

# **LE COMPROMIS DURÉE/RESSOURCE EN GESTION DE PROJET DANS UN CONTEXTE DE MULTIPLICITÉ DE RESSOURCES: ANALYSE ET IMPACTS SUR LA PERFORMANCE DE PROJET**

---

## **RÉSUMÉ**

Les problèmes d'accélération de projet sont aujourd'hui non seulement d'actualité mais aussi très importants, tant pour la compétitivité des organisations de classe mondiale que pour les petites et moyennes entreprises et industries. Malheureusement, sur la question du compromis nécessaire pour rencontrer les durées accélérées à moindre coût, lors de l'accélération de projet, sans affecter négativement la qualité des livrables, l'unanimité est loin d'être réalisée tant les controverses sont multiples.

Ce mémoire participe de la résolution d'une telle controverse en démontrant les différences entre compromis durée/coût et compromis durée/ressource, la nécessité de s'appuyer surtout sur un compromis durée/ressource dans un contexte de multiplicité, de non fragmentation et de non substituabilité des ressources. À travers une typologie des outils en accélération de projet, le mémoire suggère deux approches différentes pour faire face à un vide instrumental dans ce contexte précis, à savoir :

- une approche d'optimisation avec respect de l'appartenance identitaire des ressources, la programmation linéaire multi-objective en nombres entiers (MOLIP);
- une approche heuristique avec respect de l'appartenance identitaire des ressources, l'Approche Modifiée d'Exploration par Coupe (AMEC).

Ces deux approches permettent de mieux prendre en compte la rareté des différents types de ressource sans pénaliser la réalisation du projet.

## AVANT-PROPOS

Si j'écris aujourd'hui ces quelques lignes, c'est avant tout grâce à mon directeur de recherche. Cette aventure a commencé comme un pari dans lequel mes chances me semblaient nulles mais sans hésitation, il a misé sur moi. Le professeur Sébastien H. AZONDÉKON est pour moi, comme un de ces personnages déterminants dans l'existence d'une personne qui, quand une porte vous a été fermée, non seulement il vous tend la clé mais s'engage à la traverser avec vous. Parmi ces innombrables clés dont il est détenteur, Monsieur AZONDÉKON m'a tendu celle de la Recherche. Ce mémoire est le fruit de la confiance qu'il m'a témoignée, de sa générosité infinie, de son expertise et de ses réprimandes, oh! combien utiles. Je lui dédie en partie ce mémoire parce que les mots ne me suffiront jamais pour le remercier.

Mes remerciements s'adressent également aux professeurs Juan SALAZAR et Tov ASSOGBAVI dont les remarques et les conseils ont fait la preuve de leur grand dévouement, de leur disponibilité et de leur support indéfectible. Leurs occupations respectives, bien que chargées ne les ont pas fait reculer devant un rôle aussi exigeant qu'est celui d'être membre du jury.

Je remercie particulièrement mes collègues et compagnons du GRAP<sup>2</sup>AD (Groupe de Recherche en Analyse de Projet, Production et Aide à la Décision) pour leur réel sens du partage et de la solidarité sur ce chemin aussi « périlleux et caillouteux » qu'est la Recherche.

Ces quelques mois de sacrifices n'ont pas pu porter leur fruit sans le soutien inconditionnel de mon époux Heritiana ANDRIAMIHAMISOA, ni les précieux conseils et encouragements de mes parents, ni la tendresse de mes deux frères LIVA et MAMY et ma sœur VOLA. Une pensée particulière à mon grand-père qui m'a quittée durant cette période mais qui, de là où il est, j'en suis sûre, veille avec fierté sur la petite fille qu'il a élevée. Je dédie également ce mémoire à ma grand-mère, mon pilier et ma source de sagesse, pour son amour infini.

Je n'oublierai pas d'exprimer ma profonde gratitude à la famille de LA BRUYÈRE, pour leur incomparable amitié, véritable source d'énergie durant mes moments de désespoir.

Enfin, un grand merci à ceux qui, de près ou de loin, m'ont offert leur soutien moral ou technique, dans la réalisation de ce travail.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>i</b>
<b>AVANT-PROPOS.....</b>	<b>ii</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>vi</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : LE COMPROMIS DURÉE/RESSOURCE EN GESTION DE PROJET : UNE REVUE DE LA LITTÉRATURE .....</b>	<b>5</b>
1.1. Problématique de compromis durée/ressource .....	6
1.2. Compromis durée/ressource versus compromis durée/coût.....	14
1.3. Revue de la littérature en compromis durée/coût et compromis durée/ressource.....	19
1.4. Optimisation versus Heuristiques en contexte de ressources multiples .....	22
<b>CHAPITRE 2 : MODÉLISATION DU PROBLÈME DE COMPROMIS DURÉE/RESSOURCE EN CONTEXTE DE RESSOURCES MULTIPLES : APPROCHES OPTIMALE ET HEURISTIQUE.....</b>	<b>27</b>
2.1. Fondements multi-objectifs du compromis durée/ressource .....	28
2.2. Une approche optimale du compromis durée/ressource en contexte de ressources multiples : le MOLIP .....	32
2.3. Une méthode heuristique de compromis durée/ressource en situation de ressources multiples : l'AMEC .....	37
2.4. Contribution des deux approches à l'amélioration de la performance de projet.....	45
<b>CHAPITRE 3 : ILLUSTRATION ET ANALYSE COMPARATIVE DES DEUX APPROCHES .....</b>	<b>47</b>
3.1. Contexte du projet d'application.....	48
3.2. Application optimale .....	50
3.3. Application heuristique .....	75
3.4. Analyse comparative .....	81
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>84</b>
<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>87</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1 : Typologie des outils en accélération de projet .....</b>	<b>25</b>
<b>Figure 2 : Réseau avec pentes de coûts.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure 3 : Réseau avec pentes effectives de coût.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure 4: Réseau avec deux coupes .....</b>	<b>41</b>
<b>Figure 5: Réseau du projet .....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 6: Illustration graphique des solutions .....</b>	<b>74</b>
<b>Figure 7: Coupes dans le flux du réseau .....</b>	<b>76</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1: Paramètres de flux du projet .....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau 2: Valeurs des deux premières coupes .....</b>	<b>42</b>
<b>Tableau 3: Données de base du projet.....</b>	<b>48</b>
<b>Tableau 4: Calculs CPM.....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau 6: Paramètres requis pour l'application de MOLIP au projet .....</b>	<b>50</b>
<b>Tableau 7: Solutions optimales du modèle selon les différentes options.....</b>	<b>73</b>
<b>Tableau 8: Paramètres requis pour l'application de AMEC au projet .....</b>	<b>75</b>
<b>Tableau 9: Paramètres avec pentes effectives de coût .....</b>	<b>75</b>
<b>Tableau 10: Paramètres initiaux de flux du projet.....</b>	<b>76</b>
<b>Tableau 11: Localisation de la coupe minimale à la première exploration.....</b>	<b>77</b>
<b>Tableau 12: Paramètres de flux après la première itération.....</b>	<b>77</b>
<b>Tableau 13: Localisation de la coupe minimale à la deuxième itération.....</b>	<b>78</b>
<b>Tableau 14: Paramètres de flux après la deuxième itération .....</b>	<b>78</b>
<b>Tableau 15: Localisation de la coupe minimale à la troisième itération .....</b>	<b>79</b>
<b>Tableau 16: Paramètres de flux après la troisième itération.....</b>	<b>79</b>
<b>Tableau 17: Localisation de la coupe minimale à la quatrième itération .....</b>	<b>80</b>
<b>Tableau 18: Calculs de l'algorithme de Siemens.....</b>	<b>83</b>

## **INTRODUCTION**

En ce début de millénaire, la gestion de projet est reconnue comme une nécessité à la survie d'une organisation. (Kerzner, 2002). Avec l'ampleur grandissante de la compétitivité, toutes les organisations en quête de profitabilité sont amenées à élaborer de plus en plus souvent des projets de produits ou services nouveaux, des projets d'investissements nouveaux. En effet, la gestion par projets est utilisée dans bon nombre d'industries et d'organisations diverses comme la défense, la construction, l'industrie pharmaceutique, les banques, les hôpitaux, les administrations publiques régionales ou locales et même les Nations Unies.

Selon Oisen (1971), la gestion de projet est une application d'un ensemble d'outils et de techniques en vue de d'orienter l'utilisation des diverses ressources vers l'accomplissement d'une tâche unique, complexe et ponctuelle, sous les contraintes de temps, de coût et de qualité.

Cette définition, quoique très technique, précise la mission du gestionnaire de projet : réaliser le projet dans un délai raisonnable, à moindre coût et en une qualité acceptable. De ce fait, le pilotage d'un projet reste un travail laborieux et requiert un certain niveau d'expertise. N'est plus gestionnaire de projet qui veut mais qui peut. De plus, celui qui peut doit être en mesure de cerner la notion de performance, de maîtriser les outils dans un souci permanent d'amélioration de cette performance et d'assurer une bonne gestion des ressources à l'intérieur du triangle vertueux (durée, coût, qualité).

Donc, gestion de projet veut dire avant tout obligation de résultats. Dans cette obligation de résultats, la clé de la bonne performance se trouve dans la maîtrise des étapes et processus de réalisation d'un projet. Les méthodes d'accélération de projet figurent au nombre de ces processus auxquels le gestionnaire doit recourir quotidiennement, dans sa quête d'efficience et d'efficacité, afin de répondre aux exigences et directives des parties prenantes au projet. Avec les progrès scientifiques et techniques enregistrés de nos jours, ces exigences deviennent multiples, fréquentes et de plus en plus complexes. Ceci fait de l'accélération de projet un problème de plus en plus incontournable, crucial, pertinent, actuel, objectivement posé et à résoudre. Plus des recherches s'y intéressent, plus l'on



constate son caractère inépuisable mais explicable par la nature également inépuisable du risque entourant les projets. La recherche en accélération de projet est par conséquent une aventure passionnante. C'est par conséquent cette passion et la détermination de contribuer à l'avancement des connaissances dans ce domaine précis qui nous ont conduit à nous y intéresser à travers le thème suivant : ***le compromis durée/ressource en gestion de projet dans un contexte de multiplicité des ressources : analyse et impacts sur la performance de projet.***

Cette recherche se veut avant tout d'ordre instrumental et se fixe, à la lumière de l'analyse de la problématique d'accélération, comme objectif le développement de deux approches (optimale et heuristique) d'accélération de projet, dans un contexte de multiplicité, de non fragmentation et de non substituabilité des ressources (hypothèse 1 et hypothèse 2). Notre démarche instrumentale sera illustrée à l'aide d'un projet concret pour démontrer l'utilisation des outils élaborés aux praticiens de la gestion de projet.

Pour atteindre cet objectif fixé, nous aborderons cette recherche dans l'ordre suivant :

- au chapitre 1, nous nous intéresserons au compromis durée/ressource en gestion de projet à travers une revue de la littérature. Nous y expliquons notamment ce qu'est la problématique de compromis durée/ressource; ensuite nous analysons la différence entre compromis durée/coût et compromis durée/ressource pour nous intéresser aussi à l'état de l'art en compromis durée/coût et compromis durée/ressource; nous terminons ce chapitre par une analyse comparative des approches heuristiques et d'optimisation en contexte de ressources multiples.
  
- Au chapitre 2, il sera question de modéliser le problème de compromis durée/ressource en contexte de ressources multiples via deux types d'approche : heuristique et optimale. Nous y expliquerons notamment les fondements multi-objectifs du compromis durée/ressource pour ensuite dégager une approche optimale de réalisation de ce compromis ainsi

qu'une méthode heuristique de résolution du même problème. Nous finirons par l'évaluation de la contribution des deux approches élaborées à l'amélioration de la performance de projet.

- le chapitre 3 sera consacré à l'illustration et à l'analyse comparative des deux approches. Il relate notamment le contexte d'application du projet choisi, l'application de l'approche optimale au projet, celle de l'approche heuristique et une analyse comparative des résultats obtenus avec les deux méthodes.

En conclusion, nous exposons les résultats obtenus ainsi que les limites de la recherche et les avenues qu'elle offre pour des recherches futures.

**CHAPITRE 1 : LE COMPROMIS DURÉE/RESSOURCE EN GESTION DE  
PROJET : UNE REVUE DE LA LITTÉRATURE**

## **1.1. Problématique de compromis durée/ressource**

La gestion de projet est une alliance d'art et de science qui vise à contrôler les ressources (humaines, matérielles et financières) sous des contraintes de durée, de coût et de qualité (Kerzner, 2000). Elle s'appuie ainsi sur le temps, le coût et la qualité, trois éléments capitaux qui, combinés, forment ce qu'on appelle le « triangle vertueux » de la gestion de projet. Gérer un projet consiste alors à établir un compromis entre les trois composantes de ce triangle vertueux.

La gestion de ce triangle vertueux revient à trouver la combinaison qui permet la réalisation du projet à temps, à coût minimal et au niveau de qualité requis. Ceci n'est pas une tâche facile car le meilleur compromis en général entre les trois éléments du triangle est difficile à établir. En effet, les projets deviennent de plus en plus complexes et les contraintes posées par le triangle vertueux de moins en moins arbitraires. Le but visé étant l'efficacité et l'efficacité, en utilisant avec persévérance les méthodes de planification opérationnelle tout au long du projet, le gestionnaire va apprendre à gérer son projet à l'intérieur de ce triangle afin de faire face rapidement à tout imprévu et d'évaluer les ajustements nécessaires plus efficacement.

En planification opérationnelle de projet, dans la phase d'ordonnancement, le gestionnaire de projet conçoit son projet dans les détails et parfois anticipe les imprévus tels la modification de la contrainte originale de temps. Dans ce cas précis, la durée normale du projet va être assujettie à de nouvelles contraintes et pour que cela n'affecte pas la qualité, il va falloir établir un compromis entre le facteur temps et le facteur coût.

Ainsi, selon la situation qui se présente, la planification initiale du projet nécessitera des modifications. En gestion de projet, les révisions que le gestionnaire est

amené à apporter suite aux modifications, pour répondre aux nouvelles contraintes, s'opèrent pour la plupart dans la phase de suivi et contrôle. Durant cette phase, afin de rencontrer les nouvelles exigences, établir des compromis entre le coût, le durée et la qualité devient inévitable. Dépendamment du problème posé, c'est à dire selon la nature des nouvelles contraintes, le gestionnaire se trouve ainsi dans l'obligation d'analyser les alternatives et de déterminer quels couples de composantes du triangle seront considérés dans le compromis. En gestion de projet, le compromis peut être compris de trois façons :

- le compromis durée/qualité, c'est à dire vite et bien : ce premier type de compromis vise à se conformer à une nouvelle contrainte de temps (réaliser le projet plus tôt que prévu) sans trop nuire à la qualité. Il convient ici de préciser qu'en réalisant ce type de compromis, tout en veillant au succès du projet, le gestionnaire de projet dispose d'une certaine marge de manœuvre en ce qui concerne le facteur coût, mais très limitée compte tenu de la dépendance des trois éléments.
- Le compromis coût/qualité, c'est à dire pas très dispendieux mais bien. Dans ce deuxième type de compromis, les contraintes sont de nature budgétaire. Ici, il est demandé au gestionnaire de projet de réaliser le projet en dessous du budget planifié, et cela sans trop en affecter la qualité. Une réduction du budget planifié sans affectation majeure de la qualité ne peut se faire sans vraisemblablement affecter la durée du projet. Étant donné que la courbe des coûts totaux du projet au-delà de la durée normale commence par grimper, ce glissement de projet doit être réduit à son stricte minimum.
- Le compromis durée/coût, c'est à dire plus vite avec un accroissement de coût minimal. En effet, afin de répondre aux requêtes d'un client ou selon des directives précises émanant de la haute direction, le gestionnaire de projet pourrait se trouver dans l'obligation d'accélérer le projet de manière à rencontrer une échéance plus précoce que celle planifiée. Dans ce cas, le compromis se fera entre les facteurs temps et coût. La question que se pose le gestionnaire de projet est la

suivante : comment piloter les activités afin de réaliser le projet plus tôt que prévu avec un incrément minimal de ressources sans en pénaliser la qualité?

De façon générale, en gestion de projet, la compression de la durée d'un projet s'obtient par l'accélération de certaines activités critiques. Cela nécessite des ajustements au niveau de la planification initiale, notamment une allocation supplémentaire de ressources. Cette procédure entraîne généralement une réaction inverse des facteurs coût et temps, c'est à dire une hausse des coûts directs des activités et une réduction de la durée du projet (Icmeli, 1993; Phillips et Dessouky, 1977). Établir le compromis durée/coût consiste alors à réaliser le projet pour la nouvelle échéance et à coût minimal.

