

**Titre:** Modélisation des pertes de productivité suite à un changement  
Title: dans des grands projets de construction

**Auteur:** Rémi Trudeau  
Author:

**Date:** 2017

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Trudeau, R. (2017). Modélisation des pertes de productivité suite à un  
change dans des grands projets de construction [Mémoire de maîtrise, École  
Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2950/>  
Citation:

## Document en libre accès dans PolyPublie Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/2950/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Robert Pellerin, & Michel Gamache  
Advisors:

**Programme:** Maîtrise recherche en mathématiques appliquées  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION DES PERTES DE PRODUCTIVITÉ SUITE À UN CHANGEMENT DANS  
DES GRANDS PROJETS DE CONSTRUCTION

RÉMI TRUDEAU

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES)

DÉCEMBRE 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION DES PERTES DE PRODUCTIVITÉ SUITE À UN CHANGEMENT DANS  
DES GRANDS PROJETS DE CONSTRUCTION

présenté par : TRUDEAU Rémi

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BAPTISTE Pierre, Doctorat, président

M. PELLERIN Robert, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. GAMACHE Michel, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. HAJJI Adnène, Ph. D., membre

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les personnes qui m'ont épaulé lors de cette recherche qui fut une expérience incroyable pour mon développement personnel et professionnel. Ce travail m'a permis d'élargir mes connaissances et d'apprécier plusieurs domaines que je connaissais peu.

Pour commencer, je veux remercier mon directeur de recherche Robert Pellerin et mon codirecteur Michel Gamache de m'avoir accepté en tant qu'étudiant pour ce projet. Leurs expertises étendues lors de cette recherche m'ont permis d'éviter plusieurs embuches lors de ma recherche. Leurs connaissances m'ont permis d'apprendre les joies et principes de la recherche ce qui m'était à ce jour inconnu.

Je tiens aussi à remercier Nathalie Perrier qui était toujours présente pour répondre à mes questions et aux besoins de l'ensemble des étudiants de la chaire. Je me rappellerai toujours de son intérêt et sa passion pour chacun des projets produit dans la chaire de recherche Jarislowsky-SNC-Lavalin.

Enfin, je veux remercier SNC-Lavalin et M. Jarislowsky pour la création de cette chaire de recherche. Grâce à leur soutien, la recherche dans le domaine des réclamations a une fois de plus avancé. Ces contributions seront toujours indispensables afin de faire avancer l'ensemble de la société.

## RÉSUMÉ

Les grands projets de constructions demandent une collaboration importante entre plusieurs partis et ressources et il est courant d'y noter des demandes de changements tout au long de leur déroulement. Ces changements peuvent augmenter les coûts du projet de façon significative et peuvent mener à la création de conflits entre les partis impliqués. Le calcul des coûts et de l'impact de ces changements est donc un enjeu d'importance pour les gestionnaires de grands projets.

Le calcul des coûts reliés au changement est divisé en deux éléments: les coûts directs qui sont facilement quantifiables et les coûts indirects qui sont rarement pris en compte lors du calcul d'impact. Ces coûts indirects sont pour la plupart liés à une perte de productivité engendrée par la réalisation d'activités additionnelles qui nuisent à l'exécution des autres activités planifiées en nécessitant les mêmes ressources ou espaces.

Le problème des coûts indirects dû à des changements est présent dans l'ensemble des projets de la construction et peu d'entreprises sont en mesure de les évaluer. Ce projet de recherche cherche à répondre à ce besoin en proposant un modèle simple et efficace capable de calculer les coûts indirects reliés aux pertes de productivité due aux changements.

La littérature existante montre d'ailleurs des pistes de solutions possibles. Certains modèles cherchent à déterminer les pertes de la productivité en utilisant des données réelles obtenues par diverses firmes de construction. Toutefois, ces modèles sont souvent trop spécifiques à certains types de projets ce qui empêche leur utilisation dans différents contextes. L'approche préconisée ici se démarque en proposant plutôt un modèle général de simulation capable de refléter l'effet des changements sur la productivité d'un projet. Pour ce faire, le modèle simule un retard dû à un changement et implante une technique d'accélération bien précise, les heures supplémentaires. Les résultats obtenus permettent ainsi de mieux comprendre l'effet des mesures d'accélération entreprises suite à l'apparition de changements en cours de projet.

## ABSTRACT

Big construction projects need an excellent collaboration between its parties. Because of the size of those projects, changes are really frequent and cause a lot of problems. Those changes when implemented have a significant influence on the total cost of the project which create big conflict between the parties.

The calculation related to those changes can be divided into two categories, direct costs and indirect costs. The direct cost is easily quantifiable in contrary of the indirect cost which is habitually not taken into account during the calculation of the final change impacts cost. The reason is because those cost comes from the loss of productivity which is really hard to quantify.

The problem of quantification of the indirect cost is present in the entire construction industry. The objective of this research will be to create a model able to quantify easily the loss of productivity in change. Research has already been made on this subject, but they have not been accepted by the general industry. Some company tried to use these models to justify the value of indirect costs but the court has not accepted any models to this day. Those models are seen as too specific to be used in any kind of project. That is why the problem of indirect costs quantification style exists today. To resolve this issue, this research will create a simulation model able to recreate changes in big construction projects. The model created will use the effect cause by overtime to simulate the loss of productivity present when a change occurs. The result of this research is able to quantify the relation between lost of productivity and quantity of changes which will make the calculation of indirect costs easier for the entire construction industry.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT .....	v
TABLE DES MATIÈRES .....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES .....	vii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	ix
LISTES DES ANNEXES .....	x
CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	3
2.1    Introduction .....	3
2.2    Les demandes de changement.....	3
2.2.1    Les causes.....	3
2.2.2    Les impacts.....	5
2.2.3    Les accélérations à la suite d'un changement .....	6
2.2.4    Effet cumulatif.....	8
2.2.5    Ordre de changements.....	8
2.3    Modèles existants.....	9
2.3.1    Modèle de Léonard.....	9
2.3.2    Modèle de Ibbs et Allens .....	10
2.3.3    Modèle de Hannah.....	11
2.3.4    Comparaison et critique.....	12
2.4    Conclusion.....	15
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	16
3.1    Introduction .....	16
3.2    Description des objectifs de recherche.....	16
3.3    Étapes de la méthodologie .....	17

3.4	Modélisation du problème .....	18
3.4.1	Création d'un modèle de simulation.....	19
3.4.2	Banque de données .....	21
3.4.3	Simulation des scénarios .....	22
3.5	Validation du modèle.....	24
3.6	L'analyse des résultats.....	25
3.7	Conclusion.....	25
	<b>CHAPITRE 4 MODÈLE .....</b>	<b>26</b>
4.1	Ordonnancement.....	26
4.2	Implantation de changement .....	30
4.3	Réordonnancement.....	31
4.4	Résultats .....	32
4.5	Validation du modèle.....	35
4.6	Conclusion.....	36
	<b>CHAPITRE 5 RÉSULTATS .....</b>	<b>38</b>
5.1	Nombre d'activités .....	38
5.2	Moment du changement.....	41
5.3	Impact du choix de l'activité.....	44
5.4	Impact des ressources.....	46
5.5	Nombre d'activités touchées .....	47
5.6	Comparaison avec la littérature.....	49
5.7	Conclusion.....	50
	<b>CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>52</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>56</b>
	<b>ANNEXES .....</b>	<b>59</b>

## **LISTE DES TALBEAUX**

Tableau 2-1 Division de causes de Hsieh selon les sources.....	4
Tableau 3-1 Scénarios testés lors de la simulation.....	22
Tableau 3-2 Exemple de borne temporelle.....	23
Tableau 4-1 Critère de tri des huit heuristiques d'ordonnancement .....	29
Tableau 5-1 Diminution de la productivité selon le nombre d'activités.....	40

## LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Effets des heures supplémentaires sur la productivité (AACE. 1973) .....	7
Figure 2-2 : Comparaisons des modèles existants dans la littérature.....	12
Figure 3-1 : Méthodologie du projet de recherche .....	17
Figure 3-2 : Exemple des données présentes dans une instance .....	22
Figure 4-1 : Étape du modèle de simulation.....	26
Figure 5-1 : Productivité de la main-d'oeuvre selon le pourcentage de changement et le nombre d'activités avec un changement au temps $t=(50\% \text{ et } 75\%)$ . .....	39
Figure 5-2 : Impact du moment d'occurrence d'un changement sur la productivité d'un projet de 120 tâches .....	41
Figure 5-3 : Augmentation de la durée d'un projet en pourcentage selon le pourcentage de changement.....	42
Figure 5-4 : Impact de l'occurrence d'un changement sur la productivité d'un projet de 120 tâches en ciblant que des tâches critiques. .....	43
Figure 5-5 : Comparaison entre la productivité suite à un changement sur une activité du chemin critique et une activité choisie de façon aléatoire à 25% d'avancement dans un projet de 120 activités.....	44
Figure 5-6 : Effet du chemin critique sur la productivité en présence de changement à 50% d'avancement dans le projet avec 120 activités .....	45
Figure 5-7 : Effet de la disponibilité des ressources sur la productivité en présence de changement à 25% d'avancement dans le projet.....	47
Figure 5-8 : Effet du nombre d'activités touchées par un changement sur la productivité après 50% d'avancement dans le projet.....	48
Figure 5-9 : Comparaison entre les modèles de la littérature et le modèle de cette recherche .....	49
Figure A.1: Effects of change orders on productivity : electrical and mechanical work .....	59
Figure A.2: Effects of change orders on productivity : civil architectural work.....	59

Figure B.1 : Perte de la productivité selon le pourcentage de changement selon Ibbs et Allen (REVAY 2007).....	60
Figure C.1 : Perte de productivité selon le pourcentage de changement selon Ibbs (Ibbs 2005)...	61
Figure C.2 : Effet du moment de l'occurrence du changement sur la productivité selon Ibbs (Ibbs 2005).....	61
Figure D.1 : Comparaison entre la productivité suite à un changement sur une activité du chemin critique et une activité choisie de façon aléatoire à 0% d'avancement dans un projet de 120 activités.....	62
Figure E.1 : Effet de la disponibilité des ressources sur la productivité en présence de changement à 25% d'avancement dans le projet avec 60 tâches .....	63
Figure E.2: Effet de la disponibilité des ressources sur la productivité en présence de changement à 25% d'avancement dans le projet avec 90 tâches .....	63

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

RCPSP : Resource-Constrained Project Scheduling Problem

**LISTES DES ANNEXES**

ANNEXE A RÉSULTAT DE LÉONARD .....	59
ANNEXE B RÉSULTAT MODÈLE DE IBBS ET ALLEN .....	60
ANNEXE C RÉSULTAT DU MODÈLE DE IBBS .....	61
ANNEXE D RÉSULTAT DE LA VARIABLE CHEMIN CRITIQUE .....	62
ANNEXE E RÉSULTAT DE LA VARIABLE RESSOURCE .....	63
ANNEXE F PROGRAMME DE LA SIMULATION .....	64

## CHAPITRE 1      INTRODUCTION

Les grands projets de construction sont d'une grande complexité. La quantité élevée de contraintes, de ressources et de parties prenantes rend la planification des projets de construction très difficile. Cette difficulté est d'autant plus augmentée à cause de l'incertitude reliée aux demandes de changement qui surviennent au cours du projet. Ces demandes entraînent bien souvent des modifications importantes à l'échéancier initial d'un projet (Sun et Meng, 2009). L'échéancier de départ doit ainsi être modifié pour inclure l'ajout d'activités supplémentaires ce qui décale l'ensemble des tâches successives et met en péril l'échéancier de départ. Ainsi, un changement implique souvent une modification de l'échéancier en plus d'une augmentation des coûts du projet.

Les coûts reliés au changement sont divisés en deux catégories distinctes, soient les coûts directs et les coûts indirects. Les coûts directs couvrent l'ensemble des données facilement quantifiables: la main-d'oeuvre, les matériaux et la location des équipements. Il est donc simple de déterminer la valeur précise de cette catégorie de coût. Les coûts directs reliés à la main-d'oeuvre proviennent de l'implantation de méthodes d'accélération comme les heures supplémentaires, l'augmentation du personnel et le chevauchement de quart de métier sur une même tâche. Dans l'industrie, les maîtres d'ouvrage sont en mesure de quantifier le coût relié aux accélérations de la main-d'oeuvre, en déterminant le nombre d'heures de main-d'oeuvre effectuée sans grande difficulté. Cependant, les coûts indirects sont plus difficiles à calculer parce qu'ils sont reliés à des pertes de productivité provenant d'activités supplémentaires. Plusieurs méthodes de calcul existent afin de déterminer le coût relié aux pertes de productivité. Toutefois, elles demandent au maître de l'ouvrage un travail exigeant et régulier, qu'ils ne sont pas en mesure de fournir (Léonard 1988). Généralement, les données fournies par le maître de l'ouvrage sont soit inexistantes ou incomplètes, ce qui empêche l'utilisation de ces méthodes de calcul. De ce fait, les coûts indirects sont souvent une source de conflit entre le client et les firmes de construction parce que leur valeur est inconnue par chacune des parties prenantes. La difficulté reliée à leur quantification et la perception divergente des parties impliquées peuvent amener des démarches juridiques formelles.

Afin de remédier à cette problématique, certains chercheurs ont tenté de modéliser l'effet des changements. En 1988, Léonard (1988) a proposé un modèle simple permettant de calculer, de façon précise, les coûts indirects reliés au changement à partir de données historiques. Ce modèle

est le plus reconnu au sein de l'industrie. Les résultats obtenus, empiriquement, démontrent une relation entre le pourcentage de changement présent dans un projet et la perte de productivité engendrée par les changements. À la suite de cette recherche, plusieurs chercheurs ont tenté de recréer le même type d'expérience afin de valider les résultats de ce premier modèle. Or, ces modèles ne sont toujours pas reconnus par les tribunaux (McEniry 2007). L'utilisation d'expert permet au juge de mieux comprendre les limites de chacun de ces modèles ce qui rend leur utilisation non applicable. De ce fait, la problématique liée au calcul des coûts indirects reste toujours présente.

Reconnaissant cette difficulté, le présent mémoire s'attarde au calcul des coûts indirects liés au changement présent lors d'un grand projet de construction. La recherche effectuée souligne l'effet des changements sur les coûts indirects provoqués par les pertes de productivité à la suite de l'accélération d'un projet.

Pour y arriver, la structure suivante est proposée. Le chapitre 2 présente en premier lieu une revue de la littérature dans le but d'expliquer les différents composants des changements en cours de projet, en plus de présenter les différents modèles s'y attardant. Ensuite, au chapitre 3, une description de la méthodologie est présentée afin d'exposer la démarche scientifique suivie. La description du modèle développé est par la suite présentée au chapitre 4. Une analyse des résultats sera donnée au chapitre 5. Ces résultats sont comparés avec les modèles existants afin de valider la pertinence du modèle proposé. Enfin, ce mémoire se conclut avec une synthèse des résultats obtenus et une présentation des limitations et opportunités futures.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

### 2.1 Introduction

Cette revue de la littérature débute avec une définition des demandes et des ordres de changement afin de mieux comprendre leur effet sur un projet de construction. À la suite de cette définition, les modèles existants seront analysés afin de comprendre leur fonctionnement et leur résultat. Le modèle de Léonard sera par la suite analysé en profondeur, puisqu'il est le premier modèle à avoir été créé sur le sujet de la quantification des coûts indirects (Léonard, 1988). Cette revue sera conclue par une critique des modèles existants en exposant leurs limites.

### 2.2 Les demandes de changement

Selon le "*construction industry institute*" (2016), un changement est défini comme une modification pouvant toucher les aspects majeurs d'un projet, soit le temps, le coût ou la planification. La définition de l'institut de l'industrie de construction du Texas établit des points importants afin de déterminer les changements pris en compte, lors d'un projet de la construction. Par exemple, la couleur de la peinture ne peut être considérée comme un changement valable. Néanmoins, si le coût de la nouvelle peinture est inférieur ou le temps de l'application est différent, il y a une présence de changement.

Cette définition est primordiale dans le cadre de la modélisation. Elle permet d'isoler les changements significatifs possibles au cours d'un projet de construction. Il est possible de classer l'importance de l'impact d'un changement, de par son effet, sur les aspects majeurs d'un projet de construction. Un changement qui augmente énormément le temps, le coût et la planification d'un projet est plus marquant qu'un changement avec peu d'effets sur ces aspects.

#### 2.2.1 Les causes

Tout d'abord, il faut souligner que les changements auront lieu même si plusieurs précautions sont prises. Cox (1997) indique dans son article «*Managing change orders and claims*» que le propriétaire doit s'attendre à des changements tout au long du projet. Cette information est primordiale parce qu'elle vient affirmer que l'occurrence d'un changement n'est pas fixe. Un

changement peut être implanté au début, comme à la fin d'un projet. De plus, il faut souligner que le propriétaire peut lui aussi être la cause d'un changement.

L'article de Wu, Hsieh, Cheng et Lu (2004) divisait les changements selon leur provenance et indiquait que le client était l'une des causes des demandes de changement. Par ailleurs, Wu note que les changements ne sont pas seulement dus qu'aux parties internes. Certains changements peuvent provenir de certaines conditions externes comme le climat, le terrain ou la législation.

Selon les tâches ou les caractéristiques des sources d'un changement, il est possible de déterminer les causes qui provoquent les changements au sein d'un projet. Le travail de Hsieh, Lu and Wu (2004) sur les causes des changements donne un résumé des causes possibles. Neuf catégories ont été créées afin de regrouper les diverses sources de changement : la planification et la conception, les conditions souterraines, la sécurité et les incidents climatiques, changement de règlement, changement de figures d'autorité, transfert de propriété, le voisinage et autres causes diverses.

Tableau 2-1 Division de causes de Hsieh selon les sources

Causes	Humaines	Environnement
la planification et la conception	X	
conditions souterraines	X	x
sécurité	X	
incidents climatiques		x
changement de règlement	X	
changement de figure d'autorité	X	
transfert de propriété	X	
voisinage	X	
causes diverses	X	

Le tableau 2.1 montre que les causes sont généralement provoquées par des facteurs humains. Néanmoins, il est important de mentionner que certains facteurs sortent du contrôle humain. Les conditions climatiques et souterraines peuvent donner lieu à des changements. Selon la littérature, il est impossible d'empêcher tous les changements, même si plusieurs précautions ont été prises auparavant (Bakhary, Adnan and Ibrahim, 2013).

## 2.2.2 Les impacts

Cette partie permet de classifier les impacts existants à la suite d'un ordre de changement. Les impacts sont les suivants : le coût, le risque, le temps, les impacts divers et la productivité (Sun et Meng, 2009).

Le premier impact est le coût. Comme mentionné précédemment, un changement est défini comme une modification du projet qui touche le temps, le coût et la planification. Il est normal que l'un des impacts d'un changement soit le coût. La modification d'un projet entraîne toujours des coûts supplémentaires. Effectivement, l'approbation d'un changement demande le travail de plusieurs ressources qui entraînent des coûts avant même que le changement ne soit implanté. De plus, l'ajout d'un changement modifie généralement les tâches présentes dans l'échéancier de départ. Quelle que soit la modification engendrée, le coût de départ ne restera pas le même (Sun et Meng, 2009). C'est pourquoi le coût est un facteur important à considérer lors de changement, ce qui est en lien avec la problématique de cette recherche.

Le deuxième impact est l'augmentation du risque. Le risque est défini comme la possibilité qu'une variation influence le coût et la durée d'un projet (Sun et Meng, 2009). Il est de pratique courante de mettre un temps plus élevé sur des tâches critiques afin de tenir compte des retards éventuels (Cox, 2003). Cette technique permet d'amortir les effets des changements. De ce fait, une relation directe existe entre la quantité de changement et la quantité de risque. Plus le nombre de modifications augmente et plus la valeur tampon de protection diminue ce qui augmente le risque. C'est pourquoi le risque est à son maximum lorsqu'aucune mesure de suppression n'est accessible.

Le troisième impact mentionné est le temps. Il est normal lors d'un projet que le temps soit une variable critique. Le temps de location, le temps total d'un projet et le temps d'une tâche sont des paramètres indispensables pour un projet. Les ordres de changements modifient la durée d'une

tâche ou d'un projet à cause des différentes causes mentionnées précédemment. La correction engendrée peut ralentir, arrêter et rallonger un projet sans qu'aucune action ne puisse être prise par un contremaître ou une firme externe (Cox, 1997).

Enfin, le quatrième impact regroupe les catégories diverses. Il est possible de reformer cette catégorie comme le regroupement des facteurs externes au projet. Cet impact englobe les relations entre les parties, la santé et sécurité, ainsi que la qualité du produit. Tous les facteurs au sein de cet impact sont beaucoup moins tangibles, ce qui rend difficile leur quantification. De ce fait, la réussite d'un projet ne prend pas en considération ces données, lors de la clôture d'un projet pour déterminer la rentabilité finale (G. G. Boyle, 2014).

Le dernier et cinquième impact est la productivité. Comme mentionnées à la section précédente, les modifications proviennent de plusieurs sources telles que la planification et la conception. L'exemple de changement de conception peut être lié à une perte de productivité de la main-d'œuvre parce que refaire une tâche mène à une perte de motivation et une fatigue au sein de la main-d'œuvre, ce qui est directement lié à une perte de productivité (Léonard, 1988). Dans le cadre de cette recherche, la perte de productivité joue un rôle crucial, lors du calcul des coûts indirects. Le moral des travailleurs est important afin d'obtenir une productivité adéquate au bon fonctionnement d'un projet. La perte de motivation des travailleurs à la suite d'un changement est difficilement quantifiable et devrait être prise en compte lors du calcul de coût indirect. Cette perte ne sera pas couverte dans le cadre de cette recherche, car elle demande une analyse pointue de donnée pratique afin d'être calculée. La recherche présente expérimente dans un cadre purement théorique, qui empêche l'application de perte de productivité liée aux émotions des travailleurs. La section suivante permet de mieux établir les pertes de productivité quantifiable par un modèle théorique, ce qui amène la possibilité de calculer les coûts indirects d'un projet.

### 2.2.3 Les accélérations à la suite d'un changement

La perte de productivité est l'impact le plus important, en ce qui a trait au coût indirect (Léonard 1988). Il est possible de déterminer les sources liées à cet impact afin d'en déterminer l'effet. Lors d'un ordre de changement, les personnes responsables du projet cherchent à éliminer le retard créé par ce changement par rapport à l'échéancier fixé au départ. Les techniques les plus utilisés sont les

heures supplémentaires, l'augmentation du personnel et le chevauchement de quart de métiers (Léonard, 1988).

L'augmentation du nombre d'heures par quart de travail est couramment utilisée dans l'ensemble des industries afin de rattraper un retard important. Il est prouvé de façon pratique qu'une augmentation du temps de main-d'œuvre accélère la vitesse d'un projet (Chang et Woo, 2017). Toutefois, une perte de productivité affectera la main-d'œuvre, tout en ralentissant la courbe d'apprentissage. En effet, les ouvriers auront tendance à ralentir leur vitesse de travail, sachant que leur nombre d'heures de travail de la journée est augmenté. Le graphique suivant montre la relation entre la productivité et le nombre de semaines d'heures supplémentaires.

