95	151,95	140,11	140,11	10,48	10,48	1,87	1,87	118,16	144,25	191,44	295,64
56	128,63	128,63	128,63	128,63	4,18	4,18	4,18	4,18	19,32	47,12	47,12	74,29
57	33,05	33,05	33,05	33,05	3,54	3,54	3,54	3,54	70,17	159,57	159,57	219,51
58	45,37	59,72	51,56	45,37	0	31,63	13,64	0	22,23	37,21	58,1	73,66
59	83,4	83,4	83,4	83,4	12,1	12,1	12,1	12,1	66,73	111,77	195,9	195,9
60	63,87	63,87	63,87	63,87	0,79	0,79	0,79	0,79	55,76	94,4	153,95	153,95
61	75,66	78,43	75,66	75,66	0,67	4,35	0,67	0,67	48,99	80,21	116,09	153,22
62	85,54	85,54	85,54	85,54	1,78	1,78	1,78	1,78	132,01	89,3	179,71	215,62
63	84,64	80,16	80,16	78,7	7,55	1,86	1,86	0	18,94	44,62	44,62	73,59
64	119,78	119,78	119,78	119,78	1,91	1,91	1,91	1,91	42,72	82,73	82,73	108,09
65	120,86	120,86	120,86	120,86	6,62	6,62	6,62	6,62	31,4	57,32	80,05	104,75
66	137,15	133,53	133,53	133,53	3,71	0,97	0,97	0,97	19,76	27,45	39,26	50,16
67	97,75	98,09	97,75	97,75	2,18	2,54	2,18	2,18	47,29	103,62	103,62	144,88
68	59,11	63,81	63,81	54,32	15,18	24,34	24,34	5,85	53,2	118,33	191,03	260,33
69	53,16	53,16	53,16	53,16	2,9	2,9	2,9	2,9	38,49	51,25	75,7	89,57
70	121,13	114,54	114,54	113,94	14,61	8,37	8,37	7,81	70,39	148,22	148,22	206,38

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	56,68	56,68	56,68	56,68	2,72	2,72	2,72	2,72	54,78	78,71	124,78	145,12
72	172,66	172,66	172,66	172,66	2,51	2,51	2,51	2,51	57,63	71,38	128,33	154,6
73	94,04	94,04	86,32	86,32	9,92	9,92	0,9	0,9	48,1	92,73	92,73	121,64
74	69,2	70,63	70,63	69,2	0	2,07	2,07	0	70,93	130,9	130,9	184,6
75	144,94	144,94	144,94	144,94	0,48	0,48	0,48	0,48	84,37	156,37	156,37	187,01
76	78,37	78,37	78,37	77,36	1,4	1,4	1,4	0,09	29,68	63,34	92,94	118,36
77	163,64	159,69	159,69	159,16	3,79	1,29	1,29	0,95	102,05	190,29	190,29	236,19
78	62,3	62,3	61,99	61,99	2,47	2,47	1,96	1,96	53,94	69,27	98,39	122,41
79	21,69	24,04	24,04	21,69	3,58	14,8	14,8	3,58	55,09	118,06	180,92	234,74
80	72,32	72,32	72,32	70,05	3,24	3,24	3,24	0	56,68	69,53	69,53	96,76
81	19,41	26,11	26,11	19,41	0	34,52	34,52	0	21,54	52,18	70,21	81,43
82	38,63	35,5	35,5	34,54	14,32	5,06	5,06	2,22	17,94	34,23	34,23	48,75
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	16,09	23,48	29,94	39,86
84	39,81	54,74	54,74	39,81	0	37,5	37,5	0	97,22	124,13	124,13	176,4
85	27,31	27,03	27,03	27,03	1,04	0	0	0	86,23	182,47	182,47	270,13
86	67,9	67,9	67,9	63,7	10,69	10,69	10,69	3,85	65,23	98,1	98,1	147,47
87	97,72	97,72	97,72	97,72	2,29	2,29	2,29	2,29	21,26	26,04	43,36	56,05
88	124,08	124,08	124,08	124,08	3,76	3,76	3,76	3,76	62,79	149,61	149,61	211,22
89	65,2	65,2	65,2	65,2	1,78	1,78	1,78	1,78	39,29	88,88	124,81	163,33
90	141,06	134,81	134,81	134,81	6,41	1,7	1,7	1,7	43,48	83,12	83,12	112,25
91	141,73	141,73	133,59	133,59	10,06	10,06	3,74	3,74	99,31	211,35	211,35	277,68
92	74,88	84,71	84,71	74,88	1,45	14,77	14,77	1,45	58,87	111,9	111,9	131,03
93	65,63	65,63	65,63	63,86	5,24	5,24	5,24	2,41	44,12	71,89	95,46	171,69
94	121,52	121,52	118,66	118,66	5,75	5,75	3,26	3,26	33,82	86,08	86,08	105,08
95	78,47	95,78	95,78	78,47	0	22,06	22,06	0	127,31	87,51	116,52	169,89
96	74,98	73,4	73,4	73,4	3,21	1,03	1,03	1,03	33,87	38,49	56,75	74,59
97	39,91	37,13	37,13	37,13	12,01	4,21	4,21	4,21	138,26	279,58	279,58	389,3
98	122,52	122,52	122,52	122,52	0	0	0	0	104,64	85,42	157,67	212,82
99	56,72	58,73	58,73	58,73	0	3,54	3,54	3,54	39	46,84	72,91	72,91
100	33,48	33,48	33,48	33,48	3,56	3,56	3,56	3,56	40,78	56,72	87,19	87,19

ANNEXE 15 : Résultats de l'étude de l'effet de la variation du nombre de solutions visitées avant l'arrêt de la recherche : cas de la méthode *GRASP*