Ahn et Erenguc (1998) confirment cette idée en stipulant que l'accélération d'un projet doit s'opérer grâce à des ressources additionnelles. En définitive, tous ces auteurs s'accordent sur un même point : l'accélération de projet requiert une attention particulière sur la gestion des ressources.

À l'ère de la mondialisation où la lutte contre le gaspillage sous toutes ses formes devient une priorité, la gestion des ressources n'a jamais été aussi rigoureuse. Avec le poids de la concurrence et des exigences de la compétitivité ainsi que la disponibilité limitée des ressources, la résolution du problème d'accélération de projet consiste avant tout à gérer la relation entre le temps et les ressources.

Ahn et Erenguc (1998) estiment que dans la pratique, l'accélération de projet peut s'opérer de différentes façons : par les heures supplémentaires (augmentation de la charge de travail) ou par l'allocation de ressources additionnelles.

En accélération de projet, la conduite du projet vers le succès repose de ce fait sur le juste équilibre entre la durée et le niveau d'utilisation de ressources. L'objectif sera de deux ordres : au niveau des ressources (minimisation de la quantité additionnelle de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâches, minimisation de la charge

additionnelle de chaque ressource) et au niveau du temps (rencontre de la nouvelle échéance fixée).

Plusieurs approches ont été élaborées pour assister le gestionnaire de projet dans la résolution de cette problématique d'accélération. Dans le modèle de Babu et Suresh (1996), à chaque activité est assignée une durée normale et une durée accélérée, et par conséquent un coût normal et un coût accéléré. Le coût total du projet (normal ou accéléré) est tout simplement la somme des coûts de chaque activité (normal ou accéléré).

Force est de constater que dans la majorité des modèles traitant du compromis durée/coût élaborés jusqu'ici, la méthode de détermination du coût accéléré pour chaque activité demeure imprécise. Dans la plupart des cas, les coûts normaux et accélérés des activités sont donnés de façon condensée, ce qui ne permet pas de connaître de façon précise le niveau d'implication normal et additionnel des différents types de ressources dans le processus. Afin de mieux contrôler ces coûts d'accélération, certains auteurs ont proposé quelques pistes intéressantes qui méritent d'être explorées.

Selon Foster (1986), pour un projet de développement d'un produit, la résolution de la problématique d'accélération de projet consiste essentiellement à minimiser les coûts inhérents à l'innovation du produit et à la course pour pénétrer le marché en premier. Dans un tel projet, souligne-t-il, un bon gestionnaire de projet doit viser la minimisation de la somme de deux types de coûts insidieux à savoir, les coûts de retard sur le marché et les coûts de développement, les coûts de retard étant les coûts de pénalité d'avoir pénétré le marché trop tard, c'est à dire le manque à gagner, tandis que les coûts de développement sont les coûts nécessaires à la transformation du produit pour que celui-ci soit qualitativement compétitif sur le marché. Cette piste ne sort pas de l'approche condensée dont nous venons de parler et de ce fait ne lève pas l'imprécision.

Graves (1989) souligne que pour mieux cerner le problème de compromis durée/coût et pour pouvoir contrôler ses impacts sur le projet, il est impératif de connaître la nature de tous les coûts insidieux et de comprendre pourquoi les coûts augmentent

quand les projets sont accélérés. Pour ce faire, il propose de surveiller entre autres, les facteurs suivants: la perte de l'information due à l'accélération, le rendement décroissant du personnel ainsi que l'incertitude associée aux différents scénarios de réalisation d'une activité.

Selon Graves (1989), le fait de devoir réaliser certaines activités en parallèle afin d'accélérer le projet, réduit la quantité d'informations nécessaire pour la réalisation des autres activités. Plus le projet est accéléré, plus les chevauchements sont nécessaires et plus les activités sont réalisées avec le moins d'informations, ce qui entraîne souvent des erreurs dont les coûts qui y sont associés peuvent être très considérables. Selon nous, le problème du chevauchement des activités se pose beaucoup plus en terme de conflit de ressources que de quantité d'information nécessaire pour la réalisation des autres activités et c'est justement ce conflit de ressources que le gestionnaire doit chercher à résoudre.

Comme le soutiennent Ozdamar et Ulusoy (1995), le problème de planification de projet avec contraintes de ressources ne représente pas seulement un domaine de recherche isolé mais regroupe aussi un grand nombre de problèmes de planification tels que le problème d'accélération de projet. Selon ces auteurs, les ressources devraient être les principaux éléments à considérer dans le problème de compromis durée/coût à cause du fait que les activités peuvent être accélérées en y assignant des ressources additionnelles et que la durée du projet est toujours représentée comme une fonction des ressources que chaque activité consomme.

D'autre part, amener plus de ressources à un projet peut être très critique pour les rendements du personnel du projet. Plus le nombre de ressources additionnelles est élevé, plus la contribution marginale de chaque ressource allouée au projet diminue. Ce phénomène s'explique en premier par l'effet d'apprentissage. Les ressources en place doivent consacrer une partie de leur temps à former les nouveaux arrivants, faisant diminuer ainsi le rendement global du personnel. La diminution du rendement du personnel entraîne non seulement des coûts au niveau du projet devant être accéléré mais aussi des coûts de pénalité au niveau des projets d'où ces ressources ont été soutirées.



Enfin, Graves (1986) évoque l'hypothèse selon laquelle il existe plusieurs scénarios possibles pour accélérer un projet et que les mêmes probabilités de succès sont assignées à chaque scénario d'accélération. Selon l'auteur, étant donné qu'un même coût est associé à chaque scénario et que les scénarios sont indépendants les uns des autres, lorsque plusieurs scénarios devraient être testés afin de vérifier lequel aurait du succès, la meilleure stratégie serait de les expérimenter un à un et d'arrêter l'expérimentation quand un s'avère être le bon. C'est la manière la plus adéquate de minimiser le nombre d'essais. Cependant, dans le cas d'accélération, étant donné que le bon scénario doit être trouvé le plus rapidement possible, plusieurs scénarios devront être essayés simultanément. Selon Graves (1989), les coûts associés à ce genre d'opérations s'avèrent toujours être plus élevés que prévus. Il justifie la non linéarité de ces coûts en démontrant qu'augmenter le nombre d'essais devant être effectués simultanément entraîne des coûts encore plus élevés que ceux attendus.

Ainsi Foster (1986) et Graves (1989) s'accordent sur l'assertion selon laquelle l'élément coût dudit compromis en accélération de projet doit inclure tous les coûts des éléments que le gestionnaire de projet juge pertinents pour la décision d'accélération. De notre point de vue, cet exercice semble difficile à réaliser, l'exhaustivité et le jugement quant à la pertinence des coûts étant contextuels et subjectifs. En effet, dépendamment de la nature et de l'envergure du projet, la connaissance totale de tous les coûts qui peuvent être associés à une accélération est très rare, voire impossible et seul le gestionnaire de projet aura la responsabilité de les recenser. Il nous paraît ainsi difficile de pouvoir déterminer un coût d'accélération précis et exhaustif pour chaque activité. À notre avis, le coût des ressources s'avère le principal coût à considérer.

Cet état de chose justifie la nécessité de recourir à différentes formes de compromis qui permettraient une allocation efficace et efficiente des ressources en accélération de projet. Dans ce contexte précis, il s'agit de veiller à ce que le coût des ressources additionnelles plus le coût total normal du projet ne dépasse pas le nouveau budget alloué au projet et que les ressources disponibles puissent permettre de compléter le projet dans les nouveaux délais prévus.

Ainsi, pour mieux cerner et contrôler la performance d'un projet dans un contexte d'accélération et pour une bonne réallocation des ressources, un gestionnaire de projet doit considérer plusieurs facteurs : ce sont entre autres les habiletés requises, la compétence du personnel, la disponibilité des ressources humaines et de la machinerie ainsi que l'impact du niveau de ressource sur l'atteinte de la durée désirée dans la décision d'allocation de ressources. Chaque activité nécessitant plusieurs types de ressources, ces facteurs seront par conséquent analysés par le gestionnaire de projet, pour chacune d'elles et pour chaque type de ressource.

Dans le cas des ressources humaines, le type de ressources peut être aussi un choix difficile à faire de par son coût et de par son niveau d'expertise pour la charge de travail nécessaire. Burns, Liu et Feng (1996) montrent qu'en général, le niveau de compétence des ressources humaines peut être un élément déterminant dans la réalisation d'un projet dans une période donnée. Dans le cas de la machinerie par exemple, les différentes fonctionnalités des équipements utilisés pour les mêmes tâches peuvent faire varier les durées de réalisation des tâches. Les choix et les décisions sur le personnel ainsi que l'équipement vont ultérieurement déterminer la durée et le coût du projet.

Phillips (1996) estime que, dans toute situation de projet, les préoccupations fondamentales sont la durée et le niveau des ressources nécessaires pour réaliser le projet dans l'intervalle de temps espéré ou en moins de temps que prévu. Cette assertion parfaitement acceptable et acceptée par plusieurs gestionnaires de projet justifie la prise en considération de la nécessité d'établir un compromis durée/ressource en vue d'éviter l'explosion des coûts du projet. Selon Phillips (1996), ce compromis consiste à trouver à quelle (s) activité(s) du projet devrait-on allouer des ressources additionnelles en vue de réduire la durée totale du projet d'un montant de temps requis, avec un niveau de dépenses en ressources additionnelles minimal.

En quelques mots, résoudre le compromis durée/ressource revient donc à faire vite avec un minimum de ressources additionnelles. Il s'agit ici de construire une combinaison efficiente de durée et de quantité de ressources requises pour chaque activité et par conséquent pour le projet, pour toutes les durées possibles entre la durée normale et la durée accélérée. Le profil durée/ressource du projet est obtenu par la sommation des quantités (ou des coûts) de ressources requises pour réaliser toutes les activités du projet.

Chaque activité définie possède une courbe de ressources qui documente l'utilisation de ressources nécessaires pour la compléter. Un taux fixe d'utilisation de chaque type de ressources pour chaque activité est déterminé et représente les exigences de ressources additionnelles par unité de temps des conditions normale à accélérée.

En supposant que le coût d'accélération de chaque activité suit une fonction linéaire basée sur le compromis durée/ressource, le premier choix du gestionnaire de projet sera en général d'accélérer l'activité la moins chère à réduire. Sous l'hypothèse de la linéarité des coûts encourus avec l'accélération, le gestionnaire de projet s'attend donc à des coûts proportionnels aux unités de temps de réduction opérées. Pour chaque unité de temps de moins, on va déterminer le nombre de ressources additionnelles de chaque type nécessaire pour chaque activité.

Pour nous résumer, nous dirons que le problème de compromis durée/ressource peut se poser ainsi : nous avons un projet, le projet a une durée normale et utilise plusieurs types de ressources disponibles en quantités limitées. Pour des raisons précises, nous voulons réaliser le projet dans un espace temporel inférieur à la durée normale et nous voulons que cette réalisation se fasse dans des conditions d'efficacité et d'efficience. Dans un contexte de multiplicité, de non fragmentation et de non substituabilité des ressources, quelle doit-être la meilleure planification pour y parvenir?

Il s'agit là bel et bien d'un problème d'accélération de projets en contexte de ressources multiples, de non fragmentation et de non substituabilité des ressources.

## **1.2 Compromis durée/ressource versus compromis durée/coût**

La majorité des recherches effectuées en accélération de projet ont traité le problème sous forme de résolution de compromis entre les facteurs durée et coût. En proposant l'analyse du compromis durée/ressource pour résoudre cette même problématique, certains auteurs ont relevé une distinction notable entre les différents types de coût engagés sur les activités d'un projet, entre autres les coûts des ressources, et notent de ce fait une différence considérable entre les deux types de compromis.

Rappelons qu'en planification de projet, le gestionnaire est intéressé par la détermination du temps de réalisation des activités dans l'optique de minimiser le coût de réalisation du projet. Nous savons aussi que ce coût est la somme des coûts de chaque activité et le coût de chaque activité est un coût agrégé résultant de l'utilisation de toutes les ressources requises pour mener à bien cette activité. Dans un contexte de multiplicité, de non fragmentation et de non substituabilité, une telle agrégation peut être fortement imprécise, voire floue.

Pour la résolution de la problématique d'accélération, Pulat et Horn (1996) estiment qu'un problème de compromis durée/coût génère des plans du projet à coût minimal comme une fonction du temps de réalisation du projet. Cette fonction offre au gestionnaire de projet la possibilité de déterminer l'accroissement minimal du coût du projet permis quand son temps de réalisation diminue d'une unité.

Il est important ici de remarquer que vue sous cet aspect, la décision d'accélération est basée sur une analyse globale du coût du projet à chaque unité de temps de réduction. Or, comme élaboré ultérieurement, pour une accélération de projet efficace et efficiente, la problématique peut être définie comme la recherche d'un plan optimal d'allocation de

ressources qui puisse permettre la réduction de la durée du projet avec une augmentation minimale de ressources. Le coût de toutes les ressources (humaines et/ou équipements, matérielles etc.) exigées pour passer de la durée normale à une durée accélérée pour chaque activité étant ici comptabilisé en un investissement monétaire supplémentaire, nous pouvons alors dire que la considération d'un compromis durée/coût ne fournit pas au gestionnaire assez d'informations quant à la quantité de ressources de chaque type devant être allouée à chaque activité afin d'opérer les réductions.

De notre point de vue, il est important de noter le fait que l'expression monétaire des différents types de ressources est avant tout une façon de convertir ces ressources en un équivalent commun afin d'en faciliter leur agrégation. Une telle agrégation comporte à notre avis plusieurs faiblesses (entre autres l'imprécision et le flou).

La première réside dans le fait qu'elle ne respecte pas l'appartenance identitaire des ressources. Par appartenance identitaire, nous entendons les compétences, le profil et la nature d'une ressource qui amène à la classer dans un type donné. Tous les types de ressources engagés sur chaque activité, quelle que soit leur nature sont rassemblés en un équivalent unique. Si la réalisation d'une activité dans le projet requiert un nombre  $x$  de ressources de type  $A$  et un nombre  $y$  de ressources de type  $B$  et que l'on fixe la valeur de cet équivalent unique à un niveau  $M$ , il est difficile de dire exactement la part de  $M$  devant aller à chaque type de ressource, d'où le flou. Il existe plusieurs façons d'atteindre cet équivalent  $M$  mais l'objectif recherché ici est de pouvoir atteindre avec ce montant  $M$ , le temps de réduction nécessaire pour rentrer dans la nouvelle durée de cette activité dans le respect de l'identité des ressources. Il devient alors clair que la plupart des solutions à ce problème sont des solutions où la compensation des ressources est implicitement acceptée, ce qui serait incompatible avec le respect de l'appartenance identitaire de ces dernières.

De ce fait, l'agrégation des ressources via un équivalent unique (le plus souvent monétaire) revient à transformer un problème à connotation multiobjective (puisque'il s'agit de réduire la durée du projet tout en rationalisant l'utilisation supplémentaire de chaque type de ressources), en un problème de nature uniojective (atteindre la nouvelle durée avec

la minimisation du coût de l'ensemble de ressources). La conversion de la réalité complexe des différents types de ressources ainsi que celle de leur alliage pour la réalisation des activités et par conséquent du projet, en une forme pécuniaire est fort réductrice. Pire, elle revient à traquer tout le problème multiobjectif à travers un seul prisme, un seul aspect (pécuniaire). La réalité du projet et des ressources impliquées n'est pas que pécuniaire. Dans la pratique, un projet peut viser un nombre incommensurable d'objectifs. Selon Vrat et Kriengkrairut (1986), dans le problème d'accélération, ces objectifs, souvent conflictuels peuvent être l'atteinte d'une échéance donnée avec un budget précis tout en minimisant le coût total du projet ainsi que l'assurance que certaines activités accélérées ne pénalisent pas la qualité du projet. Ils soutiennent qu'il n'est pas toujours possible de traduire et réduire tous ces objectifs en un équivalent monétaire. En effet, tout ce que l'on pense de plus précieux, l'argent n'achète pas. Il est alors clair qu'une telle réduction évacue du problème des aspects fort déterminants pour le succès du projet et par conséquent est peu recommandable.

Ce non respect de l'appartenance identitaire des ressources nous amène à relever une deuxième faiblesse imputable à cette agrégation. En effet, le fait qu'il n'existe aucune distinction physique entre les différents types de ressources ne permet pas de considérer l'état de chacun de ces derniers dans la résolution du problème d'accélération. Un montant de dix dollars d'une ressource *A* n'est pas le même qu'un montant de dix dollars d'une ressource *B* et de ce fait, la sommation de ces deux montants ne facilite en rien la gestion correcte de l'utilisation des deux ressources surtout si elles ne sont en rien interchangeables.

