ADG

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

MEMOIRE PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE DU PROGRAMME

DE MAITRISE EN GESTION DE PROJET

PAR

LUCCHESI MATHIEU

APPLICATION DU PNET A L'ALGORITHME D'ALLOCATION DES RESSOURCES DE MACLEOD ET PETERSEN, ET ANALYSE DE LA VALEUR ACQUISE EN CONTEXTE D'INTERDEPENDANCE DES CHEMINS

Université du Québec
en Outaouais

13 OCT 2010

Bibliothèque

JUIN 2010

Table des matières

Introduction 1

Chapitre 1 Application du PNET à l'algorithme d'allocation des ressources de MacLeod et Petersen 5

1.1 Contexte théorique 6

1.1.1 La planification de projets 6

1.1.2 Le conflit PERT / CPM 7

1.1.3 La méthode MacLeod et Petersen 8

1.1.4 La méthode PNET 12

1.2 Contribution scientifique 16

1.2.1 Pourquoi créer un outil d'estimation du compromis entre allocation de ressources et probabilité de réaliser le projet à temps 16

1.2.2 Mes propositions 17

1.2.3 Conséquences 20

1.2.4 De l'algorithme au programme VBA 23

1.2.5 Illustration : Application du programme à l'exemple de Mac Leod et Petersen 24

1.3 Bilan 36

Chapitre 2 Analyse de la valeur acquise en contexte d'interdépendance des chemins 37

2.1 Contexte théorique 38

2.1.1 Introduction à la valeur acquise 38

2.1.2 Problème de la valeur acquise 40

2.2 Contribution scientifique 43

2.2.1 Solution 43

2.2.2 Illustration : Application du programme à l'exemple de MacLeod et Petersen 49

2.3 Bilan 61

Conclusion 62

Références 65

Liste des figures

Figure 1 : Données d'entrée du problème....25
Figure 2 : Détermination du nombre d'itérations....25
Figure 3 : Message de fin d'algorithme....26
Figure 4 : Détails des calculs d'une étape d'allocation 1....27
Figure 5 : Détails des calculs d'une étape d'allocation 2....28
Figure 6 : Résultat reporté sur la page principale du programme....29
Figure 7 : Résultats du programme....31
Figure 8 : Graphe récapitulatif de l'évolution de la probabilité et du coût en fonction des allocations supplémentaires de ressources....33
Figure 9 : Exemple de rapport graphique de performance (PMI, 2004)....39
Figure 10 : Réseau d'activités de l'exemple de MacLeod et Petersen....46
Figure 11 : Données d'entrée du problème....50
Figure 12 : Message de fin de l'algorithme....50
Figure 13 : Résultats du programme....51
Figure 14 : Calculs du temps espéré et de la variance de chaque activité....52
Figure 15 : Calculs des probabilités pour un chemin....53
Figure 16 : Formulation des combinaisons possibles et calculs associés, dans le programme VBA....54
Figure 17 : Affichage des Valeurs Acquises Espérées minimale et maximale....56
Figure 18 : Affichage des résultats....56
Figure 19 : Graphe récapitulatif des résultats....57
Figure 20 : Graphe représentant la valeur planifiée et les Valeurs Acquises Espérées minimale et maximale au cours du projet....60

Liste des tableaux

Tableau 1 : Données initiales de l'algorithme de MacLeod et Petersen.....24
Tableau 2 : Temps espérés et variances à la première étape d'allocation 27
Tableau 3 : Durées espérées, variances et écarts-type des chemins à la première étape d'allocation 28
Tableau 4 : Matrice de corrélation à la première étape d'allocation 29
Tableau 5 : Durées espérées, variances et écarts-type des chemins à la deuxième étape d'allocation 30
Tableau 6 : Probabilités calculées à la deuxième étape d'allocation.....30
Tableau 7 : Résumé des allocations de ressources.....35
Tableau 8 : Combinaisons numériques générées pour dans le cadre de l'exemple.....45
Tableau 9 : Données du problème de MacLeod et Petersen modifié.....49
Tableau 10 : Liste des combinaisons possibles à t=13 mois.....55
Tableau 11 : Valeur Planifiée au cours du projet.....58
Tableau 12 : Valeurs Acquises Espérées minimale et maximale au cours du projet.....59

Liste des acronymes

AC : Actual cost

ACWP : Actual Cost for Work Performed

BAC : Budget At Completion

BCWP : Budgeted Cost for Work Performed

BCWS : Budgeted Cost for Work Scheduled

CPI : Cost Performance Indix

CPM : Critical Path Method

EV : Earned Value

PERT : Program Evaluation and Review Technique

PNET : Probabilistic Network Evaluation Technique

PV : Planned Value

SPI : Schedule Performance Index

VA : Valeur Acquise

VAE : Valeur Acquise Espérée

VBA : Visual Basic for Applications

VP : Valeur Planifiée

VR : Valeur Réelle

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide, qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de ce séjour universitaire à l'étranger.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Lavagnon Ika qui, malgré ma découverte de la recherche au début du mois de janvier 2009, m'a encouragé et accompagné dans un premier temps en tant que professeur, puis en tant que directeur de mémoire. Il s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de notre collaboration. Je lui suis très reconnaissant de l'aide et du temps qu'il a bien voulu me consacrer en dépit de ses nombreuses activités professionnelles.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs Sébastien Azondékon et Stéphane Gagnon qui ont accepté avec gentillesse de participer au jury de mon mémoire.

Je remercie l'école Arts et Métiers ParisTech de l'opportunité qu'ils m'ont offert de participer à une maîtrise au Canada.

J'exprime ma gratitude à tous les consultants et internautes rencontrés lors des recherches effectuées dans le domaine qui m'était inconnu de la programmation informatique, et qui ont accepté de répondre à mes questions.

J'adresse de chaleureux remerciements à tous ceux qui m'ont soutenu lors de mon séjour au Canada et qui m'ont donné la force de continuer l'aventure : mes amis Gadz'Arts au Canada et en France, mes amis de Martigues, mes parents, grands-parents et à ma grande sœur Céline ainsi qu'à Raoul.

Introduction

En gestion de projet, le dépassement des délais et des coûts est fréquent. Le contrôle de projet ou la mesure de la performance s'avère important, et l'outil de mesure de la performance disponible est la valeur acquise.

D'un point de vue professionnel, les gestionnaires vont utiliser l'analyse de la valeur acquise pour évaluer, lors de la mise à jour du projet à un moment donné dans le temps, la performance, du point de vue du délai et du coût et suggérer, en cas d'écart important avec ce qui a été planifié, des actions correctives (Fleming et Koppelman, 2004). C'est donc un outil utile et puissant de mesure de la performance qui tient à la fois compte des délais et des coûts (Anbari, 2003 ; Ika, 2005).

Mais l'outil pose des problèmes quant à son utilisation. Ses détracteurs avancent qu'il est plutôt difficile à utiliser, un argument que ses défenseurs rejettent souvent en faveur de son importance pratique (Fleming et Koppelman, 2006 ; Anbari, 2003).

Par ailleurs, l'analyse de la valeur acquise repose sur une planification de base PERT / CPM, deux techniques concourantes et synergiques. Le lien entre l'analyse de la valeur acquise et PERT / CPM est donc reconnu (Anbari, 2003; Ika, 2005). Et il a par le passé été proposé de combiner l'analyse de la valeur acquise basée sur la méthode PERT à la méthode du chemin critique (CPM) afin de profiter des avantages des deux outils en vue d'une amélioration de l'évaluation de la performance (MacLeod & Petersen, 1996). « En effet, si ce dernier outil se concentre trop sur le chemin critique – et de ce fait, néglige les autres activités du projet – le premier, plus enclin à mesurer l'avancement en termes monétaires, ne considère pas le chemin critique de manière adéquate » (Ika, 2005).

Mais pour ce faire, encore faut-il débarrasser PERT/CPM des erreurs que la littérature de la gestion de projet met en évidence, soit dans les données de base du PERT et celles liées à la configuration particulière des réseaux dans PERT, soit celles qui peuvent biaiser la détermination de la durée totale du projet et de sa variance (Ika, 2005 ; Archibald et Villoria, 1967). Par exemple, l'hypothèse d'indépendance des durées des activités a été retenue pour gérer des distributions difficiles à nommer comme la Bêta (utilisation du théorème central limite[1]) et pour faire le calcul des paramètres de la variable aléatoire donnant la durée totale de chaque chemin (durée totale espérée et variance). Or, deux ou plusieurs chemins du réseau PERT ont souvent des activités en commun et, de facto, cela viole l'hypothèse d'indépendance des durées des chemins (Ang, Abdelnour et Chaker, 1975; Archibald et Villoria, 1967). L'hypothèse d'indépendance des durées des chemins est alors une considération sujette à des erreurs non négligeables (Soroush, 1994). Ce qui justifie la prise en compte de l'hypothèse plus réaliste d'interdépendance des durées des chemins dans le calcul du temps de réalisation du projet dans PERT pour améliorer les chances d'obtenir une probabilité plus juste de compléter le projet à temps (Ika, 2005). Toutefois, il n'est pas facile de prendre en compte l'interdépendance ou la corrélation des durées des chemins. Car cela expose à un calcul fastidieux mais nécessaire des chances de compléter le projet en un temps t donné, compte tenu de la nature multi-activités et multi-chemins du réseau (Ika, 2005). C'est pourquoi certains chercheurs (par exemple, Soroush, 1994 ; Ang, Abdelnour et Chaker,

---

[1] Toute somme de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées tend vers une variable aléatoire gaussienne

1975) ayant étudié le problème ont suggéré d'utiliser soit la simulation de Monte Carlo si l'envergure du projet l'autorise, soit une approximation par des heuristiques ou encore le fait de borner la probabilité de compléter le projet à une date t donnée dans un intervalle. Cette dernière méthode (l'algorithme du Probabilistic Network Evaluation Technique, PNET) nécessite des outils informatiques si l'on veut l'utiliser dans la pratique. Il existe de nos jours, des logiciels (assez dispendieux) tels que @Risk for Project pour faire la simulation en utilisant Monte Carlo, mais certains auteurs considèrent qu'il est, d'un point de vue théorique, intéressant d'explorer la solution PNET. L'outil informatique aidera le gestionnaire à faciliter ces calculs.

C'est pourquoi dans ce mémoire je vais traiter dans un premier temps de l'application du PNET à un algorithme d'allocation de ressources de MacLeod et Petersen, après avoir mis en évidence les lacunes des méthodes classiques PERT/CPM. Puis de la création d'un programme informatique automatisant cet algorithme, pour le rendre plus apte à être utilisé par les gestionnaires de projet.

Dans une deuxième partie, en reprenant Ika (2005) et en améliorant les hypothèses de calcul de la valeur acquise espérée (des erreurs de probabilités combinées que nous verrons plus tard ont été trouvées dans l'article de 2005), je vais créer un algorithme de calcul de la valeur acquise espérée, puis l'automatiser à travers un programme informatique, toujours pour en faciliter l'utilisation future.

Chapitre 1 Application du PNET à l'algorithme d'allocation des ressources de MacLeod et Petersen

1.1 Contexte théorique

1.1.1 La planification de projets

La gestion de projet est une approche de la gestion qui utilise des méthodes, des techniques et outils destinés à planifier et contrôler, dans le but de respecter les contraintes, notamment de délais, de coûts et de qualité du livrable.

Dans les années 1950, deux méthodes de planification de projet ont été introduites dans le but de minimiser les risques de dépassement des délais. La première, la méthode CPM (Critical Path Method)[2], utilise une technique de diagrammes de réseau et une technique d'estimation, servant entre autres à calculer la durée normale du projet. C'est un outil qui a une démarche déterministe dans sa vision de la planification de projet.

La seconde est la méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique)[3], qui a été développée dans le programme du système de missile Polaris, missile nucléaire lancé à partir de sous marins immergés, par la Royal Navy et l'US Navy. Comme CPM, cette méthode est un diagramme de réseau et une technique d'estimation servant à effectuer des calculs de planification. Cette méthode est toujours utilisée, notamment dans les projets où l'incertitude est engagée (Chan, 1997), ce qui est le cas de la quasi-totalité des projets.

---

[2] Méthode du chemin critique

[3] Technique d'évaluation et d'examen de programmes

1.1.2 Le conflit PERT / CPM

Les méthodes PERT et CPM ont des objectifs communs. Elles estiment toutes les deux une durée de réalisation du projet, et déterminent quelles activités requièrent une attention particulière dans le but d'éviter un retard de livraison. Ces deux méthodes basent l'estimation de la durée du projet sur la durée du chemin le plus long du réseau (Mingus, 2002, p.5). Cependant les deux méthodes ont été développées séparément, elles nécessitent des informations différentes et n'ont pas les mêmes capacités de prévision de la durée de réalisation du projet.