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1	81,56	81,56	68,56	68,56	21,84	21,84	2,42	2,42	69,63	101,76	150,22	176,99
2	66,84	66,84	66,84	66,84	0,71	0,71	0,71	0,71	29,68	56,6	56,6	72,28
3	78,92	78,92	78,92	78,92	6,16	6,16	6,16	6,16	142,65	306,8	355,87	450,78
4	121,09	121,09	111,46	111,46	10,1	10,1	1,35	1,35	67,07	121,51	200,91	200,91
5	78,4	48,88	48,88	47,38	70,88	6,54	6,54	3,27	35,27	57,12	105,34	105,34
6	28,5	14,7	14,7	14,7	121,79	14,4	14,4	14,4	31,64	77,26	117,46	158,95
7	28,65	28,65	28,65	28,65	5,52	5,52	5,52	5,52	87,61	151,88	197,83	197,83
8	61,77	50,49	50,49	50,49	23,22	0,72	0,72	0,72	24,05	48,11	65,78	82,19
9	18,78	18,78	17,37	17,37	8,12	8,12	0	0	24,29	24,29	40,71	62,96
10	77,07	55,31	55,31	54,44	47,33	5,74	5,74	4,07	71,29	139,88	139,88	198,95
11	81,27	81,27	81,27	81,27	3,83	3,83	3,83	3,83	12,46	31,34	44,07	44,07
12	132,72	132,72	132,72	132,72	2,91	2,91	2,91	2,91	51,27	113,97	140,39	208,34
13	105,49	105,49	105,49	103,46	5,64	5,64	5,64	3,61	34,97	60,04	128,14	189,59
14	101,11	101,11	100,99	100,99	5,61	5,61	5,48	5,48	36,21	52,81	89,61	89,61
15	49,5	49,5	49,5	49,5	3,17	3,17	3,17	3,17	63	63	113,91	113,91
16	110,2	110,2	110,2	110,2	4,81	4,81	4,81	4,81	137,44	137,44	192,27	230,09
17	97,68	97,68	87,26	87,26	11,94	11,94	0	0	74,54	145,9	231,94	231,94
18	99,95	99,95	99,95	99,95	1,78	1,78	1,78	1,78	103,43	180,87	180,87	255,19
19	106,33	106,33	106,33	106,33	0	0	0	0	67,47	117,49	164,17	164,17
20	63,66	63,66	59,21	59,21	11,76	11,76	3,95	3,95	34,49	55,91	102,47	125,93
21	112,43	112,43	112,43	105,36	6,81	6,81	6,81	0,1	58,78	58,78	102,58	102,58
22	48,3	48,3	48,3	48,3	8,42	8,42	8,42	8,42	53,42	85,9	118,25	153,45
23	97,21	97,21	97,21	97,21	1,68	1,68	1,68	1,68	15,45	31,3	41,64	52,55
24	43,21	41,21	41,21	41,21	10,79	5,67	5,67	5,67	87,53	149,29	259,87	259,87
25	31,57	31,57	31,57	31,57	0	0	0	0	21,98	46,54	69,87	95,05
26	55,98	48,49	48,49	48,49	15,95	0,43	0,43	0,43	14,51	31,71	50,23	50,23
27	57,38	57,38	45,14	45,14	27,12	27,12	0	0	11,67	23,86	36,05	47,18
28	123,66	123,66	123,66	123,66	1,23	1,23	1,23	1,23	15,3	29,01	47,88	62,5
29	135,65	121,46	121,46	121,46	16,16	4,01	4,01	4,01	23,03	46,3	113,57	113,57
30	109,2	109,2	109,2	109,2	1,39	1,39	1,39	1,39	335,06	335,06	458,55	458,55
31	36,5	36,5	36,5	36,5	0	0	0	0	25,02	25,02	57,75	57,75
32	107,63	107,63	107,63	96,91	22,94	22,94	22,94	10,69	27,67	27,67	40,65	59,85
33	189,16	189,16	188,05	188,05	1,36	1,36	0,77	0,77	83,29	152,55	210,29	210,29