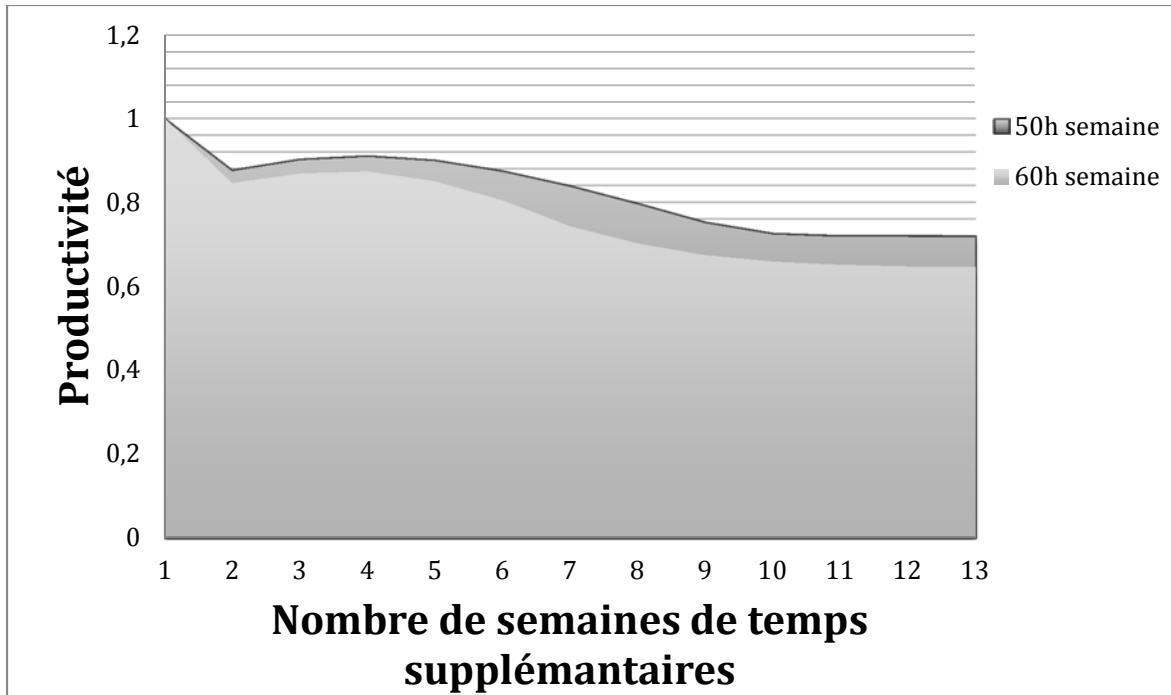


Figure 2-1 : Effets des heures supplémentaires sur la productivité (AACE. 1973)

Il faut constater que l'utilisation des heures supplémentaires sur une longue durée amène une productivité de plus en plus basse. En analysant les impacts, il est possible de lier le coût, la productivité, ainsi que le temps du projet avec l'utilisation des heures supplémentaires. Par exemple, afin de rattraper le retard dû à un ordre de changement, les maîtres d'ouvrage augmentent

le nombre d'heures de travail par jour ce qui augmente le coût et le nombre d'heures de main-d'œuvre du projet. Cependant, une diminution de la productivité est constatée.

D'autre part, le chevauchement de plusieurs quarts de métier sur une tâche, au même moment, crée aussi des pertes de productivité (Léonard, 1988). Cette méthode est utilisée afin d'accélérer la production en forçant plusieurs types de métiers (électricien, plombier, etc.) à travailler en même temps sur une même tâche. Cette action provoque des interférences entre le travail des quarts de métiers.

L'augmentation du nombre de personnels agit de la même façon que le chevauchement de quarts de métiers. La présence accrue du personnel crée une interférence entre les différents travailleurs. Les effets de ces méthodes sont semblables à ceux des heures supplémentaires, une accélération est constatée, ce qui diminue le temps du projet avec l'ajout d'un changement. Néanmoins, une perte de productivité et une augmentation des coûts sont aussi présentes. L'interférence entre les employés crée une perte de productivité due au nombre trop important de personnels travaillant sur une même tâche au même moment. Dans le cadre de cette maîtrise, l'effet des heures supplémentaires à la suite d'un changement sera le sujet principal de cette maîtrise.

#### **2.2.4 Effet cumulatif**

Un dernier point qui doit être discuté est l'existence de l'effet cumulatif des changements. Selon Léonard (1988), l'effet cumulatif peut être défini comme une répercussion à la suite de plusieurs ordres de changement. Dans le bulletin de la firme Revay (G. McEniry, 2007), il est possible de voir une diminution de la productivité liée à l'augmentation du nombre de changements. La thèse de Léonard (1988) montre aussi que plus le nombre de changements est important, plus la productivité du projet sera affectée. La section suivante expliquera en détail le modèle de Léonard, en plus des autres modèles existants.

#### **2.2.5 Ordre de changements**

Le dernier point qu'il faut définir est les ordres de changement. Il est plus facile de faire comprendre le lien entre les demandes de changement et les ordres de changements, en se basant sur les clauses

typiques d'un contrat à la suite d'un changement. Lors de l'occurrence d'un changement, une procédure existe dans les clauses d'un contrat, en ce qui a trait à la démarche à suivre suite à l'occurrence d'un changement. Généralement, une demande de changement est effectuée par le parti responsable de ce changement. Un contrat standard stipule qu'un ordre de changement est approuvé lorsque le client, le contractant et l'architecte sont d'accord sur les actions à entreprendre à la suite du changement (Cox 1997). Dans le cas d'un désaccord, l'ordre de changement n'est pas créé et la demande de changement est rejetée. Il faut tout de même mentionner que pour un changement mineur, l'architecte peut approuver une demande de changement, sans la création d'ordre de changement. Ce type de changement n'influence pas les composantes majeures d'un projet présent dans la définition d'un changement mentionnée plus tôt. Dans le cadre de cette recherche, seules les demandes de changement qui provoquent un ordre de changement seront évaluées.

## 2.3 Modèles existants

La modélisation des pertes à la suite des ordres de changement est un phénomène peu maîtrisé dans l'industrie de la construction. Le nombre de modèles sur ce sujet, présent à l'intérieur des bases de données de recherche, est très faible. De plus, les tribunaux ne reconnaissent pas l'utilisation de ces modèles comme une preuve suffisante pour déterminer le montant des coûts indirects créés par les changements (G. McEniry, 2007). Une firme peut difficilement facturer les coûts des pertes de productivité à la suite d'un changement, en utilisant l'un de ces modèles. De plus, il est fréquent que ces modèles soient utilisés à l'extérieur de leurs limites, ce qui fait perdre toute crédibilité, lors de leur utilisation devant un juge. La section suivante classe de façon périodique les modèles les plus populaires à ce jour (J. Hudon, 2015).

### 2.3.1 Modèle de Léonard

Le premier modèle créé par Léonard (1988) a été développé en collaboration avec la firme Revay Limited. Le principal but de cette étude était de déterminer l'effet des ordres de changement sur l'ensemble d'un projet. Leur effet était évalué de façon qualitative et quantitative. Le modèle qualitatif détermine comment les ordres de modification peuvent affecter la productivité d'un

projet. La partie quantitative est liée de près à la partie qualitative parce qu'elle permet d'interpréter de façon numérique la partie qualitative.

Les données recueillies lors de cette recherche portent sur 90 projets avec des coûts variant de millions de dollars à des milliards de dollars. Ces projets touchent 57 types d'infrastructures et d'industries différentes. Afin d'être en mesure de voir la variation dans plusieurs sphères de l'industrie, les données sont divisées en trois catégories : contrats portant sur des installations électriques et mécaniques dans des projets d'édifices, contrats portant sur des installations électriques et mécaniques dans des projets industriels, et contrats portant sur des aspects de génie civil et architectural sur des projets d'édifices et industriels. Cette division avait pour but de voir s'il existe une différence selon le type de contrat. La méthodologie utilisée consistait à faire un ratio entre la durée réelle et la durée prévue. L'étape suivante consistait à compiler les résultats afin d'observer l'existence d'une relation entre le pourcentage de changement et la perte de productivité. Une régression linéaire fut obtenue selon le nombre de changements majeurs présents. Les graphiques présentés à l'Annexe A montrent les résultats obtenus par Léonard selon les différents quarts de métiers. Une droite commençant à 10% de changement est présentée parce que les professionnels du milieu considèrent être capables d'absorber jusqu'à 10% de changement avant de voir une perte de productivité de leur main-d'œuvre. De plus, le maximum de pourcentage de changement présent dans les données est de 60%. Donc, le graphique montre les pertes de productivité pour les projets comprenant des pourcentages de changement allant de 10% à 60%.

### 2.3.2 Modèle de Ibbs et Allens

Le prochain modèle qui sera présenté est celui de Ibbs (2005). Les données de ce modèle ont été recueillies à partir de plus de 162 projets différents appartenant à 93 différents contacteurs. Les attributs des projets étaient les suivants :

- 45% des projets étaient publics;
- 55% des projets étaient privés;
- Le budget des projets allait de 3.9 millions à 14,5 milliards;
- Les projets touchaient les constructions lourdes comme les autoroutes, les infrastructures commerciales et industrielles;
- Les données de productivité viennent d'entrepreneurs ou de sous-traitant lorsque possible.

Tout comme Léonard, le modèle de Ibbs et Allen montre une large étendue de types de projets. Leurs résultats soulignent une relation proportionnelle semblable à celle de l'étude de Léonard. Cependant, la perte de productivité est moins accentuée lorsque le pourcentage de changement augmente. De plus, Ibbs et Allen ont cherché à inclure dans l'étude les projets avec un pourcentage de changement inférieur à 10% afin de vérifier l'hypothèse de l'industrie (voir Annexe B).

Il faut mentionner que Ibbs a effectué une deuxième étude sur les ordres de changements en utilisant un spectre de données semblables à celui de sa première étude. Les résultats montrent une relation entre le pourcentage de changement et la productivité différente de celle obtenue lors de la première expérience. Une augmentation du pourcentage de changement mène à une perte de productivité plus importante. De plus, une relation de type quadratique est obtenue, ce qui diverge des relations linéaires de Léonard et de Ibbs et Allen.

Ibbs a trouvé un moyen d'améliorer le projet initial en cherchant à déterminer les effets des ordres de changement dans le temps. Afin de quantifier cet effet, Ibbs prend le moment d'occurrence du changement selon le pourcentage d'avancement du projet. Son étude montre qu'un changement tardif diminue davantage la productivité qu'un changement hâtif (Ibbs 2005).

Le modèle de Ibbs vient confirmer l'étude de Léonard quant à l'effet des ordres de changement. Encore une fois, une relation entre le pourcentage de changement et la perte de productivité existe (G. McEniry, 2007). De plus, il faut souligner que l'occurrence du changement influence aussi de façon significative la productivité d'un projet de construction. Il est possible de consulter les résultats des études de Ibbs à l'annexe C.

### **2.3.3 Modèle de Hannah**

Le dernier modèle significatif est celui de Hannah. Les recherches de son équipe critiquent l'étude de Léonard et de Ibbs à cause d'un manque de distinction entre les quarts de métier (Hanna, Russell, Nordheim et Bruggink 1999). Selon Hannah, les types de métiers réagiront différemment suite à un changement donnant une perte de productivité distincte entre eux. Les métiers identifiés par cette équipe de recherche sont les travaux mécaniques et électriques. La méthodologie adoptée pour

l'obtention des données est la même. Les caractéristiques des données utilisées sont les suivantes (G. McEniry 2007) :

- 61 projets ont été considérés;
- Les travaux mécaniques étaient évalués en argent et leur valeur variait de 61000\$ à 136000000\$;
- Les travaux électriques étaient évalués en heures et le nombre d'heures variait entre 1 100 à 106 000.

L'utilisation de questionnaires est utilisée afin de déterminer les heures prévues sur le projet et les heures réelles obtenues. La méthodologie utilisée cherchait à ressortir les facteurs les plus importants dans chacun des types de métiers afin de déterminer une relation. L'équipe de recherche quantifiait ensuite le pourcentage des impacts clefs dans chacun des domaines afin de déceler une relation capable de quantifier les effets des changements. Un total de dix facteurs d'impact a été établi pour les ouvriers mécaniques et seulement quatre pour les ouvriers électriques.

### 2.3.4 Comparaison et critique

Afin de mieux comprendre les limites de chacun des domaines et de les comparer, les différents résultats ont été regroupés dans un seul graphique.

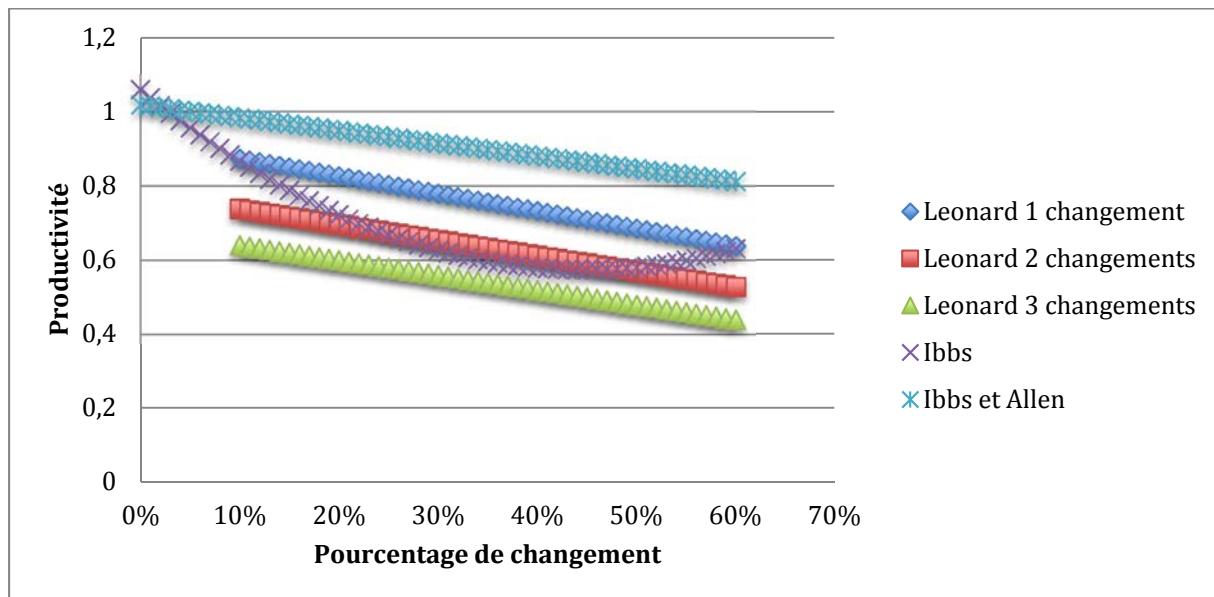


Figure 2-2 : Comparaisons des modèles existants dans la littérature

La figure 2.2 montre une disparité entre les modèles. Il est possible de voir que le modèle de Hannah n'est pas présent sur ce graphique. La raison est que sa méthode prend en compte plusieurs variables en plus de calculer le taux de modification différemment des autres modèles (G. McEniry, 2007). C'est pourquoi il est difficile de comparer les résultats du modèle de Hannah avec les modèles de Ibbs et Leonard. Les paragraphes suivants permettront d'éclaircir les différences entre les modèles. Leurs limites seront présentées par le fait même.

Tout d'abord, le modèle de Léonard ne peut être utilisé que pour les projets avec un commencement normal. En d'autres mots, ce modèle ne peut pas être utilisé sur un projet effectué en mode accéléré dès le départ. Ensuite, la quantification des impacts ne touche que des projets qui ont atteint le stade du conflit, ce qui implique une perte de productivité plus élevée. Gerald McEniry (2007), ingénieur auprès de la firme Revay limited, mentionne : « (...) l'étendue des projets étudiés était insuffisante pour qu'on puisse extrapoler les résultats de l'étude et de les appliquer à l'ensemble de l'industrie ». Ce spectre de données était insuffisant en ce qui a trait à la variété et à la quantité des projets. Cette quantité est moindre face au nombre de projets de construction effectué chaque année simplement dans la province de Québec (commission de la construction du Québec). De plus, il faut mentionner que cette étude omet de prendre en considération trois facteurs importants. Le premier est de ne pas considérer les projets avec un pourcentage de changement inférieur à 10%. Les maîtres d'ouvrage déclarent être en mesure d'absorber un 10% de changement sans accuser une perte de productivité (Léonard 1988). Cependant, selon Ibbs (2005), le seuil critique de perte de productivité commence à 3%. Ensuite, aucune notion de temps n'est considérée alors que, selon Hannah et Ibbs, le moment d'occurrence d'un changement est critique par rapport aux pertes de productivité. Enfin, Charles A. Léonard n'a pas considéré l'impact de la situation géographique et géopolitique lors de ces projets. L'ensemble des projets utilisés dans son étude était effectué au Canada. Le climat et la politique canadienne influencent les projets de construction de façon significative (Hsieh, Lu and Wu, , 2004).

Pour ce qui est du modèle de Hannah, ce dernier montre un manque de fiabilité important. En effet, les données recueillies pour cette expérience étaient basées sur une estimation faite sur les sondages obtenus auprès de contremaîtres (Hanna, Russell, Gotzion et Nordheim, 1999). Cette déficience dans la méthodologie diminue la crédibilité des résultats obtenus. De plus, il faut noter que les

équations obtenues sont contre-intuitives (G. McEniry, 2007). Les variables utilisées diffèrent entre les quarts de métier, soit quatre pour les travaux mécaniques et sept pour les travaux électriques. De ce fait, un manque de subjectivité est noté face au choix des variables (G. McEniry , 2007). Il faut mentionner que les équations montrent des pertes minimes face à l'augmentation du nombre d'effectifs, ce qui va à l'encontre des recherches déjà effectuées (Léonard 1988).

Le dernier modèle évalué est celui de Ibbs. Lors de la compilation des données, Ibbs n'a pas divisé les projets en différentes catégories ce qui va à l'encontre de la base fondamentale des projets de Hannah (Hanna, Russell, Gotzion et Nordheim, 1999). De ce fait, ce modèle est considéré comme trop général afin d'être utilisé dans diverses circonstances (R G. McEniry , 2007). De plus, il faut mentionner que le taux de corrélation est relativement faible, ce qui diminue la fiabilité des résultats (Ibbs 2005). Enfin, la dernière critique de cette recherche est liée à la formule du taux de modification. Contrairement à l'étude de Léonard, la méthode de Ibbs et Allen détermine le taux de modification en prenant en compte les changements apportés dans le temps du projet (Ibbs, 2005). Pour sa part, Léonard calcule le taux de modification en prenant la durée du projet sans le temps de modification (Léonard, 1988). Donc, l'étude de Ibbs diminue le taux de modification, lorsqu'on compare ses résultats avec ceux obtenus par l'étude de Léonard, ce qui crée un écart entre les deux modèles (McEniry 2007).

Il faut mentionner que les études de Hannah, Ibbs et Allen ont suivi la même méthodologie que Léonard. L'utilisation de projets réels provenant de diverses sources comme des firmes de construction ou associations de construction. Cette méthode est limitée par son nombre de données. Le nombre de projets provenant de données réelles pris en considération n'est pas assez élevé pour être considéré significatif pour l'ensemble des projets de l'industrie (McEniry 2007).

Bref, il faut conclure cette revue de la littérature en indiquant que même si les modèles créés ne sont toujours pas reconnus par les tribunaux, plusieurs points doivent être retenus pour de futures recherches (McEniry, 2007). Tout d'abord, l'évaluation du pourcentage de changement utilisé varie entre les modèles, ce qui peut amener une différence entre les résultats. Ensuite, les hypothèses suggérées par les spécialistes du domaine de la construction amènent des erreurs importantes. Par exemple, le modèle de Léonard perd de la précision à cause de l'exclusion des projets avec un taux de modification inférieur à 10% (Léonard, 1988). Le modèle de Ibbs montre un seuil de 3% avant d'obtenir une perte de productivité notable. Cette valeur est inférieure au seuil de 10% affirmé par

les maîtres d'ouvrage de l'industrie (Ibbs, 2005). Ensuite, la collecte de données réelles amène une divergence trop importante entre un modèle et la pratique. Comme expliquées, la méthode ainsi que les conditions dans lesquelles le projet a été effectué influencent grandement les pertes de productivité.

## 2.4 Conclusion

Pour terminer, cette revue de littérature a permis de mieux comprendre les changements dans les grands projets de la construction. En définissant ce qu'est un changement, il est possible de mieux comprendre leurs sources et causes et comment ceux-ci peuvent affecter la productivité de la main-d'oeuvre d'un projet. Conformément à cette compréhension, il est possible d'identifier chacun des modèles existants dans la littérature ainsi que leurs limites. Par exemple, il a été noté que les modèles existants sont basés sur des données pratiques, ce qui amène des sources d'erreurs sur les résultats à cause de la situation économique et du style de gestion utilisée lors de projets réels. Bref, cette littérature permet d'orienter cette recherche avec une méthodologie adéquate afin de créer un modèle capable d'isoler les données entrantes nécessaires pour refléter l'effet des changements sur la productivité dans les grands projets de construction.

## CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

### 3.1 Introduction

En fonction des observations présentées au chapitre précédent, il est possible d'identifier des éléments qui permettront d'améliorer les modèles actuellement utilisés. Pour ce faire, l'élaboration d'un objectif clair et précis est nécessaire, ainsi que la description des sous objectifs qui le supportent. Une description de la méthodologie suivra.

### 3.2 Description des objectifs de recherche

La revue de la littérature a souligné l'importance des coûts d'exécution des changements générée en bonne partie par l'augmentation des heures-personnes non prévues à l'échéancier initial. En effet, la firme Revay soutient que 30% des heures supplémentaires sont attribuables aux ordres de changement (J. Hudon, 2015). Le 70% des heures supplémentaires restant est attribué aux pertes de productivité (J. Hudon, 2015). Selon l'étude de Léonard, une partie des pertes de productivité est attribuable aux ordres de changement qui augmente les heures supplémentaires (Léonard, 1988). Le règlement de cette facture importante est une source de conflits sérieux et complexes pour les différentes parties. Les modèles et méthodes de calcul des coûts existants à ce jour se révèlent peu efficaces pour montrer l'impact sur la productivité à la suite d'un changement.

De ce fait, la question suivante est posée : *comment évaluer l'effet des ordres de changements d'un grand projet de construction sur la productivité de la main-d'œuvre afin de calculer les coûts indirects reliés aux ordres de changement?* Cette question générale a déjà été étudiée auparavant. Toutefois, les modèles existants ne reflètent pas la réalité de façon adéquate pour être utilisés dans le cadre légal des grands projets de la construction. C'est pourquoi l'objectif principal de cette recherche est de créer un nouveau modèle théorique capable de mieux refléter la réalité.

Plusieurs questions doivent être envisagées afin de pouvoir atteindre cet objectif :

- 1- Quel type de modèle serait adéquat pour représenter la situation actuelle?
- 2- Quels sont les scénarios à envisager?
- 3- Comment comparer ce modèle avec ceux présents dans la littérature?

Ces questions permettent de préciser l'objectif principal avec les étapes ou objectifs spécifiques qui sont requis afin de remplir le but de ce projet.

- 1- Créer un modèle capable de refléter la réalité;
- 2- Élaborer et tester différents scénarios possibles dans l'industrie actuelle;
- 3- Comparer les résultats du modèle avec ceux présents dans la littérature.

### 3.3 Étapes de la méthodologie

La méthodologie de ce projet de recherche, comme le démontre la figure 3-1, comporte les étapes suivantes : création d'un modèle de simulation, élaboration d'une banque de données, simulation des scénarios, validation des résultats et analyse des résultats.



Figure 3-1 : Méthodologie du projet de recherche

La méthodologie présentée permet de remplir les objectifs de cette recherche. La création d'un modèle de simulation valide permet de bien refléter la réalité. Le modèle est le point de base de cette recherche afin de pouvoir commencer toutes les expérimentations. L'élaboration d'une banque de données doit être faite afin de s'assurer la validité des résultats. Si les données entrantes dans le domaine ne sont pas valables, il sera impossible d'affirmer la validité des résultats sortants. Pour continuer, la création de plusieurs scénarios de simulation est nécessaire. Les scénarios seront créés en modifiant les variables clefs présentes dans le modèle. Ils permettront de voir comment le phénomène de changement influence la productivité lorsque différentes situations possibles surviennent dans le domaine de la construction. La validation des résultats aide à vérifier si les données sortantes sont exactes. Avant de pouvoir faire une analyse approfondie, il est important de vérifier si les valeurs obtenues reflètent la réalité. Dans le cas d'erreur, les résultats doivent être rejetés afin de ne pas fausser la recherche. Enfin, une analyse des résultats est effectuée. Cette analyse permet de relever les relations présentes. Conformément à cette analyse, il sera possible de

trouver la relation entre les pertes de productivités et la quantité de changement dans le projet de la construction.

### **3.4 Modélisation du problème**

Cette section présente les arguments qui justifient le choix du type de modèle qui est utilisé pour produire les résultats de cette recherche. Une évaluation par élimination permet de ressortir l'ensemble des informations nécessaires au modèle futur.

Le premier point à déterminer est la donnée de sortie du modèle. Il est important d'identifier si le modèle produit une donnée qualitative ou quantitative. Cette première partie est facilement justifiable. Afin de comparer le modèle proposé avec ceux de la littérature, il faut être en mesure de transformer les résultats selon un indicateur de productivité pour ensuite créer une régression qui pourra être comparée avec les recherches existantes (Léonard, 1988). Dans la littérature, l'indicateur de productivité le plus utilisé est un ratio entre le nombre d'heures de main-d'oeuvre réelle et le nombre d'heures de main-d'oeuvre envisagées sans changement. Donc, un modèle quantitatif est le plus approprié.