Au début, PERT était utilisée dès qu'un projet faisait intervenir une incertitude trop importante (Chan, 1997). En effet, elle traite les durées des activités comme des variables aléatoires. L'estimation se fait donc de manière probabiliste. La durée d'une activité est aléatoire et ne peut pas être contrôlée directement par le gestionnaire de projet. La méthode nécessite, pour chaque activité, 3 données estimées par le gestionnaire lors de la phase de planification : une durée optimiste a, la plus probable m, et une pessimiste b. La durée espérée d'une activité est $t_e = \frac{a+4m+b}{6}$.

La méthode CPM traite des durées d'activité fixes, ce qui rend l'estimation déterministe. Les variances existent, mais sont entièrement contrôlées par le gestionnaire. Elle a besoin pour effectuer ses prévisions de la durée normale n de chaque activité. Le problème que posent ces estimations déterministes de durées des activités est que la durée estimée du projet est également déterministe. Or dans la plupart des projets, les durées des activités ne sont pas toujours prévisibles, il y a des aléas comme la

météorologie qui retarde l'exécution d'une activité, ou des ressources temporairement indisponibles à cause de maladie par exemple.

Cependant aucune des deux approches ne permet d'avoir une vision globale du problème (MacLeod & Petersen, 1996 ; Omar, 2009).

1.1.3 La méthode MacLeod et Petersen

MacLeod et Petersen ont présenté dans un article de 1996 une méthode combinant les forces à la fois de la méthode PERT et de la méthode CPM, qu'ils ont utilisée en traitant un exemple de compromis entre allocation de ressources et probabilité de terminer le projet à temps.

Les contraintes de ressources étant les plus difficiles à traiter (Chan, 1997), elles sont un des problèmes de planification le plus largement étudié dans la littérature (Liess et Michelon, 2007). C'est dans ce contexte que MacLeod et Petersen (1996) ont développé un algorithme d'estimation du compromis entre allocation de ressources et probabilité de réaliser le projet à temps. Dans leurs travaux, au lieu d'utiliser soit PERT soit CPM, ils ont développé une méthode combinant les deux.

Un grand avantage de la méthode PERT est la prise en compte de l'incertitude dans la durée de chaque activité. Or renseigner 3 estimations pour chaque activité du PERT étant jugé trop rude, Golenko-Ginzburg (1988) a proposé un modèle de remplacement. Ses recherches sur la détermination des estimations ont conclu que l'estimation la plus probable m était « pratiquement inutile » car très souvent proche de $\frac{2a+b}{3}$. MacLeod et Petersen (1996) ont vérifié que la méthode PERT traditionnelle et la

méthode Golenko-Ginzburg (1988) à 2 estimations donnaient sensiblement les mêmes résultats, puis ont décidé qu'ils utiliseraient cette dernière, car elle simplifiait grandement l'analyse du compromis et les calculs effectués.

La méthode de Golenko-Ginzberg (1988) à 2 estimations sera utilisée dans mon travail, car à précision égale, elle simplifie le travail du gestionnaire de projet et rend la phase d'estimation de la durée des activités plus rapide.

Pour développer une méthode combinant PERT et CPM, une hypothèse importante liant les deux méthodes doit être posée : la durée espérée d'une activité $t_e = 0.2 * (3a + 2b)$ (selon PERT à 2 estimations de Golenko-Ginzberg, 1988) et le temps normal n (CPM) sont les mêmes. En effet, il est nécessaire de lier les données des deux méthodes pour n'en former plus qu'une. De même la durée optimiste du PERT a est égale à la durée de l'activité accélérée c du CPM.

Le but de l'algorithme est d'augmenter la probabilité de réaliser le projet à temps. Pour cela, il faut diminuer la durée de réalisation du projet, et la méthode employée dans cet algorithme est d'allouer des ressources supplémentaires à une ou des activités critiques du projet. En utilisant la formule $t_e = 0.2 * (3a + 2b)$ de Golenko Ginzberg (1988), MacLeod et Petersen (1996) ont montré que pour diminuer la durée espérée d'une activité d'une unité, il suffisait de diminuer la durée pessimiste de 2.5 unités. Dans le cas de l'algorithme, on peut donc en déduire que des ressources peuvent continuer à être allouées à une activité tant que $b - a \geq 2.5$. La démonstration est aisée dans MacLeod et Petersen (1996), je la considère comme acquise.

Le projet est composé de plusieurs chemins. La durée espérée d'un chemin est égale à la somme des durées espérées des activités qu'il contient. Compte tenu de ce qui a été dit précédemment, pour réduire d'une unité la durée espérée du chemin, il suffit de réduire de 2.5 unités la durée pessimiste d'une activité de celui-ci, en l'occurrence la moins coûteuse. Ainsi en appliquant cette méthode au chemin critique, l'algorithme de MacLeod et Petersen (1996) permet, en diminuant de 2.5 unités la durée pessimiste de l'activité la moins coûteuse du chemin critique, de diminuer d'une unité la durée du projet.

Algorithme du compromis entre allocation de ressources et probabilité de réaliser le projet à temps de MacLeod et Petersen :

1. Déterminer les durées optimiste et pessimiste a et b pour chaque activité
2. Déterminer les coûts induits par l'allocation des ressources pour chaque activité (coût par unité de temps d'accélération). *Par exemple, si le coût par mois d'accélération d'une activité est de 5 000$, il coûtera au projet 10 000$ de réduire la durée de cette activité de 10 à 8 mois.*
3. Etablir la durée t au bout de laquelle le projet doit être terminée
4. Résoudre le problème de planification PERT en utilisant les durées a et b, en déduire le chemin critique et la durée totale espérée du projet
5. Calculer la probabilité de terminer le projet dans les temps $p(T_e(chemin\ critique) < t)$
6. Si la probabilité est acceptable : fin de l'algorithme

7. Si la probabilité est trop faible, allouer des ressources pour réduire T_e sur une activité du chemin critique et enregistrer la quantité de ressources allouées.
8. Réduire la durée pessimiste b de 2.5 unités
9. Recalculer la probabilité de finir le projet dans les temps
10. Si la nouvelle probabilité de finir le projet dans les temps et la quantité de ressources allouées sont acceptables, fin de l'algorithme
11. Si la quantité de ressources allouées n'est pas acceptable, décider soit d'augmenter l'objectif d'allocation de ressources, soit de baisser l'objectif de la probabilité acceptable. Dans le premier cas, retourner à l'étape 4, dans le deuxième cas, fin de l'algorithme.
12. Si la probabilité n'est pas acceptable, retourner à l'étape 4.

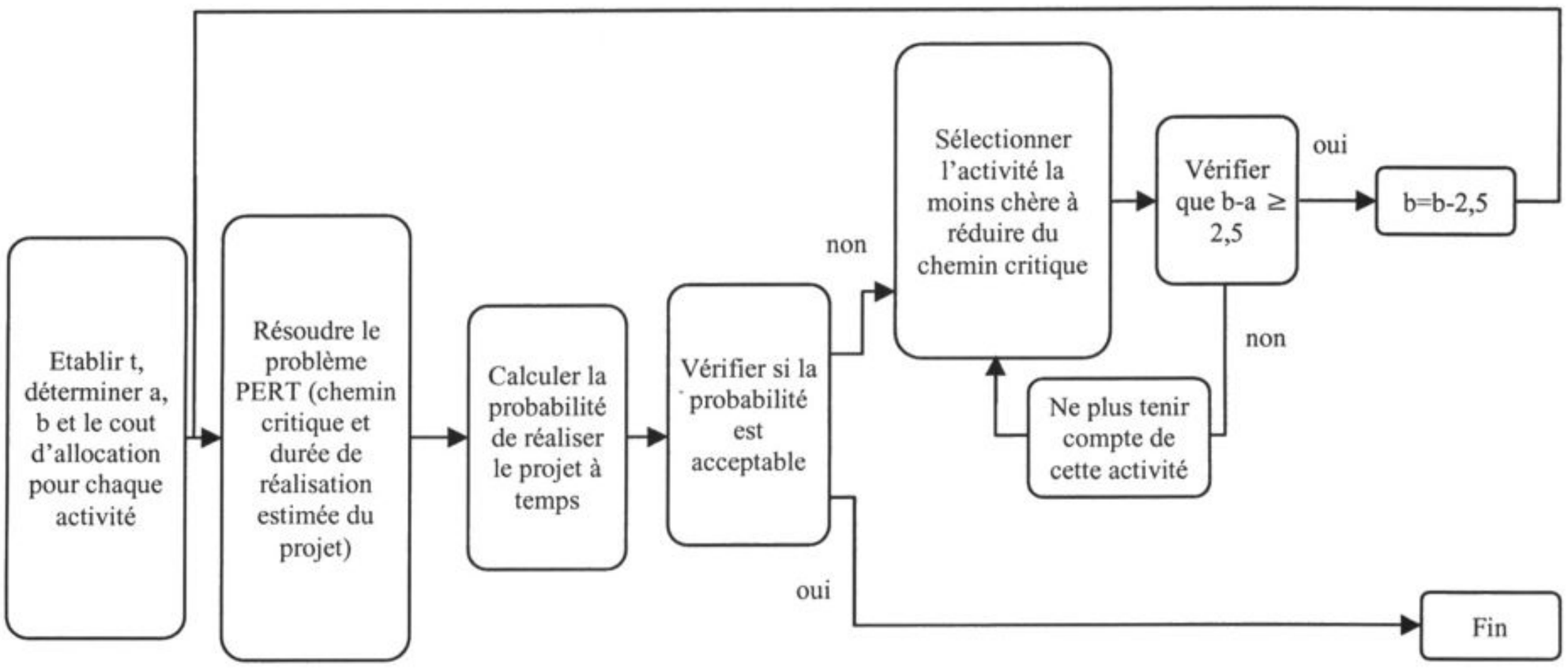


Diagramme 1 : Algorithme de MacLeod et Petersen

1.1.4 La méthode PNET

Lorsque les limites du PERT sont étudiées, on remarque que plus il y a de parallélisme[4] dans le réseau, plus grande sera l'erreur sur le temps calculé de réalisation du projet (Archibald et Villoria, 1967). De plus, le biais sera d'autant plus important que les durées des différents chemins du réseau sont proches. Cependant, la prise en compte de la corrélation entre les chemins tend à compenser le biais du parallélisme.

Ang, Abdelnour et Chaker proposent en 1975 une méthode probabiliste pour évaluer différemment la durée de réalisation d'un projet : la méthode PNET (Probabilistic Network Evaluation Technique)[5]. Cette méthode tend à corriger les erreurs du PERT dues au parallélisme dans le réseau, relevées par Archibald et Villoria (1967).

La probabilité $p(t)$ de terminer un projet dans le temps t est bornée par le produit des probabilités de terminer chaque chemin dans le temps t et le minimum des probabilités de terminer chaque chemin dans le temps t (Ang, Abelnour et Chaker, 1975) :

$$\prod_{i=1}^{n} P(T_i \leq t) \leq p(t) \leq \min P(T_i \leq t)$$

Cas d'égalité : La probabilité de réaliser le projet à temps $p(t)$ est égale au produit des probabilités de terminer chaque chemin dans le temps t lorsqu'il y a une indépendance totale en durée entre les chemins : c'est la probabilité la plus pessimiste.

---

[4] Deux chemins parallèles sont des chemins qui ont très peu d'activités en commun

[5] Technique probabiliste d'évaluation de réseau

La probabilité de réaliser le projet à temps $p(t)$ est égale au minimum des probabilités de terminer chaque chemin dans le temps t lorsqu'il y a une parfaite corrélation entre les chemins : c'est la probabilité la plus optimiste.

La méthode PNET est une méthode PERT améliorée qui prend en compte, dans la probabilité de réaliser le projet à temps, tous les chemins majeurs (appelés plus tard chemins représentatifs).

Elle se base sur 3 observations :

1. Les chemins les plus longs avec de hautes variances vont beaucoup contribuer à $p(t)$
2. Si plusieurs chemins sont « hautement » corrélés à un chemin majeur, alors ils sont représentés par celui-ci. (borne supérieure de l'inégalité)
3. Si plusieurs chemins sont « peu » corrélés, la probabilité de réalisation du projet associé à ces chemins est approximativement le produit des probabilités de ces chemins. (borne inférieure de l'inégalité)

Ces observations ont mené Ang, Abelnour et Chaker (1975) à regrouper les chemins majeurs en sous-groupes selon leurs corrélations. Chaque sous groupe contient des chemins hautement corrélés, et sont représentés par un seul d'entre eux. Pris deux à deux, les chemins représentatifs ont une corrélation faible. La probabilité de réaliser le projet à temps est alors donné par le produit des probabilités de réaliser les chemins représentatifs à temps.