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
34	70,9	70,9	64,98	64,98	14,39	14,39	4,84	4,84	78,59	122,9	183,73	183,73
35	105,14	105,14	105,14	105,14	3,16	3,16	3,16	3,16	33,14	70,36	93,24	121
36	160,74	160,74	160,74	160,74	3,38	3,38	3,38	3,38	123,22	299,51	299,51	491,06
37	41,39	34,95	34,95	34,95	18,43	0	0	0	43,93	84,37	108,99	149,06
38	55,81	55,81	55,81	55,81	0	0	0	0	16,43	30,11	42,09	62,84
39	123,51	106,89	106,89	106,89	23,21	6,63	6,63	6,63	62,9	135,02	210,44	320,68
40	68,51	59,62	59,62	59,62	16,89	1,72	1,72	1,72	69,18	180,92	180,92	180,92
41	129,11	129,11	116,33	116,33	11,04	11,04	0,05	0,05	75,58	113,19	172,05	235,41
42	124,61	124,61	124,61	124,61	2,95	2,95	2,95	2,95	22,58	35,62	56,88	77,92
43	41,13	41,13	41,13	41,13	2,16	2,16	2,16	2,16	129,98	129,98	186,04	276,9
44	67,3	67,3	67,3	67,3	1,13	1,13	1,13	1,13	47,94	93,17	160,53	160,53
45	17,1	17,1	17,1	17,1	0	0	0	0	66,47	66,47	111,35	147,27
46	113,85	113,85	106,12	106,12	11,49	11,49	3,92	3,92	146,83	146,83	275,95	328,93
47	47,21	41,63	41,63	41,63	13,4	0	0	0	60,12	121,58	160,65	183,83
48	81,94	81,94	69,97	69,97	25,16	25,16	6,87	6,87	17,64	44,19	54,92	73,73
49	87,13	70,95	70,95	70,95	27,22	3,59	3,59	3,59	66,69	109,3	136,7	251,91
50	188,61	188,61	188,61	187,39	2,03	2,03	2,03	1,37	121,35	121,35	168,48	222,73
51	46,4	46,4	46,4	43,65	6,3	6,3	6,3	0	34,11	34,11	61,75	61,76
52	51,06	51,06	48,08	48,08	6,2	6,2	0	0	45,8	45,8	75,62	95,34
53	76,96	76,96	76,96	76,96	0	0	0	0	21,92	39,49	51,07	68,68
54	64,85	64,85	64,85	64,85	1,17	1,17	1,17	1,17	51,76	51,76	93,29	93,29
55	157,74	157,74	140,11	140,11	14,69	14,69	1,87	1,87	104,02	181,07	276,88	376,26
56	133,66	128,63	128,63	128,63	8,25	4,18	4,18	4,18	26,24	37,25	59,39	59,39
57	33,05	33,05	33,05	32,3	3,54	3,54	3,54	1,19	63,6	158,45	158,45	230,4
58	56,16	51,56	45,37	45,37	23,78	13,64	0	0	18,62	33,23	49,27	62,82
59	86,35	86,35	86,35	83,4	16,06	16,06	16,06	12,1	116,61	116,61	208,49	208,49
60	94,87	94,87	94,87	63,87	49,71	49,71	49,71	0,79	80,56	128,68	190,1	190,1
61	99,57	89,65	80,07	80,07	32,48	19,28	6,53	6,53	30,22	51,34	85,73	115,08
62	115,23	115,23	103,65	93,53	37,11	37,11	23,33	11,29	60,34	128,98	179,49	179,49
63	87,75	86,1	78,7	78,7	11,5	9,4	0	0	15,59	25,58	42,08	52,4
64	119,78	119,78	119,78	119,78	1,91	1,91	1,91	1,91	32,47	77,49	103,89	119,29
65	130,36	130,36	120,86	120,86	15	15	6,62	6,62	42,71	42,71	74,7	85,82
66	180,11	169,95	137,15	133,53	36,19	28,51	3,71	0,97	18,56	27,97	41,55	55,54
67	98,09	98,09	98,09	98,09	2,54	2,54	2,54	2,54	24,87	50,69	73,62	97,35
68	65,37	65,37	59,11	59,11	27,38	27,38	15,18	15,18	77,48	138,14	172,14	234,54
69	104,47	104,47	85,74	52,41	102,23	102,23	65,97	1,45	23,77	38,7	89,58	89,58
70	114,54	114,54	113,94	113,94	8,37	8,37	7,81	7,81	43,91	71,94	161,38	161,38

instance	Valeur de la fonction objectif				Déviation par rapport à l'optimum (%)				Temps de calcul			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
71	56,68	56,68	56,68	56,68	2,72	2,72	2,72	2,72	72,92	108,69	130,18	162,9
72	181,58	172,66	172,66	172,66	7,8	2,51	2,51	2,51	45,42	73,37	123,2	178,58
73	86,32	86,32	86,32	86,32	0,9	0,9	0,9	0,9	48,61	48,61	92,78	139,21
74	71,06	71,06	69,2	69,2	2,69	2,69	0	0	76,35	140,59	179,56	237,66
75	200,91	186,66	150,51	144,94	39,28	29,4	4,34	0,48	35,13	64,68	108,35	108,35
76	89,89	78,79	78,37	78,37	16,3	1,94	1,4	1,4	30,61	50,86	87,16	116,9
77	175,71	175,71	163,63	163,63	11,45	11,45	3,79	3,79	132,82	171,94	214,48	240,78
78	62,3	62,3	62,3	60,8	2,47	2,47	2,47	0	47,67	83,49	111,13	147,07
79	24,04	24,04	23,48	21,69	14,8	14,8	12,13	3,58	84,23	84,23	105,12	153,48
80	70,05	70,05	70,05	70,05	0	0	0	0	29,62	53,66	82,76	127,33
81	22,85	22,85	20,5	19,41	17,72	17,72	5,62	0	43,38	43,38	86,25	86,25
82	34,54	34,54	34,54	34,54	2,22	2,22	2,22	2,22	18,27	34,44	43,33	55,09
83	109,07	109,07	109,07	109,07	0	0	0	0	17,97	17,97	29,22	36,35
84	63,08	63,08	39,81	39,81	58,45	58,45	0	0	159,04	159,04	207,46	259,84
85	50,84	50,84	48,68	27,31	88,09	88,09	80,1	1,04	69,55	118,34	145	198,78
86	61,45	61,45	61,45	61,45	0,18	0,18	0,18	0,18	79,14	79,14	131,3	151,87
87	104,36	97,72	97,72	97,72	9,24	2,29	2,29	2,29	18,16	32,57	42,54	56,23
88	124,08	124,08	124,08	124,08	3,76	3,76	3,76	3,76	88,19	161,74	215,24	289,55
89	76,35	76,35	65,2	65,2	19,19	19,19	1,78	1,78	55,31	55,31	125,12	148,09
90	149,43	134,81	134,81	134,81	12,73	1,7	1,7	1,7	38,21	56,92	110,5	110,5
91	141,73	141,73	141,73	133,59	10,06	10,06	10,06	3,74	170,56	170,56	247,89	300,35
92	74,88	74,88	74,88	74,88	1,45	1,45	1,45	1,45	57,22	93,51	129,19	154,15
93	65,63	65,63	65,63	63,86	5,24	5,24	5,24	2,41	54,62	54,62	112,45	158,71
94	118,66	118,66	118,66	118,66	3,26	3,26	3,26	3,26	26,29	40,55	64,52	88,17
95	95,78	95,78	78,47	78,47	22,06	22,06	0	0	86,6	86,6	200,4	200,4
96	73,4	73,4	73,4	73,4	1,03	1,03	1,03	1,03	17,01	29,04	45,96	57,6
97	51,21	51,21	38,16	38,16	43,73	43,73	7,1	7,1	242,5	242,5	427,38	427,38
98	122,52	122,52	122,52	122,52	0	0	0	0	65,87	167,35	167,35	167,35
99	56,72	56,72	56,72	56,72	0	0	0	0	29,61	52,4	71,73	99,03
100	33,48	33,48	33,48	33,48	3,56	3,56	3,56	3,56	29,49	61,46	75,9	101,54