Ensuite, il faut déterminer si le modèle sera de type réactif ou prédictif. En d'autres mots, est-ce que le modèle cherche à prévoir des événements futurs ou réagit aux changements externes? Dans le but de refléter la réalité autant que possible, un modèle réactif semble le plus adéquat. Malgré l'ensemble des recherches présentes dans le domaine de la gestion de projet, la pratique n'est pas aussi avancée que la théorie (Herroelen, 2005). De ce fait, les techniques prédictives existantes sont peu utilisées dans les projets réels ce qui amène une gestion de projet plus réactive que prédictive lors de la présence de changements. Compte tenu de cette observation, le modèle réactif doit être privilégié.

En raison de ces deux critères, il est possible de considérer une modélisation par programmation linéaire ou une modélisation par simulation. La programmation linéaire est très répandue dans l'ordonnancement de projet afin d'obtenir une réponse optimale. Cependant, le cadre de cette recherche touche davantage un milieu stochastique à cause de l'incertitude reliée à l'occurrence des changements et leurs effets (Wu, Hsieh, Cheng and Lu , 2004). L'utilisation d'un modèle de simulation doit donc être priorisée.Une simulation capable de montrer les effets des ordres de

changements sur un projet géré de façon réactive donnerait des résultats qui pourraient être utilisés dans la communauté de grands projets de construction. Ce type de modèle est présent dans plusieurs domaines de la littérature, dont celui de la construction. Par exemple, Lim, Yi, D. Lee et Ardit (2014) cherche à déterminer la meilleure technique de planification à l'aide de différents scénarios lors d'une simulation. Récemment, Du, M. El-Gafy et D. Zhao (2015) ont simulé plusieurs techniques de gestion des ordres de changement afin de trouver la meilleure réaction. De ces faits, l'utilisation d'un modèle de simulation dans le contexte des ordres de changements semble appropriée.

Les données d'entrée du modèle de simulation seront fournies sous la forme d'un réseau de tâches avec des contraintes de ressources, de durées et de prédecesseurs. Des tâches du réseau subiront des changements et le modèle de simulation aura pour but de retrouver l'équilibre grâce à des techniques réactives utilisées dans le milieu. En d'autres mots, le modèle trouve l'équilibre lorsque le retard créé par un changement a pu être rattrapé. Ensuite, la productivité du système sera calculée afin d'être comparée avec la littérature.

Le modèle de simulation utilisé dans le cadre de ce projet est développé du début à la fin. Le caractère particulier du problème évalué ne permet pas l'utilisation de logiciel de simulation tel que Arena. La variation importante du nombre de tâches sur les différents réseaux est trop contraignante pour les logiciels de simulation déjà existants. L'utilisation de ce type de logiciel obligera la création de plusieurs modèles afin de respecter les contraintes de préséance des différents projets. Le nombre de modèles augmenterait ce qui allongerait et compliquerait le temps du projet de cette maîtrise. De plus, il serait difficile de justifier que l'ensemble des modèles créés est identique. C'est pourquoi la création d'un logiciel interne est beaucoup plus efficace et valable afin d'obtenir les résultats voulus.

### 3.4.1 Crédit d'un modèle de simulation

Afin d'être en mesure de créer une expérience similaire sur chacune des instances, le modèle doit enregistrer des données de projet de type RCPSP (*Resource-Constrained Project Scheduling Problem*). Une fois l'acquisition des données complétée, une heuristique crée un ordonnancement des tâches. L'utilisation d'heuristique reflète la simplicité de la planification présente dans la pratique. Effectivement, les logiciels de gestions de projet comme MS Project utilisent

normalement des heuristiques afin d'établir l'échéancier d'un projet compte tenu de la combinatoire très élevée pour ce type de problème. C'est pourquoi un ordonnancement optimal n'est pas nécessaire pour cette simulation.

Le prochain point est le pourcentage de changement. Afin d'obtenir des mesures semblables à la littérature, le pourcentage de changement est obtenu de la façon suivante :

$$D_c = D_p * (1 + C\%) \quad (1)$$

$D_c$ : Durée du changement

$D_p$ : Durée totale du projet

$C\%$ : pourcentage de changement

Il faut mentionner que le temps du projet est celui obtenu à la suite de l'ordonnancement de départ, c'est-à-dire celui effectué avant les changements. Dans le cas où la valeur de  $C\% = 0$ , le temps du projet resterait le même.

Lorsqu'un retard est remarqué, le logiciel implante directement des heures supplémentaires afin de rattraper le retard de l'activité. Le temps de la tâche accélérée est lui-même influencé par une perte de productivité due à l'accélération de la production. La perte de productivité est calculée grâce au graphique de la Rountable (1980) mentionné dans la thèse de Léonard (1988). Il est possible de consulter le graphique dans la section littérature à la figure 2.1. La valeur de la productivité est calculée de la façon suivante :

$$P = E/A \quad (2)$$

P: productivité

E: valeur acquise

A: valeur actuelle

Cette formule est commune dans le domaine de la gestion de projet afin de déterminer la productivité de la main-d'œuvre. La valeur acquise constitue la durée estimée pour effectuer la tâche. La valeur actuelle représente la durée réelle d'une tâche ou du projet.

Enfin, la dernière étape consiste à exécuter le projet avec l'ordonnancement de départ tout en prenant en compte les changements présents dans le modèle. Lorsque le modèle rencontre un retard sur le temps de fin d'une tâche, il accélère la production. Ainsi, le modèle de simulation est purement réactif. Tant que la présence d'un retard n'est pas détectée, le modèle n'implante pas d'heures supplémentaires.

Les étapes de simulation utilisée pour créer les résultats sont les suivantes :

- 1-Entrée de données;
- 2- Ordonnancement;
- 3- Implantation de changements;
- 4- Réordonnancement;
- 5- Sortie des résultats.

### **3.4.2 Banque de données**

Il est important de mentionner que dans le cadre de ce projet aucune donnée réelle ne sera utilisée. Malheureusement, le caractère sensible des dossiers ne permet pas le partage de données. Une approbation de toutes les parties prenantes est nécessaire afin de divulguer les informations d'un projet, ce qui n'a pas pu être obtenu. La poursuite de ces informations confidentielles serait même inefficace parce que plusieurs banques de données existantes peuvent être utilisées. C'est pourquoi la banque de données PSPLIB sera utilisée. Ces données sont très utilisées dans la recherche en général et sont présentes dans la littérature (Lim, Yi, Lee et Ardit, 2013). À partir de ces renseignements, il est possible de créer plusieurs instances de projet qui se rapprocheront de cas réels. Dans le cadre de ce projet, les éléments nécessaires sont le nombre de ressources utilisées, le nombre de types de ressources ainsi que la quantité de chacune des ressources, le nombre de tâches, le réseau des tâches et la durée des tâches. La simplicité des données requises permet d'utiliser une base de données telle que PSPLIB tout en obtenant des résultats fiables. La figure 3.2 montre un exemple de données utilisées.

Nbre tache		Nbre Res.							
32		4							
		Dispo. Res. 1	Dispo. Res. 2	Dispo. Res. 3	Dispo. Res. 4				
		11	12	9	9				
Durée	Conso. Res. 1	Conso. Res. 2	Conso. Res. 3	Conso. Res. 4	Nbre Succ.	Succ. 1	Succ. 2	Succ. 3	

Figure 3-2 : Exemple des données présentes dans une instance

### 3.4.3 Simulation des scénarios

Afin de tester le modèle et de valider les hypothèses, plusieurs scénarios ont été créés.

Tableau 3-1 Scénarios testés lors de la simulation

Numéro	Variable modifiée
Scénario 1	Temporelle
Scénario 2	Ressources
Scénario 3	Activité modifiée
Scénario 4	Nombre d'activités touchées

Le premier scénario prend en considération le moment d'occurrence du changement. Il faut noter que Léonard (1988) a omis de prendre en considération cette variable lors de la compilation de ses résultats. Cependant, la littérature indique une corrélation entre l'occurrence du changement et la productivité des travailleurs (Hanna, Camlic, Peterson and Nordheim , 2002). Afin d'observer son effet, une segmentation de l'ordonnancement de départ du projet est effectuée. Ensuite, une activité est choisie aléatoirement à l'intérieur de ce laps de temps. La segmentation proposée est de diviser le projet par tranche de 25% d'avancement jusqu'à 75% d'avancement. La borne supérieure de 75% provient de la littérature. Les données montrent qu'un changement survenant après 60% d'avancement est très rare. C'est pourquoi une borne supérieure a pu être créée.

Tableau 3-2 Exemple de borne temporelle

Occurrence	Activité	Temps minimum	Temps maximum	Temps de départ
Entre 0 et 25% du temps	A	0	25	16
Entre 25% et 50% du temps	B	25	50	32
Entre 50% et 75% du temps	C	50	75	64

Le tableau donne les bornes possibles d'un projet de 100 unités de temps, soit 0, 25, 50, 75. Le programme choisit une tâche de façon aléatoire entre les bornes afin d'augmenter la durée de celle-ci. Il faut noter que la variable temporelle sera combinée avec chacun des autres scénarios expliqués plus tard dans ce mémoire. Le temps minimum est égal à la borne inférieure choisie lors du scénario tandis que le temps maximum est égal à la borne supérieure. La valeur temps de départ est le moment où la tâche choisie de façon aléatoire doit commencer.

Le deuxième scénario permet de déterminer l'influence des ressources utilisées suite à l'implantation d'un changement. Afin d'augmenter la rigidité du projet, la valeur des ressources disponibles est augmentée à son maximum pour chacun des types de ressources. Pour ce faire, chacun des types de ressources est égal à la valeur maximale de l'ensemble de ces ressources :

$$RN_j = \text{MAX} ( R_{ij} ) \quad (3)$$

RN : nouvelles valeurs de ressources disponibles pour le type de ressources j

$R_{ij}$  : Consommation de la ressource j pour la tâche i

Le scénario 3 cherche à montrer l'effet du chemin critique sur le projet. En forçant le modèle à effectuer un changement sur une activité du chemin critique, il sera possible de voir si le retard créé sur le départ au plus tard influencera davantage le problème et obligera l'intervention d'une quantité d'heures supplémentaires plus importante. Il faut mentionner que le chemin critique est déterminé par un ordonnancement sans contrainte de ressource.

Le dernier scénario prend en considération l'effet de changements multiples. En d'autres mots, un changement multiple touche plus d'une activité lorsqu'il est implanté. Par exemple, il est possible de diviser le pourcentage de changement sur plusieurs activités. Au lieu d'implanter un changement de 20% sur une seule activité, deux modifications de 10% sur deux activités sont ajoutées. De cette façon, il est possible de constater si la concentration d'un changement sur une seule activité impacte davantage la productivité que plusieurs changements, le tout à l'intérieur du même écart de temps.

L'analyse des résultats permet de comprendre les effets réels des changements. Conformément aux résultats obtenus, il sera possible de voir le type de relation qui existe entre les ordres de changements et la productivité de la main-d'oeuvre. La relation obtenue sera ensuite comparée avec les modèles déjà existants dans la littérature.

### 3.5 Validation du modèle

Il faut mentionner que la modélisation est au centre de ce projet. Les résultats de cette recherche seront valables uniquement si le modèle utilisé reflète la réalité de façon juste et robuste. Le modèle sera validé à la suite de l'utilisation de plusieurs instances. Une analyse des ordonnancements proposés sera faite avant l'implémentation des changements afin de vérifier la validité de l'ordonnancement donné. De plus, les actions prises à la suite des changements seront validées par les pratiques courantes en vigueur dans le milieu des grands projets de la construction. Enfin, l'évaluation des résultats obtenus permettra de déterminer si le modèle est valable ou non. Les critères évalués sont le temps total du projet et la perte de productivité. Dans le même ordre d'idée, une augmentation du temps total du projet est attendue à la suite de l'implantation d'un changement. Selon le pourcentage de changement, le temps du projet devrait augmenter de façon logique. En d'autres mots, le retard créé doit être transmis sur l'ensemble du réseau qui suit la tâche modifiée tant et aussi longtemps qu'il n'est pas éliminé. Par exemple, si 5% sont ajoutés à la durée d'une

tâche et que le temps total du projet augmente de 100%, les tâches qui suivent le changement devront être analysées afin de vérifier leur validité. Dans le cas où le retard est transmis de façon logique tout au long du réseau, le modèle sera valide. Toutefois, si le retard augmente de façon importante sans aucune explication sur plusieurs instances, le modèle sera considéré comme invalide. La section de modélisation expliquera davantage les critères utilisés pour la validation du modèle.

### **3.6 L'analyse des résultats**

La dernière étape de cette recherche sera l'analyse des résultats. Cette partie est nécessaire afin d'évaluer les tendances et les relations possibles entre les ordres de changement et les coûts indirects. L'utilisation d'une régression aidera à comparer les résultats avec ceux provenant de la littérature (G. McEniry 2007). Les buts premiers de cette analyse sont de valider les hypothèses en plus de remplir l'objectif de cette recherche. De plus, une comparaison entre les différentes variables permet de voir la divergence entre les scénarios.

### **3.7 Conclusion**

Bref, la méthodologie proposée permet de créer un modèle capable de simuler les changements dans les grands projets de la construction. Les données entrantes du modèle seront basées sur les contraintes présentes dans les problèmes RCPSP, soit les contraintes de ressources, de temps et de présence. Ces contraintes permettent la création de quatre scénarios de simulation qui fourniront les résultats quantitatifs analysables dans le cadre de cette recherche. Les variables de ressources, d'occurrence de changement, du nombre d'activités et du nombre d'activités touchées simultanément fourniront un éventail de scénarios intéressant pour ce projet. Enfin, une analyse du modèle par rapport à l'ordonnancement obtenu avant et après changement validera le modèle tout en permettant la comparaison entre les résultats de cette recherche avec ceux de la littérature.

## CHAPITRE 4 MODÈLE

La section suivante permet d'élaborer davantage sur le modèle de simulation programmée. Le modèle est un logiciel programmé dans son intégrité avec le langage de programmation Visual Basic. Le modèle peut être divisé en quatre sections :

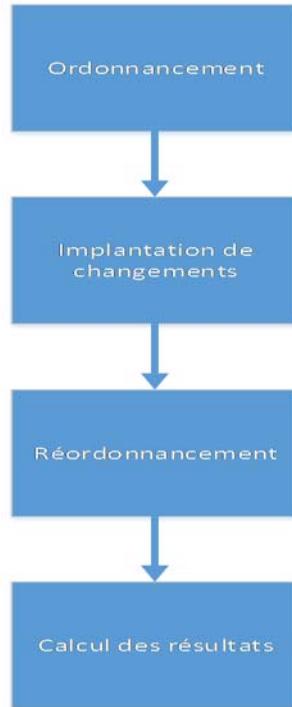


Figure 4-1 : Étape du modèle de simulation

Le diagramme précédent sera expliqué de façon plus précise dans les prochaines lignes. Chacun des éléments le composant sera décrit afin de faciliter sa compréhension.

### 4.1 Ordonnancement

Afin d'être en mesure d'implanter un pourcentage de changements dans le modèle, il faut déterminer le temps total du projet sans présence de modifications. L'utilisation d'heuristiques d'ordonnancement de projet permet d'obtenir un temps total du projet tout en restant conforme avec la réalité. Effectivement, les problèmes RCPSP sont considérés comme NP-difficile, ce qui

rend leur résolution longue et complexe plus le nombre d'activités augmente (Abbasi, Shadrokh and Arkat, 2006). C'est pourquoi l'utilisation d'heuristiques est une bonne alternative lors de projet réel. Dans le cadre de ce projet,  $k$  heuristiques sont utilisées. À l'aide d'une boucle logique de programmation, le résultat de l'ordonnancement des  $k$  heuristiques est obtenu et comparé afin d'obtenir la meilleure solution possible. Le nombre d'heuristiques comparées est de huit ce qui implique l'affirmation que  $k$  est égal à huit. L'algorithme décrit est programmé en pseudo-code afin d'en faciliter la compréhension :

*Fonction Ordonnancement*

{

$Cmax^* = \infty$

Pour  $k=1$  à 8

{

$Cmax = H_k$

Si  $Cmax^* > Cmax$

{

$Cmax^* = Cmax$

$k^*=k$

}

Fin Si

}

Prochain  $k$

}

Le pseudo-code de l'algorithme montre que huit ordonnancements sont effectués selon un critère de choix précis relié à la valeur de  $k$ . Le principe de fonctionnement des huit heuristiques ( $H_1, H_2, H_3, \dots, H_8$ ) reste le même. Un sous-ensemble  $B^t$  des tâches actives est sélectionné. Ce sous-ensemble comprend toutes les tâches pouvant être continuées ou débutées à un temps  $t$ . Une tâche  $i$  dont les prédecesseurs ne sont pas terminés ne peut débuter. La prochaine étape trie l'ensemble  $B^t$  selon l'heuristique  $k$  choisie. Enfin, les tâches pouvant être effectuées sont amorcées tout en respectant les contraintes de ressources. Les lignes suivantes décrivent de façon condensée le fonctionnement global des huit heuristiques :

Soit  $V$  l'ensemble des activités  $i$  qui ne sont pas encore complétées

Soit  $B$  l'ensemble des tâches  $i$  pouvant débuter au temps  $t$

1-Création de l'ensemble  $B$  à partir de l'ensemble  $V$

2-Trie de l'ensemble  $B$  selon la valeur de  $k$

3-Choix des «  $a$  » premières tâches telles que

$$\sum_{i=1}^{|B|} R_{ij} y_{it} \leq Q_j \quad (4)$$

Où :

$R_{ij}$  : Quantité de la ressource  $j$  que l'activité  $i$  consomme

$Q_j$  : Quantité de ressources  $j$  disponibles

$|B|$  : la cardinalité de l'ensemble  $B$  (c.-à-d. le nombre d'activités de l'ensemble  $B$ )

$y_{it}$  : variable binaire reliée à l'activation d'une tâche

$\begin{cases} y_{it} = 1, \text{ si la tâche } i \text{ est active au temps } t \\ y_{it} = 0, \text{ sinon} \end{cases}$

Le tableau suivant explique chacun des critères de tri des huit heuristiques :

Tableau 4-1 Critère de tri des huit heuristiques d'ordonnancement

Heuristique	Critère de tri
H1	Tri en ordre décroissant de la consommation de la ressource 1
H2	Tri en ordre décroissant de la consommation de la ressource 2
H3	Tri en ordre décroissant de la consommation de la ressource 3
H4	Tri en ordre décroissant de la consommation de la ressource 4
H5	Tri en ordre décroissant de la consommation totale des ressources
H6	Tri en ordre décroissant de durée
H7	Tri en ordre croissant de début au plus tôt
H8	Tri en ordre croissant de la marge totale

Le critère de tri des heuristiques H1 à H4 est très simpliste. L'activité dont la consommation de la ressource  $j$  est la plus élevée aura priorité sur l'ensemble des activités de B. De ce fait, si  $R_{11}$  est égal à 4 et si  $R_{21}$  est égal à 8, l'activité 2 aura priorité sur l'activité 1. Pour l'heuristique H5, la consommation totale des ressources des activités pouvant débuter est calculée afin de faire le tri.

Dans le critère de tri de H6, la valeur de la durée de l'activité est prise en considération. Si la quantité de ressources disponibles le permet, l'activité de plus longue durée sera sélectionnée pour débuter au temps  $t$ , sinon l'activité suivante dans la liste sera sélectionnée selon le même critère.

Les critères H7 et H8 commencent par effectuer un ordonnancement sans ressource. Un passe-avant et une passe-arrière permettent de déterminer les moments de début au plus tôt, de début au plus tard, de fin au plus tôt et de fin au plus tard. L'heuristique H7 trie les activités en ordre croissant de début au plus tôt. Lorsque plusieurs activités peuvent commencer au même moment, le logiciel exécutera celle dont le moment de début au plus tard est le moins élevé. L'heuristique H8 trie les activités selon un ordre croissant de la valeur de leur marge totale. Cette heuristique calcule la

marge en prenant la différence entre le début au plus tard et le début au plus tôt. De ce fait, les tâches situées sur le chemin critique sont priorisées.

## 4.2 Implantation de changement

Une fois l'ordonnancement choisi, la valeur de  $k$  de l'heuristique choisie est mémorisée sous l'indice  $k^*$  afin que cette heuristique puisse être réutilisée tout au long des implantations des changements. Le calcul du niveau de changement est le même que celui présent dans la littérature (Léonard, 1988) :

$$C\% = \frac{D_c}{D_p} \cdot 100 \quad (5)$$

$C\%$  : pourcentage de changement

$D_c$  : Durée du changement

$D_p$  : Durée totale du projet

Il faut noter que la durée du projet est égale à la valeur de fin du projet suite au meilleur ordonnancement obtenu. Cette valeur est mémorisée et liée à l'instance pour l'ensemble des étapes suivantes. Il a déjà été expliqué dans la littérature que plusieurs sources d'ordre de changement pouvaient influencer la durée d'un projet. Dans le cadre de cette simulation, une augmentation de la durée d'une activité permet de refléter les ordres de changement dans une situation réelle sans tenir compte de la source du changement. Ensuite, le pourcentage de changement est choisi de façon graduelle afin d'obtenir des résultats comparables à ceux de la littérature. De par cette explication, la formule précédente doit être modifiée afin de déterminer la valeur du temps de changement devant être implantée. La formule devient :

$$D_c = \frac{D_p C\%}{100} \quad (6)$$

Cette équation permet d'avoir une valeur précise de durée qui doit être ajoutée à une tâche spécifique. Puisque l'ordonnancement des RCPSP est généralement difficile à prévoir, le choix de la tâche modifiée peut être aléatoire. Néanmoins, cette tâche doit être comprise entre les bornes de temps présentées lors de la méthodologie. Cette explication peut être définie mathématiquement comme suit :

$$i \in C \Leftrightarrow M_u \leq d_i \leq (M_u + 25\%Cmax) \text{ où } M_u \in (0\%Cmax, 25\%Cmax, 50\%Cmax) \quad (7)$$

$i$  : Indice de la tâche

$d_i$  : Moment où la tâche  $i$  débute

$C$  : L'ensemble des tâches pouvant être modifiées

Une fois l'ensemble  $C$  créé, il suffit de prendre une tâche aléatoire à l'intérieur de cet ensemble. Ensuite, la valeur de la durée du changement est calculée pour être ajoutée à la durée de la tâche trouvée.

$$d_i^* = d_i + D_c \quad (8)$$

$d_i^*$  : Durée tâche  $i$  après ajout du changement

$d_i$  : Durée initiale de la tâche  $i$

$D_c$  : Durée du changement

### 4.3 Réordonnancement

Une fois le changement implanté, un nouvel ordonnancement est effectué. Ce dernier est basé sur l'échéancier de l'algorithme *Fonction d'Ordonnancement*. L'ordonnancement est effectué en prenant comme critère de tri la valeur de  $k^*$ . Il est certain que l'ordonnancement sera modifié à cause de l'augmentation de la durée d'une tâche. On peut présumer que cette modification sera plus importante lorsque le pourcentage de changement sera élevé. De ce fait, la durée du projet de chacune des instances sera augmentée de façon générale. Étant donné qu'une heuristique est utilisée pour trouver l'ordonnancement, il existe une possibilité que la durée du nouvel ordonnancement

soit inférieure à celle obtenue avant les changements. En effet, il se peut que le retard d'une tâche permette le commencement d'autres tâches que l'heuristique  $k^*$  n'aurait pas considéré et qui permettrait un meilleur ordonnancement. On considère que ces cas seront tout de même isolés et qu'étant donné qu'aucune méthode optimale ne peut être utilisée en raison de la taille des problèmes, ceci demeure un inconvénient acceptable dans les circonstances.

Puisque la simulation doit refléter un mode réactif de gestion de changement, le modèle n'implante aucune heure supplémentaire tant et aussi longtemps qu'un retard sur l'ordonnancement original n'est pas détecté. Afin de détecter ce retard, le logiciel compare le moment de fin des tâches du nouvel ordonnancement avec le moment de fin de l'ordonnancement initial. Lorsqu'une différence est relevée, l'ajout d'heures supplémentaires est effectué.