Algorithme du PNET d'Ang Abelnour et Chaker :

1. Générer de façon séquentielle les chemins les plus significatifs[6], classés par ordre décroissant de durées espérées.
2. Evaluer l'écart-type de chaque chemin
3. Calculer les coefficients de corrélation ρ_{ij} entre le chemin critique et chacun des chemins les plus significatifs.
4. Pour chaque chemin :
    a. Si $\rho_{ij} > 0.5$, représenter le chemin par le chemin critique
    b. Si $\rho_{ij} \leq 0.5$, les chemins forment un sous-ensemble de chemins, sur lequel répéter les étapes 1 et 3
5. Calculer la probabilité de compléter chaque chemin représentatif obtenu à l'étape 4.

On a alors $p(T \leq t) \approx p(T_1 \leq t)p(T_2 \leq t)...p(T_\eta \leq t)$ où les chemins 1..n sont les chemins représentatifs, ils ont un coefficient de corrélation entre eux inférieur à 0.5, ils sont considérés comme statistiquement quasi-indépendants.

---

[6] Les chemins les plus significatifs sont ceux qui ont une durée espérée supérieure à un certain pourcentage de la durée espérée du chemin critique. On peut par exemple utiliser la règle du pouce, qui sélectionne les chemins les plus significatifs si leur durée espérée est supérieure à celle du chemin critique moins 2 écarts-types du chemin critique.

Pour information, le coefficient de corrélation ρ_{ij} entre deux chemins i et j est égal au rapport de la somme des variances des activités qui partagent les chemins i et j, par le produit des écarts-types du chemin i et du chemin j : $\rho_{ij} = \frac{\sum_{k \in \Pi_i \cap \Pi_j} \sigma_k^2}{\sigma_i \sigma_j}$

- ρ_{ij} est le coefficient de corrélation entre les chemins i et j
- $k \in \Pi_i \cap \Pi_j$ correspond aux activités communes k aux chemins i et j
- σ_k^2 est la variance de l'activité k
- σ_i est l'écart-type du chemin i

1.2 Contribution scientifique

1.2.1 Pourquoi créer un outil d'estimation du compromis entre allocation de ressources et probabilité de réaliser le projet à temps

Pour prendre en compte la dépendance statistique des durées des chemins dans la détermination de la durée totale du projet, Ika (2005, p.6-8) a intégré la méthode PNET d'Ang, Abdelnour et Chaker (1975) à l'intérieur de l'algorithme de MacLeod et Petersen (1996). Cela permet de donner plus de validité à la probabilité de compléter le projet à temps. Dans le cadre de ce mémoire, j'ai décidé de poursuivre et de prolonger ce travail en deux temps.

Premièrement, en optimisant l'algorithme pour le rendre plus précis et plus réaliste (mise en place du « chemin le plus critique », et de la méthode PNET). En effet, l'algorithme ne prend pas en compte l'interdépendance en durée des chemins, ce qui ne donne pas à la méthode une précision optimale. A la décharge de MacLeod et Petersen (1996), les calculs étant effectués à la main, ils ne pouvaient pas utiliser une autre méthode que les méthodes manuelles (CPM et PERT modifié).

Deuxièmement en réalisant un outil informatique d'estimation du compromis entre allocation de ressources et probabilité de réaliser le projet à temps pour les gestionnaires de projet. L'algorithme du compromis, réalisé par MacLeod et Petersen (1996) est très fastidieux à effectuer manuellement. En effet, il est nécessaire de rentrer dans les détails théoriques de la gestion de projet pour effectuer ces calculs, ce qui rebute les gestionnaires de projet les plus motivés, alors que les automatiser leur rendrait la méthode accessible. De plus, la simulation est un outil puissant pour planifier la

conception et la réalisation de systèmes complexes. Or peu de managers l'utilisent dans leur travail (Chan, 1997). En conséquence, un outil informatique pour estimer ce compromis va permettre d'effectuer des calculs plus précis et une utilisation plus simple de la part des gestionnaires de projet, qui seraient alors plus enclins à utiliser ces méthodes.

1.2.2 Mes propositions

Pour réduire les calculs effectués manuellement, optimiser les algorithmes utilisés (MacLeod et Petersen, Ang, Abelnour et Chaker, et Ika) et proposer au gestionnaire de projet un outil le plus automatisé possible, quelques modifications sont nécessaires :

Proposition 1 : Remplacer le chemin « critique » par le chemin « le plus critique »

Dans la méthode PNET décrite par Ang, Abdelnour et Chaker, les coefficients de corrélation sont calculés entre le chemin critique (chemin ayant la durée la plus longue), et les autres chemins significatifs. Je propose de modifier cette approche en prenant en compte le « chemin le plus critique » (celui qui a la probabilité la plus faible de finir le projet dans le temps imparti) et non le chemin critique pour calculer les coefficients de corrélation.

En effet, le « chemin le plus critique » (mis en évidence et nommé par Soroush, 1994) a plus de légitimité d'être le point de comparaison avec les autres car c'est ce chemin qui risque le plus de retarder le projet et non pas le chemin le plus long. Il est le chemin le plus risqué pour la finition du projet. Selon Soroush (1994, p.287), estimer

que le chemin le plus long (chemin critique) permet de définir la probabilité de terminer le projet à temps est extrêmement optimiste.

Proposition 2 : Supprimer les chemins significatifs dans l'algorithme du PNET d'Ang, Abdelnour et Chaker

Je ne vais pas procéder au « filtrage » des chemins qui consiste à ne garder que les chemins significatifs à l'étape 1 de l'algorithme du PNET d'Ang, Abdelnour et Chaker pour deux raisons. D'une part, comme l'a fait Ika (2005) se concentrer sur les chemins les plus longs en utilisant une règle du pouce approximative (ou un pourcentage déterminé du chemin le plus long) peut selon moi générer des « oublis » de chemins. Tous les chemins étant susceptibles de devenir le chemin le plus critique. Bien sûr cela nécessite une force de calcul bien plus importante, et c'est la deuxième raison pour laquelle cette opération existait lorsque les calculs étaient faits à la main. Puisque j'ai opté pour une méthode automatique qui permet de faire de nombreux calculs aisément, tous les chemins seront donc soumis à l'étape de détermination des chemins représentatifs à travers la matrice des corrélations.

Proposition 3 : Allouer des ressources à l'activité la moins chère du chemin « le plus critique » et non du chemin « critique » dans l'algorithme de MacLeod et Petersen

A l'étape 7 de l'algorithme du compromis allocation de ressources / probabilité de réaliser le projet de MacLeod et Petersen, lorsque la probabilité n'est pas satisfaisante, une allocation de ressource est réalisée, sous condition que $b - a \geq 2.5$, à l'activité la moins coûteuse à réduire du chemin critique. Le but étant d'améliorer la

probabilité de réaliser le projet à temps. Pour les mêmes raisons que pour la proposition 1, je considère que le chemin dont la probabilité doit être améliorée est le chemin le plus critique et non le chemin critique.

Proposition 4 (Ika, 2005) : Dans l'algorithme du compromis de MacLeod et Petersen (1996) lors du calcul de la probabilité de terminer le projet à temps, remplacer la méthode PERT par la méthode PNET modifiée des propositions précédentes.

A l'étape 4 de l'algorithme de Mac Leod et Petersen, nous cherchons à déterminer la probabilité de réaliser le projet dans le temps imparti. Mac Leod et Petersen nous invitent à utiliser la méthode PERT. Il s'agit de déterminer le chemin le plus long : le chemin critique. La probabilité de finir ce chemin dans le temps imparti est la probabilité de finir le projet dans le temps imparti.

En prolongeant le travail de Ika (2005), je remplace cette méthode par une méthode plus précise mais plus coûteuse (en terme de ressources) : la méthode PNET modifiée. Il s'agit maintenant de déterminer les chemins représentatifs parmi tous les chemins, à l'aide des coefficients de corrélation entre le chemin le plus critique et chacun des autres chemins. Pour le calcul de la probabilité finale, les chemins corrélés d'un sous-groupe seront représentés par le chemin le plus critique du sous-groupe. Les chemins représentatifs ne seront pas corrélés entre eux, et seront alors considérés comme statistiquement quasi-indépendants. Ils participeront donc tous au calcul de la probabilité finale.

1.2.3 Conséquences

Les conséquences de ces propositions modifient significativement l'algorithme de base de MacLeod et Petersen et celui du PNET d'Ang, Abdelnour et Chaker. Pour ce dernier, l'étape de recherche des chemins significatifs est supprimée, et le calcul des coefficients de corrélations se fait maintenant avec le « chemin le plus critique » et non plus le chemin critique, comme le suggère Soroush (1994). Dans l'algorithme d'allocation des ressources, l'algorithme du PNET modifié remplace la méthode PERT classique pour calculer la probabilité de terminer le projet à temps. Pour finir, l'allocation des ressources se fait maintenant sur l'activité la moins coûteuse du chemin le plus critique et non plus du chemin critique.

Lors de la simulation, une activité commencée ne peut être interrompue avant la fin de celle-ci (on ne peut donc pas considérer qu'une activité fasse une pause pour reprendre plus tard).

Algorithme final de MacLeod et Petersen amélioré par la méthode PNET modifié :

1. Déterminer les durées optimistes et pessimistes a et b pour chaque activité
2. Déterminer les coûts induits par l'allocation des ressources pour chaque activité (coût par mois d'accélération)
3. Etablir la durée t au bout de laquelle le projet doit être terminé
4. Résolution du problème de planification par la méthode PNET :

a. Evaluer l'écart-type de chaque chemin

b. Calculer les coefficients de corrélation ρ_{ij} entre le « chemin le plus critique » que nous appellerons dans cette étape le chemin caractéristique et chacun des chemins les plus significatifs (dans notre cas, tous les autres chemins)

c. Pour chaque chemin :

i. Si $\rho_{ij} > 0.5$, représenter le chemin par le chemin caractéristique

ii. Si $\rho_{ij} \leq 0.5$, ce chemin ainsi que tous les autres dont le coefficient de corrélation est inférieur ou égal à 0.5 forment un sous ensemble de chemins parmi lesquels le nouveau chemin le plus critique du sous-ensemble est celui qui a la probabilité la plus faible de finir le projet dans le temps imparti. Revenir à l'étape b.

5. Calculer la probabilité de terminer le projet dans les temps $p(T \leq t) \approx p(T_1 \leq t)p(T_2 \leq t)...p(T_\eta \leq t)$ où T est le temps espéré du projet, t le temps imparti imposé, et $T_1, T_2, \ldots, T_n$ sont les temps espérés des chemins représentatifs

6. Si la probabilité est acceptable : fin de l'algorithme. Si elle ne l'est pas, rechercher l'activité la moins couteuse du chemin le plus critique. Vérifier qu'elle puisse bien être réduite (IE : $b - a \geq 2.5$), et enregistrer la quantité de ressources allouées.

7. Réduire la durée pessimiste b de 2.5 unités

8. Retourner à l'étape 4

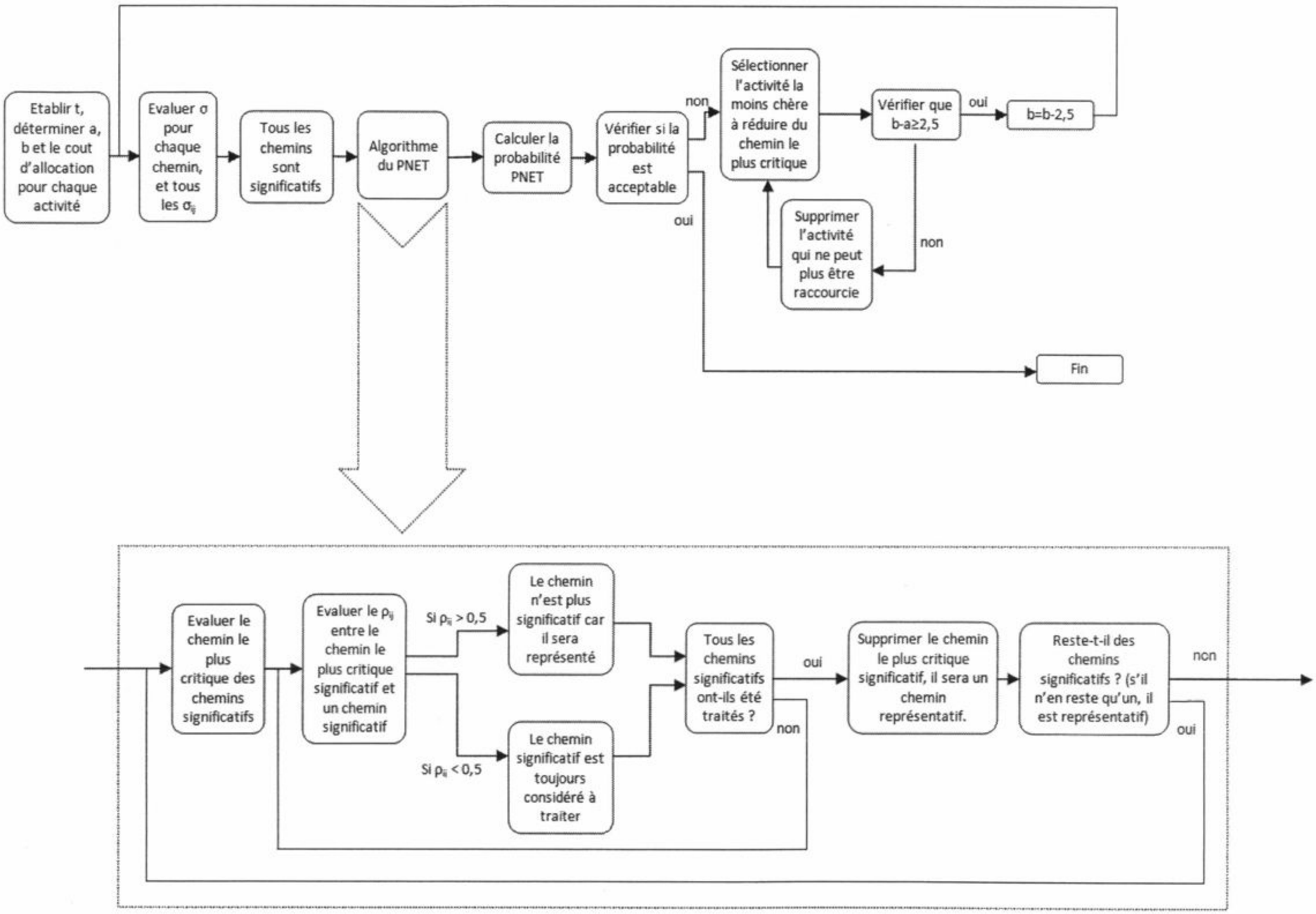


Diagramme 2 : Algorithme final de Mac Leod et Petersen amélioré par la méthode PNET modifié