ANNEXE 16 : Résultats des méthodes de recherche dans le voisinage en termes de déviation par rapport à l'optimum

Instance	Recuit-simulé					Recherche avec tabous					Δ% (AG)	Δ% (GRASP)
	Δ% (V1)	Δ% (V2)	Δ% (V3)	Δ% (V4)	Δ% (V5)	Δ% (V1)	Δ% (V2)	Δ% (V3)	Δ% (V4)	Δ% (V5)		
1	9,96	0	0	0	0	25,52	2,42	0	0	0	2,42	2,42
2	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
3	5,57	1,94	1,94	1,94	1,94	11,18	2,27	2,27	1,94	1,94	6,16	6,16
4	2,76	2,03	1,35	1,35	1,35	10,1	1,35	1,55	2,03	2,03	9,77	1,35
5	30,78	3,27	3,27	3,27	3,27	30,78	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27
6	7,78	7,78	7,78	2,72	2,72	7,78	7,78	7,78	2,72	2,72	7,78	14,4
7	8,84	5,52	5,52	5,52	5,52	10,42	5,52	8,84	5,52	5,52	5,52	5,52
8	3,85	0,72	0	0	0	0,72	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	8,12	0	0	0	0	0	0
10	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84	8,37	8,37	3,84	3,84	3,84	3,84	5,74
11	3,83	3,83	3,83	3,83	3,83	7,13	3,83	3,83	3,83	3,83	3,83	3,83
12	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	6,79	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91
13	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	5,64	3,61
14	5,61	5,48	5,48	5,48	5,48	6,08	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48
15	5,81	3,17	3,17	3,17	3,17	26,87	3,17	3,21	3,17	3,17	3,21	3,17
16	3,86	2,4	2,4	2,4	2,4	22,13	12,72	2,4	2,4	2,4	4,81	4,81
17	0	0	0	0	0	9,61	2,26	2,72	0	0	0	0
18	1,78	0,76	0,76	0,76	0,76	1,78	1,78	1,53	0,76	0,76	1,78	1,78
19	4,91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	11,76	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95
21	2,46	2,57	0,03	0,03	0,03	28,31	2,57	0,03	0,03	0,03	0,03	0,1
22	13,56	8,42	8,42	8,42	8,42	19,98	8,42	8,42	8,42	8,42	13,56	8,42
23	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
24	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	13,56	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67
25	0	0	0	0	0	1,77	0	0	0	0	1,77	0
26	5,49	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
29	4,01	4,54	4,01	4,01	4,01	50,17	4,01	4,01	4,01	4,01	4,2	4,01
30	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	18,57	1,39	1,39	1,39	1,39	2,41	1,39
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	12,24	0	0	0	0	0	10,69

Instance	Recuit-simulé					Recherche avec tabous					Δ% (AG)	Δ% (GRASP)
	Δ% (V1)	Δ% (V2)	Δ% (V3)	Δ% (V4)	Δ% (V5)	Δ% (V1)	Δ% (V2)	Δ% (V3)	Δ% (V4)	Δ% (V5)		
33	0,77	0,42	0,42	0,42	0,42	9,15	0,77	0,42	0,42	0,42	0,77	0,77
34	22,15	4,84	4,84	4,84	4,84	9,68	4,84	4,84	4,84	4,84	9,29	4,84
35	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	6,64	3,16	4,3	3,16	3,16	3,16	3,16
36	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38
37	32,42	0	0	0	0	32,42	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	6,63	5,14	5,14	5,14	5,14	10,57	10,95	5,14	6,63	5,14	6,63	5,14
40	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	5,68	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72
41	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	24,34	1,14	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
42	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95
43	2,16	3,03	2,16	2,16	2,16	4	2,16	2,16	2,16	2,16	6,33	3,03
44	10,43	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	5,95	3,34	3,34	3,34	3,34	5,95	3,92	3,34	6,57	3,34	3,92	3,92
47	0	0	0	0	0	13,45	0	0	0	0	0	0
48	7,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87
49	2,42	0	0	0	0	6,6	4,7	0	4,7	4,7	0	3,59
50	4,17	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	2,92	1,37	1,37	1,37	3,51	1,37
51	15,03	0	0	0	0	12,85	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	25,35	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	4,54	4,54	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
55	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	12,2	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87
56	3,58	0	0	0	0	4,18	4,18	0	0	0	3,58	4,18
57	3,54	1,19	1,19	1,19	1,19	3,54	3,54	1,19	1,19	1,19	3,54	1,19
58	13,64	0	0	0	0	9,04	0	0	0	0	0	0
59	14,87	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
60	17,23	0,79	0,79	0,79	0,79	27,55	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
61	0,67	0,67	0	0	0	19,27	0	0	0	0	0,67	0
62	13,67	1,78	1,78	1,78	1,78	31,83	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	11,29
63	0	0	0	0	0	15,67	0	0	0	0	1,23	1,86
64	7,88	1,91	1,91	1,91	1,91	26,65	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91
65	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62
66	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
67	15,45	2,18	2,18	2,18	2,18	15,45	2,54	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18
68	15,18	6,98	5,85	5,85	5,85	24,34	15,18	5,85	5,85	5,85	15,18	15,18