Nous pouvons alors dire que cette agrégation ne prend pas en compte la «criticité» de certaines ressources pour lesquelles il est désirable de surveiller particulièrement le niveau de consommation pour ne pas avorter la nouvelle échéance. En raison de la criticité des ressources et de leur différence, résoudre le problème du compromis durée/coût par une simple sommation des coûts engagés pour chaque activité sans distinction des ressources auxquelles ils sont associés, peut conduire à une solution d'accélération non réalisable dans

la pratique. À moins qu'il n'existe une possibilité de substitution d'un type de ressource critique par un autre non critique, chose plutôt rare de nos jours et difficile dans la pratique.

De ce fait, la minimisation du niveau de consommation des ressources en tenant compte de la nature et de l'état de chaque type de ressources devient partie intégrante de la résolution du problème d'accélération et c'est là tout le fondement du compromis durée/ressource.

En accord avec Pulat et Horn (1996), nous pouvons définir le problème de compromis durée/ressource comme celui qui fournit aux gestionnaires de projet l'information quant à combien la consommation de chaque ressource (ou son coût) augmenterait si la durée du projet diminuait d'une unité de temps. Il s'agit ici d'analyser le problème d'accélération sous plusieurs angles, notamment par rapport au facteur temps et par rapport à chacun des types de ressources impliquées. Ceci renforce et précise davantage à notre avis la vision de Ozdamar et Ulusoy (1995), contrairement aux prescriptions du compromis durée/coût où toutes les variables d'accélération du projet sont agrégées sous forme monétaire pour la réalisation dudit compromis.

D'autre part, si dans le problème de compromis durée/coût, le facteur coût est la principale variable de décision, dans le compromis durée/ressource, l'analyse du problème d'accélération est avant tout focalisée sur les contraintes posées par les ressources. Il ne suffit plus ici de décider sur la base du seul élément monétaire, mais plutôt en tenant compte de tous les critères entourant la variable ressource en prenant appui sur l'élément discriminant que constitue l'appartenance identitaire des ressources. Cela revient à poursuivre comme objectifs dans une telle démarche, l'optimisation de l'utilisation des différents types de ressources et celle du temps, sous les contraintes de précédence, de disponibilité de ressources et de leur non fragmentation.

À partir de ces considérations, il devient alors clair que même si compromis durée/coût et compromis durée/ressource partagent assez de points en commun, ils ne sont pas tout à fait identiques. Leurs points communs s'appuient sur le principe sacré d'une

philosophie de gestion de projet selon lequel «time is money», principe bien intégré dans le triangle vertueux. Leurs divergences quant à elles, prennent appui sur le fait que «tout ce qu'on pense de plus précieux, l'argent n'achète pas» et que même si l'argent pouvait encore tout acheter, un montant d'argent d'une ressource *A* n'a pas la même signification que ce même montant d'argent pour une ressource *B*. C'est dans le but d'éviter un tel amalgame dans l'établissement du compromis nécessaire et vital pour le succès du projet en contexte de ressources multiples, de non fragmentation et de non substituabilité des ressources que nous avons opté, dans le cadre de la présente recherche, pour le compromis durée/ressource en lieux et places du compromis durée/coût.



### **1.3 Revue de la littérature en compromis durée/coût et compromis durée/ressource**

La plupart des recherches sur le problème d'accélération de projet ont suggéré des approches qui considèrent de façon implicite la possibilité de substitution entre les différents types de ressources et agrègent les coûts des différentes activités sans distinction.

Selon Burns, Liu et Feng (1996), étant donné que le temps et le coût constituent les deux principales préoccupations en contexte de projet, la relation entre ces deux facteurs pourrait, lors de la réalisation des activités du projet, conduire à un point où les deux éléments seraient optimisés. L'approche de compromis durée/coût qu'ils suggèrent utilise une programmation à deux étapes : la programmation linéaire et la programmation en nombre entier. Cette approche est connue sous l'appellation de méthode hybride LP/IP d'analyse du compromis durée/coût. Malgré toutes ses mérites, elle ne prend malheureusement en compte ni l'appartenance identitaire ni la criticité des ressources.

Ahn et Erenguc (1998) ont suggéré une procédure heuristique pour un problème de planification de projet sans pré-emption avec contraintes de ressources et qui est une combinaison naturelle du problème de compromis durée/coût et du problème d'ordonnement de projet avec contraintes de ressources. La méthode vise à déterminer la date de début (ou de fin) de chaque activité, son mode ainsi que sa durée, de manière à minimiser le coût total du projet. Dès lors que le coût total du projet dans cette approche est obtenu par la sommation des coûts des activités plus les coûts de pénalités pour avoir terminé le projet au-delà de la date prévue, nous considérons que, ni la diversité des ressources ni leur criticité ne sont respectées.

Demeulemeester, Herroelen et Elmaghraby (1996) décrivent deux algorithmes basés sur une logique de programmation dynamique pour résoudre de façon optimale le problème

discret de compromis durée/coût d'une manière déterministe, mais ils considèrent seulement l'utilisation d'une seule ressource non renouvelable.

Phillips (1996) présente une procédure application-orientée de résolution du problème de compromis durée/ressource en gestion de projet par la réduction de sa durée normale à sa durée accélérée à un incrément minimal de ressources additionnelles sous l'hypothèse de la linéarité de son utilisation. Sa procédure basée sur une approche graphique d'exploration par coupe pour repérer le niveau minimal de ressource à chaque réduction dans la durée totale du projet, considère un seul type de ressource et ne prévoit rien en cas de ressources multiples.

Toutes ces approches définies ultérieurement ne traduisent malheureusement pas toutes les réalités des projets. Cependant, l'évolution des travaux entrepris dans les problèmes de planification avec contraintes de ressources a inspiré certains chercheurs à analyser le problème d'accélération de projet sous forme de compromis durée/ressource où les ressources sont de plus en plus considérées de façon plus précise.

En travaillant sur le problème de planification de projet avec contraintes multiples de ressources, Patterson et Roth (1976) ont classé les contraintes de ressources de manière à se rapprocher des réalités des projets. Leur catégorisation des contraintes de ressources en trois types (ressources renouvelables, ressources non-renouvelables et ressources doublement contraintes) ont inspiré les approches de Weglarz (1981) et de Slowinski (1981). Ces derniers ont proposé des modèles de fonction durée/ressource à nombres entiers de ressources, où chaque activité est représentée par différents modes d'opération, chaque mode contenant des informations sur la durée de l'activité, la quantité de ressources renouvelables et de ressources non-renouvelables requises pour sa réalisation. Le rôle du gestionnaire de projet consiste ici à choisir le mode d'opération qui satisfèrait le plus la contrainte de durée et les contraintes des deux types de ressources (renouvelables et non-renouvelables) c'est à dire l'établissement d'un compromis durée/ressource.

En résumé, si certains auteurs ont soulevé l'importance de la considération exclusive de l'élément ressource dans le problème d'accélération de projet, les approches qui ont été élaborées ne traduisent pas toujours cette préoccupation d'une manière explicite. En résolvant le problème d'accélération sous forme de compromis durée/ressource et non plus de compromis durée/coût, plusieurs recherches ont démystifié ce vocable coût qui a toujours été utilisé de façon ambiguë faute de pouvoir détailler explicitement les éléments qui sont impliqués dans le compromis et ainsi mieux faciliter leur agrégation. Plusieurs types d'approches ont été élaborées sur ce compromis durée/ressource, chacun traitant différents aspects du problème mais rares sont les recherches qui traduisent de manière exhaustive tous les types de contraintes de ressources. Cependant, certaines approches s'en sont rapprochées, dont Pulat et Horn (1996).

Pulat et Horn (1996) abordent le problème de compromis durée/ressource dans un contexte d'utilisation de ressources multiples via la détermination d'ordonnements efficaces de projet dans un intervalle de temps de réalisation. Leur approche qui associe à chaque activité sa durée normale, l'intervalle maximal d'accélération permis ainsi que le coût unitaire pour chaque ressource, utilise la programmation linéaire multi-objective. Mais malheureusement, la solution obtenue par leur approche pourrait ne pas être entière quand bien même elle respecterait l'appartenance identitaire et la criticité des ressources.

Cette revue de la littérature montre que dans la réalisation du compromis durée/coût ou durée/ressource, il n'existe que deux grandes familles qui se partagent l'ensemble des approches élaborées jusqu'à date : l'optimisation et les heuristiques. C'est à ces deux grandes familles d'approches que nous nous intéressons dans le sous chapitre à suivre.

#### **1.4 Optimisation versus Heuristiques en contexte de ressources multiples**

En nous basant sur tous les éléments que nous avons développés jusqu'ici, la question qui se pose est la suivante: comment alors trouver une bonne méthode d'allocation de ressources dans le cas d'accélération de projet et régler ainsi le problème de compromis durée/ressource en contexte de ressources multiples? À cet effet, deux grandes familles de méthodes existent pour résoudre cette problématique :

- les méthodes exactes ou optimales;
- les méthodes heuristiques ou méthodes dites de règle de pouce.

Les techniques d'optimisation sont des approches algébriques et numériques basées sur la programmation mathématique. En planification opérationnelle de projet, une technique d'optimisation s'appuie sur une catégorie de variables de décision pour prouver l'existence d'un scénario qui s'avère le meilleur de tous les scénarios possibles. Ce scénario porte le nom de scénario ou de solution optimale. Avec les méthodes exactes, les problèmes de compromis durée/coût et durée/ressource sont traduits en termes mathématiques. La programmation linéaire, la programmation en nombres entiers et la programmation dynamique sont les techniques mathématiques de résolution généralement utilisées pour résoudre de tels problèmes. Des formes non linéaires sont également envisageables (Deckro, R.F., Hebert J.E., Verdini, W.A, Grimsrud P.H., and Venkateshwar, S., 1995) mais leur utilisation peut compliquer grandement la situation déjà très instable du gestionnaire de projet et par conséquent le dégoutter parce que très opaques à ses yeux.

Avec la résolution par programmation linéaire, Kelly (1961) a été un des premiers à établir et modéliser la relation linéaire entre la durée et le coût. Les options par activité ont cependant été limitées à deux. Suite à sa recherche, Meyer et Shaffer (1963) ont intégré la programmation en nombres entiers dans un modèle à partir de la relation linéaire et discrète entre la durée et le coût dans une même activité. Robinson (1975) a également développé la programmation dynamique dans l'interprétation des relations entre les activités pour certains types de réseaux .

Burns, Liu et Feng (1996) estiment que même si les techniques pour l'analyse du compromis durée/coût existent depuis plusieurs décennies, la réalité est telle que ces techniques sont rarement utilisées dans la planification courante des activités en gestion de projet. Dans l'industrie de la construction par exemple, ces auteurs soulignent que la plupart des ingénieurs ignorent les techniques d'optimisation et les rares ingénieurs qui utilisent la modélisation font principalement appel aux approches heuristiques.

En effet, malgré l'efficacité et la précision des approches mathématiques, la formulation des contraintes et des fonctions-objectifs peut être très laborieuse et facilement sources d'erreurs. D'autre part, la connaissance de la programmation mathématique est nécessaire afin de pouvoir formuler les modèles correctement.

Une heuristique est une méthode de résolution de problèmes complexes moins robuste mathématiquement mais plus basée sur le bon sens. Elle ne garantit pas de ce fait l'obtention d'une solution optimale mais plutôt d'une solution dont les performances sont en général assez bonnes et assez proches de la première. Cette atténuation de la robustesse permet un gain en temps et en coût qui y pousse spontanément les gestionnaires de projet. Mais le désavantage réside dans le fait que sa portée est plutôt contextuelle plutôt qu'universelle.

Les méthodes heuristiques sont aussi des approches non programmables le plus souvent manuelles, ce qui en constitue un autre désavantage. Burns, Liu et Feng (1996) ajoutent que même si les méthodes heuristiques ne fournissent pas la solution optimale et

malgré l'approximation et l'imprécision des résultats obtenus, en construction, la croyance des ingénieurs est telle que ces méthodes sont suffisantes et efficaces. Cette position est souvent défendue par ces derniers pour masquer leurs lacunes sur le plan technique. Les limites de ces méthodes se ressentent rapidement en présence des réseaux complexes et obligent les gestionnaires de projet à affronter le problème de compromis sur des bases plus solides au plan axiomatique.

Malgré le caractère approximatif des méthodes heuristiques, ce sont les approches qui sont privilégiées par les gestionnaires de projet à cause de leur côté pratique. De plus, les gestionnaires de projet, en supposant qu'ils aient la capacité et les compétences, n'ont pas toujours le temps, ni le goût de recourir à des techniques mathématiques sophistiquées telles que les méthodes d'optimisation.

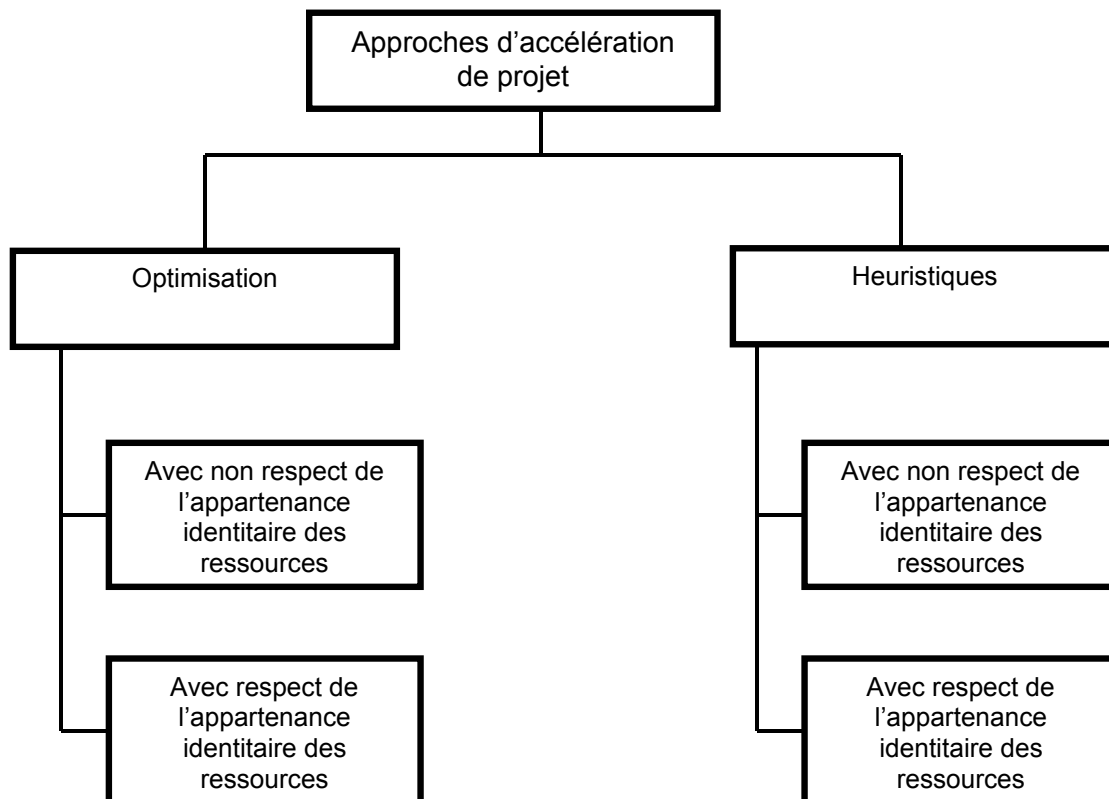
Burns, Liu et Feng (1996) pensent que dans le domaine de la construction par exemple, même si la majorité des professionnels admettent l'importance du problème de compromis durée/ressource, ils avouent aussi qu'il est généralement négligé à cause de la complexité de l'analyse. Seuls les gestionnaires avertis dans l'utilisation des techniques de recherche opérationnelle et d'applications informatiques expérimentent ces techniques.

Malheureusement, cette situation est assez courante en gestion de projet. Peu de gestionnaires sont formés pour effectuer ce genre d'opérations pourtant fondamentales dans l'atteinte des objectifs d'efficience et d'efficacité. Les méthodes mathématiques sont souvent sources de plaintes quant au niveau d'efforts nécessaires pour la formulation des modèles. Les gestionnaires de projet sont toujours à la recherche de méthodes pratiques et adaptables aux interfaces informatiques des logiciels courants en gestion de projet.