1.2.4 De l'algorithme au programme VBA

J'ai dans un premier temps testé cet algorithme final de Mac Leod et Petersen amélioré par la méthode PNET, à la main pour en vérifier les résultats. Puis pour développer son accessibilité aux gestionnaires de projet, je l'ai automatisé en langage VBA[7], implémentation de Visual Basic dans les applications de Microsoft Office.

Pour l'arrêt de l'algorithme, plusieurs possibilités s'offrent à nous :

- Après x allocations de ressources (entré par le gestionnaire de projet en début de programme).
- Après avoir atteint un certain pourcentage de probabilité de terminer le projet à temps
- Après avoir atteint un certain budget d'allocation de ressources

Les informations présentées en conclusion au gestionnaire sont pour chaque étape l'activité qui a été accélérée à l'aide d'une allocation supplémentaire de ressources, le coût de l'allocation, le coût cumulé, et la probabilité de terminer le projet dans le temps imparti. Puis un graphe récapitulatif lui est présenté, indiquant en abscisse les étapes d'allocation et en ordonnée d'une part le coût total d'allocation de ressources supplémentaires, et d'autre part la probabilité de réaliser le projet à temps.

---

[7] Visual Basic pour Applications

1.2.5 Illustration : Application du programme à l'exemple de Mac Leod et Petersen

Afin de montrer la force du programme, je vais traiter un exemple extrait de MacLeod et Petersen (1996). Il est important de préciser que le programme a été testé avec d'autres exemples, qui fonctionnent tous dans la limite d'un nombre d'activités raisonnable (une vingtaine) et un maximum de 4 chemins. Les données d'entrée nécessaires sont la durée optimiste et pessimiste de chaque activité, le cout supplémentaire par mois accéléré, une liste des activités par chemin, et le temps imparti pour terminer le projet.

Une compagnie d'électricité prévoit de construire une centrale électrique en moins de 55 mois. Le tableau suivant résume les données de base dont dispose le gestionnaire de projet.

	Données initiales				Coût supplémentaire par mois accéléré
Tâches	Sommet 1	Sommet 2	a	b	
A	1	2	10	16	30 000
B	2	3	2	36	7 500
C	2	4	1	5	7 500
D	2	6	2	4	15 000
E	3	5	8	20	157 000
F	4	5	15	30	600 000
G	4	6	3	8	15 000
H	5	7	2	8	22 500
I	6	7	6	12	15 000
J	7	8	4	14	3 000

Tableau 1 : Données initiales de l'algorithme de MacLeod et Petersen

1.

La première étape de l'utilisation du programme est la détermination des données d'entrée (voir la capture d'écran ci-après).

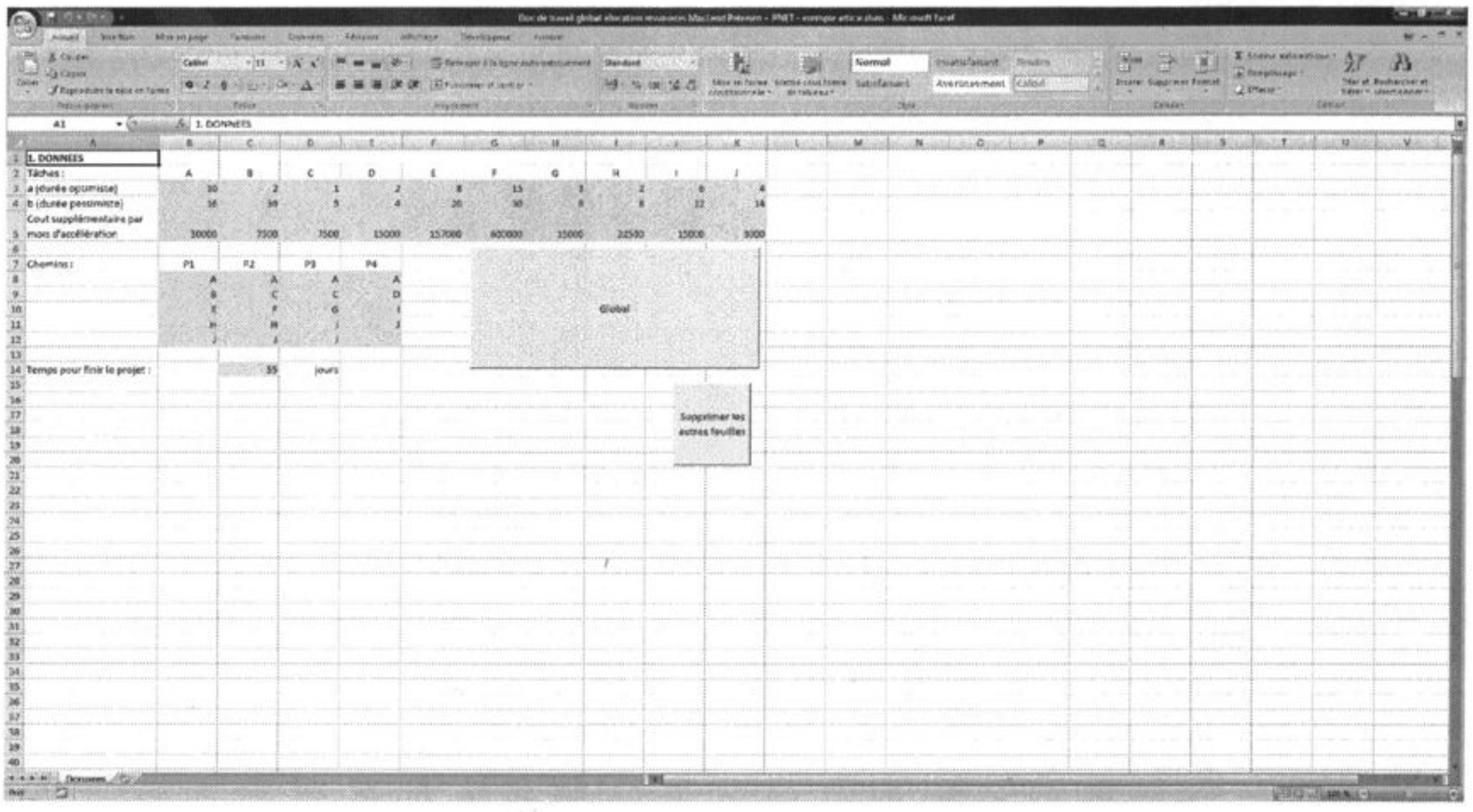


Figure 1 : Données d'entrée du problème

2.

Lorsque le programme est lancé, une boîte de dialogue vous permet d'entrer le nombre d'itérations à effectuer.

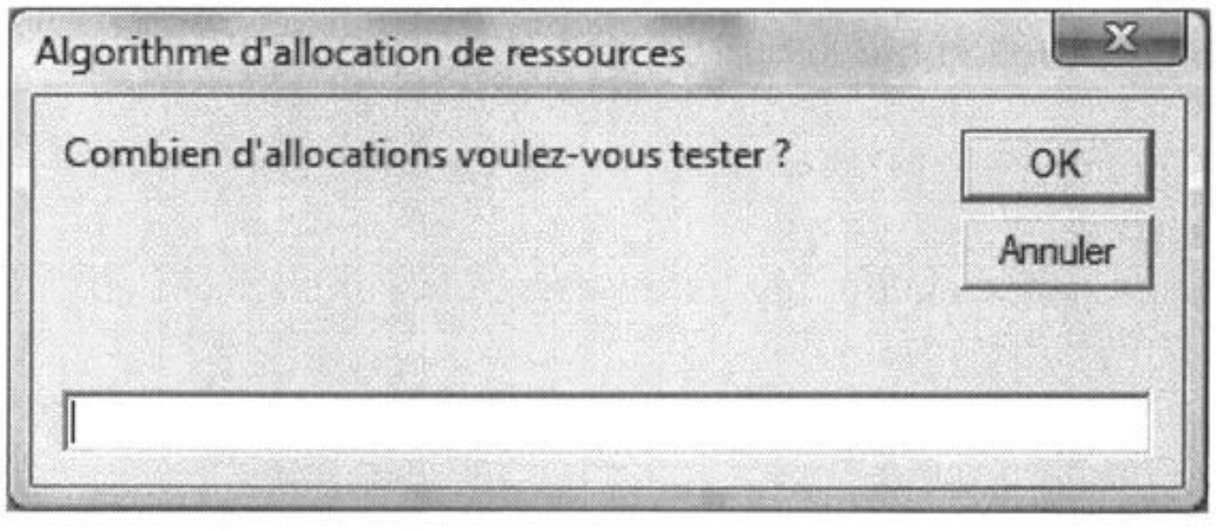


Figure 2 : Détermination du nombre d'itérations

3.

Le programme est alors en cours d'exécution pendant un temps compris entre 1 et 10 secondes.

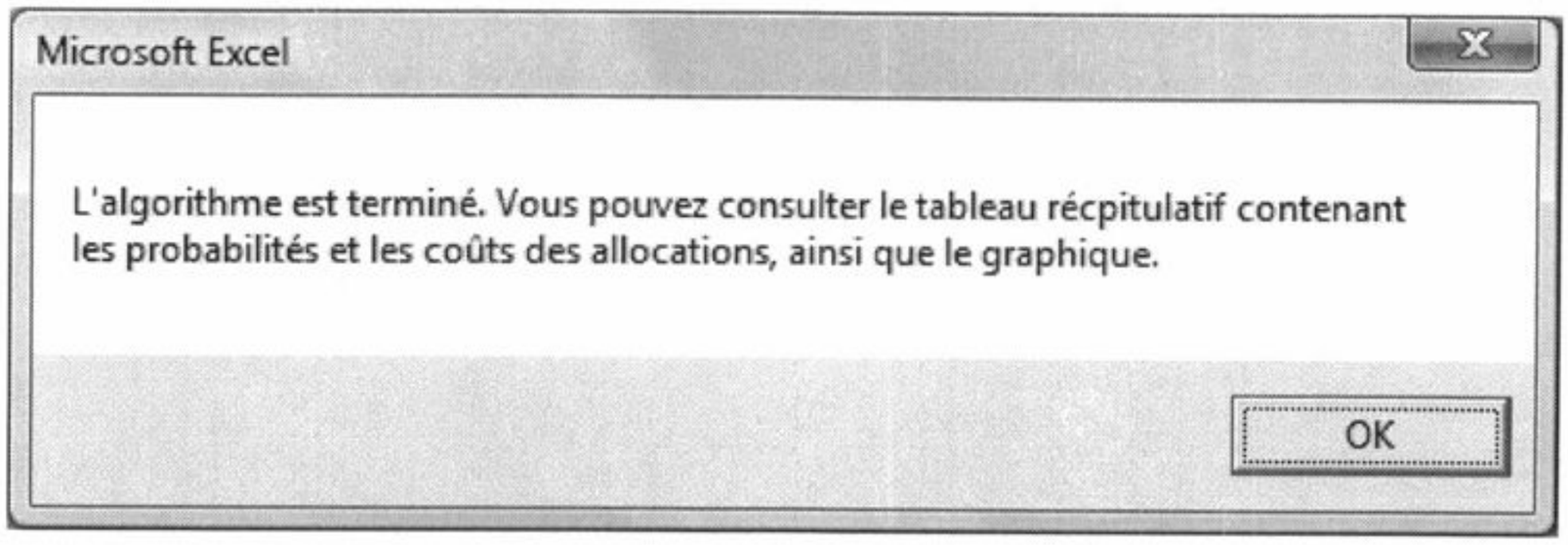


Figure 3 : Message de fin d'algorithme

Avant de détailler les résultats disponibles, voici les calculs auxquels le programme donne accès :

4.