Instance	Recuit-simulé					Recherche avec tabous					Δ% (AG)	Δ% (GRASP)
	Δ% (V1)	Δ% (V2)	Δ% (V3)	Δ% (V4)	Δ% (V5)	Δ% (V1)	Δ% (V2)	Δ% (V3)	Δ% (V4)	Δ% (V5)		
69	15,64	1,45	1,45	1,45	1,45	15,64	2,9	8,83	1,45	1,45	2,9	1,45
70	8,37	7,81	7,81	7,81	7,81	14,61	7,81	8,37	7,81	7,81	7,81	8,37
71	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72
72	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51
73	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	22,54	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
74	7,24	0	0	0	0	8,63	2,07	2,69	0	0	0	0
75	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	18,88	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
76	1,4	0,09	0,09	0,09	0,09	1,4	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
77	4,2	0,95	0,95	0,95	0,95	24,67	0,95	3,91	0,95	0,95	0,95	0,95
78	2,47	0	0	0	0	2,47	0	0	0	0	1,96	0
79	22,78	7,93	3,58	3,58	3,58	28,84	21,59	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58
80	0	0	0	0	0	5,88	2,14	3,93	0	0	0	0
81	0	0	0	0	0	17,72	0	0	0	0	0	0
82	19,38	2,22	2,22	2,22	2,22	28,88	2,22	2,22	2,22	2,22	2,22	2,22
83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
84	47,2	0	0	5,65	0	68,9	13,29	0	5,65	5,65	0	0
85	33,26	0	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	0	1,04
86	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	3,85	0,18
87	3,88	2,29	2,29	2,29	2,29	16,09	2,29	3,88	2,29	2,29	2,29	2,29
88	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	28,95	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76
89	17,75	3,51	1,78	3,51	1,78	17,75	3,51	2,34	3,51	3,51	1,78	1,78
90	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	16,18	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
91	14,04	3,74	3,74	3,74	3,74	10,06	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74
92	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	4,34	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
93	4,43	3,27	2,41	2,41	2,41	5,55	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
94	3,92	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26
95	14,39	10,17	0	3,16	0	14,39	0	0	0	0	0	11,86
96	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	3,21	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
97	4,21	3,79	2,1	2,1	2,1	4,21	3,79	2,1	2,1	2,1	3,79	2,1
98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
99	2,57	0	0	0	0	27,72	0	0	0	0	0	0
100	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	34,86	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56

ANNEXE 17 : Temps de résolution du code pour les différentes méthodes de recherche dans le voisinage

Instance	Recuit-simulé					Recherche avec tabous					AG	GRASP
	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5		
1	427,18	332,9	347,56	330,98	349,18	455,84	281,13	261,04	306,68	287,43	443,31	435,3
2	182,48	202,37	223,2	198,69	204,46	165,5	210,04	230,1	214,35	238,42	222,85	238,56
3	942,42	1008,12	766,96	972,84	980,95	530,59	728,26	855,86	1110,88	729,41	1101,15	968,57
4	470,59	495,1	510,55	485,3	496,13	359,82	535,73	485,26	577,68	515,59	571,28	519,38
5	275,62	290,5	295,23	278,23	295,99	340,19	359,12	332,55	354,17	351,38	306,53	306,77
6	451,67	314,1	355,23	356,15	325,29	297,32	283,68	320,91	364,47	299,07	438,15	350,47
7	494,18	514,82	499,87	501,92	475,04	465,51	459,72	470,02	445,56	626,35	560,76	459,82
8	281,41	246,55	284,37	238,06	251,03	203,89	241,77	232,86	198,59	186,05	300,11	303,3
9	141,42	127,23	162,09	131,71	132,9	129,07	141,69	131,49	133,84	105,88	148,47	167,24
10	416,04	397,82	441,2	434,07	430,58	311,68	390,9	435,43	458,92	466,09	455,66	508,13
11	96,4	93,35	116,88	95,16	95,06	98,25	96,75	103,04	108,78	82,5	109,91	115,2
12	455,64	427,93	404,55	436,62	454,31	544,35	510,85	344,72	444,65	421,24	442,07	364,89
13	345,41	307,6	340,05	316,7	337,02	223	188,79	255,85	170,58	202,81	329,7	355,33
14	206,14	232,69	248,81	225,91	227,54	248,57	221,04	254,92	196,08	259,58	243,21	245,3
15	282,8	264,48	280,89	258,41	270,42	184,74	192,62	198,26	226,34	246,41	315,61	237,64
16	697,29	585,31	564,66	586,45	615,69	417,67	446,81	444,11	493,56	503,66	615,31	592,28
17	707,69	736,25	664,13	671,39	759,2	488,59	512,26	522,97	588,83	666,47	824,93	692,29
18	523,6	472,26	508,89	511,88	524,36	521,71	544,9	542,97	521,28	624,09	529,82	503,64
19	409	356,39	348,89	391,01	373,1	424,57	298,32	368,01	389,84	276,31	407,62	380,01
20	313,13	263,57	292,06	264,76	260,3	205,06	257,74	235,7	271,11	243,81	323,17	288,66
21	251,31	263,11	264,53	250,78	249,82	291,09	214,91	275,55	213,37	224,12	270,54	258,22
22	363,07	386,99	353,16	344,37	364,74	454,65	303,96	345,63	361,45	412,12	457,98	400,47
23	564,78	531,06	572,57	125,42	125,81	729,7	124,74	608,87	124,85	130,49	144,08	573,33
24	584,19	628,2	607,79	663,25	752,15	387,56	944,62	391,52	395,03	368,21	795,45	598,72
25	201,02	199,73	216,43	201,04	194,65	226,85	176,79	201,8	175,45	201,51	217,14	235,59
26	107,79	105,71	119,51	105,12	105,84	99,54	98,1	109,86	107,41	106,59	119,23	136,95
27	94,21	686,56	658,74	90,64	90,89	103,58	88,5	567,59	92,47	89,96	103,44	697,98
28	164,27	144,82	181,93	165,35	154,04	164,74	135,19	145,96	164,03	197,09	185,89	191,3
29	267,61	196,54	252,97	223,02	219,99	181,76	248,27	254,08	285,09	168,08	243,74	266,76
30	1110,4	997,02	916,83	980,68	997,7	996,04	995,04	868,48	1109,25	1060,39	1019,69	884,55
31	162,82	154,21	172,46	152,8	158,01	113,74	116,36	131,3	179,36	125,65	165,74	181,48