Ensuite, la quantité maximum d'heures supplémentaires pouvant être implantées est égale à la durée de la tâche  $i$  fois la quantité d'heures supplémentaires ajoutées chaque jour.

$$T_{max} = A_i d_i \quad (9)$$

$d_i$  : Durée initiale de la tâche  $i$  (en jour)

$A_i$  = Heures supplémentaires ajoutées sur la tâche  $i$  par jour où  $A_i \in (2,4)$

$T_{max}$  = Heures supplémentaires maximums pour la tâche  $i$

Le nombre total d'heures supplémentaires pouvant être ajouté ne peut dépasser la valeur de  $T_{max}$ . Le logiciel prend en considération la valeur du  $T_{max}$  et du retard afin de déterminer le nombre d'heures supplémentaires nécessaire. En d'autres mots, le programme détermine le retard à rattraper sur une tâche  $i$ . Si le retard est inférieur à  $T_{max}$ , le nombre d'heures supplémentaires ajouté est égal au retard. Si le retard est supérieur à  $T_{max}$ , le nombre d'heures supplémentaires ajouté est égal à  $T_{max}$ .

#### 4.4 Résultats

Le calcul de la productivité de la simulation prend en considération les formules déjà existantes dans la littérature. Dans la thèse de Léonard (1988), le calcul de la productivité se définit comme

le rapport entre le nombre d'heures actuelles et le nombre d'heures estimées pour effectuer une tâche précise. La formule peut être définie comme suit :

$$P_i = (E_i / A_i) \quad (10)$$

$P_i$  : Productivité de la tâche i

$E_i$  : Nombre d'heures estimées de la tâche i

$A_i$  : Nombre d'heures actuelles de la tâche i

De plus, la perte de productivité de la tâche i est définie ainsi :

$$\rho_i = 1 - P_i \quad (11)$$

$$\rho_i = (1 - E_i / A_i) \quad (12)$$

$\rho_i$  = Perte de la productivité

Il est facile de lier cette formule avec les données produites par la simulation. Il a été expliqué auparavant que le modèle était capable d'implanter les pertes de productivité. L'utilisation de la courbe de la AACE. (1973) permet de déterminer la productivité à la suite du nombre de journées d'heures supplémentaires. Cette courbe montre une perte de la productivité des ouvriers selon le nombre de semaines de travail avec des heures supplémentaires continues. De plus, une différence notable entre la productivité d'une semaine contenant deux heures supplémentaires par jour ou quatre heures supplémentaires est observée. Il faut spécifier que le nombre d'heures par jour normal dans l'industrie est égal à huit heures par quart de travail ce qui explique une perte de productivité lorsque le nombre d'heures par jour augmente à dix ou douze. Cette donnée provient du standard canadien de travail. Pour continuer, une augmentation du nombre d'heures par jour diminuera le nombre de jours total pour effectuer la tâche provoquant une diminution du nombre de semaines. Le facteur de productivité fourni par la Rountable (1980) peut varier selon le nombre d'heures effectuées chaque jour et le nombre de semaines consécutives des heures supplémentaires. Afin de s'assurer d'utiliser le bon facteur, un algorithme récursif a dû être utilisé :

### Fonction facteur productivité

{

Semaine1=  $d_i/5$  \*\*\*\*\*5 est égale au nombre de jours par semaine\*\*\*\*\*

Calcul  $d_i$  suite aux pertes de productivités

Calcul de la semaine2 \*\*\*\*\* semaine2 est le nombre de semaines d'heures supplémentaires suite aux pertes de productivité

si semaine1<>semaine2 faire

{

revenir aux valeurs de départ

Appeler la fonction facteur productivité

sinon

}

fin si

}

Grâce à cette fonction, le système prend en compte que la productivité influence le nombre de semaines nécessaires d'heures supplémentaires. Un équilibre est trouvé lorsqu'un nombre exact de semaines d'heures supplémentaires est obtenu. Le logiciel cherche à diminuer les pertes de productivité au maximum. Il détermine au départ si l'ajout de deux heures supplémentaires par jour permettrait de rattraper le retard. Dans le cas où le retard est trop grand, quatre heures sont ajoutées sur chacune des journées au quart de travail normal ( huit heures ). Si le retard est encore une fois trop important, le retard est transféré aux successeurs de la tâche. Lorsque le retard est rattrapé ou inexistant sur une tâche, une productivité de 100% est supposée.

Afin d'obtenir la productivité d'une tâche précise, la formule suivante est utilisée :

$$P_i = \frac{(d_i+T_i)F_i}{(d_i+T_i)} \quad (13)$$

$P_i$ = Productivité de la tâche i

$F_i$ : facteur de productivité de la tâche i trouvée par l'algorithme récursif présenté ci-haut.

De ce fait, la productivité d'une tâche  $i$  équivaut à la valeur présente dans les graphiques de la Rountable (1980).

$$P_i = F_i \quad (14)$$

Afin d'obtenir la productivité totale du système, il faut modifier la formule en additionnant la somme de la durée des tâches. La formule devient alors :

$$P_{total} = \frac{\sum_{i=1}^n ((d_i+T_i)F_i)}{\sum_{i=1}^n (d_i+T_i)} \quad (15)$$

Où  $n$  représente le nombre de tâches du projet.

En prenant en compte le temps de toutes les activités présentes dans une instance, il est possible de quantifier la productivité du système. Il faut mentionner qu'une moyenne des  $P_i$  donnerait une valeur erronée de la productivité de la main-d'oeuvre puisqu'il y aurait un effet de pondération lié à la longueur de chacune des tâches. Une activité avec une durée de 3 jours et une productivité de 50% n'influencera pas autant la valeur finale de la simulation qu'une activité avec une durée de 20 jours et une productivité de 100%. On peut alors affirmer :

$$\frac{E_{total}}{A_{total}} = P_{total} = \frac{\sum_{i=1}^n ((d_i+T_i)F_i)}{\sum_{i=1}^n (d_i+T_i)} \neq \frac{\sum_i^n P_i}{n} \quad (16)$$

## 4.5 Validation du modèle

Finalement, le dernier point à ajouter à cette simulation est la validation. Il n'est pas possible de prouver le fonctionnement du modèle en le comparant avec la réalité à cause du manque de données réelles. C'est pourquoi une analyse des données sortantes permet la validation. Effectivement, le problème d'ordonnancement évalué doit respecter des critères cohérents avec la réalité ainsi que les hypothèses de départ. Tout d'abord, lorsqu'aucun changement n'est implanté, le temps du projet doit être identique au temps de départ. De ce fait, la quantité d'heures supplémentaires doit être

égale à zéro ainsi que les pertes de productivité. C'est pourquoi l'efficacité totale du modèle doit logiquement être de 100% sans présence de changements. Ensuite, une analyse du temps total du projet selon la quantité de changement est faite afin d'établir une cohérence dans les résultats. Par exemple, une relation linéaire proportionnelle entre le pourcentage de changement et le temps montrerait un modèle erroné. À cause de la nature du problème étudié (RCPSP), des diminutions et augmentations du temps sont attendues. Une augmentation du temps du projet est attendue lorsque la quantité de changements est trop importante par rapport au nombre d'heures supplémentaires. Le nombre de successeurs de l'activité modifiée affecte de façon importante les résultats du projet. Plus la quantité de successeurs est élevée, plus l'impact sur la productivité, le nombre d'heures supplémentaires et la durée totale du projet sont importants. Le retard non ratrapé sur une tâche doit être transféré à ses successeurs. Dans un autre ordre d'idée, une diminution du temps du projet est aussi attendue. Le retard créé sur certaines tâches permet le commencement hâtif d'autres tâches, ce qui peut diminuer la durée totale du projet. Donc, le meilleur moyen de valider le modèle est d'analyser le retard le long du réseau de l'instance de projet et de s'assurer que la succession des tâches respecte les contraintes d'un projet RCPSP.

De plus, une perte supérieure aux valeurs présentes dans le graphique de la Rountable (1980) ne peut pas être possible vu le modèle existant. Selon la littérature, une productivité inférieure à 64% et supérieure à 100% avec la présence d'heures supplémentaires est impossible. C'est pourquoi le modèle ne sera pas valable si la productivité se situe à l'extérieur des bornes supérieures et inférieures. Bref, la validation du modèle utilise le temps final du projet parmi chacune des instances en vérifiant la cohérence avec la littérature ainsi que les valeurs entrantes dans la simulation.

## 4.6 Conclusion

En résumé, le modèle utilisé dans le cadre de cette recherche est programmé à l'aide du logiciel de Visual Basic. L'utilisation de huit heuristiques permet l'obtention d'un ordonnancement non optimal reflétant la situation actuelle de la pratique. La valeur de temps de la meilleure solution, soit l'ordonnancement le plus court, est mémorisée dans la variable  $C_{max}^*$  ainsi que le numéro de l'heuristique dans  $k^*$ . De par la valeur de  $C_{max}^*$ , le modèle est en mesure de déterminer le temps total de changement à implanter tout en respectant le pourcentage et le moment d'occurrence du

changement voulu. Ensuite, un réordonnancement selon le critère  $k^*$  est effectué à la suite du changement. Le retard engendré par le changement est rattrapé à l'aide d'heures supplémentaires tant et aussi longtemps que celui-ci sera présent sur l'ensemble du réseau du projet initial. À cause des heures supplémentaires implantées, une perte de productivité est engendrée ce qui est enregistré par le modèle et compilé sous forme de résultats. Une sommation de la productivité totale du projet est effectuée afin d'évaluer l'effet réel des changements sur la productivité. Enfin, le modèle est validé grâce à une analyse approfondie de chacun des ordonnancements fournis. En observant le transfert des retards tout le long de l'ordonnancement, il est possible de valider la simulation, car elle reflétera la pratique de façon concrète.

## CHAPITRE 5 RÉSULTATS

Pour faire suite à la modélisation proposée, une présentation des résultats obtenus est primordiale. Comme mentionné lors de la méthodologie, le plan d'expériences comprend cinq variables clefs : le moment du changement, la disponibilité de ressources, la flexibilité de l'activité et le nombre d'activités impactées par le changement. À la suite d'une analyse approfondie des résultats, une comparaison entre les résultats de cette recherche et les résultats de la littérature est effectuée afin de ressortir les similarités et les différences possibles.

### 5.1 Nombre d'activités

Le nombre d'activités d'une instance représente le nombre de tâches qui doivent être effectuées afin de compléter le projet. Lors de cette simulation, le nombre de tâches est de 30, 60, 90 et 120. Le choix du nombre d'activités est basé sur les données présentes dans PSPLIB. Les premiers résultats montrent l'impact du nombre de tâches lorsque le changement est ajouté à un moment  $t$  situé entre 50% et 75% de la durée normale du projet. La durée normale du projet est définie comme le temps pour effectuer un projet lorsqu'aucun changement n'est ajouté. L'activité touchée par le changement est choisie aléatoirement et la disponibilité des ressources est inchangée. Le graphique suivant reflète la différence entre les valeurs possibles de tâches :

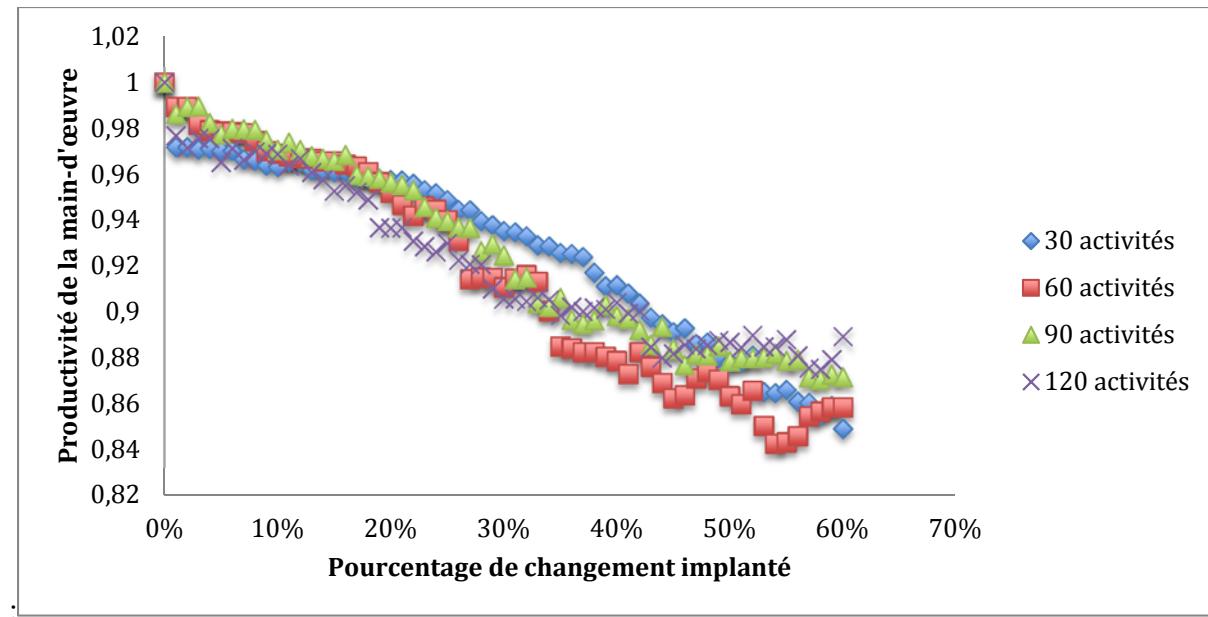


Figure 5-1 : Productivité de la main-d'œuvre selon le pourcentage de changement et le nombre d'activités avec un changement au temps  $t=(50\% \text{ et } 75\%)$ .

La figure 5.1 souligne une différence en ce qui a trait à la productivité de la main-d'œuvre lorsque le nombre de tâches à effectuer est modifié. Quand le pourcentage de changement est inférieur à 10%, la productivité de la main-d'œuvre pour les instances ayant 60 ou 90 activités se situe aux alentours de 98.5% alors que pour les instances ayant 30 et 120 activités, l'efficacité est environ de 97%. Il est possible de relier cette différence de productivité à deux raisons différentes. Tout d'abord, il est important de spécifier que les pertes de productivité sont plus importantes avec un nombre élevé d'opérations à cause de la longueur totale du projet sans changement. 1% d'augmentation pour un projet de 60 ou 90 activités représente une valeur de temps beaucoup plus basse que 1% d'augmentation pour un projet de 120 activités. De ce fait, les pertes de productivité d'un projet de 120 tâches seront plus importantes avec des changements de la valeur de moins de 10%. L'implantation d'heures supplémentaires sera plus importante avec un changement minime, lorsque comparée avec des projets dont le nombre d'activités est égal ou inférieur à 90.

Ensuite, il faut noter que l'absorption de pourcentage de changement est beaucoup plus difficile lorsque le nombre de tâches est restreint. C'est pourquoi lorsque le nombre d'opérations est égal à

30, un changement de moins de 10% provoque une perte plus importante que lorsque 60 ou 90 activités sont présentes dans le projet. L'explication vient du fait que le nombre de successeurs touchés par le retard est plus important si le retard n'est pas rattrapé immédiatement. En d'autres mots, un effet cumulatif est créé sur les tâches suivantes. Cet effet cumulatif devient de plus en plus important avec l'augmentation du pourcentage de changement. Effectivement, il faut constater que même si les projets de 120 opérations montrent les plus grandes pertes d'efficacité avant 25% de changement, leurs pertes de productivité sont les plus basses lorsque les changements sont à 60%. Suite à cette observation, une analyse de la vitesse de la pente de la perte de productivité devient intéressante lorsque le pourcentage de changement est compris entre 0% et 60%. Le tableau suivant est obtenu :

Tableau 5-1 Diminution de la productivité selon le nombre d'activités

Nombre d'activités	Vitesse de descente de la pente	Coefficient de corrélation
30	-0.377	0.95147
60	-0.354	0.96473
90	-0.321	0.96699
120	-0.277	0.93707

Les informations précédentes montrent qu'une perte de productivité sera plus importante lorsque le nombre d'activités est petit. On constate une différence de perte notable à chaque augmentation de 1% du pourcentage de changement entre un projet avec 30 et 120 activités. En d'autres mots, un projet avec 30 tâches perd sa productivité 26,68% plus rapidement qu'un projet avec 120 tâches. Bref, plus le nombre d'activités est important, moins la vitesse de descentes des pertes de productivité, à la suite d'un changement, sera élevée.

## 5.2 Moment du changement

Pour la seconde analyse, la variable qui est modifiée est le moment d'occurrence du changement. Selon Hanna and Swanson (1990), l'instant de la modification affecterait de façon notable la productivité. En forçant un changement dans un intervalle de temps donné, il est possible de ressortir l'effet de l'occurrence sur la productivité de la main-d'oeuvre. Les résultats suivants montrent l'impact de cette variable lorsqu'un projet comporte 120 activités.

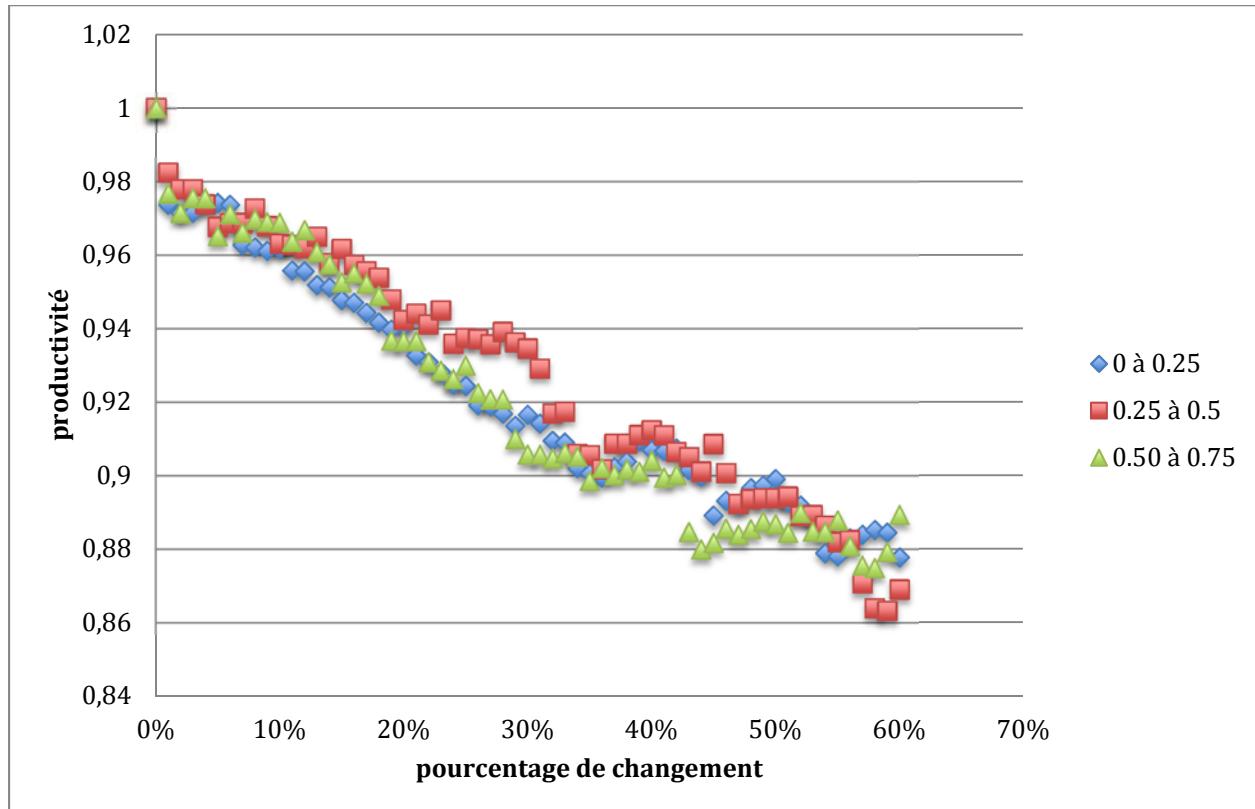


Figure 5-2 : Impact du moment d'occurrence d'un changement sur la productivité d'un projet de 120 tâches

Le graphique de la figure 5.2 montre l'impact du moment d'occurrence d'un changement sur la productivité. Les intervalles de temps pris en considération sont 0 à 25%, 25% à 50% et 50% à 75%. Les valeurs présentes dans la légende de la figure 5.2 indiquent que l'activité touchée par le changement est effectuée entre la valeur minimum et maximum de l'intervalle. Il est possible d'observer que le moment du changement influence peu la valeur de la productivité des ressources. Effectivement, il n'est pas possible de faire une distinction claire de l'impact de ce facteur comme

ce fut le cas pour le nombre d'activités. Cependant, une évaluation du temps total du projet peut être faite afin de voir l'impact du moment du changement sur la date de fin.

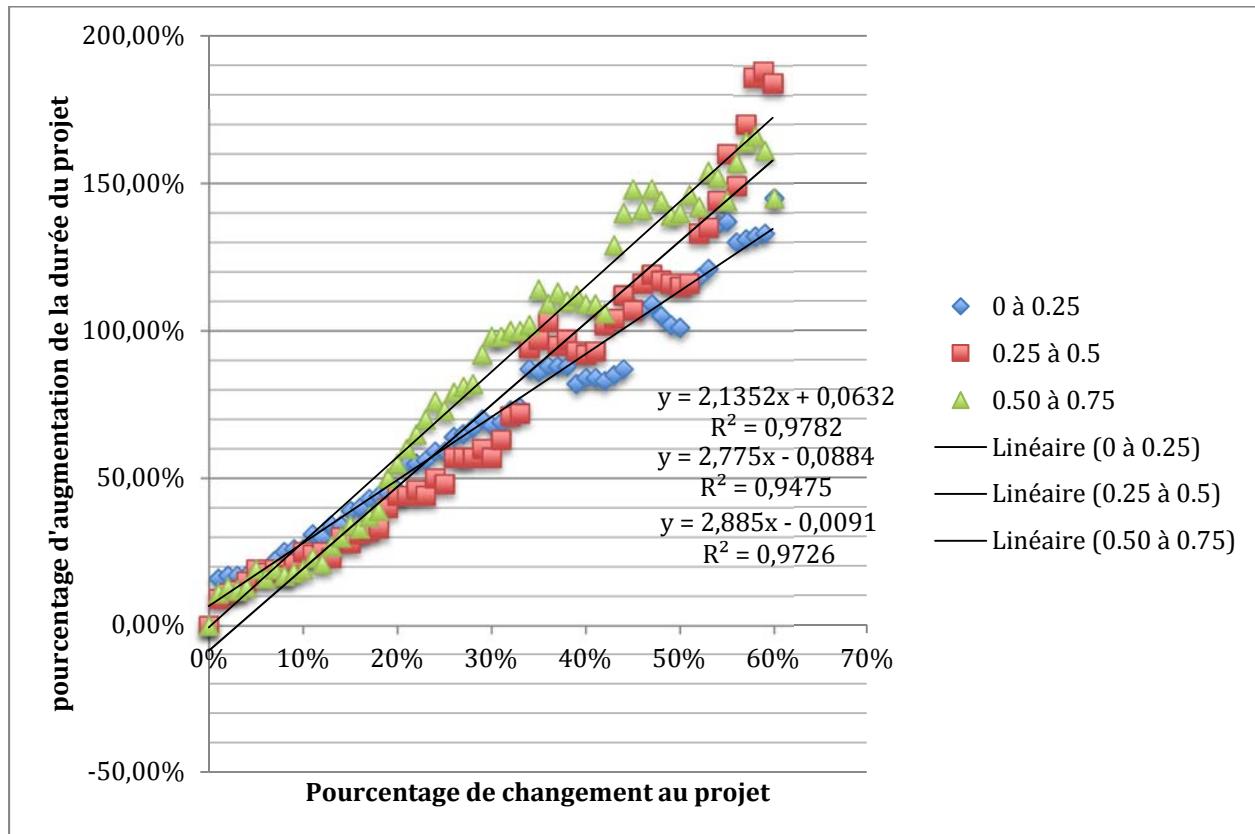


Figure 5-3 : Augmentation de la durée d'un projet en pourcentage selon le pourcentage de changement

Après analyse du graphique de la figure 5.3, il faut constater que l'impact du moment du changement est important en ce qui a trait à la date d'achèvement d'un projet. Les droites linéaires calculées soulignent le taux d'augmentation du temps d'un projet selon le moment d'occurrence. Lorsque le changement survient de façon tardive, la durée totale du projet est augmentée de façon significative par rapport à un changement survenu de façon hâtive. Cependant, en modifiant les activités touchées par les changements, il est possible de voir l'influence du moment du changement sur la productivité.