Pour chaque étape d'allocation, un nouveau feuillet est créé sur le classeur Excel du programme. Sur ce feuillet est rappelé les données du problème (à la première allocation il s'agit des données initiales, mais au fur et à mesure des allocations, elles sont modifiées), les différentes probabilités intermédiaires, la matrice de corrélation et le calcul de la probabilité PNET du projet.

Premièrement, pour chaque activité le temps espéré et la variance est calculée. Puis pour chaque chemin, le temps espéré la variance et l'écart type sont calculés, puis la probabilité de terminer le chemin à temps. On peut ainsi faire une première conclusion intermédiaire en déterminant le chemin critique et le chemin le plus critique (voir la capture d'écran ci-après).

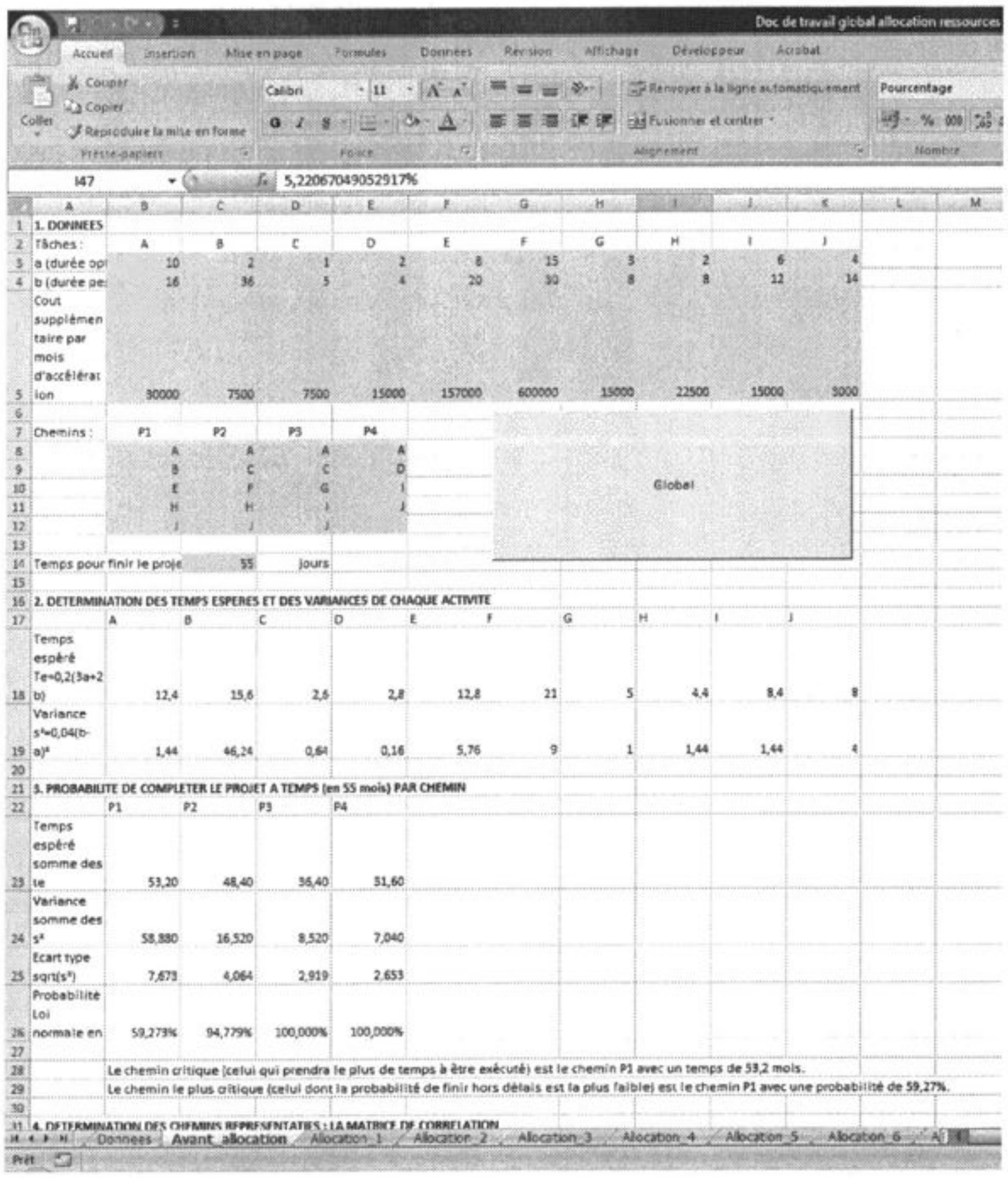


Figure 4 : Détails des calculs d'une étape d'allocation 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
te	12.40	15.60	2.60	2.80	12.80	21.00	5.00	4.40	8.40	8.00
σ^2	1.44	46.24	0.64	0.16	5.76	9.00	1.00	1.44	1.44	4.00

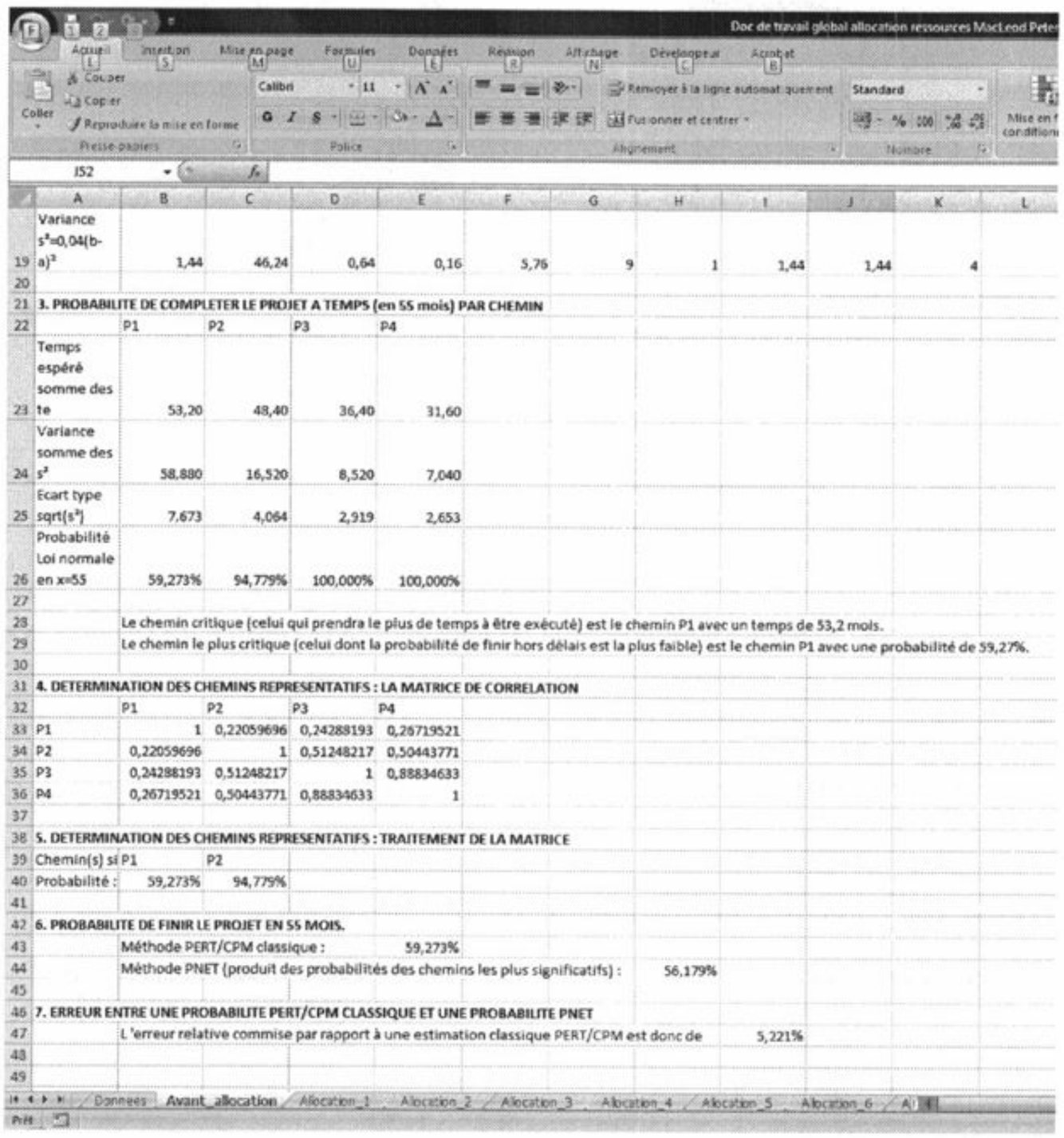
Tableau 2 : Temps espérés et variances à la première étape d'allocation

Chemin P_i	Durée espérée te	Variance σ^2	Ecart-type σ
P_1	53.20	58.88	7.67
P_2	48.40	16.52	4.06
P_3	36.40	8.52	2.92
P_4	31.60	7.04	2.66

Tableau 3 : Durées espérées, variances et écarts-type des chemins à la première étape d'allocation

Ensuite, la matrice des corrélations est affichée, puis le nom et la probabilité de chaque chemin représentatif.

En conclusion du feuillet de l'étape d'allocation, la probabilité de terminer le projet à temps par la méthode PNET et PERT est comparée (voir la capture d'écran ci-après).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
19	Variance $s^2=0,04(b-a)^2$	1,44	46,24	0,64	0,16	5,76	9	1	1,44	1,44	4	
20												
21	3. PROBABILITE DE COMPLETER LE PROJET A TEMPS (en 55 mois) PAR CHEMIN											
22		P1	P2	P3	P4							
23	Temps espéré somme des te	53,20	48,40	36,40	31,60							
24	Variance somme des s^2	58,880	16,520	8,520	7,040							
25	Ecart type sqrt(s^2)	7,673	4,064	2,919	2,653							
26	Probabilité Loi normale en x=55	59,273%	94,779%	100,000%	100,000%							
27												
28		Le chemin critique (celui qui prendra le plus de temps à être exécuté) est le chemin P1 avec un temps de 53,2 mois.										
29		Le chemin le plus critique (celui dont la probabilité de finir hors délais est la plus faible) est le chemin P1 avec une probabilité de 59,27%.										
30												
31	4. DETERMINATION DES CHEMINS REPRESENTATIFS : LA MATRICE DE CORRELATION											
32		P1	P2	P3	P4							
33	P1	1	0,22059696	0,24288193	0,26719521							
34	P2	0,22059696	1	0,51248217	0,50443771							
35	P3	0,24288193	0,51248217	1	0,88834633							
36	P4	0,26719521	0,50443771	0,88834633	1							
37												
38	5. DETERMINATION DES CHEMINS REPRESENTATIFS : TRAITEMENT DE LA MATRICE											
39	Chemin(s) si	P1	P2									
40	Probabilité :	59,273%	94,779%									
41												
42	6. PROBABILITE DE FINIR LE PROJET EN 55 MOIS.											
43		Méthode PERT/CPM classique :	59,273%									
44		Méthode PNET (produit des probabilités des chemins les plus significatifs) :	56,179%									
45												
46	7. ERREUR ENTRE UNE PROBABILITE PERT/CPM CLASSIQUE ET UNE PROBABILITE PNET											
47		L 'erreur relative commise par rapport à une estimation classique PERT/CPM est donc de	5,221%									
48												
49												

Figure 5 : Détails des calculs d'une étape d'allocation 2

	P_1	P_2	P3	P_4
P_1	1.000	0.221	0.243	0.267
P_2		1.000	**0.512**	**0.504**
P_3			1.000	**0.888**
P_4				1.000

Tableau 4 : Matrice de corrélation à la première étape d'allocation

*Dans ce cas, avant allocation, le chemin le plus critique est P1, les chemins représentatifs sont les chemins P1 et P2, donc la probabilité de terminer le projet en 55 mois est : p = 0.5927 * 0.9478 = 56,18%. L'erreur relative commise par rapport à une estimation classique PERT/CPM (59,27%) est de 5,22%, ce qui est tout de même important. Cet écart se réduira au fur et à mesure des allocations.*

Pour finir, la probabilité PNET est reportée sur la page de données principales, ainsi que le chemin le plus critique. Le programme calcule sur quelle activité va être allouées des ressources supplémentaires (voir la capture d'écran ci-après).