Instance	Recuit-simulé					Recherche avec tabous					AG	GRASP
	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5		
32	171,78	162,54	207,55	169,3	183,32	107,76	173,24	220,43	181,5	189,16	173,16	180,1
33	539,25	519,67	480,31	508,33	500,85	559,9	530,53	489,07	518,18	479,46	587,52	467,8
34	390,44	481,77	442,59	443,52	446,01	449,44	492,92	453,99	448,03	550,73	545,33	448,78
35	209,78	204,94	249,03	221,36	226,76	183,45	173,52	176,03	159,19	168,27	261,77	271,48
36	1051,22	925,38	856,83	878,54	882,56	568,39	673,22	652,75	721,36	749,41	1008,64	895,95
37	249,2	251,25	260,98	265,37	265,73	319,35	287,99	301,92	315,47	356,84	291,7	259,42
38	129,15	119,64	144,27	115,79	117,33	91,6	103,95	128,94	108,57	121,35	133,93	158,06
39	537,42	501,55	544,96	557,95	543,17	800,75	695,47	590,1	582,83	730,78	631,47	453,22
40	525,06	588,05	478,84	518,83	553,55	285,35	603,03	437,44	587,18	678,83	564,26	451,18
41	449,74	452,13	450,65	483,86	473,55	612,76	507,74	562,84	509,54	420,03	588,97	485,01
42	431,27	432,19	448,8	156,53	154,2	342,46	152,95	422,02	161,73	140,62	186,35	597,58
43	675,62	567,58	605,93	636,11	590,88	612,01	617,91	579,91	554,71	672,57	682,17	533,28
44	297,35	345,18	343,8	310,79	360,5	287,33	259,77	260,56	292,88	268,13	379,94	382,99
45	415,57	425,44	389,6	401,38	414,1	551,68	489,13	329,69	508,23	515,43	407,41	413,75
46	1005,84	825,56	807,33	854,49	828,47	998,36	690,92	871,3	1069,37	1181,66	1006,37	813,17
47	442,12	377,72	408,07	426	412,52	427,02	373,57	376,5	410,43	469,61	521,17	426,42
48	227,57	183,51	185,55	169,32	180,8	147,28	148,79	181,57	157,59	187,53	195,7	183,62
49	495,68	506,02	442,26	548,05	523,47	732,66	787,21	286,8	687,12	800	460,86	411,44
50	502,17	514,08	451,3	505,45	539,54	554,59	562,28	511,61	553,3	602,47	506,59	368,43
51	140,08	125,87	149,68	119,97	114,35	113,26	103,8	114,04	112,88	105,07	154,85	152,41
52	254,67	222,88	261,32	225,57	232,53	311,8	309,85	240,37	220,25	274,27	253,38	275,2
53	236,18	229,07	231,57	158,94	164,24	185,9	202,44	207,24	188	182,02	167,87	280,77
54	234,05	176,26	231,03	180,66	183,65	177,64	178,38	246,36	211,5	257,95	189,4	230,55
55	849,75	843,52	766,32	822,52	832,76	832,31	976,04	704,26	787,92	816,65	872,52	773,33
56	117,45	153,76	151,31	125,79	118,52	139,53	151,28	145,39	108,37	125,6	144,47	140,15
57	459,62	447,07	413,01	435,45	448,8	558,03	577,08	342,41	535,72	398,3	498,32	455,81
58	147,08	122,15	144,54	121,03	118,27	120,37	108,9	127,19	127,67	119,03	161,34	151,48
59	460,23	392,81	386,37	432,15	410,48	323,18	294,09	319,75	267,54	321,36	496,92	441,08
60	339,5	342,44	344,47	282,37	292,27	293,98	241,05	263,04	218,39	221,24	330,97	310,64
61	268,78	310,11	301,23	290,43	299,24	296,03	257,76	285,51	287,29	355,67	327,78	300,67
62	558,61	494,96	496,37	505,33	490,68	555,96	560,3	418,13	772,33	593,39	642,7	540,93
63	135,42	141,93	161,63	135,75	138,09	150,78	112,94	135,86	129,27	129,92	145,26	165,63
64	310,69	278,05	246,56	236,13	256,25	241,08	192,58	217,07	216,23	247,51	293,58	236,68
65	201,79	201,63	234,79	196,08	196,7	270,11	162,12	242,48	164,66	216,46	243,43	235,06
66	101,3	101,86	124,09	105,37	102,15	104,45	116,23	112,56	102	102,01	112,74	132,93