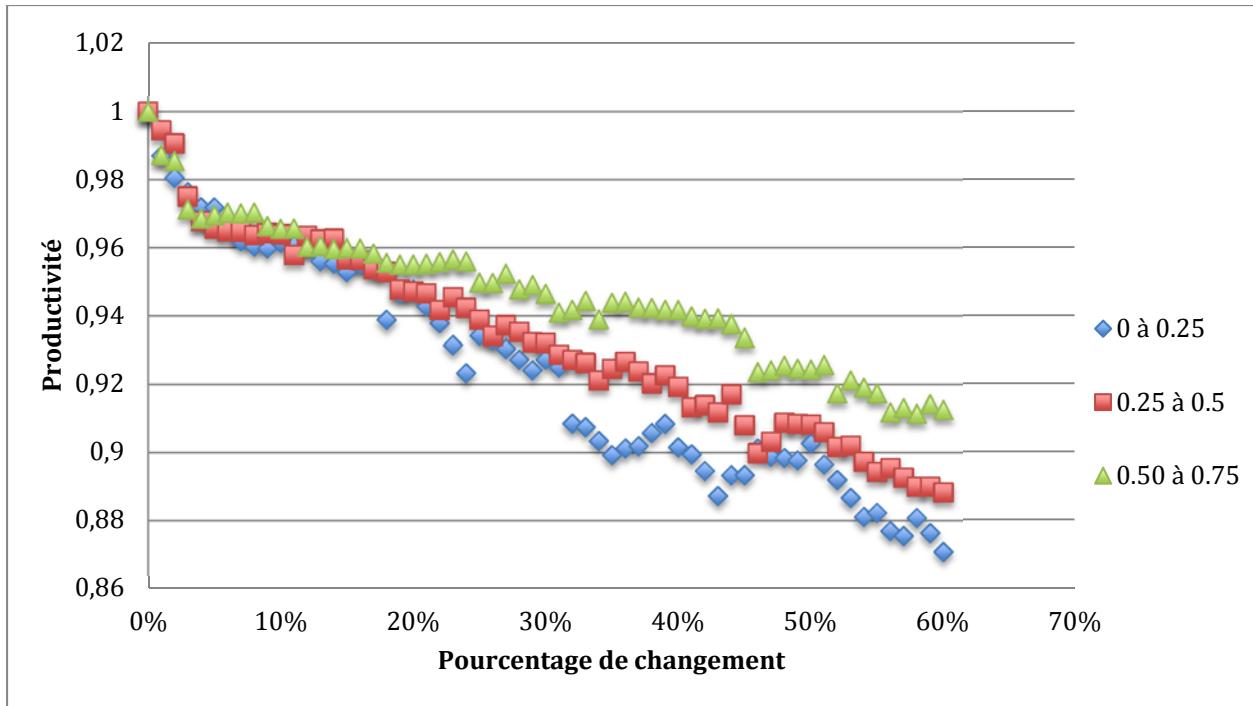


Figure 5-4 : Impact de l'occurrence d'un changement sur la productivité d'un projet de 120 tâches en ciblant que des tâches critiques.

Contrairement à la figure 5.2, le choix des tâches touchées par le changement n'est plus fait de façon aléatoire (voir figure 5.4). La tâche doit être sur le chemin critique du projet afin de voir si l'effet de l'occurrence du changement n'influence réellement pas la productivité. Dans le but de modifier le moins de variables à la fois, les autres variables clefs sont restées identiques à la figure 5.2. Le graphique de la figure 5.4 indique que plus le changement survient tôt, plus la productivité de la main-d'oeuvre est diminuée. Il est important d'expliquer pourquoi l'interaction entre le temps et la productivité montre qu'une occurrence tôt influence davantage la productivité. Comme expliqué précédemment, en choisissant des tâches critiques avec une durée de tâche et un nombre de successeurs important, le retard non rattrapé est transmis à un ensemble de successeurs plus important que lorsque le changement est tardif. De ce fait, un retard plus important sur l'ensemble des tâches du projet mène à une demande d'heures supplémentaires plus élevée ce qui crée une perte de productivité beaucoup plus élevée tout au long du projet.

Il est important de spécifier que la différence entre les figures 5.2 et 5.4 peut être expliquée par le fait que les tâches étaient choisies aléatoirement dans les résultats de la figure 5.2. En ne forçant pas le choix d'une tâche critique, rien n'indique que les tâches touchées par le changement ont le même type d'impact sur le projet. Le choix d'une tâche critique permet de mieux comparer l'effet de l'occurrence du changement sur un projet.

### 5.3 Impact du choix de l'activité

La partie précédente montre que le choix de tâches peut d'une façon ou d'une autre impacter la productivité à la suite d'un changement. Il a été montré que lorsque les tâches avaient des caractéristiques similaires, le moment du changement devenait un facteur important en ce qui a trait à l'efficacité de l'équipe de construction. La figure suivante montre l'effet d'un changement sur une activité aléatoire comparé avec une tâche sur le chemin critique.

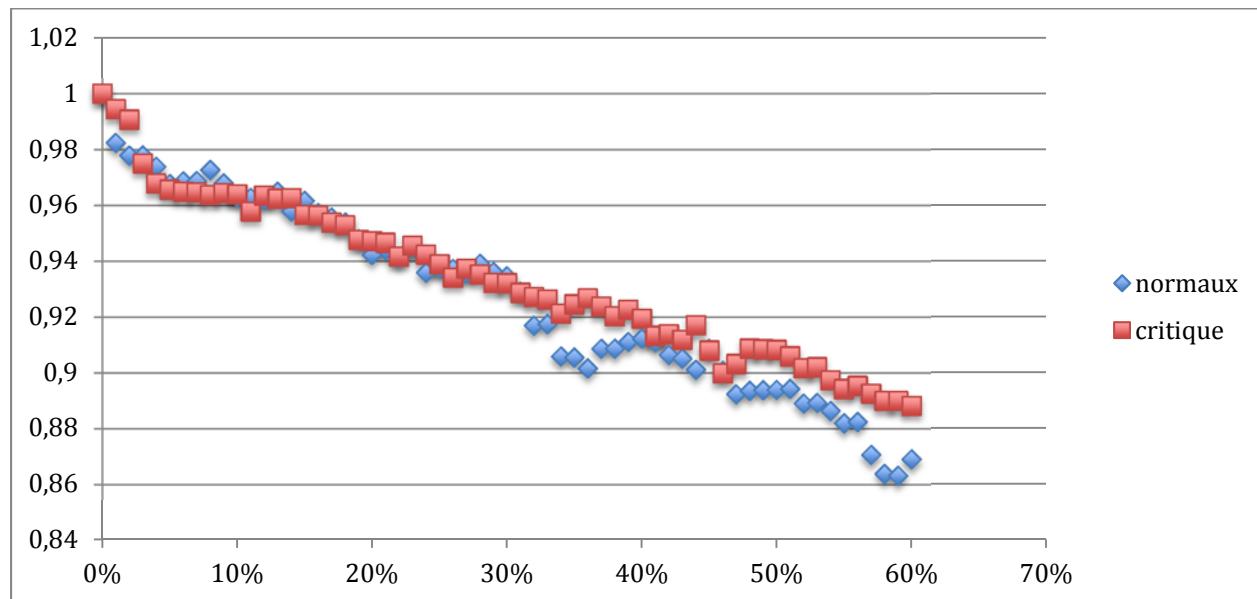


Figure 5-5 : Comparaison entre la productivité suite à un changement sur une activité du chemin critique et une activité choisie de façon aléatoire à 25% d'avancement dans un projet de 120 activités.

Le graphique de la figure 5.5 fait partie d'un ensemble de résultats. L'ensemble contient la comparaison entre des tâches modifiées aléatoirement et des tâches sur le chemin critique selon

différents moments d'occurrence de changements. La figure 5.5 prend en considération que le moment du changement est provoqué après 50% d'avancement et que le nombre d'activités est de 120. En d'autres mots, la seule variable qui les différentie est le choix de l'activité qui a été modifiée. L'exposition de ces résultats est importante afin de montrer la difficulté de prévoir l'effet de changement d'une activité sur la productivité. En effet, l'ensemble des résultats ne montrait aucune relation entre la productivité et l'activité modifiées (voir figure 5.5 et annexe D). Toutefois, il faut mentionner que dans le cas où le nombre d'activités est égal à 120 et que l'occurrence de changement survient après 50% d'avancement du projet, une différence de productivité importante est notée.

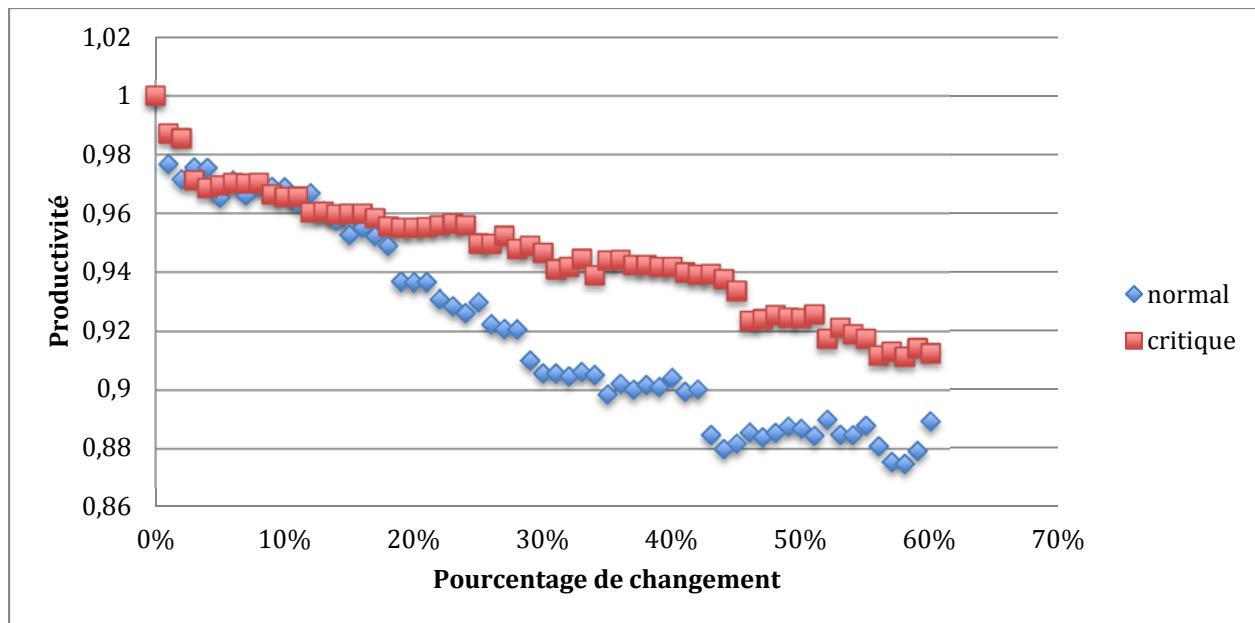


Figure 5-6 : Effet du chemin critique sur la productivité en présence de changement à 50% d'avancement dans le projet avec 120 activités

Le graphique de la figure 5.6 montre que lorsqu'une activité sur le chemin critique est modifiée, la productivité de l'ensemble des ouvriers sera moins affectée que si l'activité est choisie de façon aléatoire. Ce résultat est en fait causé par les heuristiques présentes dans le système. Lors de la méthodologie, l'utilisation de plusieurs heuristiques d'ordonnancement permet d'obtenir une séquence d'activités ainsi qu'un critère de choix de la prochaine activité à commencer. Il faut

mentionner que le critère qui est retenu le plus souvent est celui de la marge totale la moins élevée. Le calcul de la marge total utilise la différence entre le début au plus tôt et le début au plus tard. Donc, une activité avec une marge de zéro (c.-à-d. sur le chemin critique) débutera nécessairement rapidement. Alors, les activités sur le chemin critique seront commencées le plus tôt possible minimisant ainsi la transmission de leur retard à leur successeur et diminuant par le fait même la quantité d'heures supplémentaires. Il faut mentionner que l'ensemble des tests effectués sur les tâches critiques n'est pas aussi concluant que le graphique de la figure 5.5. Une différence d'efficacité n'a pu être observée sur l'ensemble des instances. C'est pourquoi les changements sur les activités du chemin critique avec des contraintes de ressources ne révèlent pas de résultat concluant dans la situation donnée.

## 5.4 Impact des ressources

La prochaine variable testée est la disponibilité des ressources. Un problème d'ordonnancement de projet devient difficile à résoudre lorsque des contraintes de ressources sont ajoutées. En modifiant la disponibilité de chacune des ressources, le problème devient de plus en plus complexe. Il devient difficile d'effectuer plusieurs tâches de façon simultanée. Afin de recréer cette situation, une modification de la quantité de ressources est effectuée afin de combler la demande des ressources de chacune des tâches au minimum. De cette façon, la disponibilité des ressources devient moindre et le nombre de tâches pouvant être effectué de façon simultanée est fortement diminué. Le graphique suivant montre l'impact d'un système rigide, soit avec peu de ressource, sur la productivité, lorsqu'un changement est implanté dans la simulation.

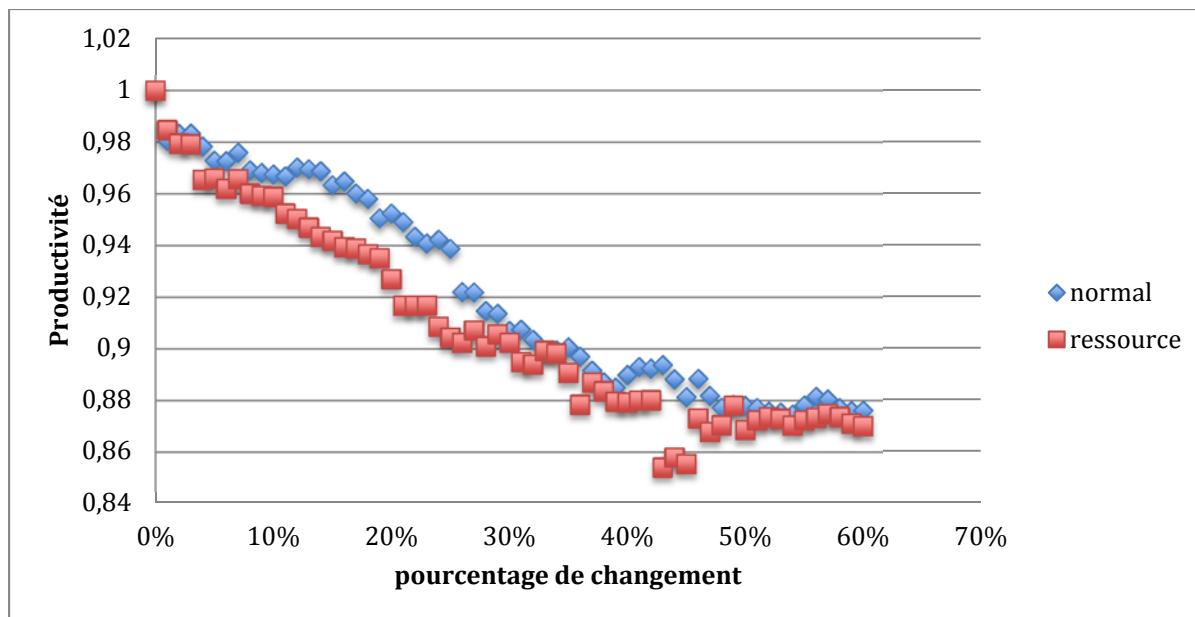


Figure 5-7 : Effet de la disponibilité des ressources sur la productivité en présence de changement à 25% d'avancement dans le projet.

La figure 5.7 montre un impact visible de la disponibilité des ressources lors de l'occurrence d'un changement. Il est possible de comparer la courbe lorsque le niveau des ressources est rigide avec une disponibilité flexible des ressources. Il faut noter que lorsque les changements se situent entre 10% et 50%, la productivité est plus faible dans le cas d'un modèle plus rigide. Cependant, lorsque le niveau de changement est inférieur à 10% ou est supérieur à 50%, la productivité est similaire. L'annexe D expose davantage l'effet des ressources sur la productivité en modifiant les autres variables clefs. Il faut constater que la productivité de la main-d'oeuvre est inférieure ou égale lorsque la quantité des ressources est restreinte dans la majorité des cas. Donc, un projet avec une disponibilité de ressource plus faible entraînera une perte de productivité plus importante lorsqu'un changement survient.

## 5.5 Nombre d'activités touchées

La dernière variable à modifier est le nombre d'activités touchées. Cette expérimentation cherche à montrer que le fait de répartir un changement sur plusieurs activités du projet a un impact sur la perte de productivité. Par exemple, implanter 40% de changement sur une activité A aura un impact

différent si le 40% est divisé en deux sur une activité A et B, soit 20% sur A et 20% sur B. Dans le cadre de cette recherche, deux phénomènes seront comparés avec les valeurs de départ. Les changements sont divisés sur deux ou trois activités. Le graphique suivant montre la différence de productivité obtenue entre les différents départements.

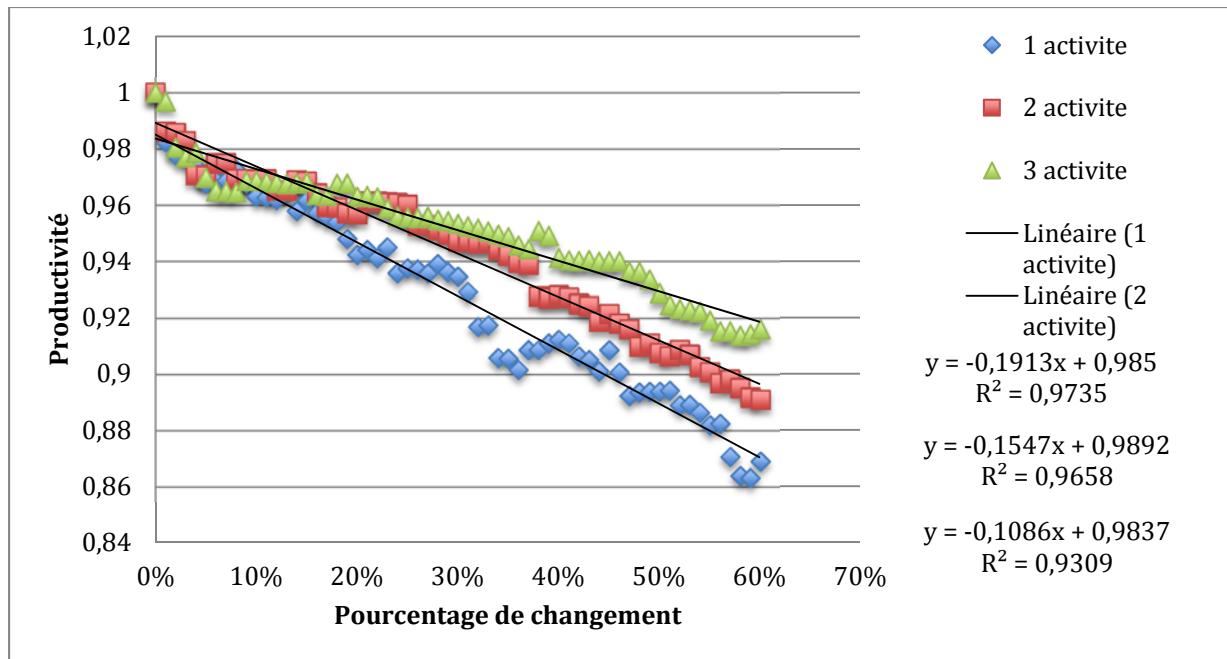


Figure 5-8 : Effet du nombre d'activités touchées par un changement sur la productivité après 50% d'avancement dans le projet.

Le graphique de la figure 5.8 montre que le nombre d'activités touchées par un changement influence de façon significative la productivité de la main-d'œuvre en présence de changement. En extrapolant une fonction linéaire sur chacune des courbes, il est possible de sortir trois équations du premier degré pour chaque scénario simulé. Les valeurs obtenues montrent que lorsqu'une activité est touchée par un changement, la diminution est 1.42 fois plus lente que lorsqu'il y en a deux et 1.75 fois plus lente que lorsqu'il y en a trois. Ces résultats impliquent que si le nombre d'activités touchées augmente avec le même pourcentage de changement, les pertes de productivité diminuent. Cette diminution des pentes peut être attribuée à la diminution du temps de changement par activité. Un changement de 40% a un impact plus important que deux changements de 20% à cause du retard créé sur les successeurs. Le résultat suit la même tendance lorsque le nombre

d'activités touchées est augmenté à trois. De ce fait, il est possible d'affirmer que la fragmentation de l'impact du changement minimise les pertes de productivité. Selon les résultats précédents, cette réaction est attendue, car le facteur important relevé est la transmission du retard sur les successeurs. Si le changement est divisé, la transmission du retard sera diminuée, ce qui explique pourquoi une perte de productivité est moindre plus le changement est divisé sur plusieurs tâches.

## 5.6 Comparaison avec la littérature

Le dernier point à inclure dans cette recherche est une comparaison avec la littérature existante. Il est difficile de comparer avec les données de Hannah à cause de la différence de calcul des pertes de productivité (G. McEniry , 2007). De plus, l'impact du moment d'occurrence du changement n'étant pas pris en compte par Léonard, Ibbs et Allen modifient leurs résultats obtenus (G. McEniry, 2005). Néanmoins, une comparaison reste nécessaire afin de relever les différences.

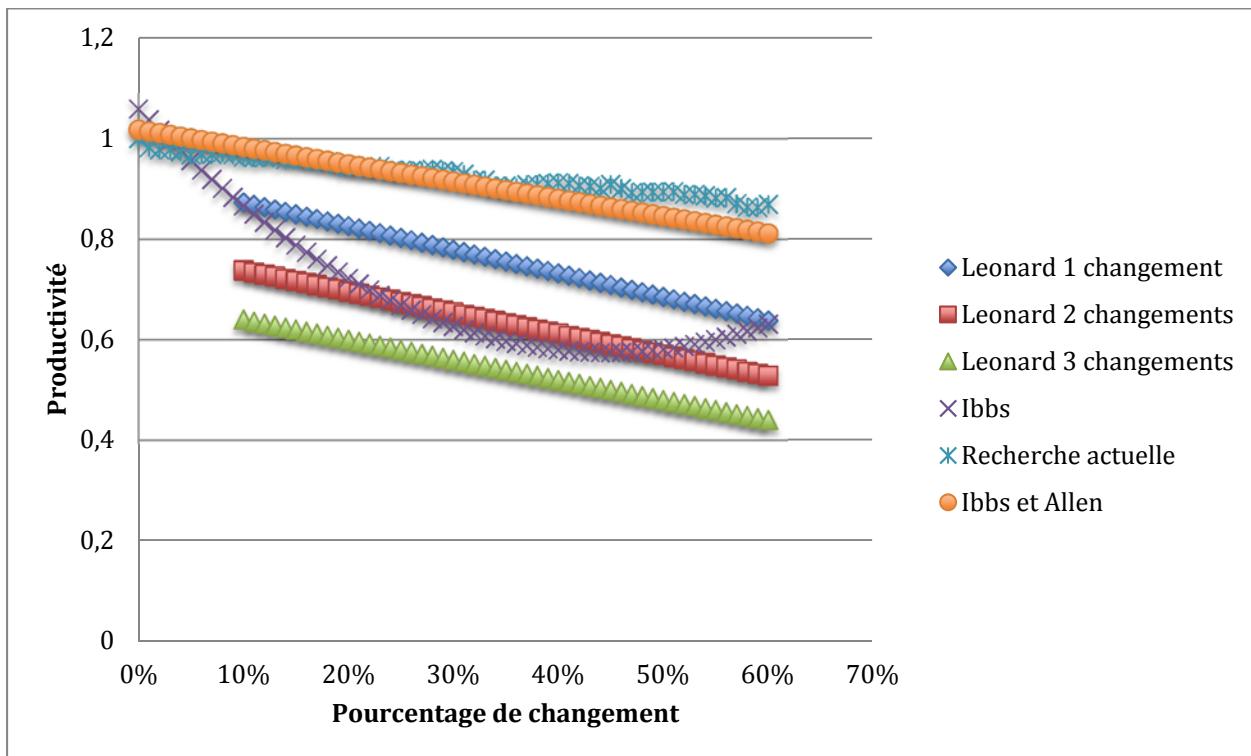


Figure 5-9 : Comparaison entre les modèles de la littérature et le modèle de cette recherche

Les différents modèles mentionnés sont présents sur la figure 5.9. Il est possible de constater que les résultats obtenus montrent une perte de productivité plus faible que l'ensemble des modèles de la littérature. Lorsque le pourcentage de changement est supérieur à 3%, la courbe de valeur actuelle montre une productivité plus élevée que les valeurs de Ibbs. De plus, les pertes de productivité commencent dès le début des changements. Contrairement à l'hypothèse de Léonard, la productivité n'est pas de 100% lorsque le pourcentage de changement est inférieur à 10%. De ce fait, les résultats concordent davantage avec le modèle de Ibbs.