La question qui se pose est donc la suivante : existe-t-il des approches simples, faciles à utiliser et permettant de résoudre efficacement et de manière efficiente le problème de compromis durée/ressource surtout en contexte de multiplicité, de non fragmentation et de non substituabilité des ressources?

Phillips (1996) propose une méthode heuristique traitant de ce problème de compromis durée/ressource. Son modèle qui se veut être une solution optimale pour ce problème est basée sur l'exploration par coupe. Il soutient que la coupe minimale est utilisée pour établir le niveau minimal optimal de ressources et pour identifier l'ensemble d'activités qui seront modifiées afin de procéder à la réduction nécessaire.

Après cette clarification des deux grandes familles d'approches, nous pouvons procéder à une typologie des principaux outils en accélération de projet de la façon suivante :



**Figure 1 : Typologie des outils en accélération de projet**

Au vu de cette typologie, dans la famille des méthodes d'optimisation, font partie des approches optimales avec non respect de l'appartenance identitaire des ressources les travaux de Burns, Liu et Feng (1996), de Demeulemeester, Herroelen et Elmaghraby (1996), Ahn et Erenguc (1998) et de Icmeli et Erenguc (1995). La recherche de Pulat et

Horn (1996) pourrait éventuellement se classer dans la catégorie des approches optimales avec respect de l'appartenance identitaire des ressources. Cependant, il est à reconnaître l'existence d'un vide instrumental dans cette deuxième catégorie.

Dans la famille des méthodes heuristiques, font partie des approches heuristiques avec non respect de l'appartenance identitaire des ressources, les travaux de Siemens (1971) et de Phillips (1996). À notre connaissance, dans la catégorie des approches heuristiques avec respect de l'appartenance identitaire des ressources, le vide instrumental est total.

C'est pourquoi, dans le cadre de ce mémoire, nous nous fixons comme objectifs de contribuer à combler les vides instrumentaux au niveau de la catégorie d'approches optimales avec respect de l'appartenance identitaire des ressources et de celle des approches heuristiques avec respect de l'appartenance identitaire des ressources. Cette contribution consistera en l'élaboration d'un modèle d'optimisation en accélération de projet avec respect de l'appartenance identitaire des ressources et d'une approche heuristique en accélération de projet avec respect de l'appartenance identitaire des ressources.



**CHAPITRE 2 : MODÉLISATION DU PROBLÈME DE COMPROMIS  
DURÉE/RESSOURCE EN CONTEXTE DE RESSOURCES MULTIPLES :  
APPROCHES OPTIMALE ET HEURISTIQUE.**

## **2.1. Fondements multi-objectifs du compromis durée/ressource**

Comme nous avons eu à le dire dans le chapitre précédent, la réalité d'un projet est à points de vue multiples, ce qui fait de la gestion du projet en général et de la planification du projet en particulier, des activités à objectifs multiples. Il va de soi alors que, l'agrégation unicritère des coûts des différents types de ressources impliqués dans le projet, plus qu'une simple façon de traquer la réalité à travers un seul prisme, constitue un appauvrissement réel du problème posé, appauvrissement aux conséquences très lourdes.

Dans la décision d'accélération, la prise en compte de la criticité de chaque type de ressource s'avère très importante en gestion de projet si l'on veut éviter de pénaliser l'aboutissement et le succès du projet. La minimisation du coût du projet sans la prise en compte de cette criticité pourrait devenir une décision dangereuse et fort préjudiciable. Elle n'aurait alors de sens que si elle prenait en compte la minimisation du niveau d'implication (utilisation) des types de ressources. Dès lors que ce montant de chaque type de ressources utilisé s'exprime plutôt mieux physiquement, nous pouvons alors conclure au fait que, ensemble avec la minimisation du coût du projet, la minimisation du niveau de consommation des types de ressources est également un objectif fortement désiré pour le gestionnaire de projet. De ce fait, la minimisation de la consommation de chaque type de ressources devient un objectif devant aller de paire avec celle de la durée du projet. Malheureusement, peu de recherches ont abordé le problème d'accélération sous l'aspect de compromis durée/ressource et le compromis durée/ressource sous l'aspect multiobjectif que nous venons d'évoquer. La contribution de Pulat et Horn (1996) sur ce plan a été d'une grande portée.

Dans un contexte de multiplicité des types de ressources, une vision multiobjective du compromis durée/ressource serait incomplète si elle n'intégrait pas la non divisibilité

des ressources et l'impossibilité d'interchangeabilité de ces dernières d'un type à l'autre. Il en découle alors deux hypothèses fondamentales à prendre en compte :

***Hypothèse 1 (hypothèse intra-type de ressources ou de non fragmentation) :*** Pour un même type de ressources, il est impossible de fragmenter une unité pour l'utiliser simultanément sur des activités différentes.

***Hypothèse 2 (hypothèse extra-type de ressources ou de non substituabilité) :*** Étant donné les différences physiques et utilitaires des types de ressources, il est impossible dans le processus de réalisation du projet, de substituer un type de ressources manquant par un autre type excédentaire pour résorber la pénurie du premier.

La multiplicité des types de ressources induit la nature multiobjective du problème de compromis durée/ressource. L'hypothèse 1 de non fragmentation signifie la nature entière des besoins et disponibilités en ressources de chaque type à chaque instant. L'hypothèse 2 de non substituabilité quant à elle, dicte le pilotage du problème multiobjectif via des objectifs de rationalisation de ressources type par type. Toute approche de compromis durée/ressource développée, que ce soit optimale ou heuristique, doit par conséquent intégrer en un tout, tous ces trois éléments. Il devient dès lors clair que ces trois éléments constituent les fondements multiobjectifs du compromis durée/ressource.

Parmi les rares recherches ayant abordé cette approche multiobjective du problème posé, celle de Pulat en Horn (1996) mentionnée plus haut s'est intéressée audit problème via la détermination de plans efficaces du projet pour une série de temps de réalisation du projet. Leur approche qui associe à chaque activité sa durée normale, l'intervalle maximal d'accélération et le coût unitaire pour chaque ressource s'appuie sur la programmation linéaire multiobjective mais malheureusement, la solution obtenue par l'approche préconisée, bien que respectant l'hypothèse de non substituabilité, pourrait ne pas être entière.

Dans notre revue de littérature, la plupart des recherches qui traitent du problème d'accélération de projet utilisent un compromis durée/coût discret. Cela signifie que les durées des activités selon les options de réduction doivent être entières et non continues. C'est ce qu'ont suggéré des recherches comme celles de Demeulemeester, De Reyck et Herroelen (2000), de Demeulemeester, Herroelen et Elmaghraby (1996), de Burns, Liu et Feng (1996), de Phillips (1996) ou de Prabuddha, Dunne, Ghosh et Wells (1995). Cependant, il n'en existe presque pas à notre connaissance qui considère la condition de non fragmentation des ressources, les ressources ayant été considérées jusqu'ici comme un ensemble agrégé sous une unité de mesure commune.

Enfin, la condition de non substituabilité des ressources n'est pas moins importante à cause du fait qu'elle traduise une des principales préoccupations des gestionnaires de projet quant à la décision à prendre lors de la réallocation des différents types de ressources engagées sur chaque activité. Nous sommes d'avis qu'il n'est pas encore envisageable ni possible de pouvoir toujours remplacer une ressource humaine par une machine même si l'évolution technologique le permet de plus en plus. De plus, chaque type de ressource engagée dans un projet a des fonctionnalités et des compétences qui lui sont propres. Une grue par exemple ne peut pas remplacer une bétonneuse comme un maçon ne peut pas remplir les fonctions d'un ingénieur. Cette hypothèse signifie que, lors de la résolution du compromis durée/ressource, le gestionnaire a à sa disposition, l'information quant au nombre minimum ou au coût minimum (dans le cas d'optimisation) de ressources de chaque type devant être alloué à l'activité pour une durée désirée.

Jusqu'ici, rares sont les approches qui ont traité le problème d'accélération de projet tel que nous le posons, avec la prise en compte de la condition de non substituabilité. Comme nous l'avons évoqué plus haut, en résolvant le problème via la programmation linéaire multi-objectifs, Pulat et Horn (1996) sont parmi les seuls à notre avis, à avoir pris en compte la nécessité de considérer les ressources type par type.

La prise en compte de tous ces aspects soulevés doit, selon nous, consister en l'élaboration d'outils nouveaux capables de contribuer à combler le vide instrumental

existant présentement tant sur le plan des approches optimales que sur le plan des approches heuristiques de compromis durée/ressource. Dans le sous chapitre suivant, nous nous proposons d'élaborer une approche optimale de compromis durée/ressource dans ce contexte précis, en utilisant la programmation linéaire multiobjectifs en nombres entiers que nous baptisons « Multi Objective Linéaire Integer Programming (MOLIP)».

## **2.2. Une approche optimale du compromis durée/ressource en contexte de ressources multiples : le MOLIP**

Pour traiter ce problème de compromis durée/ressource, dans la grande famille des méthodes mathématiques, nous suggérons une approche d'optimisation plus réaliste et plus actuelle à notre avis, car intégrant les conditions citées ultérieurement. Notre approche s'inspire essentiellement des travaux de Pulat et Horn (1996) et intègre certains des aspects qu'ils ont abordés. MOLIP va considérer séparément le niveau d'utilisation de chaque type de ressource. L'agrégation compensatoire via les coûts sera ainsi évitée et l'hypothèse de non substituabilité respectée. De plus, selon Burns, Liu et Feng (1996), dès lors que le problème consiste à accélérer des activités entières (durée entière), pour avoir une solution exacte à ce problème de compromis durée/ressource, il est nécessaire d'assigner des valeurs entières aux durées des activités accélérées.

Sous ces différentes conditions et sous l'hypothèse de non fragmentation des ressources développée ultérieurement, pour résoudre ce problème de compromis durée/ressource, nous suggérons une approche basée sur la programmation linéaire multi-objectifs en nombres entiers (MOLIP).

Étant donné un réseau de  $n$  nœuds indiquant les réalisations d'événements, un ensemble de flèches  $A$  désignant les tâches à accomplir dans le projet avec chaque flèche  $(i,j) \in A$  représentant une tâche ou activité unique, un réseau de projet représenté de telle sorte que toutes les relations de précedence entre les tâches sont visibles, nous faisons l'hypothèse que le coût des ressources et la durée du projet sont liés de façon linéaire. Nous associons à chaque activité  $(i,j) \in A$ , une durée normale  $M_{ij}$  et une disponibilité d'accélération  $\delta_i$  sur la base desquelles le gestionnaire de projet se fixe comme objectifs de

déterminer l'ordonnancement efficient du projet, c'est à dire celui pour lequel il n'existe aucun autre ordonnancement qui, pour la même durée  $t_n$ , aurait le coût le plus bas pour l'ensemble des ressources. Un tel objectif en contexte d'accélération de projet signifie compresser le projet à une durée désirée  $t_n(\text{min}) \leq t_n \leq t_n(\text{normal})$  à un incrément de coût minimal pour toutes les ressources. Le  $t_n(\text{min})$  représente la durée minimale de réalisation techniquement possible pour une activité donnée. L'incrément de coût minimal pour toutes les ressources implique la poursuite de cet objectif sur chaque type de ressource. Ensemble avec l'objectif précédemment mentionné à propos de la durée du projet, nous nous retrouvons ainsi en présence d'un problème à objectifs multiples.

Un tel problème peut être résolu selon nous via la programmation linéaire multi-objectifs en nombres entiers. C'est ce modèle que nous dénommons par la suite dans ce mémoire comme le MOLIP. Le problème de compromis peut se formuler comme suit :

$$\text{Min } z_1 = \sum_{(i,j) \in A} a_{ij}^1 y_{ij}$$

$$\text{Min } z_2 = \sum_{(i,j) \in A} a_{ij}^2 y_{ij}$$

.....

$$\text{Min } z_K = \sum_{(i,j) \in A} a_{ij}^K y_{ij}$$

$$\text{Min } z_{K+1} = t_n$$

sujet a:

$$t_j - t_i + y_{ij} \leq M_{ij}, \forall (i,j) \in A$$

$$y_{ij} \leq \delta_{ij}, \forall (i,j) \in A$$

$$t_i \geq 0, \forall i = \overline{1, n}$$

$$y_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in A$$

$$t_i \text{ entier}, \forall i = \overline{1, n}$$

$$y_{ij} \text{ entier}, \forall (i,j) \in A$$

où :

$t_i$  = temps de réalisation du noeud  $i$ ;

$M_{ij}$  = durée normale de l'activité  $(i, j)$ ;

$\delta_{ij}$  = accélération permise sur l'activité  $(i, j)$ ;

$y_{ij}$  = accélération réelle sur l'activité  $(i, j)$ ;

$a_{ij}^k$  = coût d'une unité additionnelle de la ressource  $k$  requise pour accélérer l'activité  $(i, j)$

d'une unité de temps,  $k = 1, 2, \dots, K$ ;

$A$  = ensemble d'activités dans le réseau du projet ;

$n$  = nombre de noeuds dans le réseau du projet.

Dans ce modèle, les fonctions-objectifs  $z_1, \dots, z_K$  minimisent le coût de consommation des ressources de 1 à  $K$  et  $z_{K+1}$  minimise la durée totale du projet. Le modèle pourrait être utilisé pour énumérer sur  $z_{K+1}$  toutes les options entières de  $t_n$  comprises entre  $t_n$  (*min*) et  $t_n$  (*normal*) et ainsi obtenir la meilleure solution correspondant



à chacune des options  $t_n$ . Cela signifie que pour un  $t_n$  donné, l'ensemble le moins coûteux des activités est déterminé et accéléré dans les limites possibles, ce qui réduit le temps de réalisation du projet. Les contraintes utilisées dans le modèle préservent les relations de précedence entre les activités et garantissent que ces dernières ne seront pas compressées au delà de leurs limites et que le coût minimal du projet est atteint dès lors que toutes les activités sur le chemin allant du nœud  $l$  au nœud  $n$  ont atteint leur temps de réduction permis.

Ainsi, nous avons six catégories de contraintes principales dans ce modèle et qui pourraient se traduire comme suit :

- Catégorie 1 : pour une activité  $(i,j)$ , le temps de réalisation de l'événement tête  $j$  moins le temps de réalisation de l'événement queue  $i$ , plus la réduction réelle opérée sur cette activité devrait équaler tout au moins la durée normale de cette activité. Traduite de façon littéraire, cela signifie que le délai entre l'occurrence des deux événements marquant une activité (début et fin) majoré de la réduction réelle opérée sur cette activité devrait tout au moins équaler la durée normale de cette dernière.
- Catégorie 2 : pour toute activité  $(i,j)$ , la réduction réelle opérée sur cette activité devrait au plus équaler à la durée normale de cette activité.
- Catégorie 3 : aucun événement relié à une activité du projet ne saurait précéder le début du projet.
- Catégorie 4 : toute réduction sur une activité du projet devrait tout au moins être égale à zéro, cela veut dire de façon littéraire que sur une activité donnée, la réduction est possible ou impossible, c'est à dire qu'on ne peut pas décélérer une activité.
- Catégorie 5 : le début de tout événement (début ou fin) relié à une activité est un nombre entier d'unité de temps.
- Catégorie 6 : la réduction opérée sur toute activité du projet s'exprime en unités entières de temps.

La formulation d'un tel modèle, compte tenu des difficultés qu'elle comporte peut éventuellement décourager le gestionnaire non préparé à l'utilisation des outils robustes en

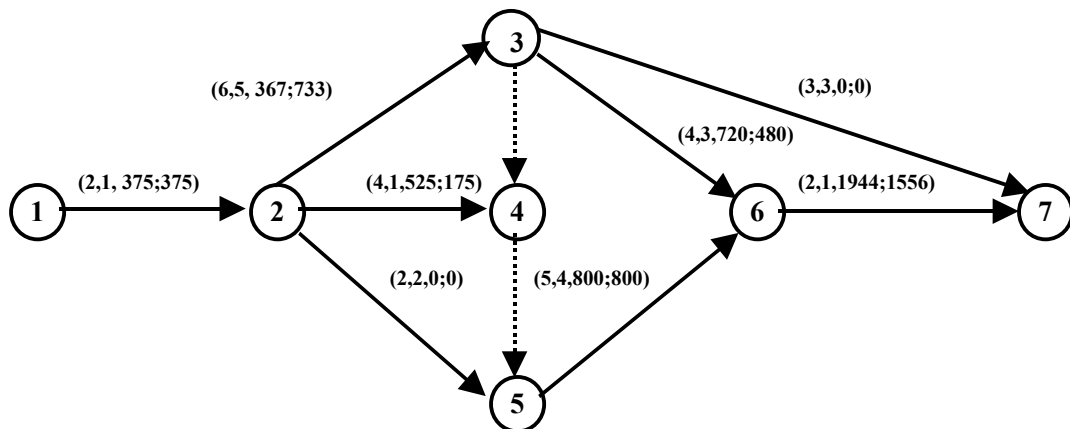
contrôle et suivi des projets. Étant donné que de nos jours, cette catégorie de gestionnaires demeure malheureusement la catégorie majoritaire, combler le vide de compromis durée/ressource uniquement au plan optimal quoique certes une bonne chose, demeure cependant insuffisant. Il est donc nécessaire de réaliser cette tâche également au plan heuristique. C'est à cela que nous consacrons le sous-chapitre à suivre.