Instance	Recuit-simulé					Recherche avec tabous					AG	GRASP
	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5		
67	296,33	310,27	321,49	289,58	293,76	284,24	329,01	233,25	210,17	182,7	328,12	298,2
68	629,96	551,84	568,43	593,1	593,88	574,37	543,39	592,74	487,14	601,62	594,62	556,61
69	180,78	200,15	209,3	192,3	191,93	163,69	221,63	204,7	224,18	255,45	227,46	201,71
70	460,84	387,42	413,73	453,81	438,38	432,57	456,66	381,47	432,77	434,79	467,33	468,54
71	354,01	342,87	367,14	340,66	341,47	388,7	359,94	329,75	382,71	355,71	441,42	374,34
72	442,75	413,62	423,77	405,08	397,1	443,29	347,64	406,26	272,5	409,16	459,46	380,66
73	203,76	260,44	315,19	301,6	326,77	203,06	403,76	255,11	162,57	184,82	286,83	285,09
74	444,48	468,13	464,82	457,4	451,13	276,01	439,47	514,21	491,86	530,6	522,06	499,29
75	339,55	292,9	334,76	302,16	326,91	280,51	215,17	238,08	223,94	222,27	355,57	307,73
76	213,43	259,63	268,51	236,34	230,57	290,57	316,36	286,95	322,35	307,77	293,01	274,92
77	492,18	567,96	576,42	563,81	640,45	450,57	514,04	497,05	482,01	562,21	599,96	526,32
78	330,86	320,03	347,71	332,76	317,56	312,74	271,45	346,79	291,05	369,2	384,66	346,14
79	361,52	354,78	409,91	404,08	427,34	387,83	531,97	484,29	541,84	482,4	522,42	428,84
80	241,47	263,7	320,92	285,96	320,59	143,55	447,01	268,51	322,63	223,51	269,75	361,29
81	190,14	191,63	224,71	180,85	172,4	180,46	171,27	244,1	128,38	173,98	182,41	235,25
82	112,39	111,15	144,34	112,63	113,77	134,54	113,97	136,49	115,45	105,68	133,75	146,35
83	86,26	85,88	117,49	87,37	87,26	90,02	88,19	107,32	88,97	84,53	96,98	128,8
84	590,08	374,57	377,67	363,32	368,45	398,16	202,88	260,18	282,35	294,26	438,03	403,45
85	553,68	597,59	537,86	598,74	596,11	748,66	610,24	566,79	480,88	530,14	602,46	524,89
86	388,43	412,39	389,83	379,56	390,87	393,59	238,67	317,43	265,33	331,62	433,91	338,26
87	112,3	108,61	127,96	108,26	110,43	122,56	113,2	119,02	108,64	109,64	127,74	143,11
88	545,85	621,2	500,4	514,52	566,85	227,47	398,6	518,58	505,1	534,55	598,54	563,98
89	330,89	331,93	338,64	344,44	385,91	376,84	433,63	288,16	361,88	229,65	366	361,55
90	253,19	316,65	292,91	283,96	293,03	237,37	328,49	335,37	311,84	430,97	311,21	313,65
91	574,23	773,2	618,75	747,82	771,73	599,67	577,44	587,13	835,15	874,5	808,08	709,84
92	311,49	313,17	326,08	325,46	326,38	304,2	315,77	291,03	357,77	329,77	324,03	356,02
93	243,78	283,16	291,12	264,44	280,29	335,11	232,37	226,99	209,86	216,24	309,33	284,4
94	208,03	240,81	225,56	218,07	199,89	194,49	165,53	206,63	185,01	178,63	223,97	229,27
95	423,32	377,61	415,12	412,46	421,98	402,98	288,22	387,62	457,96	480,66	556,45	438,43
96	169,36	162,9	187,04	166,17	165,41	174,48	159,13	172,02	155,1	162,7	182,8	186,1
97	908,78	881,91	819,83	858,11	896,74	919,49	1064,55	923,25	887,37	1081,97	960,45	852,27
98	497,01	538,03	464,32	489,67	468,21	434,07	582,12	426,63	543,86	604,34	575,04	517,14
99	177,5	177,51	216,26	195,52	185,17	116,23	177,54	231,46	231,78	219,98	215,4	220,16
100	224,97	187,67	251,06	198,13	203,96	128,72	175,5	228,49	160,21	208,61	231,22	219,28

ANNEXE 18 : Résultats du test de comparaison des moyennes pour les méthodes de recherche dans le voisinage

Méthodes	Statistique t	Décision
r1 vs r2	4,785	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
r1 vs r3	5,109	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
r1 vs r4	5,054	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
r1 vs r5	5,18	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
r1 vs t1	-3,867	$H_{0_ttest} M1 > M2$ rejetée
r1 vs t2	3,777	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
r1 vs t3	4,755	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
r1 vs t4	4,961	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
r1 vs t5	5,026	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
r1 vs AG	4,227	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
r1 vs GRASP	4,128	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
r2 vs r3	0,73	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r2 vs r4	0,575	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r2 vs r5	0,891	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r2 vs t1	-8,01	$H_{0_ttest} M1 > M2$ rejetée
r2 vs t2	-1,638	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r2 vs t3	-0,093	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r2 vs t4	0,364	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r2 vs t5	0,508	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r2 vs AG	-1,066	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r2 vs GRASP	-1,148	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r3 vs r4	-0,17	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r3 vs r5	0,158	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r3 vs t1	-8,244	$H_{0_ttest} M1 > M2$ rejetée
r3 vs t2	-2,262	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r3 vs t3	-0,834	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r3 vs t4	-0,38	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r3 vs t5	-0,239	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r3 vs AG	-1,762	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r3 vs GRASP	-1,813	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r4 vs r5	0,333	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r4 vs t1	-8,205	$H_{0_ttest} M1 > M2$ rejetée