Ensuite, les résultats indiquent une relation de type linéaire entre la productivité. Cependant, la vitesse de descente est beaucoup plus lente que la vitesse présente dans la littérature. Il est possible de lier cette différence à cause du type de simulation créé. Lors de cette expérience, une seule technique d'accélération a été utilisée, soit les heures supplémentaires. Cependant, Léonard et Ibbs ne font aucune distinction entre les différentes techniques d'accélération qui, une fois combinées, peuvent causer un effet de ralentissement beaucoup plus grand. Dans la revue de la littérature, il a été mentionné brièvement que le surplus de personnel et le chevauchement de quarts de métier accéléraient la vitesse de construction tout en créant une baisse de la productivité. De ce fait, il est normal que l'absence de ces deux méthodes d'accélération donne une productivité plus élevée. Il est possible d'affirmer que d'autres techniques d'accélération auraient été implantées, lors de cette simulation afin de rattraper le retard parce que le temps total des projets testés augmentait de façon significative plus le pourcentage de changement était important (voir figure 5.3).

## 5.7 Conclusion

Les résultats observés lors de cette section permettent de ressortir plusieurs conclusions sur la perte de productivité à la suite d'un changement. La première variable évaluée était le nombre d'activités qui variait entre 30, 60, 90 et 120. Il est observé que la vitesse de descente de la productivité à la suite d'un changement est plus élevée lorsque le nombre d'activités est bas. Effectivement, une différence de vitesse de descente de 26.68% est notée entre la vitesse de descente d'un projet de 30 activités et de 120 activités. La prochaine variable, l'occurrence de changement, montre aussi une différence notable lorsque modifiée. Il est constaté qu'un changement hâtif diminue davantage la productivité qu'un changement tardif. Ce phénomène peut être expliqué à cause du transfert de retard sur les successeurs. Plus le changement est tôt et plus le risque de retarder un nombre élevé

d'activités augmente. Ensuite, la variable disponibilité des ressources montre qu'un système rigide, un système avec des contraintes de ressources élevées, provoque une perte de productivité plus élevée. En diminuant la quantité de ressource, un changement influence une étendue plus élevée de tâche, car le nombre de tâches pouvant être effectué simultanément est diminué ce qui mène à une demande d'heures supplémentaires et une perte de productivité beaucoup plus élevée. Enfin, la variable du nombre d'activités touchées souligne la différence entre un changement important sur une seule tâche et un changement sur plusieurs tâches. Il a été montré qu'un changement massif sur une seule tâche diminuait davantage la productivité qu'un changement sur plusieurs tâches. Enfin, la variable du choix d'activité ne soulignait aucun résultat intéressant pour cette recherche. De ce fait, il n'est pas possible de conclure l'effet d'un changement sur le chemin critique.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

En conclusion, la recherche suivante permet d'identifier l'effet des changements sur la productivité dans de grands projets de construction. Le modèle de simulation créé est en mesure de refléter un projet de construction en mode réactif de façon efficace. Il est alors possible de tester différents scénarios. Les variables modifiées lors de cette recherche sont le nombre d'activités, le moment d'occurrence du changement, la disponibilité des ressources, le type d'importance des activités et la division du changement sur plusieurs activités. La section suivante permet de faire le point sur le résultat mentionné plus tôt.

Tout d'abord, le nombre d'activités présentes dans le projet est considéré comme une variable pouvant influencer la productivité d'un projet. Les résultats montrent qu'un nombre élevé d'activités amène une perte de productivité beaucoup plus faible qu'un nombre restreint d'activités. La vitesse de réduction de la productivité pour des projets de 30 tâches est environ 25% plus rapide que la vitesse de réduction pour des projets de 120 tâches. Une différence de vitesse de pente semblable est observée parmi les résultats des projets avec des activités de 60 et 90 tâches.

Ensuite, le moment d'occurrence d'un changement montre aussi un impact important sur la productivité. Effectivement, plus le changement est tôt, plus la productivité de la main-d'œuvre sera faible. Il faut cependant souligner que lors de la modification de cette variable, le choix de l'activité touchée par le changement ne peut être laissé au hasard. C'est pourquoi des activités sur le chemin critique ont été choisies. À la suite de cette modification, l'importance du moment du changement a pu être observée. Un changement tardif a un impact moins important sur un projet à cause de la diminution de transfert de retard sur les tâches subséquentes.

La disponibilité des ressources impacte aussi la productivité d'un projet lorsqu'un changement est implanté. Le type d'effet est une perte d'efficacité plus élevée lorsque la quantité de ressources est restreinte. Ce résultat peut être expliqué à cause de l'impossibilité de rattraper un retard. Le manque de ressources oblige le système à implanter une quantité d'heures supplémentaires plus élevée, car le nombre de tâches pouvant être effectuées de façon simultanée diminue. De ce fait, la tâche modifiée crée un délai sur l'ensemble du projet, ce qui engendre un nombre de retards élevé, lorsque comparé à un système avec un nombre élevé de ressources.

Une autre variable qui a été testée est le type d'activité touchée par un changement. Il a déjà été souligné que certaines activités avaient un impact plus important. Le chemin critique permet de déterminer les activités les plus importantes d'un projet lorsque le nombre de ressources est inexistant. Même si les problèmes évalués sont en présence de ressources, il est tout de même possible de voir l'effet du chemin critique sur le temps total d'un projet. L'introduction de changements sur les activités du chemin critique ne démontre pas de perte de productivité majeure dans l'ensemble des résultats obtenus de ce projet. Lorsqu'une divergence est rencontrée, celle-ci peut être expliquée à cause des heuristiques d'ordonnancement utilisées. Cependant, il faut mentionner que cet effet est rarement présent dans la simulation créée.

La dernière variable évaluée est la répartition des changements sur plusieurs activités. Lors des différents scénarios, l'ensemble des résultats était obtenu à la suite de l'implantation d'un changement majeur au sein d'un projet. Une variation de cette méthode consiste à répartir le changement majeur en changements mineurs. Afin de vérifier l'impact de plusieurs changements mineurs, le changement majeur est réparti sur deux ou trois activités. La conséquence de cette modification montre qu'un changement majeur important a un impact plus significatif sur la productivité. La dispersion du changement sur plusieurs tâches diminue le retard du projet et est plus facile pour la main-d'œuvre de rattraper le changement. De plus, le nombre de semaines de suite avec des heures supplémentaires augmente avec la grosseur du changement ce qui amène une productivité plus faible tout au long du projet.

À la suite de ces observations, il est possible de mettre en lumière les conclusions suivantes :

- Le nombre d'activités présentes dans un projet influence de façon significative la productivité en présence de changement. Plus le nombre d'activités augmente, moins les pertes seront importantes;
- Le moment d'occurrence du changement diminue l'efficacité davantage lorsque provoqué au début du projet plutôt qu'à la fin du projet;
- Une grande disponibilité des ressources permet le maintien d'une meilleure productivité lors de l'implantation de modification; et

- La dispersion des changements sur plusieurs activités diminue les pertes de productivité de façon significative.

Enfin, la comparaison avec les modèles existants permet de valider les résultats obtenus. La divergence entre les résultats de cette recherche et ceux de la littérature peut être expliquée à cause du contexte théorique de la simulation. Le fait d'isoler une seule méthode d'accélération permet de déterminer l'impact de façon précise des heures supplémentaires lors de changement dans les grands projets de construction.

Dans le but de lier la pratique avec la théorie, il est intéressant d'expliquer en quoi les résultats obtenus peuvent être utilisés par les gestionnaires de projet. Les suggestions suivantes ne prennent en compte que les résultats de cette recherche afin d'expliquer les meilleures actions possible face à un changement dans un projet. Il faut tout de même mentionner que les suggestions sont applicables lorsque la méthode d'accélération d'heures supplémentaires est utilisée. Aucune recherche ne montre que les résultats seront identiques avec l'utilisation d'une autre technique d'accélération.

Les premières suggestions touchent principalement les projets avec un nombre de tâches restreint, par exemple 30 tâches. Il a été démontré que l'implantation de changement dans des projets de petite taille amène une diminution plus importante que dans des projets de grande taille. De ce fait, les techniques d'absorption de retard sont impératives lorsque la taille du projet est petite. Les techniques suggérées sont l'ajout de tâches tampons et le chevauchement de tâche. La première consiste à planter tout au long de la planification, des tâches sans demande de main-d'œuvre. Ces tâches permettent d'absorber le retard provoqué par les modifications soudaines. La deuxième technique implique le chevauchement de tâches. Cette méthode permet le commencement d'une tâche avant la fin de son prédecesseur. Encore une fois, il est possible de rattraper un retard, mais la présence d'un surplus de personnel et de chevauchement de quarts de métier est à prendre en considération.

Ensuite, il est recommandé d'attendre le moins possible avant d'agir sur le retard occasionné sur un changement. Dans le cas où un changement survient de façon hâtive, l'effet sur l'efficacité est beaucoup plus important que lorsque le changement survient de façon tardive. Le retard occasionné tôt touche un éventail de tâches plus important qu'un retard survenant plus tard ce qui oblige l'implantation d'heures supplémentaires en plus grande quantité provoquant plus de pertes de

productivité. C'est pourquoi il est avantageux pour les gestionnaires de projets d'accélérer le plus tôt possible la production lorsqu'un changement survient à moins de 25% d'avancement afin de minimiser les pertes de productivité.

La disponibilité des ressources influence aussi la productivité lors de la présence de changements. De façon logique, les changements diminuent la productivité davantage lorsque la quantité des ressources est au minimum. La première suggestion afin de pallier les effets nuisibles est d'augmenter la quantité de ressources. Dans un projet avec une quantité de ressources minimales, il est recommandé d'augmenter les ressources présentes lorsqu'un changement se produit. De cette manière, l'efficacité de la main-d'oeuvre sera plus élevée que si la quantité de ressources est gardée à un minimum. Il faut mentionner que l'augmentation des ressources amène d'autres types de problèmes qui ne sont pas touchés dans le cadre de cette recherche.

Dans un autre d'ordre d'idée, il a été observé que les activités présentes sur le chemin critique ne donnaient pas de résultats permettant de conclure une relation intéressante. Le cadre de la simulation ne permet pas de conclure sur l'effet des changements sur les activités du chemin critique à cause du critère sur le choix de l'activité à traiter en premier. Cependant, il faut souligner que les pertes d'efficacité sont beaucoup moins importantes si une priorité est donnée aux tâches en retard sur l'ordonnancement. De ce fait, il est suggéré à l'industrie de modifier son échéancier afin de donner une priorité aux tâches en retard, ce qui permet de maintenir une bonne productivité.

L'ensemble de cette recherche observe l'effet des changements sur un grand projet de construction. Contrairement à la littérature, cette recherche n'utilise aucune donnée réelle. Elle était effectuée dans un contexte purement théorique ce qui permet de voir l'impact de plusieurs variables présentes dans un projet. Plusieurs autres recherches sont recommandées afin d'améliorer la compréhension de ce sujet. Voici quelques recherches futures qu'il serait possible d'effectuer :

- Implanter une accélération basée uniquement sur l'augmentation du personnel;
- Implanter une accélération basée uniquement sur le chevauchement de quarts de métier;
- Créer une simulation qui combine les différents types de méthode d'accélération;
- Vérifier l'effet de plusieurs changements sur une chaîne d'activités successives;
- Observer l'effet de changement lorsque la gestion de projet est proactive plutôt que réactive.

## BIBLIOGRAPHIE

- C. Ibbs, "Quantitative Impacts of Project Change: Size Issues", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 123, no. 3, pp. 308-311, 1997.
- O. Moselhi, I. Assem et K. El-Rayes, "Change Orders Impact on Labor Productivity", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 131, no. 3, pp. 354-359, 2005.
- S. Assaf et S. Al-Hejji, "Causes of delay in large construction projects", *International Journal of Project Management*, vol. 24, no. 4, pp. 349-357, 2006.
- Herroelen, W. (2005). Project Scheduling—Theory and Practice. Production and Operations Management Society, Vol.14, No.4, pp. 413–432.
- A. Hanna, J. Russell, E. Nordheim et M. Bruggink, "Impact of Change Orders on Labor Efficiency for Electrical Construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 125, no. 4, pp. 224-232, 1999.
- A. Hanna, J. Russell, T. Gotzion et E. Nordheim, "Impact of Change Orders on Labor Efficiency for Mechanical Construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 125, no. 3, pp. 176-184, 1999.
- B. Abbasi, S. Shadrokh et J. Arkat, "Bi-objective resource-constrained project scheduling with robustness and makespan criteria", *Applied Mathematics and Computation*, vol. 180, no. 1, pp. 146-152, 2006.
- C. Chang et S. Woo, "Critical review of previous studies on labor productivity loss due to overtime", *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 7, pp. 2551-2557, 2017.
- C. Wu, T. Hsieh, W. Cheng et S. Lu, "Grey relation analysis of causes for change orders in highway construction", *Construction Management and Economics*, vol. 22, no. 5, pp. 509-520, 2004.
- O. Moselhi, C. Leonard and P. Fazio, "Impact of change orders on construction productivity", *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 484-492, 1991.
- R. Cox, "Managing Change Orders and Claims", *Journal of Management in Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 24-29, 1997.
- G. Kululanga, W. Kuotcha, R. McCaffer et F. Edum-Fotwe, "Construction Contractors' Claim Process Framework", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 127, no. 4, pp. 309-314, 2001.

Du, M. El-Gafy et D. Zhao, "Optimization of Change Order Management Process with Object-Oriented Discrete Event Simulation: Case Study", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 142, no. 4, p. 05015018, 2016.

T. Lim, C. Yi, D. Lee et D. Arditi, "Concurrent Construction Scheduling Simulation Algorithm", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 29, no. 6, pp. 449-463, 2014.

T. Hsieh, S. Lu et C. Wu, "Statistical analysis of causes for change orders in metropolitan public works", *International Journal of Project Management*, vol. 22, no. 8, pp. 679-686, 2004.

G. McEniry, L'effet cumulatif des ordres de modification sur la productivité de la main-d'œuvre—examen rétrospectif de l'étude de Leonard, *Le bulletin Revay*, Volume 26 Numéro 1, 2007

G. G. Boyle, "Une solution fondée sur le rendement pour éviter les problèmes d'échéancier dans les projets de construction", *Le bulletin Revay*, Volume 31 Numéro 1, 2014

J. Hudon, "Le calcul des réclamations", *Le bulletin Revay*, Volume 32 Numéro 1, 2015

Leonard, C.A. (1988) The Effects of Change Orders on Productivity, thèse de maîtrise ès sciences, Université Concordia, Montréal (Québec).

M. Sun et X. Meng, "Taxonomy for change causes and effects in construction projects", *International Journal of Project Management*, vol. 27, no. 6, pp. 560-572, 2009.

N. Bakhary, H. Adnan et A. Ibrahim, "A Study of Construction Claim Management Problems in Malaysia", *Procedia Economics and Finance*, vol. 23, pp. 63-70, 2015.

S. Ip, "Construction claims: how they arise and how to avoid them.", Clark Wilson LLP, 2002

T K. Tochaiwat et V. Chovichien, "Contractors' Construction Claims and Claim Management Process. EIT Research and Development Journal. 15. 66-73, 2004.

K. Tochaiwat et V. Chovichien, "STRATEGIC DATA FOR EMPLOYERS' CONSTRUCTION CLAIMS", Chulalongkorn University, 2004.

K. Tochaiwat et V. Chovichien, "AN ANALYSIS OF THE EMPLOYERS' CLAIM MANAGEMENT SYSTEM IN INTERNATIONAL CONSTRUCTION PROJECTS". Chulalongkorn University.2006

T. Toupin (2016), "Processus intégré de gestion des réclamations pour des grands projets, mémoire de maîtrise ès sciences, École Polytechnique de Montréal, Montréal (Québec).

W. Ibbs, "Impact of Change's Timing on Labor Productivity", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 131, no. 11, pp. 1219-1223, 2005.

W. Ibbs, L. Nguyen et S. Lee, "Quantified Impacts of Project Change", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, vol. 133, no. 1, pp. 45-52, 2007.

L. Nguyen et W. Ibbs, "Case Law and Variations in Cumulative Impact Productivity Claims", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 136, no. 8, pp. 826-833, 2010.

M. Cheng, D. Wibowo, D. Prayogo et A. Roy, "Predicting productivity loss caused by change orders using the evolutionary fuzzy support vector machine inference model", *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 21, no. 7, pp. 881-892, 2015.

A. Hanna, R. Camlic, P. Peterson et E. Nordheim, "Quantitative Definition of Projects Impacted by Change Orders", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 128, no. 1, pp. 57-64, 2002.

A. Hanna et J. Swanson, "Risk Allocation by Law—Cumulative Impact of Change Orders", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, vol. 133, no. 1, pp. 60-66, 2007.

H. Thomas et C. Napolitan, "Quantitative Effects of Construction Changes on Labor Productivity", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 121, no. 3, pp. 290-296, 1995.

S. Assaf et S. Al-Hejji, "Causes of delay in large construction projects", *International Journal of Project Management*, vol. 24, no. 4, pp. 349-357, 2006.

L. Grèze, R. Pellerin, P. Leclaire et N. Perrier, "Evaluating the effectiveness of task overlapping as a risk response strategy in engineering projects", *International Journal of Project Organisation and Management*, vol. 6, no. 12, p. 33, 2014.

"Statistiques annuelles de l'industrie de la construction 2015", *Ccq.org*, 2017. [Online]. Available: <http://www.ccq.org>. [Accessed: 20- Nov- 2016].

G. Kululanga, W. Kuotcha, R. McCaffer et F. Edum-Fotwe, "Construction Contractors' Claim Process Framework", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 127, no. 4, pp. 309-314, 2001.

F. Berthaut, R. Pellerin, N. Perrier et A. Hajji, "Time-cost trade-offs in resource-constraint project scheduling problems with overlapping modes", *International Journal of Project Organisation and Management*, vol. 6, no. 3, p. 215, 2014.

AACE. 1973. Construction users' anti-inflation roundtable. Overtime in construction. *American Association of Cost Engineers Bulletin*

## ANNEXES

### ANNEXE A RÉSULTAT DE LÉONARD

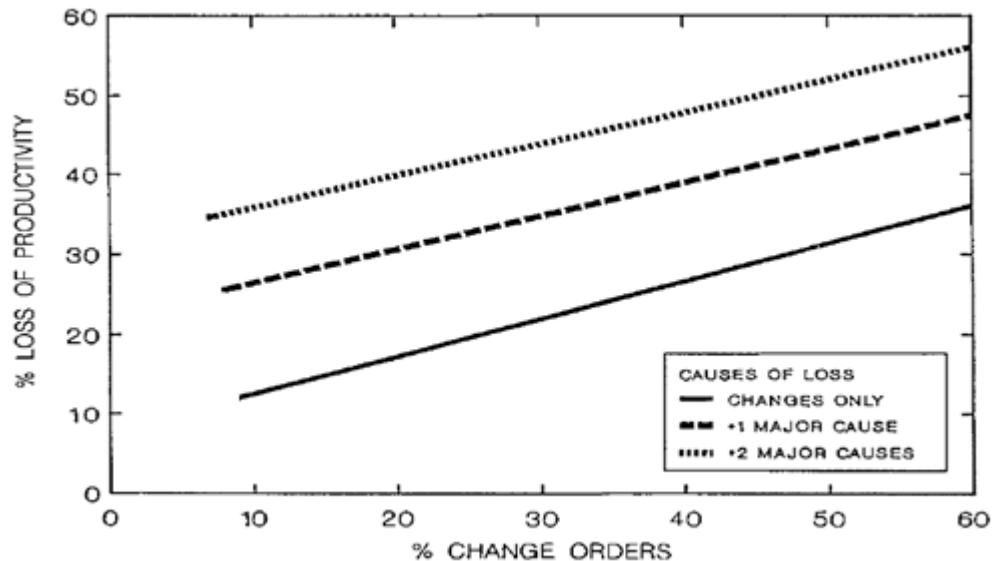


Figure A.1: Effects of change orders on productivity : electrical and mechanical work

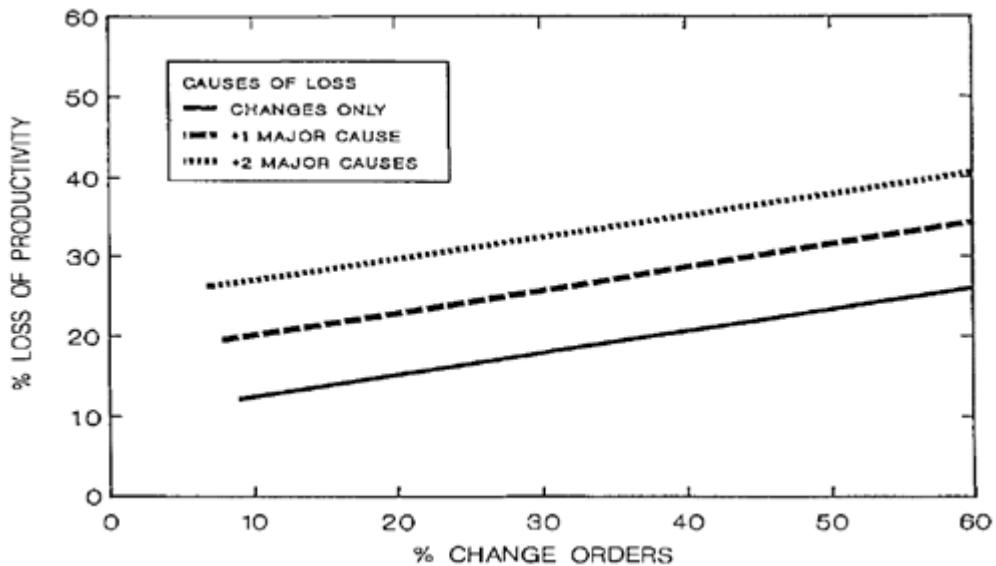
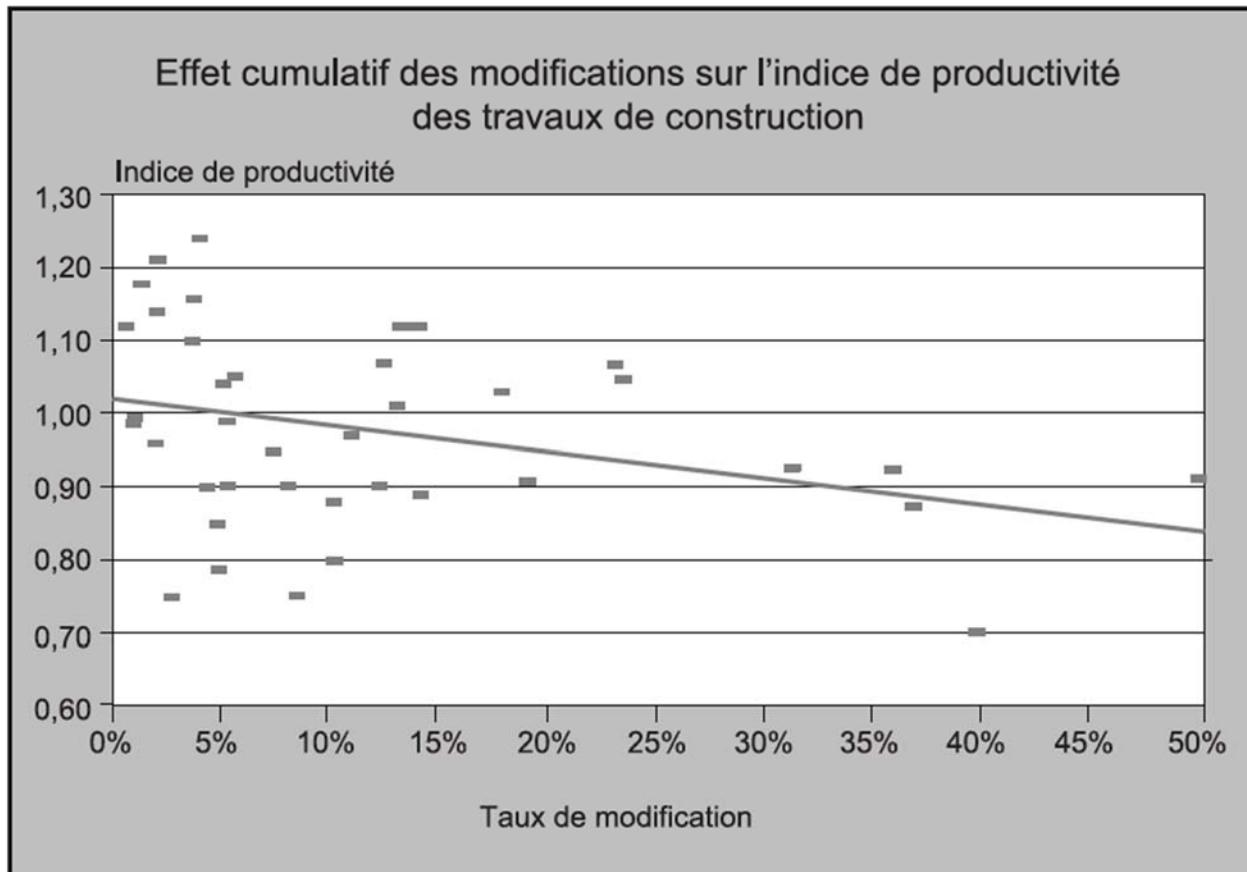