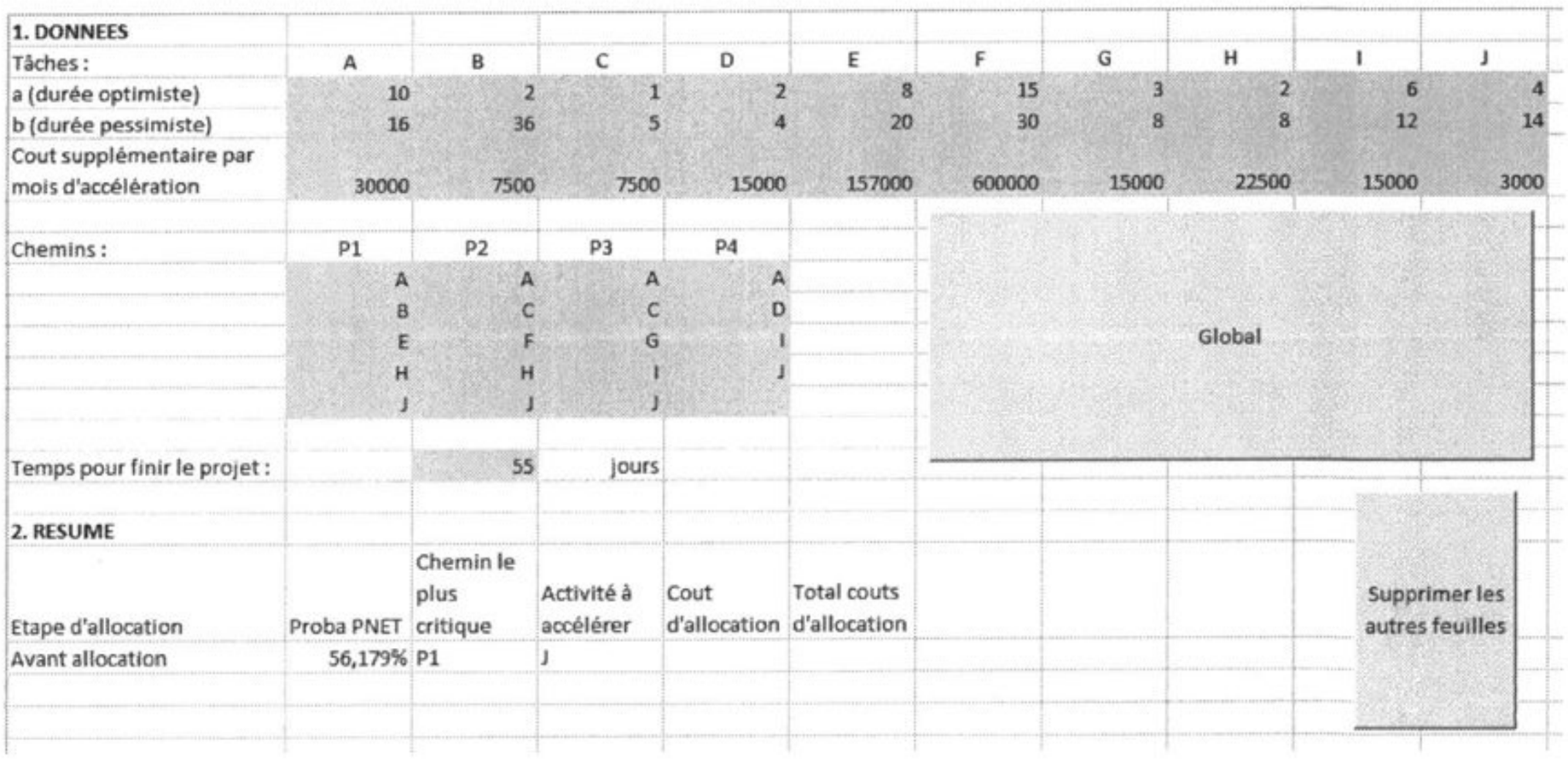


Figure 6 : Résultat reporté sur la page principale du programme

A l'étape suivante, des ressources supplémentaires sont allouées à l'activité précédemment désignée. Le projet dure un mois de moins, et le cout de l'allocation est calculé.

Dans ce cas pour augmenter la probabilité de finir le projet à temps (56,18%), il faut augmenter la probabilité d'un chemin représentatif de finir à temps. Pour que cela soit le plus efficace possible, il faut donc allouer des ressources au « chemin le plus critique ». Le chemin le plus critique étant le chemin P1, les différentes activités susceptibles d'être accélérées sont les activités A, B, E, H et J. L'activité la moins coûteuse à accélérer est la J (3 000$/mois accéléré).

Chemin P_i	Durée espérée te	Variance σ^2	Ecart-type σ
P_1	52.20	57.13	7.56
P_2	47.40	14.77	3.84
P_3	35.40	6.77	2.60
P_4	30.60	5.29	2.30

Tableau 5 : Durées espérées, variances et écarts-type des chemins à la deuxième étape d'allocation

$p(T_{P1} \leq 55)$	$p(T_{P2} \leq 55)$	$p(T_{P3} \leq 55)$	$p(T_{P4} \leq 55)$
64.45%	97.60%	100.00%	100.00%

Tableau 6 : Probabilités calculées à la deuxième étape d'allocation

Puis le nouveau tableau de données est copié dans un nouvel onglet, pour recommencer le processus, et ainsi de suite.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	**1. DONNEES**										
2	Tâches :	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
3	a (durée optimiste)	10	2	1	2	8	15	3	2	6	4
4	b (durée pessimiste)	16	36	5	4	20	30	8	8	12	14
5	Cout supplémentaire par mois d'accélération	30000	7500	7500	15000	157000	600000	15000	22500	15000	3000
6											
7	Chemins :	P1	P2	P3	P4						
8		A	A	A	A						
9		B	C	C	D						
10		E	F	G	I						
11		H	H	I	J						
12		J	J	J							
13											
14	Temps pour finir le projet :		55	jours							
15											
16	**2. RESUME**										
17	Etape d'allocation	Proba PNET	Chemin le plus critique	Activité à accélérer	Cout d'allocation	Total couts d'allocation					
18	Avant allocation	56,179%	P1	J							
19	Allocation_1	62,901%	P1	J	3000	3000					
20	Allocation_2	68,768%	P1	J	3000	6000					
21	Allocation_3	73,834%	P1	J	3000	9000					
22	Allocation_4	78,209%	P1	B	3000	12000					
23	Allocation_5	83,485%	P1	B	7500	19500					
24	Allocation_6	88,364%	P1	B	7500	27000					
25	Allocation_7	92,548%	P1	B	7500	34500					
26	Allocation_8	95,786%	P1	B	7500	42000					
27	Allocation_9	97,959%	P1	B	7500	49500					
28	Allocation_10	99,162%	P1	B	7500	57000					
29	Allocation_11	99,675%	P1	B	7500	64500					
30	Allocation_12	99,829%	P2	C	7500	72000					
31	Allocation_13	99,926%	P2	H	7500	79500					
32	Allocation_14	99,984%	P1	B	22500	102000					
33	Allocation_15	99,992%	P2	H	7500	109500					
34	Allocation_16	99,998%	P2	A	22500	132000					
35	Allocation_17	100,000%	P2	A	30000	162000					
36	Allocation_18	100,000%	P2	F	30000	192000					
37	Allocation_19	100,000%	P1	B	600000	792000					
38	Allocation_20	100,000%	P2	F	7500	799500					

Global

Supprimer les autres feuilles

Donnees | Avant_allocation | Allocation_1 | Allocation_2 | Allocation_3 | Allocation_4 | Allocation_5 | Allocation_6 | A

Prêt

Figure 7 : Résultats du programme

Après 4 mois d'accélération sur l'activité J, la probabilité de terminer le projet à temps est de 78.21% et le coût d'allocation des ressources est de 12 000$. L'activité J ne pouvant plus être accélérée (car b-a<2.5), et la probabilité n'étant pas suffisamment satisfaisante, il faut accélérer une nouvelle activité. L'activité B est la nouvelle activité du « chemin le plus critique» la moins coûteuse.

A l'étape de l'allocation 9, après 5 mois accélérés sur l'activité B, le chemin critique passe du chemin P1 au chemin P2, mais le « chemin le plus critique » (celui qui

a la probabilité la plus faible de finir le projet dans les temps) reste le chemin P1. C'est pourquoi nous continuons la procédure.

A l'étape de l'allocation 12, après 8 mois accélérés sur l'activité B, le « chemin le plus critique » devient le chemin 2. C'est pourquoi nous arrêtons l'allocation de ressources sur l'activité B. Parmi les activités du chemin 2, la moins couteuse est l'activité C.

A l'étape de l'allocation 13, l'activité C ne pouvant plus être accélérée (b-a = 1 < 2.5), l'activité la moins couteuse sur le « chemin le plus critique » devient l'activité H.

A l'étape de l'allocation 14, après avoir accéléré d'un mois l'activité H, le « chemin le plus critique » devient le chemin 1. L'activité à accélérer est alors l'activité B.

A l'étape de l'allocation 15, après avoir accéléré d'un mois l'activité B, le « chemin le plus critique » redevient le chemin 2. L'activité à accélérer est alors l'activité H.

A l'étape de l'allocation 16, la probabilité de réaliser le projet en 55 jours est de 99.998%

Pour conclure le programme, un graphe est généré automatiquement avant le premier onglet du classeur, montrant l'évolution du coût total d'allocation de ressources et la probabilité de terminer le projet à temps, en fonction du nombre d'allocations (voir la capture d'écran ci-après). Ce graphe permet au gestionnaire d'effectuer ses choix plus aisément car puisqu'il s'agit d'un compromis il n'y a pas une unique solution. La meilleure solution dépendra donc des exigences propres au projet.

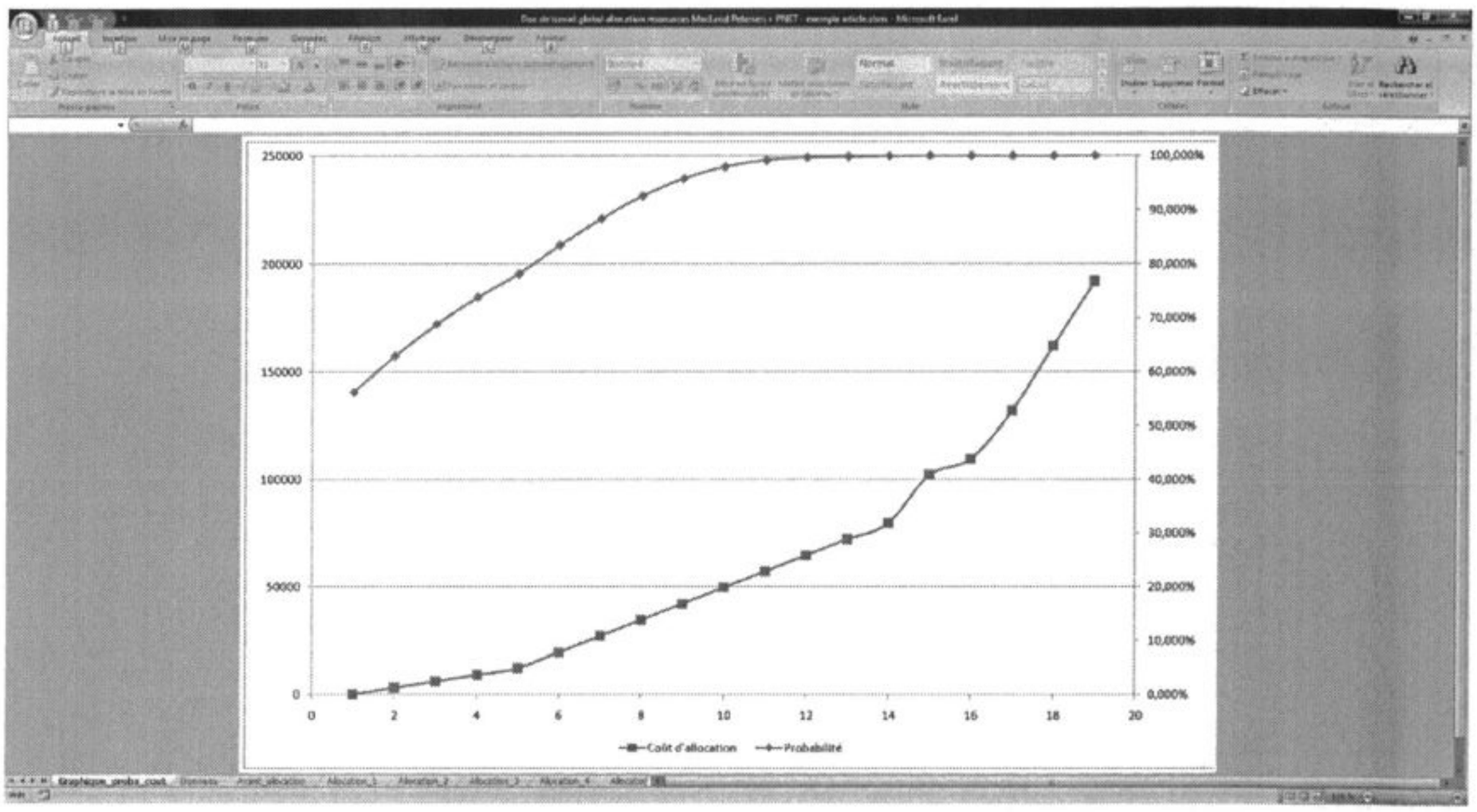


Figure 8 : Graphe récapitulatif de l'évolution de la probabilité et du coût en fonction des allocations supplémentaires de ressources

Ce graphe permet de visualiser rapidement et plus simplement qu'avec un tableau de valeurs, le résultat de l'algorithme. On remarque qu'entre l'allocation 1 et 10, au plus des ressources sont allouées, au plus la probabilité augmente, et qu'au-delà de l'allocation 10, la probabilité reste quasi constante à 100%. Alors que le coût total

d'allocation augmente de façon exponentielle avec les allocations. Si j'étais gestionnaire de projet, je choisirais d'allouer des ressources supplémentaires car la probabilité a progressé significativement. Je ne considère pas nécessaire d'effectuer 20 allocations de ressources, car bien que sûr d'avoir une probabilité de 100%, le coût serait trop important. A partir de l'allocation 10, la progression de la probabilité est minime alors que les dépenses deviennent de plus en plus grandes. Je considère que c'est une étape correcte pour arrêter les allocations.