Méthodes	Statistique t	Décision
r4 vs t2	-2,149	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r4 vs t3	-0,68	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r4 vs t4	-0,215	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r4 vs t5	-0,07	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r4 vs AG	-1,631	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r4 vs GRASP	-1,688	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r5 vs t1	-8,295	$H_{0_ttest} M1 > M2$ rejetée
r5 vs t2	-2,401	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r5 vs t3	-0,999	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r5 vs t4	-0,543	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r5 vs t5	-0,402	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r5 vs AG	-1,919	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
r5 vs GRASP	-1,961	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t1 vs t2	7,247	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
t1 vs t3	7,989	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
t1 vs t4	8,138	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
t1 vs t5	8,185	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
t1 vs AG	7,597	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
t1 vs GRASP	7,518	$H_{0_ttest} M1 > M2$ non rejetée
t2 vs t3	1,573	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t2 vs t4	1,967	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t2 vs t5	2,094	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t2 vs AG	0,65	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t2 vs GRASP	0,521	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t3 vs t4	0,464	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t3 vs t5	0,612	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t3 vs AG	-0,99	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t3 vs GRASP	-1,075	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t4 vs t5	0,146	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t4 vs AG	-1,429	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t4 vs GRASP	-1,495	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t5 vs AG	-1,569	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
t5 vs GRASP	-1,629	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée
AG vs GRASP	-0,12	$H_{0_ttest} M1 - M2 = 0$ non rejetée

ANNEXE 19 : Résultats du test de Mann-Whitney pour les méthodes de recherche dans le voisinage

Méthodes	Valeur-p	Décision
r1 vs r2	0	H _{0_mw} rejetée
r1 vs r3	0	H _{0_mw} rejetée
r1 vs r4	0	H _{0_mw} rejetée
r1 vs r5	0	H _{0_mw} rejetée
r1 vs t1	0	H _{0_mw} rejetée
r1 vs t2	0,001	H _{0_mw} rejetée
r1 vs t3	0	H _{0_mw} rejetée
r1 vs t4	0	H _{0_mw} rejetée
r1 vs t5	0	H _{0_mw} rejetée
r1 vs AG	0	H _{0_mw} rejetée
r1 vs GRASP	0	H _{0_mw} rejetée
r2 vs r3	0,567	H _{0_mw} non rejetée
r2 vs r4	0,791	H _{0_mw} non rejetée
r2 vs r5	0,519	H _{0_mw} non rejetée
r2 vs t1	0	H _{0_mw} rejetée
r2 vs t2	0,199	H _{0_mw} non rejetée
r2 vs t3	0,789	H _{0_mw} non rejetée
r2 vs t4	0,886	H _{0_mw} non rejetée
r2 vs t5	0,845	H _{0_mw} non rejetée
r2 vs AG	0,364	H _{0_mw} non rejetée
r2 vs GRASP	0,413	H _{0_mw} non rejetée
r3 vs r4	0,748	H _{0_mw} non rejetée
r3 vs r5	0,95	H _{0_mw} non rejetée
r3 vs t1	0	H _{0_mw} rejetée
r3 vs t2	0,06	H _{0_mw} non rejetée
r3 vs t3	0,39	H _{0_mw} non rejetée
r3 vs t4	0,658	H _{0_mw} non rejetée
r3 vs t5	0,698	H _{0_mw} non rejetée
r3 vs AG	0,136	H _{0_mw} non rejetée
r3 vs GRASP	0,166	H _{0_mw} non rejetée
r4 vs r5	0,694	H _{0_mw} non rejetée
r4 vs t1	0	H _{0_mw} rejetée

Méthodes	Valeur-p	Décision
r4 vs t2	0,116	H _{0_mw} non rejetée
r4 vs t3	0,583	H _{0_mw} non rejetée
r4 vs t4	0,898	H _{0_mw} non rejetée
r4 vs t5	0,947	H _{0_mw} non rejetée
r4 vs AG	0,227	H _{0_mw} non rejetée
r4 vs GRASP	0,277	H _{0_mw} non rejetée
r5 vs t1	0	H _{0_mw} rejetée
r5 vs t2	0,051	H _{0_mw} non rejetée
r5 vs t3	0,353	H _{0_mw} non rejetée
r5 vs t4	0,607	H _{0_mw} non rejetée
r5 vs t5	0,645	H _{0_mw} non rejetée
r5 vs AG	0,116	H _{0_mw} non rejetée
r5 vs GRASP	0,145	H _{0_mw} non rejetée
t1 vs t2	0	H _{0_mw} rejetée
t1 vs t3	0	H _{0_mw} rejetée
t1 vs t4	0	H _{0_mw} rejetée
t1 vs t5	0	H _{0_mw} rejetée
t1 vs AG	0	H _{0_mw} rejetée
t1 vs GRASP	0	H _{0_mw} rejetée
t2 vs t3	0,304	H _{0_mw} non rejetée
t2 vs t4	0,148	H _{0_mw} non rejetée
t2 vs t5	0,133	H _{0_mw} non rejetée
t2 vs AG	0,715	H _{0_mw} non rejetée
t2 vs GRASP	0,637	H _{0_mw} non rejetée
t3 vs t4	0,676	H _{0_mw} non rejetée
t3 vs t5	0,633	H _{0_mw} non rejetée
t3 vs AG	0,51	H _{0_mw} non rejetée
t3 vs GRASP	0,576	H _{0_mw} non rejetée
t4 vs t5	0,95	H _{0_mw} non rejetée
t4 vs AG	0,288	H _{0_mw} non rejetée
t4 vs GRASP	0,341	H _{0_mw} non rejetée
t5 vs AG	0,257	H _{0_mw} non rejetée
t5 vs GRASP	0,309	H _{0_mw} non rejetée
AG vs GRASP	0,933	H _{0_mw} non rejetée