### 2.3. Une méthode heuristique de compromis durée/ressource en situation de ressources multiples : l'AMEC

Dans la famille des méthodes heuristiques, nous suggérons une approche intégrant un certain nombre d'aspects contenus dans Phillips (1996) et considérant aussi séparément la consommation de ressources par type de ressources. Elle évite également dans cette famille, l'agrégation compensatrice et respecte alors l'hypothèse de non substituabilité. L'outil que nous suggérons est une approche heuristique qui modifie l'exploration par coupe traditionnelle proposée par Phillips. Nous l'appelons de ce fait l'Approche Modifiée d'Exploration par Coupe (AMEC).

Nous utilisons également un mode de réseautage avec activités sur flèches et notons les activités sous la forme  $(i,j)$ . Chacune de ces activités a sur chaque ressource  $k$ , trois paramètres: la durée normale  $n$ , la durée accélérée  $r$  et le taux d'utilisation de ressource ( la pente de coût)  $c_k$ , ce qui conduit au triplet  $(n, r, c_k)$ . L'algorithme que nous suggérons pour AMEC est composée des étapes suivantes:

1. *Construire le réseau avec activités sur flèches*: il s'agit ici de préparer le réseau du projet et de lister les paramètres  $(n, r, c_k)$  pour chaque activité et pour chaque ressource. Cela pourrait s'illustrer à l'aide du projet suivant où nous supposons l'utilisation de deux ressources, ce qui s'écrit comme suit  $(n, r, c_1; c_2)$ :



**Figure 2 : Réseau avec pentes de coûts**

2. Identifier le chemin critique, fixer la nouvelle durée désirée du projet et tous les chemins de longueur supérieure à cette durée : le chemin critique est la séquence d'activités déterminant la durée totale du projet et représentant le ou les chemins avec la plus longue durée. Les autres chemins dont la longueur est supérieure à la durée accélérée désirée pour le projet sont également pris en compte parce que nécessitant eux aussi de réduction pour rentrer dans la durée désirée. Dans le cas de notre exemple, nous avons:

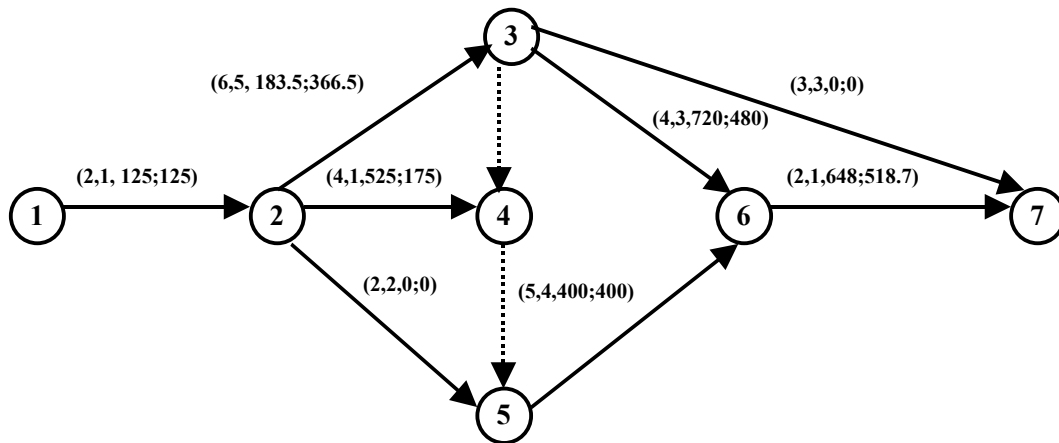
Chemin critique: (1,2) (2,3) (5,6) (6,7) = 15 jours

Nouvelle durée désirée pour le projet: 11 jours

Chemins excédant 11 jours: (1,2) (2,3) (3,6) (6,7) = 14 jours et (1,2) (2,4) (5,6) (6,7) = 13 jours

3. Déterminer pour chacune des activités ayant une possibilité de réduction la pente effective de coût relative à chaque ressource  $e_k$ : la pente effective de coût relative à chaque ressource sur chaque activité est égale au taux d'utilisation de la ressource divisé par le nombre de chemins identifiés à l'étape 2 sur lesquels se trouve cette activité.

4. Substituer les pentes effectives de coût aux pentes de coût dans les paramètres de chaque activité: nous obtiendrons suite à cela dans le cas du réseau précédent les nouveaux paramètres  $(n, r, e_1; e_2)$ : suivants:



**Figure 3 : Réseau avec pentes effectives de coût**

5. *Déterminer les valeurs de paramètres de flux* : les valeurs des paramètres de flux seront déterminées avec les paramètres obtenus par substitution des pentes effectives de coût relatives à chaque ressource sur chaque activité aux pentes de coût respectives. Les paramètres de flux sont alors la borne inférieure  $l_k(i,j)$  et la borne supérieure  $s_k(i,j)$  pour chaque activité  $(i,j)$  et sont établis en se basant sur l'état de criticité de l'activité  $(i,j)$  dans le réseau actuel, et selon que la durée de cette activité est normale, intermédiaire ou accélérée. Les valeurs de  $l_k(i,j)$  et de  $s_k(i,j)$  notées  $(l_k, s_k)$  sont déterminées à l'aide des règles suivantes:

$$(i,j) \text{ critique et normale: } (l_k, s_k) = (0, e_k)$$

$$(i,j) \text{ critique et intermédiaire: } (l_k, s_k) = (e_k, e_k)$$

$$(i,j) \text{ critique et accélérée : } (l_k, s_k) = (e_k, \infty)$$

$$(i,j) \text{ non critique: } (l_k, s_k) = (0, 0)$$

Les paramètres de flux dans le cas de notre exemple peuvent s'obtenir à partir de cette règle comme suit:

**Tableau 1: Paramètres de flux du projet**

Activités	État	$(l_1, s_1)$	$(l_2, s_2)$
(1,2)	Critique et normale	(0, 125)	(0, 125)
(2,3)	Critique et normale	(0, 183.5)	(0, 366.5)
(2,4)	Non critique	(0,0)	(0,0)
(2,5)	Non critique	(0,0)	(0,0)
(3,6)	Non critique	(0,0)	(0,0)
(5,6)	Critique et normale	(0, 400)	(0,400)
(3,7)	Non critique	(0,0)	(0,0)
(6,7)	Critique et normale	(0, 648)	(0, 518.7)

6. *Identifier les coupes dans le réseau de flux:* le réseau de flux est préparé en utilisant les valeurs  $(l_k, s_k)$ . La configuration de réseau de flux est la même que le réseau d'activités sur flèches à la seule différence que les paramètres de durées sont remplacés par les paramètres de flux  $(l_k, s_k)$ . Les coupes  $(W, W')$  dans le réseau sont opérées graphiquement. La coupe  $(W, W')$  est définie comme l'ensemble des activités  $(i,j)$  telles que:

- a.  $W$  contient la source (**S**)
- b.  $W'$  contient la queue (**Q**)
- c. Le passage de chaque activité  $(i,j)$  entre  $W$  et  $W'$  empêcherait le flux d'aller de la source à la queue.

Dans notre exemple, nous pouvons localiser deux coupes comme suit:

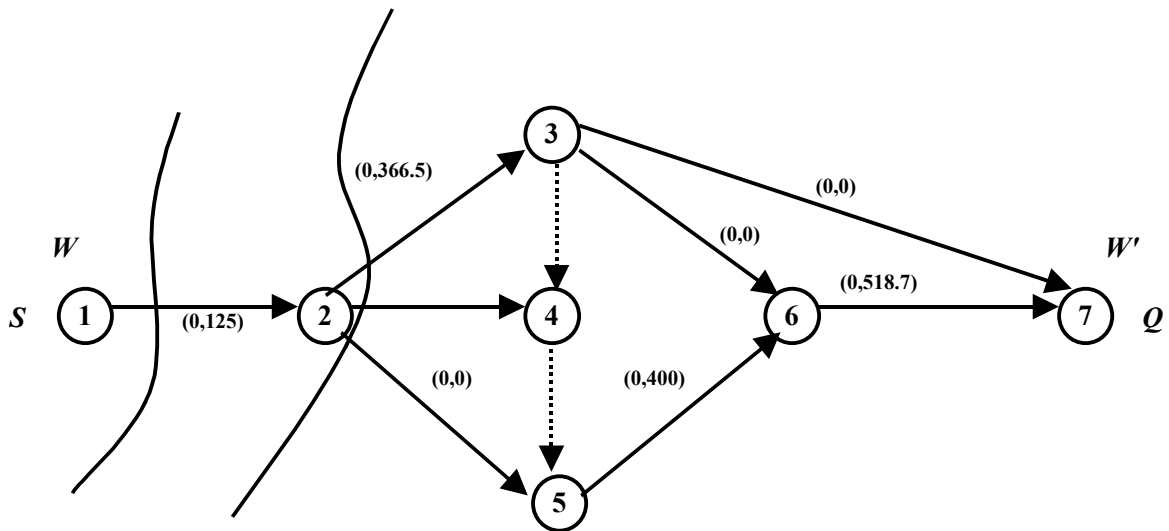


Figure 4: Réseau avec deux coupes

7. Localiser la valeur de la coupe minimale: La valeur de la coupe minimale  $K_k^*(S, Q)$  est égale à:

$$K_k^*(S, Q) = \min K_k(W, W') \quad (1)$$

Pour chaque ressource  $k$ ,  $K_k(W, W')$  est défini comme la somme des  $s_k(i, j)$  pour toutes les flèches allant de  $W$  à  $W'$  moins la somme des  $l_k(j, i)$  pour toutes les flèches allant de  $W'$  à  $W$  et se calcule comme suit:

$$K_k(W, W') = \sum_{i \in W, j \in W'} s_k(i, j) - \sum_{j \in W', i \in W} l_k(j, i) \quad (2)$$

Dans le cas de notre exemple, les valeurs des deux coupes représentées ci-haut sont données dans le tableau suivant:

**Tableau 2: Valeurs des deux premières coupes**

Coupes	Activités allant de $W$ à $W'$	Activités allant de $W'$ à $W$	$K_1(W, W')$	$K_2(W, W')$
1	(1,2)	aucun	$125+0=125$	$125+0=125$
2	(2,3) (2,4)	aucun	$183.5+0+0=183.5$	$366.5+0+0=366.5$

8. *Test du critère de finition de la séquence:* si pour chaque ressource  $k$  la somme des valeurs de  $K_k^*(S,Q)$  à chaque itération est tout au moins égale à un montant  $(F_k)$  alors nous allons directement à l'étape 15, sinon on continue. Le montant  $(F_k)$  est une limite fixe imposée au total des dépenses supplémentaires allouées à la ressource  $k$  pour réduire la durée totale du projet jusqu'à l'itération en cours. Il est soit un montant fixe ou illimité. La fixation de ce montant doit faire l'objet de négociation entre le gestionnaire de projet, son organisation et l'organisation cliente. Dans le cas de notre exemple, nous supposons  $(F_k)$  illimité pour chacune des deux ressources et dans ce cas, nous avons:  $K_1^*(S,Q) = 125, K_2^*(S,Q) = 125$ .
9. *Établir l'ensemble de modifications du réseau:* Il s'agit d'identifier l'ensemble  $M_k$  des activités  $(i,j)$  qui existent entre  $W$  et  $W'$  pour la coupe correspondant à la valeur de  $K_k^*(S,Q)$ . Dans notre exemple,  $M_1 = M_2 = \{(1,2)\}$ .
10. *Vérification des coupes sur lesquelles se trouve chaque  $K_k^*(S,Q)$ :* étant donné la multiplicité des ressources, les valeurs des coupes minimales des différentes ressources peuvent soit se retrouver sur la même coupe (dans ce cas, les  $M_k$  seront identiques), ou sur des coupes différentes (dans ce cas, les  $M_k$  seront différents) à une itération donnée.



11. *Ajustement de la durée de la ou des activités du projet*: la modification des ensembles  $M_k$  se fait sur la base de l'état de l'activité  $(i,j)$ . Les états de chaque activité  $(i,j)$  sont établis à partir du fait que la flèche dans le flux du réseau est une flèche entrante (allant de  $W$  à  $W'$ ) ou sortante (allant de  $W'$  à  $W$ ) et du fait que l'activité correspondante est critique ou non critique, en utilisant les règles suivantes:

$(i,j)$ entrant et critique:	réduire sa durée d'une unité
$(i,j)$ sortant et critique:	augmenter sa durée d'une unité
$(i,j)$ entrant et non critique :	pas de changement
$(i,j)$ sortant et non critique:	pas de changement

Ces règles appliquées à notre exemple donnent:  $(1,2)$  entrant et critique: réduire  $(1,2)$  d'un jour au coût total de  $(375 + 375) = 750\$$ .

12. *Ajuster la durée de la ou des activités du projet pour chacune des coupes sur lesquelles se trouvent un  $K_k^*(S,Q)$* : dans le cas où la valeur de la coupe minimale pour chacune des ressources se trouverait sur plusieurs coupes différentes, reprendre l'ajustement de l'étape 11 pour chacune d'elles.

13. *Réviser le réseau avec activités sur flèches*: cette révision consiste à incorporer la ou les activités réduites du ou des ensembles  $M_k$ .

14. *Répéter la procédure*: à partir de l'étape 2, répéter toutes les autres étapes.

15. *Déduire la courbe durée/ressource* : pour chacune des différentes réductions faites, donner la durée et le coût total correspondant du projet.

Les principales différences entre la méthode AMEC ainsi conçue et l'Exploration par Coupe Classique (ECC) de Phillips (1996) sont les suivantes:

- ECC utilise une pente de coût unique pour l'ensemble des ressources, ce qui suppose l'agrégation de leur coût alors que AMEC utilise des pentes de coûts relatives à chaque ressource sur chaque activité, ce qui suppose le respect de l'identité des ressources;
  
- Dans ECC, la décision d'accélération est basée sur les pentes de coût des activités alors que dans AMEC, la décision d'accélération est basée sur les pentes effectives de coût relatives à chaque ressource sur chaque activité c'est à dire la pente de coût divisée par le nombre de chemins de durées supérieures à la durée recherchée sur lesquelles se trouve cette activité. AMEC répercute de ce fait l'incrément de coût sur l'ensemble des chemins qu'affecte la réduction de cette activité.
  
- ECC utilise l'algorithme de Phillips (1996) tandis que AMEC utilise un algorithme modifié que nous proposons dans cette recherche.

## **2.4. Contribution des deux approches à l'amélioration de la performance de projet**

Les deux approches ainsi développées viennent incontestablement combler un vide. Ce vide à première vue semble seulement méthodologique mais à y regarder profondément, il est porteur de grands espoirs dans l'amélioration de la performance de projet et du succès du projet.

Au plan pratique, la prise en compte de la multiplicité des ressources attire l'attention du gestionnaire de projet sur la nécessité de regarder le problème de gestion des ressources sous l'angle de leur appartenance identitaire, de leur profil et non seulement du point de vue de leur amalgame sous forme pécuniaire.

D'un autre côté, l'introduction de la notion de non substituabilité des différents types de ressource avise le gestionnaire de projet sur la grande prudence et l'attention particulière à accorder à l'allocation de ces ressources dans le but d'éviter des pénuries fatales pour l'aboutissement du projet et par conséquent pour son succès. La chose est d'autant plus importante que dans un contexte de multiplicité des ressources, la pénurie en un seul type de ressource peut faire glisser tout le projet. Cette notion de non substituabilité souligne d'avantage l'importance de l'analyse de l'indice de criticité des ressources sur la performance du projet.

Enfin, l'impact du concept de non fragmentation de la ressource apparaît selon nous beaucoup plus évident. Il met l'emphase sur le fait que des ressources existent, comme la machinerie par exemple, qui ne sauraient être engagées partiellement à une activité d'un projet. Par rapport à de telles ressources, les calculs des besoins moyens sous forme

fractionnaire peuvent à un certain moment donné devenir rédhibitoires et compliquer l'analyse de performance des projets.