Etape d'allocation	Activité	Mois accélérés	Coût par mois	Coût total	Probabilité totale PNET	Probabilité totale PERT	Chemin critique	Chemins représent-atifs	Chemin le plus critique
Avant allocation			0	0	56,180%	59,270%	1	1 2	1
Allocation 1	J	1	$ 3 000	$ 3 000	62,901%	64,448%	1	1 2 3	1
Allocation 2	J	1	$ 3 000	$ 6 000	68,768%	69,439%	1	1 2 3	1
Allocation 3	J	1	$ 3 000	$ 9 000	73,834%	74,101%	1	1 2 3	1
Allocation 4	J	1	$ 3 000	$ 12 000	78,209%	78,316%	1	1 2 3	1
Allocation 5	B	1	$ 7 500	$ 19 500	83,485%	83,600%	1	1 2 3	1
Allocation 6	B	1	$ 7 500	$ 27 000	88,364%	88,485%	1	1 2 3	1
Allocation 7	B	1	$ 7 500	$ 34 500	92,548%	92,675%	1	1 2 3	1
Allocation 8	B	1	$ 7 500	$ 42 000	95,786%	95,917%	1	1 2 3	1
Allocation 9	B	1	$ 7 500	$ 49 500	97,959%	99,863%	2	1 2 3	1
Allocation 10	B	1	$ 7 500	$ 57 000	99,162%	99,863%	2	1 2 3	1
Allocation 11	B	1	$ 7 500	$ 64 500	99,675%	99,863%	2	1 2 3	1
Allocation 12	B	1	$ 7 500	$ 72 000	99,926%	99,960%	2	1 2 3	2
Allocation 13	C	1	$ 7 500	$ 79 500	99,926%	99,960%	2	1 2 3	2
Allocation 14	H	1	$ 22 500	$ 102 000	99,984%	99,993%	2	1 2 3	1
Allocation 15	B	1	$ 7 500	$ 109 500	99,992%	99,993%	2	1 2 3	2
Allocation 16	H	1	$ 22 500	$ 132 000	99,998%	99,999%	2	1 2 3	2
Allocation 17	A	1	$ 30 000	$ 162 000	100,000%	100,000%	2	1 2 3	2

Tableau 7 : Résumé des allocations de ressources

A l'aide du tableau récapitulatif, on peut arriver aux mêmes conclusions qu'avec le graphe précédent, mais de façon chiffrée. A l'allocation 10, la probabilité aura augmenté de 56.18% à 99.16%, pour un coût de 57 000$. Si l'on continuait les allocations jusqu'à la 17, la probabilité augmenterait de 99.16% à 100% pour un coût de 105 000$ supplémentaires, ce qui ne serait pas considéré comme une dépense nécessaire.

On peut remarquer que la probabilité donnée par la méthode PNET est toujours inférieure à celle donnée par la méthode PERT traditionnelle, ce qui confirme que la méthode PERT sous-estime toujours la réalité (Omar, 2009, P.32).

1.3 Bilan

A la main, cet algorithme est impensable car trop complexe et coûteux en temps de planification, bien que concret et précis. Mais à l'aide d'une méthode informatique, il devient très pratique et fonctionnel. C'est pourquoi j'ai développé un programme permettant d'arriver à ces conclusions. Le gestionnaire reste libre de prendre les décisions qu'il veut à l'aide des résultats de ce programme, qui ne prétend pas donner une solution unique et universelle.

Dans l'exemple de MacLeod et Petersen, le livrable de mon programme est en priorité le graphe. Le gestionnaire peut à l'aide de celui-ci constater qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer 17 allocations et d'avoir une probabilité parfaite de 100%. En effet, entre l'étape 10 et l'étape 17, la probabilité a augmenté de 0,8% pour un coût de 105 000$. Le gestionnaire peut alors à l'aide du graphe constater qu'allouer 57 000$ de ressources supplémentaires permet d'atteindre une probabilité de 99.16% de terminer son projet dans le temps imparti. Il sera largement plus performant qu'avant allocation, sans forcément dépenser les 162 000$ qui permettent d'atteindre la probabilité de 100%.

Bien sûr il ne s'agit que d'un exemple, mais cela montre que le gestionnaire de projet doit garder un regard critique sur les résultats des méthodes informatiques. La prise de décision en gestion de projet reste subjective car de nombreux paramètres influencent les décisions du gestionnaire. Lui seul pourra prendre la décision finale en fonction de la probabilité recherchée, du budget des allocations de ressources supplémentaires, et des autres paramètres du projet.

2.1 Contexte théorique

2.1.1 Introduction à la valeur acquise

Contrôler les coûts et les délais à chaque étape-clef d'un projet est primordial, car ce sont deux aspects caractéristiques pour juger de la performance en gestion de projet[8].

La connaissance de ces données permet notamment de rendre des comptes en comité de pilotage. En effet aux Etats-Unis, depuis la loi Sarbanes-Oxley[9] de 2002, les présidents et les directeurs financiers sont tenus responsables de la présentation précise de la santé financière de leur entreprise. Cette récente obligation peut être un prétexte de l'utilisation d'outils d'analyse des performances des projets (Fleming & Koppelman, 2004, p.4).

La connaissance de ces données permet également de proposer des actions correctives en cas d'écart important avec ce qui a été planifié (Fleming & Koppelman, 2006). Ces actions peuvent par exemple être selon le contexte, un changement des horaires de travail, une réduction de l'envergure du projet ou une augmentation du budget.

Pour cela les gestionnaires de projet ont à leur disposition un outil dont la qualité des résultats et des décisions qui en découlent dépend de sa pertinence et de sa précision.

---

[8] Il existe d'autres manières de juger la performance d'un projet, en analysant la satisfaction des parties prenantes, l'impact du projet, …

[9] Suite aux différents scandales financiers révélés aux Etats-Unis au début des années 2000, les sénateurs Paul Sarbanes et Mike Oxley ont promu une loi sur la réforme de la comptabilité des sociétés cotées et la protection des investisseurs, qui oblige les présidents et les directeurs financiers de certifier personnellement les comptes de leur société.

L'outil en question est la valeur acquise, méthode basée sur une planification PERT / CPM.

L'analyse de la valeur acquise se fait à l'aide de la mesure de trois types de coûts :

- BCWS (Budgeted Cost of Work Scheduled) ou VP (Valeur Planifiée) : Coût budgétisé du travail planifié au temps t.
- ACWP (Actual Cost of Work Performed) ou VR (Valeur Réelle) : Coût réel du travail effectué au temps t.
- BCWP (Budgeted Cost of Work Performed) ou VA (Valeur Acquise) : Coût budgétisé du travail effectué au temps t.

La valeur acquise est donc un concept simple : au cours du projet, le travail réellement accompli est mesuré à la lumière des coûts budgétisés.

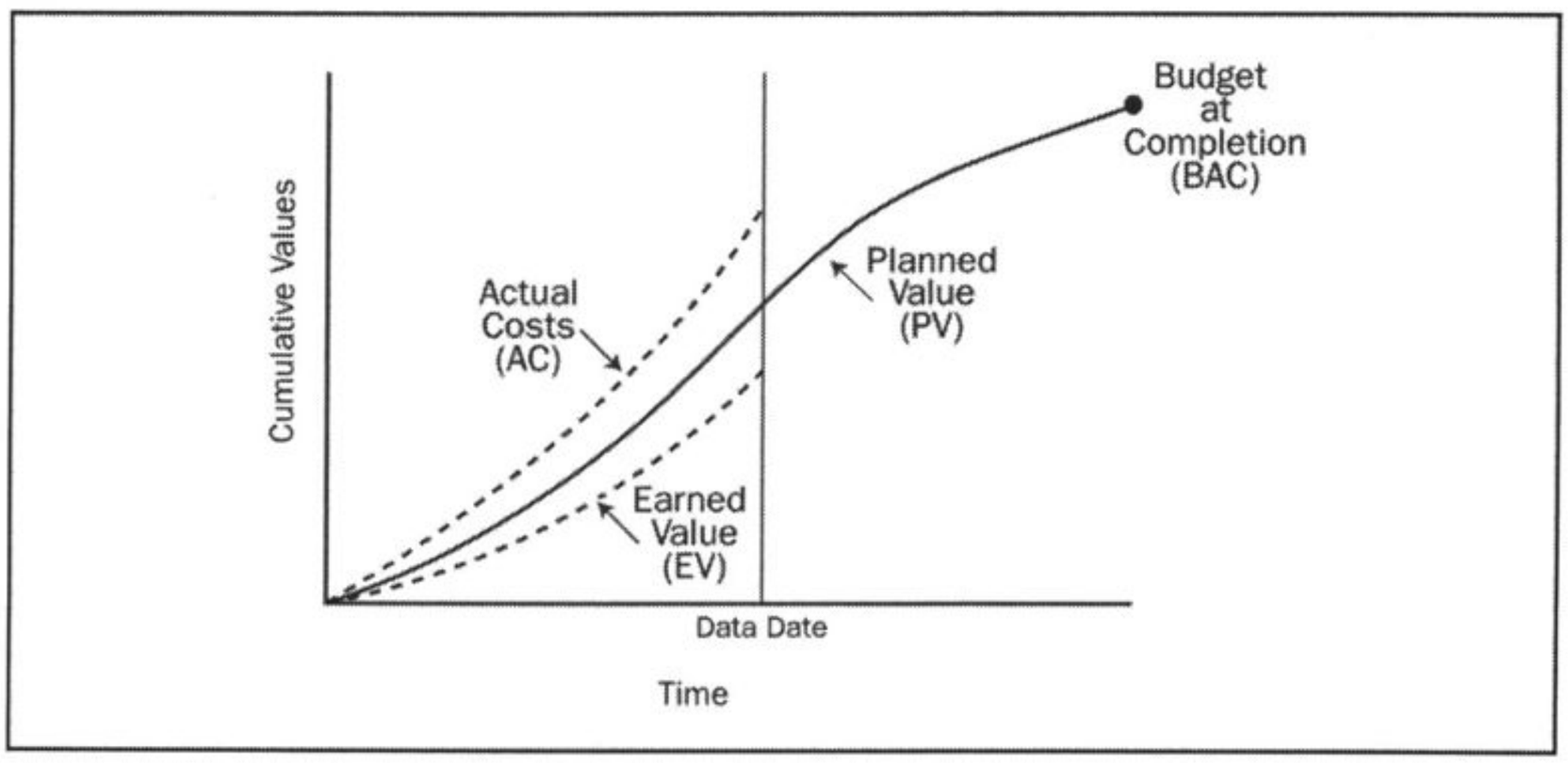


Figure 9 : Exemple de rapport graphique de performance (PMI, 2004)

De ces trois valeurs découlent deux indicateurs principaux de performance :

Premièrement, l'indice de performance par rapport au plan SPI (Schedule Performance Index) qui compare la valeur acquise à la valeur planifiée. Cela permet de détecter toute avance (SPI>1) ou retard (SPI<1) dans l'exécution du projet.