Figure A.2: Effects of change orders on productivity : civil architectural work

## ANNEXE B RÉSULTAT MODÈLE DE IBBS ET ALLEN



10Figure B.1 : Perte de la productivité selon le pourcentage de changement selon Ibbs et Allen (REVAY 2007)

## ANNEXE C RÉSULTAT DU MODÈLE DE IBBS

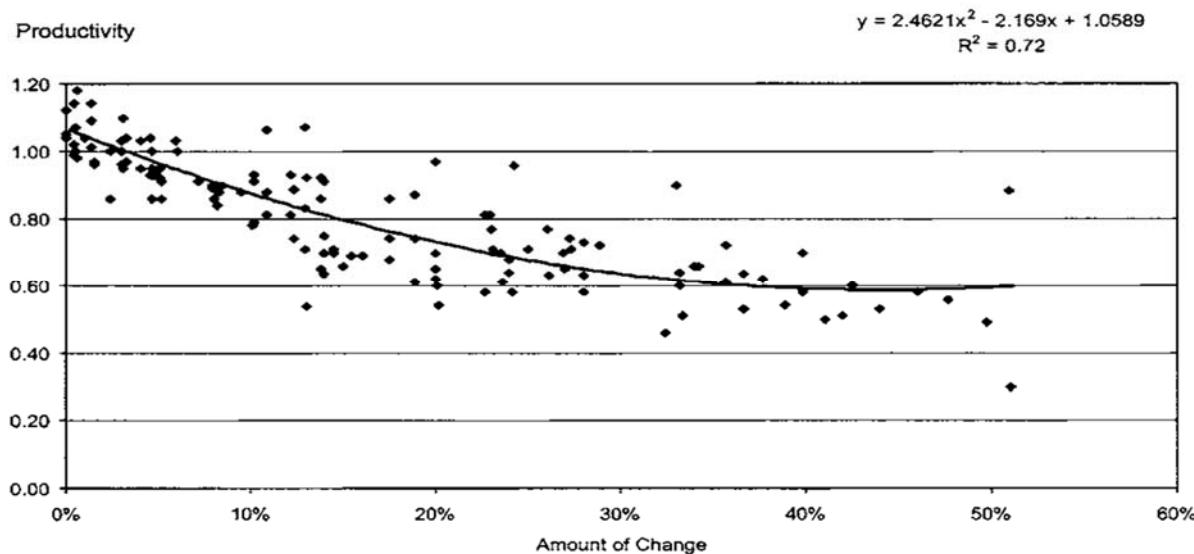


Figure C.1 : Perte de productivité selon le pourcentage de changement selon Ibbs (Ibbs 2005)

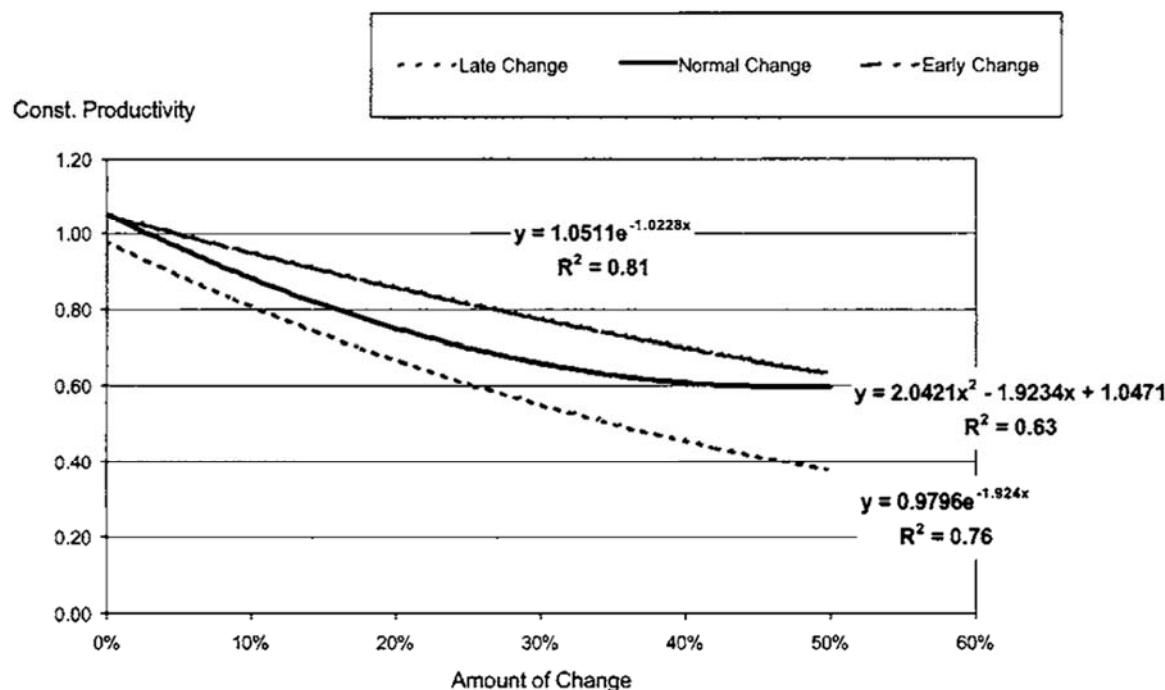


Figure C.2 : Effet du moment de l'occurrence du changement sur la productivité selon Ibbs (Ibbs 2005)

## ANNEXE D RÉSULTAT DE LA VARIABLE CHEMIN CRITIQUE

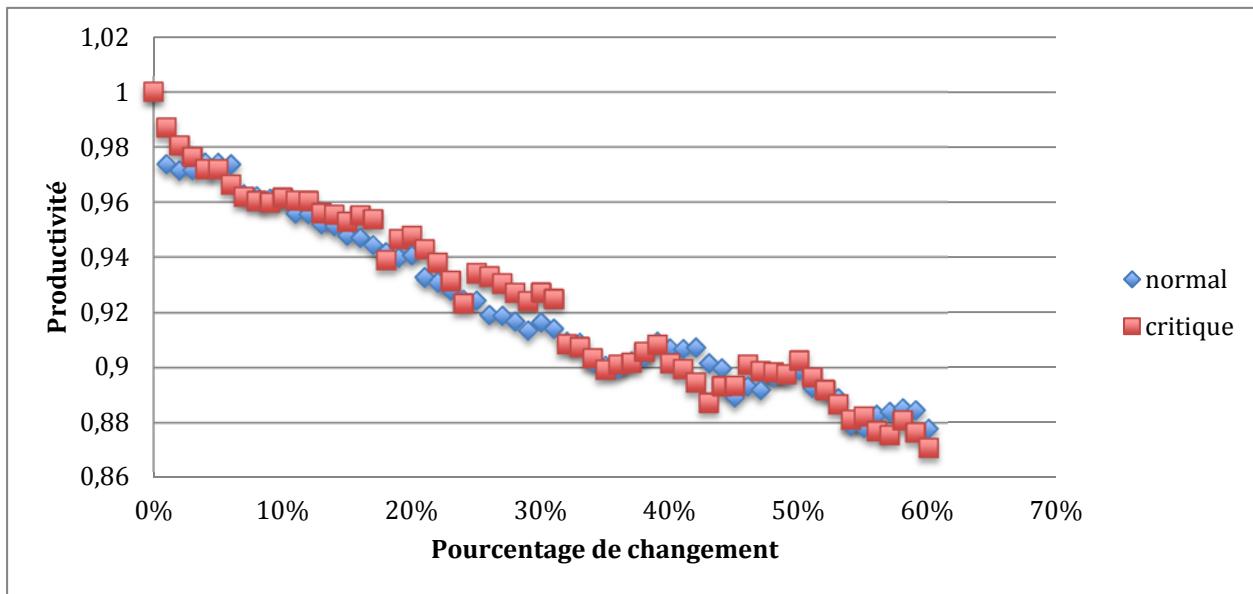


Figure D.1 : Comparaison entre la productivité suite à un changement sur une activité du chemin critique et une activité choisie de façon aléatoire à 0% d'avancement dans un projet de 120 activités.

## ANNEXE E RÉSULTAT DE LA VARIABLE RESSOURCE

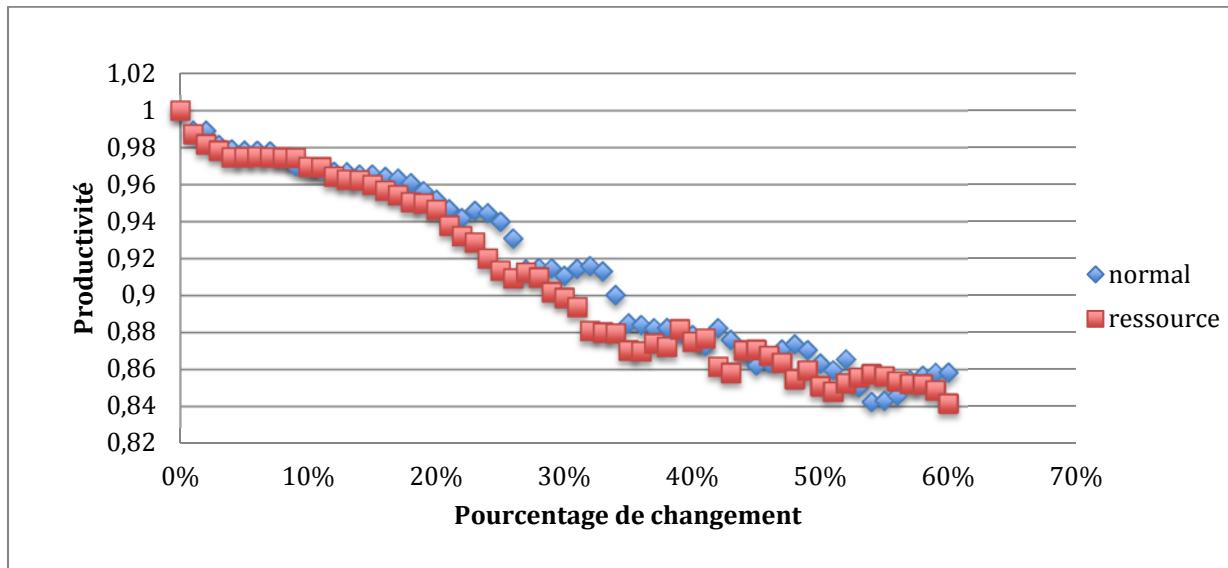


Figure E.1 : Effet de la disponibilité des ressources sur la productivité en présence de changement à 25% d'avancement dans le projet avec 60 tâches

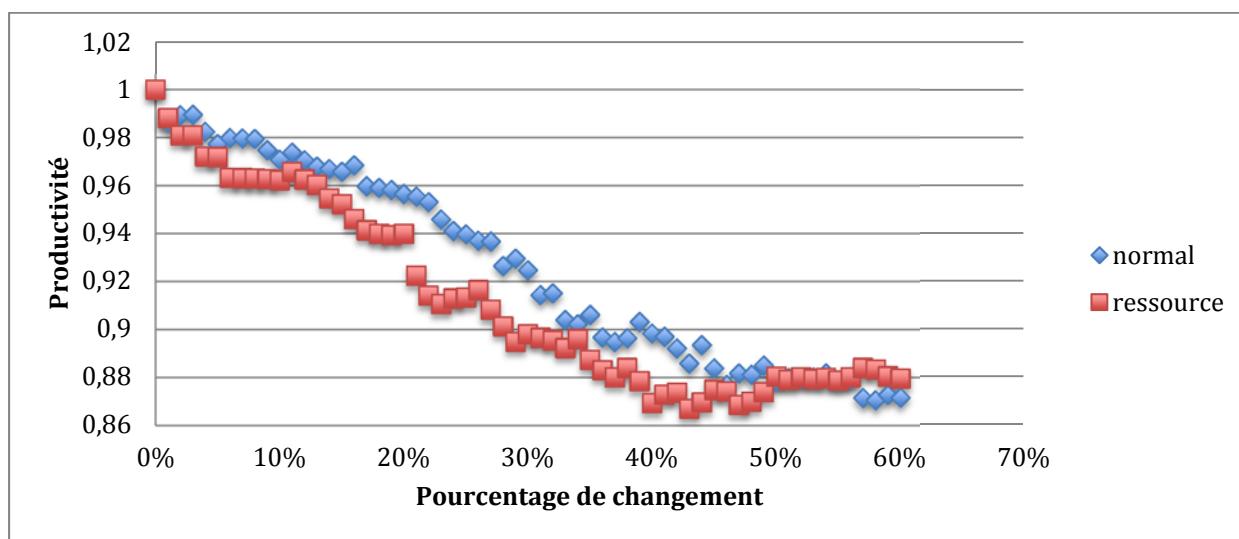


Figure E.2: Effet de la disponibilité des ressources sur la productivité en présence de changement à 25% d'avancement dans le projet avec 90 tâches

## ANNEXE F PROGRAMME DE LA SIMULATION

```

Private message As Byte
Private change As Byte
Private T_prod() As Single
Private T_debuttot() As Integer
Private test As Boolean
Private donnesup As Integer
Private augmentation As Byte
Private Effect As Double
Private sheet As String
Private critique As Byte
Private actual As Double
Private earned As Double

```

```
Sub main()
```

```

'variable tableau
Dim T_depart() As Integer 'Tableau contenant les informations des instances
Dim T_ress() As Integer 'Tableau contenant les demandes en ressrouces
Dim T_source() As Integer 'Tableau permettant de r_cup_rer les informations de d_part
Dim T_etatress() As Integer ' Tableau qui comptabilise les ressources pr_sentes
Dim T_solution() As Integer 'Tableau d'information sur la solution finale
Dim T_ordre() As Integer 'Tableau donnant la position d'un conflit
Dim T_marge() As Integer 'Tableau donnant la marge total
Dim T_durer() As Integer 'Tableau donnant la duree d'une tache
'Dim T_prod() As Single 'tableau contenant la productivite selon le nombre de semaine
Dim T_modif() As Integer 'tableau contenant les valeurs de debut au plus tot et de fin au plus tot
Dim dimension As Byte 'Dimension du nombre de donnee
Dim permtue As Boolean 'variable de d_cision
Dim indirect As Boolean ' variable de decision pour implanter calcul de changement
Dim modification As Byte 'variable d'insertion des changements

```

```

'Variables du timer
Dim modif As Byte
Dim start_time As Double 'variable du temps de d_part
Dim end_time As Double 'variable du temps de fin
'variable num_rique
Dim temps As Single 'valeur de la solution actuelle
Dim tempsol As Single 'valeur de la solution optimale
Dim tempschanges As Single ' valuer temps changement
Dim heuresdepart As Single ' nombre de jour au d_part
Dim heureschange As Single 'd_termine le nombre de jour du projet pour des journ_es de 8h
Dim heuresdispo As Single ' nombre d'heure supplementaire disponible pour mener le projet _ terme
Dim heuresup As Integer ' nombre d'heure suppl_mentaire _ faire
Dim iteration As Byte 'variable donnant le nombre d'it_ration possible
Dim activite As Integer 'tache qui subira une modification au cours du projet
Dim nbresemaine As Integer
Dim horaire As Byte
Dim horaire2 As Byte

'Variables relatives aux differentes feuilles de travail, afin de faciliter la programmation
Dim wb As Workbook 'variable du workbook du travail
Dim WsInst As Worksheet 'variable de la feuille des instances
Dim rssupdirect As Integer
Dim rssupindirect As Integer
Dim rsmdirct As Integer
Dim rscindirect As Integer
Dim where As Byte
Dim typetemps As Byte

```

dimension = 120

dimension = dimension + 2

where = 2

```

typetemps = InputBox("temps ou resultat")
critique = 1
ReDim T_prod(2, 12)
Call prod
For inst = 1 To 10
'inscription des informations du classeur excel///////////
sheet = "inst" & inst

```

```

Set wb = Workbooks("instance120")
Set WsInst = wb.Sheets(sheet)

```

```
'//////////
```

```
'donne les dimensions de tous les tableaux
```

```
'///////////
'copie des information du probleme
Effect = 0
```

```

Do While Effect < 1
ReDim T_solution(16, dimension)
ReDim T_ordre(200, dimension)
ReDim T_source(16, dimension)
ReDim T_durer(2, dimension)
ReDim T_marge(dimension)
ReDim T_supp(dimension)
ReDim T_modif(dimension)
ReDim T_debuttot(dimension)

```

```

modification = False
tempsol = 1e+15 'donner une valeur de depart _ la solution optimale

```

tempchanges = 1e+15 'donner une valeur de depart de la solution optimale de changement  
 Call copie(dimension, T\_depart, WsInst, T\_etatress) 'Prend le nombre dans notre tableau

If test = False Then

Call tableaureduit(dimension, T\_depart, T\_ress)

'//////////

'debut de l'algorithme d'ordonnancement//////////

Call comptepre(dimension, T\_depart) 'compte le nombre de predecesseur pour l'ensemble du probleme

Call debuttot(dimension, T\_depart) ' calcul du chemin critique au plus t\_t

Call debuttart(dimension, T\_depart) ' calcul du chemin critique au plus tard

Call margelibre(dimension, T\_depart) 'calcul de la marge libre

Call comptepre(dimension, T\_depart) 'compte le nombre de predecesseur pour l'ensemble du probleme

Call formesource(dimension, T\_source, T\_depart) " 'ramene l'etat original

'debut des iterations pour d\_terminer la solution optimal

For iteration = 1 To 8

Call retour(dimension, T\_source, T\_depart) 'recuperation des informations de depart

Call ordo(iteration, dimension, T\_depart, T\_ress, T\_etatress, temps, T\_ordre, permute, T\_durer, modification, indirect) 'algorithme heuristique

'determination de la meilleure solution. Si la solution obtenue est meilleur, la solution optimal devient la solution obtenue.

If tempsol > temps Then

Call `solution(dimension, T_solution, T_depart)` ' enregistre la valeur de la solution plus vraiment utile pour le problème

tempsol = temps

permute = True

keep = iteration

End If

temp = 0

## Next iteration

'//////////modification ici ///////////////////////////////

Workbooks("resultat").Activate

If typetemps = 0 Then

Worksheets("activite").Select

ElseIf typetemps = 1 Then

Worksheets("activite temps").Select

End If

change = 0

'//////////modification ici ///////////////////////////////

Call `dure(dimension, T_durer, T_source, T_depart)`

Do While change <= 60

donneesup = 0

Call changementtemps(tempsol, T\_source, activite, T\_depart, T\_solution) 'ajouter une valeur de changement sur une tache precise

'/////////////////////////////

For i = 0 To 1

If i = 0 Then

indirect = False

Else

indirect = True

donneesup = 0

End If

'ramène la valeur de duree de chacune des activites. Utilis\_ pour la fonction d'ordonnancement

'/////////////////// cout direct du probleme/////////////////////////////

modification = 0

fin = True

Do While fin = True

Call retour(dimension, T\_source, T\_depart) 'recuperation des informations de depart

Call dure2(dimension, T\_durer, T\_source)

iteration = keep

Call ordo(iteration, dimension, T\_depart, T\_ress, T\_etaress, temps, T\_ordre, permute, T\_durer, modification, indirect) 'refait le même ordonnancement qu'au départ en étant modifier suite au changement de façon réactif

tempschanges = temps

'd\_termination de une bonne solution. Si la solution obtenue est meilleur, la solution optimal devient la solution obtenue.

If tempschanges > tempsol Then ' vérifie si l'ordonnancement rattrape le retard avec ou sans overtime

    If modification = 0 Then

        modification = 1 'implante 2 heures d'over

        donnesup = 0

    ElseIf modification = 1 Then

        modification = 2 'implante 4 heures d'over

        donnesup = 0

    ElseIf modification = 2 Then

        fin = False 'sortir de la boucle

    End If

End If

If tempschanges <= tempsol Then 'si retard est rattrape, arreter la boucle

    fin = False

End If

temp = 0

Loop

end\_time = Round(Timer - start\_time, 16) 'Fin du Timer

'enregistrement des résultat (productivité

```

If i = 0 Then
rssupdirect = donneSup
rscdDirect = tempsChanges
donneSup = 0
Else

```

```

rssupindirect = donneSup
rscindirect = tempsChanges
donneSup = 0
tempsChange = 0

```

'ecris le pourcentage de change

If typeTemps = 0 Then

If Effect = 0 Then

If actual > 0 Then

Cells((change + 4), where) = (earned / actual)

actual = 0

earned = 0

Else

Cells((change + 4), where) = 1

End If

ElseIf Effect = 0.25 Then

If actual > 0 Then

Cells((change + 4), where + 10) = (earned / actual)

actual = 0

earned = 0

Else

Cells((change + 4), where + 10) = 1

End If

ElseIf Effect = 0.5 Then

If actual > 0 Then

Cells((change + 4), where + 20) = (earned / actual)

```
actual = 0
earned = 0
Else
Cells((change + 4), where + 20) = 1
End If
End If
```

```
'enregistrement du temps
ElseIf typetemps = 1 Then
If Effect = 0 Then
Cells(change + 4, where) = rscindirect + actual / 8
actual = 0
ElseIf Effect = 0.25 Then
Cells(change + 4, where + 10) = rscindirect + actual / 8
actual = 0
ElseIf Effect = 0.5 Then
Cells(change + 4, where + 20) = rscindirect + actual / 8
actual = 0
End If
End If
End If
```

Next i  
|||||  
change = change + 1

## Loop 'boucle pour faire tous les changements

```

Else
    MsgBox " ressource insuffisante"
End If

```

Effect = Effect + 0.25

Loop  
where = where + 1

actual = 0

earned = 0

Next inst

End Sub

Sub enregistrement(ByVal dimension As Byte, activite As Integer, ByRef T\_depart() As Integer, T\_modif() As Integer, T\_source() As Integer)

Dim succ As Integer  
Dim tache As Integer  
Dim tampon As Byte  
Dim jourdispo As Integer  
Dim T\_liste() As Integer

tache = activite  
succ = 1  
i = 1  
y = 8  
Z = 1  
ReDim T\_liste(2, dimension) 'changer avec bonne dimension

T\_liste(1, i) = tache  
T\_liste(2, i) = T\_source(2, tache)

For i = 2 To dimension

For y = 8 To 10

If T\_source(y, tache) = 0 Then

    y = 10

If T\_source(2, tache) = 0 Then

    i = i - 1

End If

Else

    tampon = T\_source(y, tache)

    Do While T\_liste(1, i) > 0

        i = i + 1

    Loop

    T\_liste(1, i) = tampon

    T\_liste(2, i) = T\_source(2, tampon)

End If

Next y

Z = Z + 1

tache = T\_liste(1, Z)

If tache = 0 Then

    i = 120

End If

Next i

For i = 1 To dimension

    If T\_liste(1, i) = 0 Then

        i = dimension

    Else

        T\_modif(i) = T\_liste(1, i)

        ' T\_modif(2, i) = T\_depart(12, i)

    End If

Next i

End Sub

Sub changementtemps(ByVal tempsol, ByRef T\_source() As Integer, activite, T\_depart() As Integer, T\_solution() As Integer)

Dim duredepart As Integer

Dim none As Boolean

Dim memoire1

none = False

moment1 = tempsol \* Effect

moment2 = tempsol \* (Effect + 0.25)

'For i = 1 To 120

'determine l'activite a modifier

For i = 1 To 120

If T\_solution(12, i) > moment1 Then 'changer pour start time

If T\_solution(11, i) < moment2 Then

If critique = 1 Then

Do While none = False

If T\_solution(16, i) = 0 Then

activite = i

none = True

i = 120

End If

i = i + 1

Loop

Else

activite = i

i = 120

End If

End If

End If

Next i

If change < 2 Then

T\_source(2, activite) = T\_source(2, activite) + tempsol \* (change / 100)

Else

T\_source(2, activite) = T\_source(2, activite) - tempsol \* ((change - 1) / 100)

T\_source(2, activite) = T\_source(2, activite) + tempsol \* (change / 100)

End If

```
augmentation = tempsol * (change / 100)
```

```
End Sub
```

```
Sub ordo(ByVal iteration, dimension As Byte, ByRef T_depart() As Integer, T_ress() As Integer,
T_etatress() As Integer, temps As Single, T_ordre() As Integer, permute, T_durer() As Integer,
modification As Byte, indirect As Boolean)
```

Dim fin As Byte 'compte le nombre de tache qu'il reste a placer

Dim change As Boolean 'donne l'information s'il y a eu un changement au niveau des predescesseurs

Dim T\_dispo() As Integer 'contient les taches qui peuvent commencer, car elles n'ont plus de predecesseur

Dim T\_active() As Integer ' contient les taches qui seront avance dans le temps

Dim cont\_pred As Boolean 'valeur de choix pour les predescesseur

Dim na As Byte 'num\_ro de la t\_che active

Dim b As Byte 'variable donnant la dimension du tableau T\_active

Dim nt As Byte 'variable memoire gardant la valeur du temps d'une tache disponible

Dim n As Byte 'variable d'information pour le choix du critere du trie

```
ReDim T_dispo(1, dimension)
```

```
ReDim T_active(1, dimension)
```

fin = dimension 'donne le nombre de tache a placer

permute = False 'indique qu'aucune permutation n'a eu lieu jusqu'a l'instant

Do While fin > 0 'depart de la boucle d'installation des tache

'choix des tache disponible qui seront dans T\_dispo selon le critere que la tache choix n'a aucun predecesseur

```
ReDim T_dispo(1, dimension)
```

```
a = 0
For i = 1 To dimension
If T_depart(13, i) = 0 Then
    a = a + 1 'la variable a donne le nombre de tache dans le T_dispo, ce qui permet d'avoir la bonne
    dimension
    T_dispo(1, a) = i
    End If
Next i
```

'permet de voir si aucune tache ne peut être placée. Alors le problème n'est pas réalisable

If  $a \equiv 0$  Then

cont pred = False

### MsgBox "non realisable"

fin = 0

lse

cont

End If

Do While cont\_pred = True 'boucle qui continue temps et aussi longtemps qu'aucune tache n'a ete complete et qu'aucun nouveau successeur n'est libre

ReDim T\_active(1, dimension) 'clear les informations du tableau T\_active

If  $a > 1$  Then 'decide si un tri des informations est nécessaire, si une seule tâche active. Trie non nécessaire'.