C'est l'ensemble de ces acquis qui nous ont amené à tirer comme conclusion que les deux approches MOLIP et AMEC contribuent à améliorer la gestion de projet tant sur le plan méthodologique que sur le plan pratique et représentent de ce fait, des outils précieux aux mains des gestionnaires de projet pour aborder la problématique d'accélération avec plus d'optimisme et de confiance.

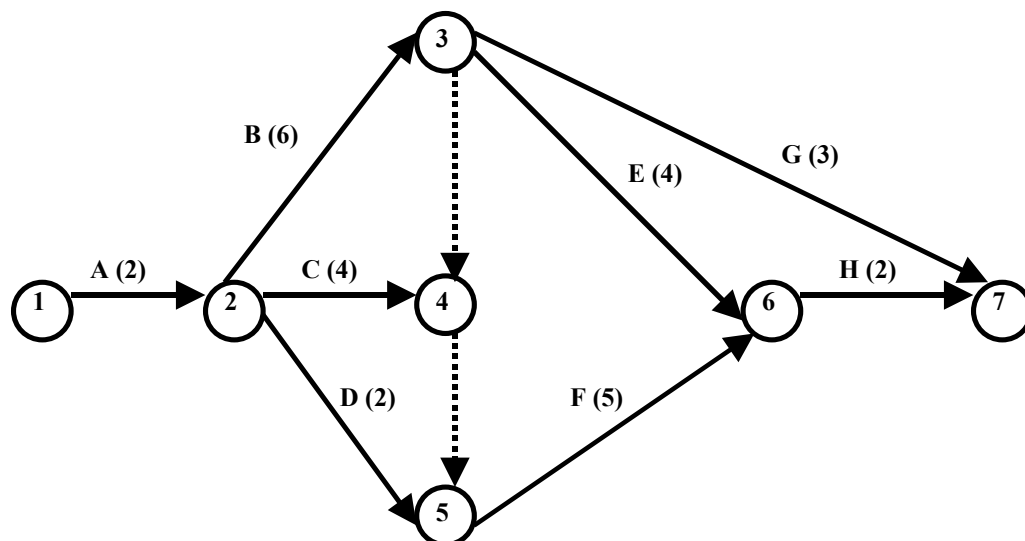
**CHAPITRE 3 : ILLUSTRATION ET ANALYSE COMPARATIVE DES DEUX  
APPROCHES**

### 3.1. Contexte du projet d'application

A titre d'exemple, illustrons les deux approches (MOLIP et AMEC) à l'aide d'un même projet. À cet effet, nous prenons un projet de petite envergure (8 activités) avec les relations de précédence, la durée normale et le coût normal. Ce projet utilise deux types de ressources non substituables et non fragmentables (hypothèses 1 et 2). Les données de base ainsi que le réseau du projet sont les suivantes :

**Tableau 3: Données de base du projet**

Activités	Prédécesseurs	Durée normale (jours)	Coût normal (\$)
A	---	2	1500
B	A	6	5400
C	A	4	2400
D	A	2	1200
E	B	4	3000
F	B,C,D	5	8000
G	B	3	1200
H	E,F	2	6000



**Figure 5: Réseau du projet**

Les calculs CPM pour déterminer le chemin critique et la durée du projet sont comme l'indiquent le tableau ci-après :

**Tableau 4: Calculs CPM**

Activité	Durée	Prédécesseurs immédiats	Début au plus tôt	Fin au plus tôt	Successeurs immédiats	Début au plus tard	Fin au plus tard	Marge
A	2	---	0	2	B,C,D	0	2	0
B	6	A	2	8	E,F,G	2	8	0
C	4	A	2	6	F	4	8	2
D	2	A	2	4	F	6	8	4
E	4	B	8	12	H	9	13	1
F	5	B,C,D	8	13	H	8	13	0
G	3	B	8	11	---	12	15	4
H	2	E,F	13	15	---	13	15	0

Comme l'indiquent les calculs CPM, la durée du projet est de 15 jours et le chemin critique est A-B-F-H. Le coût normal du projet est de 28 700\$ (voir tableau 3). Prenant en considération les paramètres d'accélération, appliquons le modèle MOLIP au projet avec comme objectif l'accélération du projet à une durée totale de 11 jours.

### 3.2. Application optimale

Les données complémentaires requises pour l'application du modèle MOLIP figurent dans le tableau ci-après :

**Tableau 6: Paramètres requis pour l'application de MOLIP au projet**

Activités	Prédécesseurs	Durée normale ( $M_{ij}$ )	Coût normal (\$)	$a^1_{ij}$ (\$ par jour)	$a^2_{ij}$ (\$ par jour)	$\delta_{ij}$ (jours)
A	---	2	1500	375	375	1
B	A	6	5400	367	733	1
C	A	4	2400	525	175	3
D	A	2	1200	----	----	----
E	B	4	3000	720	480	1
F	B,C,D	5	8000	800	800	1
G	B	3	1200	----	----	----
H	E,F	2	6000	1944	1556	1

Sur la base de ces paramètres du projet et de son réseau, nous pouvons formuler le problème d'accélération comme suit :



$$\text{Min } z_1 = 375y_{12} + 367y_{23} + 525y_{24} + 720y_{36} + 800y_{56} + 1944y_{67}$$

$$\text{Min } z_2 = 375y_{12} + 733y_{23} + 175y_{24} + 480y_{36} + 800y_{56} + 1556y_{67}$$

$$\text{Min } z_3 = t_7$$

*sujet à*

$$t_2 - t_1 + y_{12} \leq 2$$

$$t_3 - t_2 + y_{23} \leq 6$$

$$t_4 - t_2 + y_{24} \leq 4$$

$$t_5 - t_2 + y_{25} \leq 2$$

$$t_6 - t_3 + y_{36} \leq 4$$

$$t_6 - t_5 + y_{56} \leq 5$$

$$t_4 - t_3 + y_{34} \leq 0$$

$$t_5 - t_4 + y_{45} \leq 0$$

$$t_7 - t_3 + y_{37} \leq 3$$

$$t_7 - t_6 + y_{67} \leq 2$$

$$y_{12} \leq 1$$

$$y_{23} \leq 1$$

$$y_{24} \leq 3$$

$$y_{25} \leq 0$$

$$y_{34} \leq 0$$

$$y_{45} \leq 0$$

$$y_{36} \leq 1$$

$$y_{37} \leq 0$$

$$y_{56} \leq 1$$

$$y_{67} \leq 1$$

$$t_1 \geq 0$$

$$t_2 \geq 0$$

$$t_3 \geq 0$$

$$t_4 \geq 0$$

$$t_5 \geq 0$$

$$t_6 \geq 0$$

$$t_7 \geq 0$$

$$y_{12} \ ? \ 0$$

$$y_{23} \ ? \ 0$$

$$y_{24} \ ? \ 0$$

$$y_{25} \ ? \ 0$$

$$y_{34} \ ? \ 0$$

$$y_{45} \ ? \ 0$$

$$y_{36} \ ? \ 0$$

$$y_{37} \ ? \ 0$$

$$y_{56} \ ? \ 0$$

$$y_{67} \ ? \ 0$$

$$t_1 \text{ entier}$$

$$t_2 \text{ entier}$$

$$t_3 \text{ entier}$$

$$t_4 \text{ entier}$$

$$t_5 \text{ entier}$$

$$t_6 \text{ entier}$$

$$t_7 \text{ entier}$$

$$y_{12} \text{ entier}$$

$$y_{23} \text{ entier}$$

$$y_{24} \text{ entier}$$

$$y_{25} \text{ entier}$$

$$y_{34} \text{ entier}$$

$$y_{45} \text{ entier}$$

$$y_{36} \text{ entier}$$

$$y_{37} \text{ entier}$$

$$y_{56} \text{ entier}$$

$$y_{67} \text{ entier}$$

L'approche MOLIP énumère toutes les valeurs discrètes de  $t_n$ , de  $t_n (min)$  à  $t_n (normal)$  et génère l'ensemble des solutions optimales correspondant à chaque valeur. Nous avons programmé la résolution de ce modèle avec le programme Borland C<sup>++</sup>. Le programme est les solutions générées sont les suivants :

```

#include <iostream.h>

unsigned int sol_y12,
    sol_y23,
    sol_y24,
    sol_y25,
    sol_y36,
    sol_y56,
    sol_y37,
    sol_y67;
unsigned int sol_t1,
    sol_t2,
    sol_t3,
    sol_t4,
    sol_t5,
    sol_t6,
    sol_t7;

long int sol_Z1=1000000 , sol_Z2=1000000, sol_Z3=15;

int Z1(int y12, int y23, int y24, int y25, int y36, int y56, int y37, int y67);
int Z2(int y12, int y23, int y24, int y25, int y36, int y56, int y37, int y67);
int sa(int t_fin, int t_debut, int reduction_reelle, int duree_normale);
void checkMin(int t1,int t2,int t3,int t4,int t5,int t6,int t7);

void main(void)
{
    cout<<"debut"<<endl;
    for(int t1=0 ; t1<=15 ; t1++)
        for(int t2=t1 ; t2<=15 ; t2++)
            for(int t3=t2 ; t3<=15 ; t3++)
                for(int t4=t2 ; t4<=15 ; t4++)
                    for(int t5=t2 ; t5<=15 ; t5++)
                        for(int t6=t2 ; t6<=15 ; t6++)
                            for(int t7=t6 ; t7<=15 ; t7++)
                                checkMin(t1,t2,t3,t4,t5,t6,t7);
    cout<<"fin"<<endl;
    cout<<"Voici les t1,t2,..."<<endl;
    cout<<"t1 = "<<sol_t1<<endl;
    cout<<"t2 = "<<sol_t2<<endl;
    cout<<"t3 = "<<sol_t3<<endl;
    cout<<"t4 = "<<sol_t4<<endl;
    cout<<"t5 = "<<sol_t5<<endl;
    cout<<"t6 = "<<sol_t6<<endl;
    cout<<"t7 = "<<sol_t7<<endl<<endl;

    cout<<"Voici les y1,y2,..."<<endl;
    cout<<"y12 = "<<sol_y12<<endl;
    cout<<"y23 = "<<sol_y23<<endl;
    cout<<"y24 = "<<sol_y24<<endl;
    cout<<"y25 = "<<sol_y25<<endl;
    cout<<"y36 = "<<sol_y36<<endl;
    cout<<"y56 = "<<sol_y56<<endl;
    cout<<"y37 = "<<sol_y37<<endl;
    cout<<"y67 = "<<sol_y67<<endl<<endl;

    cout<<"Voici les Z1,Z2,..."<<endl;
    cout<<"Z1 = "<<sol_Z1<<endl;
    cout<<"Z2 = "<<sol_Z2<<endl;

```

```

    cout<<"Z3 = "<<sol_Z3<<endl<<endl;
}
int Z1(int y12, int y23, int y24, int y25, int y36, int y56, int y37, int y67)
{
    return (375*y12 + 367*y23 + 525*y24 + 0*y25 + 720*y36 + 800*y56 + 0*y37 + 1944*y67);
}
int Z2(int y12, int y23, int y24, int y25, int y36, int y56, int y37, int y67)
{
    return (375*y12 + 733*y23 + 175*y24 + 0*y25 + 480*y36 + 800*y56 + 0*y37 + 1556*y67);
}
void checkMin(int t1,int t2,int t3,int t4,int t5,int t6,int t7)
{
    int temp_Z1;
    int temp_Z2;
    int temp_Z3;

    for(int y12=0; y12<=1 ; y12++)
    for(int y23=0; y23<=1 ; y23++)
    for(int y24=0; y24<=3 ; y24++)
    for(int y25=0; y25<=0 ; y25++)
    for(int y34=0; y34<=0 ; y34++)
    for(int y45=0; y45<=0 ; y45++)
    for(int y36=0; y36<=0 ; y36++)
    for(int y56=0; y56<=1 ; y56++)
    for(int y37=0; y37<=0 ; y37++)
    for(int y67=0; y67<=1 ; y67++)

    if( sa(t2,t1,y12,2) && sa(t3,t2,y23,6) && sa(t4,t2,y24,4) && sa(t5,t2,y25,2) &&
        sa(t6,t3,y36,4) && sa(t6,t5,y56,5) && sa(t4,t3,y34,0) && sa(t5,t4,y45,0) &&
        sa(t7,t3,y37,3) && sa(t7,t6,y67,2) )
    {
        temp_Z1 = Z1(y12, y23, y24, y25, y36, y56, y37, y67);
        temp_Z2 = Z2(y12, y23, y24, y25, y36, y56, y37, y67);
        temp_Z3 = t7;
        if(temp_Z1<= sol_Z1 && temp_Z2<= sol_Z2 && temp_Z3<= sol_Z3)
        {
            sol_Z1 = temp_Z1;
            sol_Z2 = temp_Z2;
            sol_Z3 = temp_Z3;
            sol_y12= y12;
            sol_y23= y23;
            sol_y24= y24;
            sol_y25= y25;
            sol_y36= y36;
            sol_y56= y56;
            sol_y37= y37;
            sol_y67= y67;
            sol_t1 = t1;
            sol_t2 = t2;
            sol_t3 = t3;
            sol_t4 = t4;
            sol_t5 = t5;
            sol_t6 = t6;
            sol_t7 = t7;
        }
    }
}
int sa(int t_fin, int t_debut, int reduction_reelle, int duree_normale)
{

```









































Le tableau suivant donne les solutions optimales générées pour chaque durée  $t_n$ , de  $t_n$  (*min*) à  $t_n$  (*normal*) et les coûts totaux du projet correspondants.

**Tableau 7: Solutions optimales du modèle selon les différentes options**

Variables	Durées accélérées du projet ( $Z_3$ en jours)			
	11	12	13	14
$t_1$	0	0	0	0
$t_2$	1	1	1	1
$t_3$	6	6	6	7
$t_4$	6	6	6	7
$t_5$	6	6	6	7
$t_6$	10	10	11	12
$t_7$	11	12	13	14
$y_{12}$	1	1	1	1
$y_{23}$	1	1	1	0
$y_{24}$	0	0	0	0
$y_{25}$	0	0	0	0
$y_{36}$	0	0	0	0
$y_{56}$	1	1	0	0
$y_{37}$	0	0	0	0
$y_{67}$	1	0	0	0
$z_1$ (\$)	3486	1542	742	375
$z_2$ (\$)	3464	1908	1108	375
<b>Coût total du projet (\$)</b>	<b>35 650</b>	<b>32 150</b>	<b>30 550</b>	<b>29 450</b>

La figure 6 ci-après illustre le domaine réalisable, c'est à dire celui entre la frontière optimale et la frontière pessimiste. Les différentes solutions trouvées dans le tableau ci-dessus délimitent la frontière optimale ou efficiente, c'est à dire celles correspondant à la courbe des coûts directs minimaux du projet selon les différentes options de réduction. Cette courbe est la courbe MOLIP. La frontière supérieure ou frontière pessimiste correspond à la courbe «tout accéléré», c'est à dire celle représentant le coût accéléré de toutes les activités exceptées les activités critiques. Elle correspond de ce fait à la courbe des coûts directs maximaux du projet selon les différentes options de réduction. Dans ce cas, tous les employés sont autorisés à faire des heures supplémentaires.

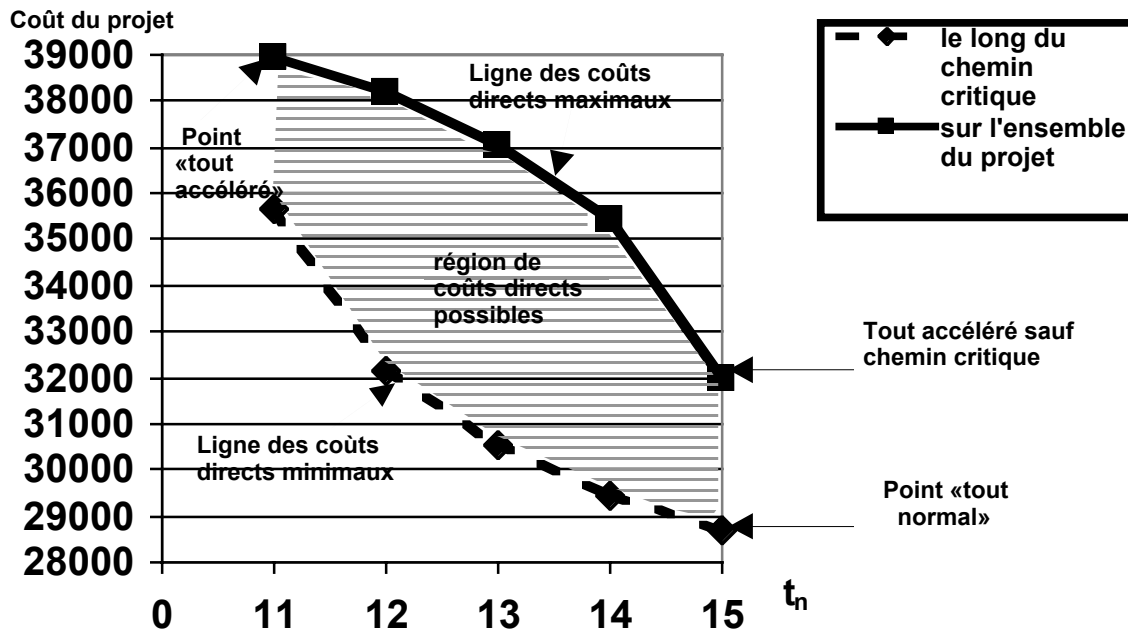


Figure 6: Illustration graphique des solutions

Mais ces deux courbes représentent deux frontières séparant les coûts possibles du projet de ceux impossibles. De ce fait, le domaine entre les deux représente la région de coûts directs possibles.



### 3.3. Application heuristique

Appliquons maintenant l'approche AMEC de façon explicite au même projet pour réduire sa durée de 15 à 11 jours. Les paramètres requis sont les suivants:

**Tableau 8: Paramètres requis pour l'application de AMEC au projet**

Activité ( <i>i,j</i> )	Durée normale <i>n</i>	Durée accélérée <i>r</i>	Coût normal	Coût accéléré	<i>c<sub>1</sub></i>	<i>c<sub>2</sub></i>
(1,2)	2	1	1500	2250	375	375
(2,3)	6	5	5400	6500	367	733
(2,4)	4	1	2400	4500	525	175
(2,5)	2	2	1200	1200	----	----
(3,6)	4	3	3000	4200	720	480
(5,6)	5	4	8000	9600	800	800
(3,7)	3	3	1200	1200	----	----
(6,7)	2	1	6000	9500	1944	1556

La pente effective de coût relative à chaque ressource est calculée ci-après:

**Tableau 9: Paramètres avec pentes effectives de coût**

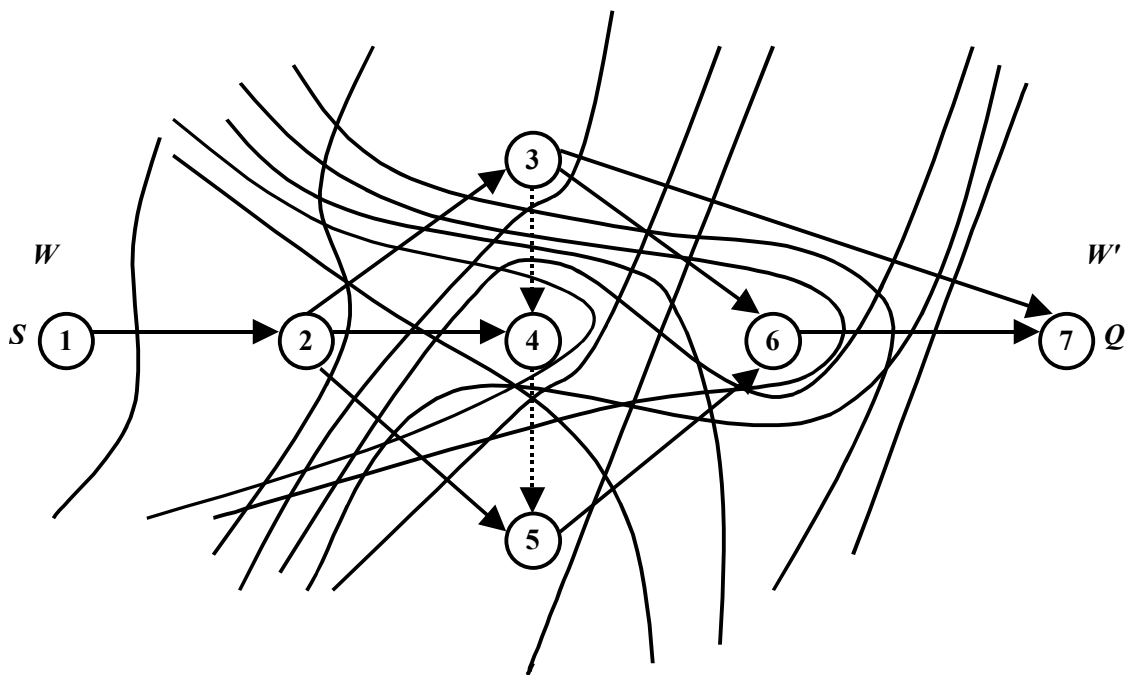
Activités ( <i>i,j</i> )	Durée normale <i>n</i>	Durée accélérée <i>r</i>	Coût normal	Coût accéléré	<i>e<sub>1</sub></i>	<i>e<sub>2</sub></i>
(1,2)	2	1	1500	2250	125	125
(2,3)	6	5	5400	6500	183.5	366.5
(2,4)	4	1	2400	4500	525	175
(2,5)	2	2	1200	1200	----	----
(3,6)	4	3	3000	4200	720	480
(5,6)	5	4	8000	9600	400	400
(3,7)	3	3	1200	1200	----	----
(6,7)	2	1	6000	9500	648	518.7

Les paramètres initiaux de flux du projet sont les suivants :

**Tableau 10: Paramètres initiaux de flux du projet**

Activités	État	$(l_1, s_1)$	$(l_2, s_2)$
(1,2)	Critique et normale	(0, 125)	(0, 125)
(2,3)	Critique et normale	(0, 183.5)	(0, 366.5)
(2,4)	Non critique	(0,0)	(0,0)
(2,5)	Non critique	(0,0)	(0,0)
(3,6)	Non critique	(0,0)	(0,0)
(5,6)	Critique et normale	(0, 400)	(0,400)
(3,7)	Non critique	(0,0)	(0,0)
(6,7)	Critique et normale	(0, 648)	(0, 518.7)

Les coupes suivantes ont été identifiées dans le flux de réseau:



**Figure 7: Coupes dans le flux du réseau**

La valeur de la coupe minimale à la première exploration a été localisée à partir des calculs ci-après:

**Tableau 11: Localisation de la coupe minimale à la première exploration**

Coupes	Activités allant de $W$ à $W'$	Activités allant de $W'$ à $W$	$K_1(W, W')$	$K_2(W, W')$
1	<b>(1,2)</b>	aucun	$125+0=125$	$125+0=125$
2	<b>(2,3)</b> (2,4) (2,5)	aucun	$183.5+0+0=183.5$	$366.5+0+0=366.5$
3	(2,5) (3,6) (3,7)	aucun	$0+0+0=0$	$0+0+0=0$
4	(2,4) (2,5) <b>(6,7)</b>	<b>(5,6)</b>	$0+0+648-0=648$	$0+0+518.7-0=518.7$
5	(2,5) (3,6) (3,7)	aucun	$0+0+0=0$	$0+0+0=0$
6	(2,5) (3,7) <b>(6,7)</b>	<b>(5,6)</b>	$0+0+648-0=648$	$0+0+518.7-0=518.7$
7	(3,6) <b>(5,6)</b> (3,7)	aucun	$0+400+0=400$	$0+400+0=400$
8	(3,7) <b>(6,7)</b>	aucun	$0+648=648$	$0+518.7=518.7$
9	<b>(2,3)</b> (2,5)	aucun	$183.5+0=183.5$	$366.5+0=366.5$
10	<b>(6,7)</b>	(3,6) <b>(5,6)</b>	$648-0-0=648$	$518.7-0-0=518.7$
11	<b>(2,3)</b> (2,4) <b>(5,6)</b>	aucun	$183.5+0+400=583.5$	$366.5+0+400=766.5$
12	<b>(2,3)</b> <b>(5,6)</b>	aucun	$183.5+400=583.5$	$366.5+400=766.5$
13	(2,4) <b>(6,7)</b>	(3,6)	$0+648-0=648$	$0+518.7-0=518.7$

À cette première exploration, les valeurs de la coupe minimale avec les deux ressources sont  $K_1^*(S,Q) = 125$ ,  $K_2^*(S,Q) = 125$  et  $M_1 = M_2 = \{(1,2)\}$ . Nous allons réduire (1,2) d'un jour au coût de  $(375 + 375) = 750\$$ . La durée du projet à cette itération est alors de 14 jours et nous passons à l'itération suivante.

Après cette première itération. Voici les nouveaux paramètres de flux:

**Tableau 12: Paramètres de flux après la première itération**

Activités	États	$(l_1, s_1)$	$(l_2, s_2)$
<b>(1,2)</b>	Critique et accélérée	$(125, \infty)$	$(125, \infty)$
<b>(2,3)</b>	Critique et normale	$(0, 183.5)$	$(0, 366.5)$
(2,4)	Non critique	$(0,0)$	$(0,0)$
(2,5)	Non critique	$(0,0)$	$(0,0)$
(3,6)	Non critique	$(0,0)$	$(0,0)$
<b>(5,6)</b>	Critique et normale	$(0, 400)$	$(0,400)$
(3,7)	Non critique	$(0,0)$	$(0,0)$
<b>(6,7)</b>	Critique et normale	$(0, 648)$	$(0, 518.7)$

La localisation de la valeur de la coupe minimale à cette deuxième itération figure dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 13: Localisation de la coupe minimale à la deuxième itération**

Coupes	Activités allant de $W$ à $W'$	Activités allant de $W'$ à $W$	$K_1(W, W')$	$K_2(W, W')$
1	<b>(1,2)</b>	aucune	$\infty+0=\infty$	$\infty+0=\infty$
2	<b>(2,3)</b> (2,4) (2,5)	aucune	$183.5+0+0=183.5$	$366.5+0+0=366.5$
3	(2,5) (3,6) (3,7)	aucune	$0+0+0=0$	$0+0+0=0$
4	(2,4) (2,5) <b>(6,7)</b>	<b>(5,6)</b>	$0+0+648-0=648$	$0+0+518.7-0=518.7$
5	(2,5) (3,6) (3,7)	aucune	$0+0+0=0$	$0+0+0=0$
6	(2,5) (3,7) <b>(6,7)</b>	<b>(5,6)</b>	$0+0+648-0=648$	$0+0+518.7-0=518.7$
7	(3,6) <b>(5,6)</b> (3,7)	aucune	$0+400+0=400$	$0+400+0=400$
8	(3,7) <b>(6,7)</b>	aucune	$0+648=648$	$0+518.7=518.7$
9	<b>(2,3)</b> (2,5)	aucune	$183.5+0=183.5$	$366.5+0=366.5$
10	<b>(6,7)</b>	(3,6) <b>(5,6)</b>	$648-0-0=648$	$518.7-0-0=518.7$
11	<b>(2,3)</b> (2,4) <b>(5,6)</b>	aucune	$183.5+0+400=583.5$	$366.5+0+400=766.5$
12	<b>(2,3)</b> <b>(5,6)</b>	aucune	$183.5+400=583.5$	$366.5+400=766.5$
13	(2,4) <b>(6,7)</b>	(3,6)	$0+648-0=648$	$0+518.7-0=518.7$

À cette deuxième itération, les valeurs de la coupe minimale avec les deux ressources sont  $K_1^*(S, Q) = 183.5$ ,  $K_2^*(S, Q) = 366.5$  et  $M_1 = M_2 = \{(2,3)\}$ . Nous allons réduire (2,3) d'un jour au coût de  $(367 + 733) = 1100\$$ . La durée du projet à cette itération est alors de 13 jours et nous passons à l'itération suivante.

Après cette deuxième itération, voici les nouveaux paramètres de flux:

**Tableau 14: Paramètres de flux après la deuxième itération**

Activités	États	$(l_1, s_1)$	$(l_2, s_2)$
<b>(1,2)</b>	Critique et accélérée	(125, $\infty$ )	(125, $\infty$ )
<b>(2,3)</b>	Critique et accélérée	(183.5, $\infty$ )	(366.5, $\infty$ )
(2,4)	Non critique	(0,0)	(0,0)
(2,5)	Non critique	(0,0)	(0,0)
(3,6)	Non critique	(0,0)	(0,0)
<b>(5,6)</b>	Critique et normale	(0, 400)	(0,400)
(3,7)	Non critique	(0,0)	(0,0)
<b>(6,7)</b>	Critique et normale	(0, 648)	(0, 518.7)

La localisation de la valeur de la coupe minimale à cette troisième itération se fait comme suit:

**Tableau 15: Localisation de la coupe minimale à la troisième itération**

Coupes	Activités allant De $W$ à $W'$	Activités allant de $W'$ à $W$	$K_1(W, W')$	$K_2(W, W')$
1	<b>(1,2)</b>	aucun	$\infty+0=\infty$	$\infty+0=\infty$
2	<b>(2,3)</b> (2,4) (2,5)	aucun	$\infty+0+0=\infty$	$\infty+0+0=\infty$
3	(2,5) (3,6) (3,7)	aucun	$0+0+0=0$	$0+0+0=0$
4	(2,4) (2,5) <b>(6,7)</b>	<b>(5,6)</b>	$0+0+648-0=648$	$0+0+1556-0=518.7$
5	(2,5) (3,6) (3,7)	aucun	$0+0+0=0$	$0+0+0=0$
6	(2,5) (3,7) <b>(6,7)</b>	<b>(5,6)</b>	$0+0+648-0=648$	$0+0+518.7-0=518.7$
7	(3,6) <b>(5,6)</b> <b>(3,7)</b>	aucun	$0+400+0=400$	$0+800+0=400$
8	<b>(3,7)</b> (6,7)	aucun	$0+648=648$	$0+518.7=518.7$
9	<b>(2,3)</b> (2,5)	aucun	$\infty+0=\infty$	$\infty+0=\infty$
10	<b>(6,7)</b>	(3,6) <b>(5,6)</b>	$648-0-0=648$	$518.7-0-0=$
11	<b>(2,3)</b> (2,4) <b>(5,6)</b>	aucun	$\infty+0+400=\infty$	$\infty+0+400=\infty$
12	<b>(2,3)</b> <b>(5,6)</b>	aucun	$\infty+400=\infty$	$\infty+800=\infty$
13	(2,4) <b>(6,7)</b>	(3,6)	$0+648-0=648$	$0+518.7-0=518.7$

À cette troisième itération, les valeurs de la coupe minimale avec les deux ressources sont  $K_1^*(S, Q) = 400$ ,  $K_2^*(S, Q) = 400$  et  $M_1 = M_2 = \{(5,6)\}$ . Nous allons réduire (5,6) d'un jour au coût de  $(400 + 400) = 800\$$ . La durée du projet à cette itération est alors de 12 jours et nous passons à l'itération suivante.

Après cette troisième itération, voici les nouveaux paramètres de flux:

**Tableau 16: Paramètres de flux après la troisième itération**

Activités	États	$(l_1, s_1)$	$(l_2, s_2)$
<b>(1,2)</b>	Critique et accélérée	(125, $\infty$ )	(125, $\infty$ )
<b>(2,3)</b>	Critique et accélérée	(183.5, $\infty$ )	(366.5, $\infty$ )
(2,4)	Non critique	(0,0)	(0,0)
(2,5)	Non critique	(0,0)	(0,0)
<b>(3,6)</b>	Critique et normale	(0,720)	(0, 480)
<b>(5,6)</b>	Critique et accélérée	(400, $\infty$ )	(400, $\infty$ )
(3,7)	Non critique	(0,0)	(0,0)
<b>(6,7)</b>	Critique et normale	(0, 648)	(0, 518.7)

La localisation de la valeur de la coupe minimale à cette quatrième itération est:

**Tableau 17: Localisation de la coupe minimale à la quatrième itération**

Coupes	Activités allant de $W$ à $W'$	Activités allant de $W'$ à $W$	$K_1(W, W')$	$K_2(W, W')$
1	<b>(1,2)</b>	aucun	$\infty+0=\infty$	$\infty+0=\infty$
2	<b>(2,3)</b> (2,4) (2,5)	aucun	$\infty+0+0=\infty$	$\infty+0+0=\infty$
3	(2,5) <b>(3,6)</b> (3,7)	aucun	$0+720+0=720$	$0+480+0=480$
4	(2,4) (2,5) <b>(6,7)</b>	<b>(5,6)</b>	$0+0+648-400=248$	$0+0+518.7-400=118.7$
5	(2,5) <b>(3,6)</b> (3,7)	aucun	$0+720+0=720$	$0+480+0=480$
6	(2,5) (3,7) <b>(6,7)</b>	<b>(5,6)</b>	$0+0+648-400=248$	$0+0+518.7-400=118.7$
7	<b>(3,6)</b> <b>(5,6)</b> (3,7)	aucun	$720+\infty+0=\infty$	$480+\infty+0=\infty$
8	(3,7) <b>(6,7)</b>	aucun	$0+648=648$	$0+518.7=518.7$
9	<b>(2,3)</b> (2,5)	aucun	$\infty+0=\infty$	$\infty+0=\infty$
10	<b>(6,7)</b>	<b>(3,6)</b> <b>(5,6)</b>	$648-0-400=248$	$518.7-0-400=118.7$
11	<b>(2,3)</b> (2,4) <b>(5,6)</b>	aucun	$\infty+0+\infty=\infty$	$\infty+0+\infty=\infty$
12	<b>(2,3)</b> <b>(5,6)</b>	aucun	$\infty+\infty=\infty$	$\infty+\infty=\infty$
13	(2,4) <b>(6,7)</b>	<b>(3,6)</b>	$0+648-0=648$	$0+518.7-0=518.7$

À cette quatrième itération, les valeurs de la coupe minimale avec les deux ressources sont  $K_1^*(S,Q) = 248$ ,  $K_2^*(S,Q) = 118.7$  et  $M_1 = M_2 = \{(6,7)\}$ . Nous allons réduire (6,7) d'un jour au coût de  $(1944 + 1556) = 3500\$$ . La durée du projet à cette itération est alors de 11 jours et l'objectif est atteint. Le coût total de réduction du projet de 15 à 11 jours est de:  $(750 + 1100 + 1600 + 3500) = 6950\$$ . Le coût total du projet après réduction est alors égal à:  $(28\ 700 + 6950) = 35\ 650\$$ .