Select Case iteration 'choisi le type de trie selon l'iteration

### Case 1

n = 14

Call `Trie(a, n, temps, T_dispo, T_depart)` 'trie selon le debut au plus tard

Case 2

n = 15

Call Trie(a, n, temps, T\_dispo, T\_depart) 'trie selon la fin au plus tard

Case 3

n = 16

Call Trie(a, n, temps, T\_dispo, T\_depart) 'trie selon la duree de la tache

Case 4

n = 8

Call Trie2(a, n, temps, T\_dispo, T\_depart) 'trie selon la consommation de la Rs1

Case 5

n = 9

Call Trie2(a, n, temps, T\_dispo, T\_depart) 'trie selon la consommation de la Rs2

Case 6

n = 10

Call Trie2(a, n, temps, T\_dispo, T\_depart) 'trie selon la consommation de la Rs3

Case 7

n = 10

Call Trie3(a, n, temps, T\_dispo, T\_depart) 'trie selon la consommation de l'ensemble des ressources

Case 8

Call Trie4(a, n, temps, T\_dispo, T\_depart) 'trie selon la tableau marge

End Select

End If

'fonction qui determine les taches qui seront activ\_ selon les ressources presentes dans le probleme.

Call conso(a, temps, b, T\_ress, T\_etatress, change, T\_dispo, T\_active, T\_depart, T\_ordre)

'verification qu'aucune tache n'a ete complete

For i = 1 To b

nt = T\_active(1, b)

If T\_depart(2, nt) = 0 Then  
 cont\_pred = False  
 End If

Next i

'//////////

If cont\_pred = False Then

'si une tache a ete complete, un changement au niveau des predecesseur est faire.

Call changepred(na, dimension, b, T\_depart, fin, cont\_pred, T\_active, T\_ress, T\_etatress)  
 End If

If cont\_pred = True Then

'si aucune taches n'est complete un avancement dans le temps et fin et une diminution de la dure restante de la tache est faite

Call utilisation(b, na, temps, T\_active, T\_depart, cont\_pred, T\_etatress, T\_ress, fin, T\_durer, modification, indirect)

End If

Loop

Loop

$T_{\text{depart}}(12, \text{dimension}) = T_{\text{depart}}(11, \text{dimension})$  l'inscription de la valeur de la tache de fin dont la dure est de zero

End Sub

Sub Trie(ByVal a, n, temps, ByRef T\_dispo() As Integer, T\_depart() As Integer)

'prend en note la valeur des taches a comparer

Dim n1 As Byte

Dim n2 As Byte

'//////////

Dim memoire As Byte 'memorise la valeur de la tache qui change de position

permute = True 'permet de voir si une permutation a eu lieu,

Do While permute = True

For i = 1 To a - 1

n1 = T\_dispo(1, i)

n2 = T\_dispo(1, i + 1)

If  $(T_{\text{depart}}(n, n1) - \text{temps}) < (T_{\text{depart}}(n, n2) - \text{temps})$  Then 'verification du critere de trie

memoire = T\_dispo(1, i)

T\_dispo(1, i) = T\_dispo(1, i + 1)

```

T_dispo(1, i + 1) = memoire
permute = True
Else
permute = False
End If

Next i

Loop
End Sub

Sub Trie2(ByVal a, n, temps, ByRef T_dispo() As Integer, T_depart() As Integer)

'voir trie pour information sur le fonctionnement

Dim n1 As Byte
Dim n2 As Byte
Dim memoire As Byte

permute = True

Do While permute = True

  For i = 1 To a - 1

    n1 = T_dispo(1, i)
    n2 = T_dispo(1, i + 1)

    If T_depart(n, n1) > T_depart(n, n2) Then

      memoire = T_dispo(1, i)
      T_dispo(1, i) = T_dispo(1, i + 1)
      T_dispo(1, i + 1) = memoire

      permute = True
    End If
  Next i
End Sub

```

```

Else
permute = False
End If

```

Next i

```

Loop
End Sub
Sub Trie3(ByVal a, n, temps, ByRef T_dispo() As Integer, T_depart() As Integer)

```

'voir trie pour information sur le fonctionnement

```

Dim n1 As Byte
Dim n2 As Byte
Dim memoire As Byte

```

permute = True

Do While permute = True

For i = 1 To a - 1

```

n1 = T_dispo(1, i)
n2 = T_dispo(1, i + 1)

```

If (T\_depart(8, n1) + T\_depart(9, n1) + T\_depart(10, n1)) > (T\_depart(8, n2) + T\_depart(9, n2) + T\_depart(10, n2)) Then

```

memoire = T_dispo(1, i)
T_dispo(1, i) = T_dispo(1, i + 1)
T_dispo(1, i + 1) = memoire

```

permute = True

Else

permute = False

End If

Next i

Loop

End Sub

Sub Trie4(ByVal a, n, temps, ByRef T\_dispo() As Integer, T\_depart() As Integer)

'voir trie pour information sur le fonctionnement

Dim n1 As Byte

Dim n2 As Byte

Dim memoire As Byte

permute = True

Do While permute = True

For i = 1 To a - 1

n1 = T\_dispo(1, i)

n2 = T\_dispo(1, i + 1)

If T\_depart(16, n1) > T\_depart(16, n2) Then

memoire = T\_dispo(1, i)

T\_dispo(1, i) = T\_dispo(1, i + 1)

T\_dispo(1, i + 1) = memoire

permute = True

Else

permute = False

End If

Next i

Loop

End Sub

End Sub

Sub formesource(ByVal dimension, ByRef T\_source() As Integer, T\_depart() As Integer)

For i = 1 To 16 'copie du tableau de depart dans source

For y = 1 To dimension

    If 11 = i Or i = 12 Then

        T\_source(i, y) = 0

    Else

        T\_source(i, y) = T\_depart(i, y)

    End If

    Next y

Next i

End Sub

Sub retour(ByVal dimension, ByRef T\_source() As Integer, T\_depart() As Integer)

For i = 1 To 15 'retour des informations de depart dans T\_depart

For y = 1 To dimension

    T\_depart(i, y) = T\_source(i, y)

    Next y

Next i

End Sub

```
Sub solution(ByVal dimension, ByRef T_solution() As Integer, T_depart() As Integer)
```

```
For i = 1 To 16 'enregistrement de la solution optimale
```

```
    For y = 1 To dimension
```

```
        T_solution(i, y) = T_depart(i, y)
```

```
    Next y
```

```
    Next i
```

```
End Sub
```

```
Sub copie(ByVal dimension As Byte, ByRef T_depart() As Integer, WsInst As Worksheet, T_etatress() As Integer)
```

```
'enregistrement des information dans le tableau T_depart
```

```
ReDim T_depart(16, dimension)
```

```
    Dim a As Byte
```

```
    a = 1
```

```
Workbooks("instance120").Activate
```

```
'Workbooks("maitrise utilisable pour resultat").Activate
```

```
WsInst.Select
```

```
WsInst.Cells(10, 1).Select
```

```
For i = 1 To 12
```

```
    For y = 1 To dimension
```

```
        If i = 1 Then
```

```
            T_depart(i, y) = a
```

```

a = a + 1
b = 1
End If
If i > 1 Then
    T_depart(i, y) = ActiveCell.Value
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    b = 2
End If
If y = dimension And b = 2 Then
ActiveCell.Offset(-dimension, 1).Select
End If
Next y
Next i

```

```

'enregistrement des informations des disponibilit_s des ressources dans le tableau T_etatress
ReDim T_etatress(1, 4)
WsInst.Cells(7, 2).Select
For i = 1 To 4
    T_etatress(1, i) = ActiveCell.Value
ActiveCell.Offset(0, 1).Select
Next i

For i = 1 To 4 And test = False
    For y = 1 To dimension And test = False
        If T_depart((i + 2), y) > T_etatress(1, i) Then
test = True
        End If
    Next y
Next i

```

End Sub

Sub tableaureduit(ByVal dimension As Byte, ByRef T\_depart() As Integer, T\_ress() As Integer)

'enregistrement des informations des demandes de ressources

ReDim T\_ress(4, dimension)

For i = 3 To 6

For y = 1 To dimension

    T\_ress((i - 2), y) = T\_depart(i, y)

    Next y

Next i

End Sub

Sub comptepre(ByVal dimension As Byte, ByRef T\_depart() As Integer)

'compte le nombre de predecesseur d'une tache en regardant le nombre de fois que son num\_ro est  
pr\_sent dans les lignes 8 \_ 10 du tableau

Dim nbre As Byte

For w = 1 To dimension

    For i = 8 To 10

        For y = 1 To dimension

            If T\_depart(i, y) = T\_depart(1, w) Then

                nbre = nbre + 1

            End If

        Next y

    Next i

    T\_depart(13, w) = nbre

    nbre = 0

Next w

End Sub

Sub changepred(ByVal na As Byte, dimension As Byte, b As Byte, ByRef T\_depart() As Integer, fin As Byte, cont\_pred As Boolean, T\_active() As Integer, T\_ress() As Integer, T\_etatress() As Integer)

Dim trump As Single 'Variable gardant en memoire les predecesseur.

'la fonction passe a traver les tache pouvant etre activer et choisi celle qui non plus de predecesseur

For i = 1 To b

    na = T\_active(1, i) 'enregistrement de la tache dont la dure est a 0

    If T\_depart(2, na) = 0 Then

        For y = 8 To 10

'liberation des sucesseur de la tache na

        trump = T\_depart(y, na)

        If trump > 0 Then

            T\_depart(13, trump) = T\_depart(13, trump) - 1

            If T\_depart(12, na) > T\_depart(11, trump) Then

                T\_depart(11, trump) = T\_depart(12, na)

        End If

        End If

    Next y

    T\_depart(13, na) = 1000 'Retraction de la tache des taches disponible et des tache a placer

    fin = fin - 1

End If

For w = 1 To 4

T\_etatress(1, w) = T\_etatress(1, w) + T\_ress(w, na) 'liberation des ressources utiliser par la tache na

Next w

Next i

End Sub

Sub conso(ByVal a As Byte, temps, ByRef b As Byte, T\_ress() As Integer, T\_etatress() As Integer, change As Boolean, T\_dispo() As Integer, T\_active() As Integer, T\_depart() As Integer, T\_ordre() As Integer)

Dim nd As Byte 'pour numero de la tache disponible

b = 0

change = True

'boucle qui determine si la quantite de ressource est suffisante pour la tache nd

Do While a > 0

nd = T\_dispo(1, a)

For w = 1 To 4

If T\_etatress(1, w) < T\_ress(w, nd) Then 'permet de v\_rifier qu'il y a la bonne quantit\_de ressource pour faire la t\_che nd

change = False

'T\_ordre(temps, nd) = w 'permet d'inscrire le conflit au temps t sur la ressource w

End If

Next w

|||||

'enregistrement de l'information dans le T\_active

If change = True Then

$b = b + 1$

$$T_{\text{active}}(1, b) = nd$$

## 'Diminution du nombre de ressource disponible

For w = 1 To 4

$$T_{\text{etatress}}(1, w) = T_{\text{etatress}}(1, w) - T_{\text{ress}}(w, nd)$$

Next w

End If

a = a - 1

change = True

## Loop

End Sub

Sub utilisation(ByVal b As Byte, ByRef na As Byte, temps As Single, T\_active() As Integer, T\_depart() As Integer, cont\_pred As Boolean, T\_etaress() As Integer, T\_ress() As Integer, fin As Byte, T\_durer() As Integer, modification As Byte, indirect As Boolean)

### Dim tampon As Integer

### Dim permute As Boolean

Dim difference As Single

Dim horaire As Byte

Dim minusday As Integer

permute = False

tampon = 10000

temps = temps + 1 'augmentation de la valeur du temps ou l'ordonnancement est rendu

For i = 1 To b

na = T\_active(1, i)

b = na

If T\_depart(2, na) > 0 Then

T\_depart(2, na) = T\_depart(2, na) - 1 'diminution du temps restant

If T\_depart(2, na) = 0 Then

T\_depart(12, na) = temps

'\*\*\*\*\* pas bon le temps, il est modifier avec la fonction compresse  
\*\*\*\*\*

'inscription du completion time si la valeur de la dure restante est \_ zero

If modification >= 1 Then

' Call search(na, T\_modif, permute)

If T\_depart(12, na) > T\_durer(2, na) Then '

difference = T\_depart(12, na) - T\_durer(2, na) ' donne le nombre de jour de retard qui doit etre rattrappe

If modification = 1 Then

horaire = 1

message = 1

Else

horaire = 2

message = 2

End If

Call compress(e, T\_depart, tampon, temps, difference, horaire, T\_durer, minusday, indirect)

' T\_depart(12, na) = T\_depart(12, na) - minusday 'modifier pour réajuster selon T\_durer

donneesup = donneesup + minusday 'compte mieux, mais reste à tester

Else

test = 0

End If

End If

cont\_pred = False

End If

End If

For w = 1 To 4 ' libération des ressources

T\_etatress(1, w) = T\_etatress(1, w) + T\_ress(w, na)

Next w

Next i

b = 0

End Sub

Sub compress(ByVal na As Byte, ByRef T\_depart() As Integer, tampon As Integer, temps As Single, difference As Single, horaire As Byte, T\_durer() As Integer, minusday As Integer, indirect As Boolean)

Dim multi As Byte

```

Dim compte As Byte
Dim dispoj As Integer
Dim nbresemaine As Integer
Dim heureschanges As Single
Dim perte As Boolean

```

```

perte = False
'////////// ajouter la perte de productivite ici///////////

```

```
multi = horaire * 2
```

```
dispoj = T_durer(1, na) * multi / 8 'donne le nombre d'heure disponible pour faire des heures supplémentaires
```

```
'determine si il y a assez de temps pour rattraper le retard avec le temps supplémentaire
```

```
If minusday < tampon Then
```

```

  If dispoj > difference Then
    ' If dispoj < tampon Then
    ' call perteprod2(horaire,
```

```

      If indirect = True Then
        nbresemaine = difference * 8 / (multi * 5) 'good fonctionne
        heureschanges = difference * 8 '
        Call perteprod2(nbresemaine, heureschanges, horaire, compte)
        minusday = heureschanges / 8
        perte = True
      End If
```

```

If perte = False Then
minusday = difference
End If

If tampon <> 10000 Then
T_depart(12, na) = T_depart(12, na) + tampon
T_durer(1, na) = T_durer(1, na) + tampon
temps = temps + tampon
End If

```

```

tampon = minusday
T_depart(12, na) = T_depart(12, na) - minusday
T_durer(1, na) = T_durer(1, na) - minusday
temps = temps - minusday
Call compresse(na, T_depart, tampon, temps, difference, horaire, T_durer, minusday,
indirect)

```

```

ElseIf dispoj <= difference Then

If indirect = True Then
nbresemaine = dispoj * 8 / (multi * 5) 'good fonctionne
heureschanges = dispoj * 8 '
Call perteprod2(nbresemaine, heureschanges, horaire, compte)
minusday = heureschanges / 8
perte = True
End If

```

```

If perte = False Then
minusday = dispoj
End If

```

```

If tampon <> 10000 Then
    T_depart(12, na) = T_depart(12, na) + tampon
    T_durer(1, na) = T_durer(1, na) + tampon
    temps = temps + tampon
    End If
    tampon = minusday
    T_depart(12, na) = T_depart(12, na) - minusday
    T_durer(1, na) = T_durer(1, na) - minusday
    temps = temps - minusday
    Call compresse(na, T_depart, tampon, temps, difference, horaire, T_durer, minusday,
    indirect)
    ' End If

    End If

End If

End Sub

```

Sub perteprod2(ByRef nbresemaine As Integer, heureschanges As Single, horaire As Byte, compte As Byte)

Dim nbresemaine2 As Integer

'calcul le nombre de semaine de temps supplementaire necessaire pour ensuite implanter les pertes de productivite

```

If nbresemaine > 12 Then
    nbresemaine = 12
End If

```

heureschanges = heureschanges \* T\_prod(horaire, nbresemaine)

If compte < 4 Then

nbresemaine2 = Round(heureschanges / (2 \* horaire \* 5))

Else

nbresemaine2 = WorksheetFunction.RoundUp((heureschanges / (2 \* horaire \* 5)), 0)

End If

If nbresemaine2 > 12 Then

nbresemaine2 = 12

End If

If nbresemaine <> nbresemaine2 Then

heureschanges = heureschanges / T\_prod(horaire, nbresemaine)

nbresemaine = nbresemaine2

compte = compte + 1

Call perteprod2(nbresemaine, heureschanges, horaire, compte)

earned = earned + heureschanges

actual = actual + heureschanges / T\_prod(horaire, nbresemaine)

End Sub

Sub retour2(ByRef nbresemaine As Integer, heureschange As Single, T\_prod() As Single, horaire2 As Byte)

'MsgBox T\_prod(horaire2, nbresemaine)

heureschange = Round(heureschange \* T\_prod(horaire2, nbresemaine))

End Sub

End If

Next i

heuresdispo = jourdispo \* 2

'MsgBox heuresdispo

End Sub

Sub debuttot(ByVal dimension As Byte, ByRef T\_depart() As Integer)

Dim fin As Byte

Dim change As Boolean

fin = dimension

Do While fin > 0

For i = 1 To dimension

    If T\_depart(13, i) = 0 Then

        Call changepred2(i, T\_depart) 'permet de liberer les predecesseurs suivant la tache complete.

        fin = fin - 1

    End If

    Next i

Loop

For i = 1 To dimension

$T_{debuttot}(i) = T_{depart}(12, i)$

Next i

End Sub

Sub debuttart(ByVal dimension As Byte, ByRef T\_depart() As Integer)

Dim ns As Byte

$a = dimension$

$T_{depart}(15, a) = T_{depart}(12, a)$

$T_{depart}(14, a) = T_{depart}(15, a)$

$a = dimension - 1$

Do While  $a > 0$

For y = 8 To 10

$ns = T_{depart}(y, a)$

If  $y = 8$  Then

$T_{depart}(15, a) = T_{depart}(14, ns)$

ElseIf  $T_{depart}(14, ns) < T_{depart}(15, a)$  And  $T_{depart}(14, ns) > 0$  Then

$T_{depart}(15, a) = T_{depart}(14, ns)$

End If

Next y

$T_{depart}(14, a) = T_{depart}(15, a) - T_{depart}(2, a)$

$a = a - 1$

Loop

$T_{depart}(15, 1) = 0$

$T_{depart}(14, 1) = 0$

For  $i = 1$  To dimension

$T_{depart}(14, i) = T_{debuttot}(i)$

Next i

End Sub

Sub margelibre(ByVal dimension, ByRef T\_depart() As Integer)

For i = 1 To dimension

T\_depart(16, i) = T\_depart(15, i) - T\_depart(14, i) 'calcul de la marge total du probleme

Next i

End Sub

Sub changepred2(ByVal i As Byte, ByRef T\_depart() As Integer)

'voir changepred. Même fonctionnement mise en part la non comptabilisation des ressources

Dim trump As Single

For y = 8 To 10

trump = T\_depart(y, i)

T\_depart(12, i) = T\_depart(11, i) + T\_depart(2, i)

If trump > 0 Then

T\_depart(13, trump) = T\_depart(13, trump) - 1

If T\_depart(12, i) >= T\_depart(11, trump) Then

T\_depart(11, trump) = T\_depart(12, i)

End If

End If

Next y

End Sub

## Sub prod()

'tableau des parties de productivité selon le nombre d'heure par jour et le nombre de semaine d'affiler avec du temps supplémentaire

T\_prod(1, 0) = 1

T\_prod(1, 1) = 0.8764

T\_prod(1, 2) = 0.9021

T\_prod(1, 3) = 0.9104

T\_prod(1, 4) = 0.9

T\_prod(1, 5) = 0.8743

T\_prod(1, 6) = 0.8389

T\_prod(1, 7) = 0.7965

T\_prod(1, 8) = 0.7521

T\_prod(1, 9) = 0.725

T\_prod(1, 10) = 0.7194

T\_prod(1, 11) = 0.7194

T\_prod(1, 12) = 0.7187

T\_prod(2, 0) = 1

T\_prod(2, 1) = 0.8458

T\_prod(2, 2) = 0.8687

T\_prod(2, 3) = 0.8736

T\_prod(2, 4) = 0.85

T\_prod(2, 5) = 0.8042

T\_prod(2, 6) = 0.7422

T\_prod(2, 7) = 0.7014

T\_prod(2, 8) = 0.6736

T\_prod(2, 9) = 0.6583

T\_prod(2, 10) = 0.6507

T\_prod(2, 11) = 0.6465

T\_prod(2, 12) = 0.6451

End Sub

Sub dure(ByVal dimension, ByRef T\_durer() As Integer, T\_source() As Integer, T\_depart() As Integer)

For y = 1 To dimension

    T\_durer(2, y) = T\_depart(12, y)

    T\_durer(1, y) = T\_source(2, y)

Next y

End Sub

Sub dure2(ByVal dimension, ByRef T\_durer() As Integer, T\_source() As Integer)

For y = 1 To dimension

    T\_durer(1, y) = T\_source(2, y)

Next y

End Sub