### **3.4. Analyse comparative**

Comme l'on peut le constater, les deux approches MOLIP et AMEC répondent à une même préoccupation du gestionnaire de projet à savoir, réaliser un compromis durée/ressource permettant de prendre en considération la multiplicité, la non fragmentation et la non substituabilité des ressources d'un type à l'autre. Cependant, elles utilisent des voies différentes pour y parvenir. En d'autres termes, elles réalisent différemment ce compromis.

Avec l'approche MOLIP, le gestionnaire de projet, s'il est formé aux approches robustes, a une garantie d'arriver au meilleur compromis durée/ressource. Cela requiert de sa part, de la détermination et de la persévérance en phase de formulation du problème. En effet, de la bonne formulation du problème dépend entièrement l'atteinte du meilleur compromis. Une fois la formulation bien faite, la résolution du modèle pose moins de problèmes dès lors que les progiciels existent sur le marché ou à défaut, la programmation informatique aide à en achever le processus de réalisation. Malgré ce mérite incontestable, il est à noter cependant que l'implémentation de ce meilleur compromis peut s'avérer difficile, voire impossible dans la réalité. Mais cet aspect, loin de réduire les forces de l'approche, met au contraire le gestionnaire de projet en garde contre les problèmes inhérents à l'optimisation dont notamment la rigidité des contraintes, la transformation rapide d'un problème apparemment assez simple en un problème d'analyse combinatoire de grande échelle. Toutefois, dans un contexte de compétitivité et de projet de grande taille, l'utilisation de MOLIP pourrait s'avérer incontournable nonobstant les difficultés de formulation qui, au regard des défis à relever pour maintenir ou améliorer sa position sur le marché deviennent à notre avis dérisoires.

Avec l'approche AMEC, il est effectivement requis moins d'efforts conceptuels de la part du gestionnaire de projet et par conséquent moins d'aisance du point de vue de l'outillage mathématique, dès lors que celui-ci est capable d'opérer convenablement les coupes et de pouvoir naviguer des deux côtés de chaque coupe. Mais la difficulté majeure du gestionnaire réside à notre avis au niveau de la taille du projet. En présence d'un projet de petite taille, la résolution du problème de compromis durée/ressource via AMEC pose moins problème au gestionnaire de projet, mais dès lors que la taille du projet devient grande (déjà à partir de 30 activités et même avant), les choses se compliquent énormément et rapidement. Le déficit de support informatique (puisque AMEC est essentiellement manuelle comme toute approche heuristique), en cas de méga projets laisse tout simplement le gestionnaire de projet impuissant. L'autre problème dans l'utilisation d'AMEC est qu'elle ne garantit pas nécessairement le meilleur compromis durée/ressource pour tous les projets, quelles que soient leur nature et leur taille. C'est une faiblesse de toutes les approches heuristiques mais qui parfois s'imposent pour surmonter certaines difficultés en se contentant de perdre les grandes retombées d'une solution optimale en matière de compétitivité pour se résigner à une solution proche de cette dernière compte tenu de l'urgence des décisions à prendre.

Dans notre exemple d'application, les deux méthodes donnent les mêmes résultats. Que ce soit avec la méthode heuristique ou la méthode optimale, les réductions suggérées se trouvent sur les mêmes activités, avec un coût total de réduction de 6950\$, ce qui donne un coût accéléré du projet égal à 35 650\$ pour l'objectif de 11 jours. À notre avis, cette coïncidence des solutions obtenues s'explique en partie par la taille assez réduite du projet (8 activités) qui n'offre pas trop d'options d'accélération. Une telle coïncidence des résultats n'aurait pas lieu avec un projet de taille plus grande un réseau plus complexe (de plus de 30 activités). Dans le cas de notre exemple, étant donné la taille modeste du projet, la réalisation du compromis durée/coût donne le même résultat avec la méthode de Siemens malgré le fait que cette dernière ne respecte pas l'hypothèse de non substituabilité. Cet état de choses, loin de valider l'identité entre compromis durée/ressource et compromis durée/coût, ne constitue qu'un cas exceptionnel lié uniquement à la taille du projet. Les résultats des calculs de l'algorithme de Siemens figurent dans le tableau ci-après.



**Tableau 18: Calculs de l'algorithme de Siemens**

Activités	Chemins nécessitant réduction			Pente de coût	Réduction possible	Itération					Pentes effectives de coût
	ABFH	ABEH	ACFH			1	2	3	4	5	
<b>A</b>	1	1	1	750	± 0	250	X	X	X	X	
<b>B</b>	1	1	X	1 100	± 0	550	550	X	X	X	
<b>C</b>	X	X	X	700	3	700	700	700	700	700	
<b>E</b>	X	X	X	1 200	1	1200	1200	1200	1200	1200	
<b>F</b>	1	X	1	1 600	± 0	800	800	800	X	X	
<b>H</b>	1	1	1	3 500	± 0	1167	1167	1167	1167	X	
<b>Longueur initiale</b>	15	14	13	<b>Itération</b>	<b>Mesures</b>	<b>Coûts de l'itération</b>		<b>Coûts cumulés</b>			
<b>Temps de réduction restant pour atteindre l'objectif</b>	4	3	2	0	----	----		28 700			
	3	2	1	1	Réduire A de 1j	750		29 450			
	2	1	1	2	Réduire B de 1j	1 100		30 550			
	1	1	0	3	Réduire F de 1j	1 600		32 150			
	0	0		4	Réduire H de 1j	3 500		<b>35 650</b>			

## **CONCLUSION**

La recherche ainsi réalisée est une recherche instrumentale. En tant que telle, elle vient contribuer à combler un vide instrumental dans la résolution de l'épineux problème d'accélération de projet. Pour y parvenir, elle s'est appuyée sur le développement de deux outils relativement simples de compromis durée/ressource MOLIP et AMEC. Notre espoir est de voir ces deux outils entrer fermement dans la pratique quotidienne des professionnels que sont les gestionnaires de projet, compte tenu de l'importance et du caractère incontournables des aspects qu'ils cernent en gestion de projet.

Ainsi, au terme de cette recherche :

- nous avons pu clairement établir la différence entre compromis durée/coût et compromis durée/ressource tout en prouvant que le premier était plus vaste que le deuxième mais que le deuxième était plus précis et plus propice au contexte de multiplicité de ressources et de non substituabilité des ressources d'un type à l'autre.
- nous avons également pu bâtir une approche multi-objective et optimale de résolution de compromis durée/ressource en prenant appui sur l'optimisation multi-objective, linéaire et en nombres entiers. L'introduction d'une telle approche nous a non seulement permis de prendre en compte le contexte de multiplicité des ressources ainsi que les hypothèses de leur non fragmentation et de leur non substituabilité. Nonobstant les difficultés de formulation de ce type de modèle, nous pensons qu'il permet incontestablement l'atteinte des objectifs d'efficacité et d'efficience en gestion de projet, objectifs dont le succès du projet demeure hautement tributaire.
- dans le même ordre d'idées, nous avons aussi réussi à élaborer une approche heuristique de résolution de ce même compromis. Son élaboration fournit à l'univers des praticiens, une façon mathématiquement moins robuste d'aborder le compromis durée/ressource, dans les conditions précédemment décrites. Certes, cette atténuation de la robustesse induit une certaine perte en efficacité et en efficience mais elle a comme mérite incontestable d'offrir au gestionnaire de

projet, non à l'aise mathématiquement, d'aboutir à un compromis tout au moins satisfaisant à défaut de l'optimal. Cependant, force est de reconnaître que les efforts à consentir manuellement pour opérer les coupes successives et les calculs subséquents peuvent s'avérer très élevés.

- l'application des deux méthodes à un projet réel a permis de se rendre compte de l'ampleur du travail à abattre pour aboutir aux solutions du problème. Ceci est certes un handicap mais ce handicap reste minime au regard des résultats que pourraient apporter les résolutions correctes du compromis durée/ressource en matière de performance et de gain en compétitivité. C'est là la preuve, une fois de plus, que rien de noble ne s'obtient sans effort.
- enfin, nous avons réussi à programmer en C++, la résolution du compromis durée/ressource pour notre projet via MOLIP et ce programme a montré que pour un projet de cette taille, il existait 1264 scénarios possibles! Ceci coupe court à toute velléité de résolution manuelle du problème de compromis durée/ressource au moyen de MOLIP.

Ces résultats, sans doute importants, que nous avons obtenus ne font pas de la présente recherche un absolu ou une recherche exhaustive. Comme toute recherche, elle comporte des limites. Une des principales limites est l'inexistence d'un support informatique adéquat (progiciel) pour la résolution de l'approche MOLIP. Nous estimons que l'élaboration d'un tel outil stimulerait son utilisation par les gestionnaires de projet. Une autre limite réside également dans l'inexistence d'un support informatique (progiciels) pour l'identification de toutes les coupes dans le réseau. Une telle chose soulagerait énormément le gestionnaire de projet dans l'utilisation de l'approche AMEC. C'est dans cette voie que nous escomptons poursuivre cette recherche au cours des années à venir mais au niveau doctoral. De ce point de vue, nous restons entièrement ouverts et réceptifs à toute les critiques et suggestions constructives pouvant nous permettre de mieux approfondir et améliorer cette recherche.

## **RÉFÉRENCES**

- Ahn, T. , and Erenguc, S.S. (1998), The resource constrained project scheduling problem with multiple crashable modes : A heuristic procedure, *European Journal of Operational Research* , Vol.107 (250-259).
- Babu, A.J.G., and Suresh, N., (1996), Project Management with time, cost, and quality considerations, *European Journal of Operational Research*, Vol.88 (320-328).
- Ba Khang, D., and Mon Myint, Y. (1999), Time, cost and quality trade-off in project management: a case study, *International Journal of Project Management*, Vol.17,no.4 (249-256).
- Burns, S.A., Liu, L., and Feng, C. (1996), The LP/IP hybrid method for construction time-cost trade-off analysis, *Construction Management and Economics* , Vol.14 (265-276).
- Carbno, C. (1999), Optimal resource allocation for projects, *Project Management Journal*, Vol.30 (22-31).
- Davis E.W. (1973), Project Scheduling Under Resource Constraints: historical review and categorization of procedures, *AIIE Transactions* (297-313).
- De, P., Dunne, E.J., Ghosh. J.B., and Wells, C.E. (1995), The discrete time-cost tradeoff problem revisited, *European Journal of Operational research*, Vol.81 (225-238).
- Deckro, R.F., Hebert J.E., Verdini, W.A, Grimsrud P.H., and Venkateshwar, S. (1995), Nonlinear time/cost tradeoff models in project management, *Computers ind. Engng*, Vol.28, no.2 (219-229).
- Demeulemeester, E.L., Herroelen, W.S., and Elmaghraby, S.E. (1996), Optimal procedures for the discrete time/cost trade-off problem in project networks, *European Journal of Operational Research* , Vol. 8 (50-68).
- Demeulemeester, E.L., De Reyck, B., and Herroelen, W.S. (2000), The discrete time/resource trade-off problem in project networks: a branch and-bound approach, *IIE Transactions*, Vol.32 (1059-1069).
- Elmaghraby S.E. (1993), Resource Allocation via dynamic programming in activity networks, *European Journal of Operational research*, Vol. 64 (199-215).
- Erenguc S.S. (1996), The resource constrained time/cost tradeoff project scheduling problem with discounted cash flows, *Journal of Operations management*, Vol.14 (255-275).
- Foster, R.N. (1986), Innovation: The Attacker's Advantage. *Summit Books*, New York.
- Graves, S. B. (1989), Why costs increase when projects accelerate, *Research, Technology Management*, March-April 1989 (16-18).

- Graves, S. B. (1989), The time-cost tradeoff in research and development: a review, *Engineering Costs and Production Economics*, Vol.16 (1-9).
- Icmeli, O. (1993). Project Scheduling Problems: A survey. *International Journal of Operations and Production Management*, Vol 13, no.11 (80-91).
- Icmeli, O., Belassi W. (1996), A new framework for determining critical success/failure factors in projects. *International Journal of Project Management*, Vol 14, no.3 (141-151).
- Icmeli, O., Erenguc S.S., (1996), The resource constrained time/cost tradeoff project scheduling problem with discounted cash flows, *Journal of Operations Management*, Vol.14 (255-275).
- Icmeli O., Erenguc S.S., and Zappe C.J. (1993), Project scheduling problems: A survey, *International Journal of Operations and Production Management*, Vol.13, no.11 (80-91)
- Kelly, J.E. (1961). Critical path planning and scheduling Mathematical basis. *Operations Research* , Vol 9 (296-320).
- Kerzner, H. (2001), *Project Management- A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling* (7e éd.), New York: John Wiley & Sons Inc.
- Kriengkairut, C., and Vrat, P. (1996), A Goal Programming Model For Project Crashing with Piecewise Linear Time-Cost Trade-Off, *Engineering Costs and Production Economics*, Vol.10 (161-172).
- Lim, C.S., and Zain Mohamed, M. (1999), Criteria of project success: an exploratory re-examination, *International Journal of Project Management*, Vol.14, no.4 (243-248).
- Meyer, W.L., Shaffer, L.R. (1963). Extensions of the critical path method through the application of integer programming. *Civil Engineering Construction Research Series*, no. 2.
- Oisen, R.P. (1971) Can project management be defined ?. *Project Management Quarterly*, Vol.2, no.1 (12-14).
- Ozdamar, L., and Ulusoy, G. (1995), A survey on the resource-constrained project scheduling problem, *IEE Transactions*, Vol.27 (574-586).
- Patterson, J.H., and Roth, G.W. (1976), Scheduling a project under multiple resource constraints: a 0-1 programming approach, *AIEE Transactions*, Vol.8 (449-455).

- Phillips, S. Jr. (1996). Project Management Duration/ Resource Tradeoff Analysis : an Application of the Cut Search Approach, *Journal of the Operational Research Society* , Vol. 47 (697-701).
- Phillips, S. Jr, Dessouky M.I. (1977) Solving the project time/cost tradeoff problem using the minimal cut concept. *Management Science*, Vol. 24 (393-400).
- Pulat, P.S., and Horn, S.J. (1996) Time-Resource Tradeoff Problem, *IEEE Transactions on Engineering Management* , Vol. 43 , no.4. (411-417).
- Robinson, D.R. (1975). A dynamic programming solution to cost-time tradeoff for CPM. *Management Science*, Vol. 22 (158-166).
- Siemens, N. (1971) A simple CPM Time-Cost Trade-off Algorithm , *Management science*, Vol. 17, no.6 (354-362).
- Slowinski, R. (1981), Multiobjective network scheduling with efficient use of renewable and non-renewable resources, *European Journal of Operational Research*, Vol.7 (265-273)
- Talbot, F.B. (1982), Resource-Constrained Project Scheduling With Time Resource Trade-offs: The Non pre-emptive Case, *Management Science*, Vol.28, no.10 (197-210).
- Weglarz, J. (1981), Project scheduling with continuously divisible double constrained resources, *Management Science*, Vol.27 (1040-1053).