Deuxièmement, l'indice de performance par rapport au coût CPI (Cost Performance Index) qui compare la valeur acquise à la valeur réelle. Cela permet d'évaluer tout dépassement (CPI<1) ou économie (CPI>1) budgétaire.

Concrètement, lors du suivi du projet, la valeur acquise est comparée à la valeur réelle pour déterminer la performance par rapport au coût du projet, et à la valeur planifiée pour déterminer la performance par rapport au plan du projet.

On peut ajouter également que ces trois valeurs permettent de déterminer d'autres indicateurs de la performance du projet comme les variances de coût et du plan qui expriment les différences entre le coût estimé et le coût réel, ou entre la progression réelle et la progression planifiée.

2.1.2 Problème de la valeur acquise

Selon Flemming et Koppelman (2004), la gestion par la valeur acquise est très peu utilisée par les gestionnaires de projet car trop théorique et très peu pratique. En effet il faut manier le vocabulaire de la théorie pure de gestion de projet pour comprendre la méthode, ce qui rebuterait la plupart des gestionnaires. De plus, ils ne pensent pas

forcément qu'un outil créé pour un projet de 19 milliards de dollars en 1962 puisse être adapté à un projet d'une échelle moindre.

Pour conclure, je pense que la difficulté de la méthode et le manque d'engouement de la part des gestionnaires de projet freine leur utilisation de la valeur acquise. De plus, la précision d'un outil provenant de méthodes PERT/CPM n'est pas assurée, comme nous avons pu voir dans la première partie. Par exemple l'interdépendance des chemins n'est pas prise en compte, ce qui fausse la probabilité de terminer le projet à temps car deux ou plusieurs chemins peuvent avoir des activités en commun. Par conséquent, si un chemin a une très grande durée, les autres chemins qui ont des activités en commun avec lui pourraient avoir une grande durée également (cf. Ika, 2005).

C'est pourquoi une solution peut être la présentation d'une nouvelle méthode de suivi de la performance en adaptant la méthode de la valeur acquise au contexte d'interdépendance de la durée des chemins du réseau. Celle-ci permettrait au gestionnaire de simplifier la méthode au strict minimum, améliorerait la précision des résultats, et surtout rendrait l'outil plus accessible à tous les gestionnaires.

Si cette méthode apporte plus d'informations et améliore la précision des résultats, je pense que les gestionnaires seraient plus enclins à l'utiliser car ils y trouveraient un intérêt. Et si elle est accessible, ils seraient, selon moi, moins gênés de l'utiliser.

Je vais donc proposer une méthode informatique pour « automatiser » les calculs liés à cet outil, ce que Ika (2005) avait commencé à faire sans tenir compte des différents

cas de figures possibles (dépendance ou indépendance en durée entre les chemins du réseau), ni de l'automatisation de la méthode. A l'aide de l'outil informatique VBA (Visual Basic for Applications) dans Microsoft Excel, le travail du gestionnaire de projet sera simplifié, et les valeurs indiquant la performance identifiées et exposées en conclusion.

Cette automatisation pourrait permettre à des gestionnaires de projet qui étaient réticents à l'utilisation de la méthode de gestion par la valeur acquise d'adopter la méthode modifiée, car elle sera simplifiée et automatisée pour l'utilisateur.

Le travail d'accessibilité se fera dans un premier temps dans le cadre de l'exemple de la première partie ; le projet d'une compagnie d'électricité souhaitant construire une centrale en moins de 55 mois, problème résolu par MacLeod et Petersen (1996) repris par Ika (2005).

2.2 Contribution scientifique

2.2.1 Solution

L'outil va utiliser la méthode de calcul de la VAE (Valeur Acquise Espérée), développée par Robinson en 1997. Il ne s'agit pas d'une valeur acquise car elle est sujette à de l'incertitude, c'est pourquoi il faut savoir relativiser son utilisation. Son but est de prévoir les dépenses liées à la réalisation des différentes activités du projet. La VAE est reliée au nombre d'activités qui seront complétées au temps où l'on souhaite connaître la valeur acquise. Plus particulièrement à la probabilité d'avoir complété n activités le long d'un chemin i au temps t : $P[N_i(t) = n]$

On peut montrer que $P[N_i(t) = n] = P(T_{i,n} \leq t) - P(T_{i,n+1} \leq t)$. C'est-à-dire que la probabilité d'avoir complété n activités le long du chemin i à l'instant t est égale à la différence des probabilités d'avoir, le long du chemin i à l'instant t, complété n et n+1 activités.

Robinson (1997, p.50) indique que la limite lorsque l'on cherche la probabilité d'avoir complété aucune activité est $P(T_{i,0} \leq t) = 1$. Ce qui est vrai à t=0 mais pour la suite du projet il y a, selon moi, confusion, car il est possible qu'au milieu ou à la fin du projet, la probabilité d'avoir complété 0 activité n'est pas de 1 mais de 0.

La suite de la méthode de Robinson est la suivante : on calcule les probabilités d'avoir tous les nombres d'activités terminés.

Par exemple si l'on considère à t fixe, 2 chemins d'une activité par chemin on aurait :

- $P[N(t) = 0] = P[N_1(t) = 0] * P[N_2(t) = 0]$
- $P[N(t) = 1] = P[N_1(t) = 1] * P[N_2(t) = 0] + P[N_1(t) = 0] * P[N_2(t) = 1]$
- $P[N(t) = 2] = P[N_1(t) = 1] * P[N_2(t) = 1]$

Dans une optique d'automatisation de la méthode, il faudrait générer toutes les combinaisons acceptables des différentes activités de chaque chemin dont la probabilité est non-nulle.

Dans l'exemple de MacLeod et Petersen, il y a 4 chemins qui comportent entre 4 et 5 activités chacun.

*Si on prenait tous les cas possibles, y compris ceux qui ont une probabilité nulle d'arriver, on aurait 6 possibilités sur les chemins 1, 2 et 3 ; et 5 sur le chemin 4, ce qui ferait 6*6*6*5 = 1080 combinaisons possibles.*

Si dans une combinaison, il y a une probabilité nulle, en prenant le produit ou le minimum des 4 probabilités, la probabilité d'avoir cette combinaison est nulle.

*Admettons qu'il existe des probabilités non nulles de terminer 0, 1, 2 ou 3 activités le long du chemin 1 ; 0, 1 ou 2 le long du chemin 2 ; 0, 1, 2 ou 3 le long du chemin 3 ; et 0, 1 ou 2 le long du chemin 4. Ce qui donne dans le cadre de notre exemple 4*3*3*4 = 144 combinaisons possibles d'activités terminées sur les différents chemins.*

0000	0001	0002	0010	0011	0012	0020	0021	0022	0030
0031	0032	0100	0101	0102	0110	0111	0112	0120	0121
0122	0130	0131	0132	0200	0201	0202	0210	0211	0212
0220	0221	0222	0230	0231	0232	1000	1001	1002	1010
1011	1012	1020	1021	1022	1030	1031	1032	1100	1101
1102	1110	1111	1112	1120	1121	1122	1130	1131	1132
1200	1201	1202	1210	1211	1212	1220	1221	1222	1230
1231	1232	2000	2001	2002	2010	2011	2012	2020	2021
2022	2030	2031	2032	2100	2101	2102	2110	2111	2112
2120	2121	2122	2130	2131	2132	2200	2201	2202	2210
2211	2212	2220	2221	2222	2230	2231	2232	3000	3001
3002	3010	3011	3012	3020	3021	3022	3030	3031	3032
3100	3101	3102	3110	3111	3112	3120	3121	3122	3130
3131	3132	3200	3201	3202	3210	3211	3212	3220	3221
3222	3230	3231	3232						

Tableau 8 : Combinaisons numériques générées pour dans le cadre de l'exemple

Or toutes les combinaisons numériques ne sont pas réalistes (logiquement, si une activité est terminée sur un chemin, elle doit l'être sur tous les autres chemins dans lesquels apparait cette activité). Elles ont besoin d'être filtrées en rejetant les combinaisons qui ne le sont pas.

Dans l'exemple qui suit, la combinaison 1, 1, 2, 1 (c'est-à-dire A, A, AC, A) est impossible car si A et C sont complétées sur le chemin 3 (ACGIJ) alors l'activité C doit être complétée sur le chemin 2 (ACFHJ), ce qui n'est pas le cas dans la combinaison. Cette dernière doit donc être rejetée.

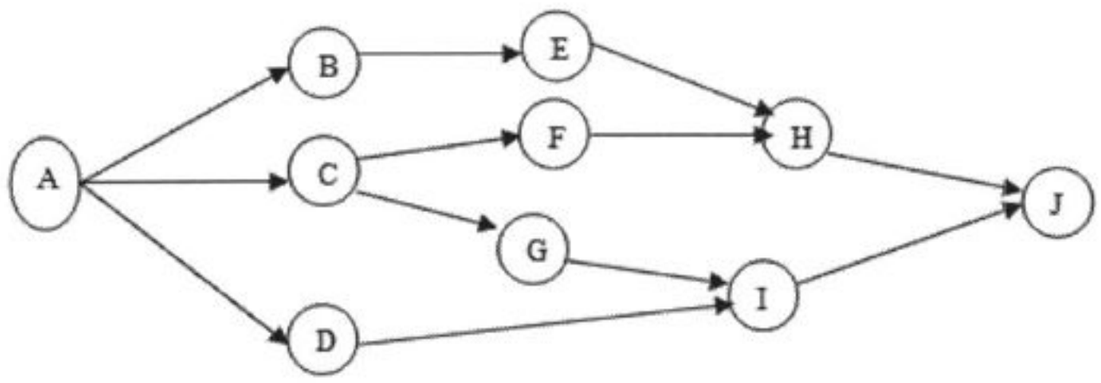


Figure 10 : Réseau d'activités de l'exemple de MacLeod et Petersen

A partir de cette étape la méthode de Robinson atteint selon moi, sa limite. En effet, dans son exemple, 2 chemins sont totalement parallèles et disjoints, donc statistiquement indépendants. C'est pourquoi $P[N(t) = 2] = P[N_1(t) = 1] * P[N_2(t) = 1]$. Or si les 2 chemins étaient entièrement corrélés on aurait eu $P[N(t) = 2] = \min(P[N_1(t) = 1], P[N_2(t) = 1])$. Et si les chemins étaient partiellement corrélés, la probabilité réelle aurait été entre les deux.

On peut voir dans Ika (2005) que l'auteur a essayé de régler ce problème au cas par cas. En effet, les 4 chemins commençant par l'activité A, lorsque l'on cherche la probabilité d'avoir la combinaison (1, 1, 1, 1), on a deux possibilités. Soit les 4 chemins sont indépendants et la probabilité est égale au produit $P_1(A) * P_2(A) * P_3(A) * P_4(A) = P(A)^4$, soit les 4 chemins sont corrélés et la probabilité est égale au $\min[P_1(A), P_2(A), P_3(A), P_4(A)] = \mathrm{P(A)}$. Les sous-chemins se limitant à la seule

activité A, les 4 entités sont entièrement corrélées, la deuxième option est choisie. Il s'agit de bon sens au cas par cas, mais ce n'est pas automatisable.

Pour automatiser ceci, deux options sont possibles :

Premièrement, on peut prendre l'hypothèse que la probabilité cherchée se trouve entre deux valeurs minimale et maximale. La valeur minimale étant le produit des 4 probabilités (4 étant le nombre de chemins), lorsque l'on suppose que les 4 chemins sont indépendants, et la valeur maximale étant le minimum des 4 probabilités, en supposant que les 4 chemins sont corrélés.

Deuxièmement, il est possible pour chaque combinaison d'effectuer le calcul de la probabilité en utilisant la méthode PNET d'Ang, Abdelnour et Chaker (1975) vue dans la première partie. A ce moment là une matrice de corrélation peut être calculée représentant les 4 sous-chemins, ce qui regroupera les sous-chemins en groupes par corrélations, chaque groupe étant statistiquement indépendant. Chaque groupe sera « représenté » par un sous-chemin représentatif (celui qui a la probabilité la plus faible) dans le calcul de la probabilité finale. Cette dernière serait alors le produit des probabilités de chaque chemin représentatif.

Dans l'exemple qui suit, le programme utilise la première des deux options formulées. La méthode calcule donc une probabilité minimale et maximale, ainsi qu'une valeur espérée minimale et maximale.

C'est cette méthode rigoureuse qu'Ika (2005) n'avait pas. En effet, un choix au bon sens, décidé au cas par cas affaiblissait sa méthode. Une méthode de choix plus rigide, et automatisable était nécessaire.

Dans ma méthode, la probabilité sera donc encadrée comme dans l'exemple suivant :

Soit la combinaison 1, 1, 1, 2 (c'est-à-dire A, A, A, AD) :

$$P_{mini}(1,1,1,2) = P_1(A) * P_2(A) * P_3(A) * P_4(AD)$$

$$P_{max}(1,1,1,2) = min\,[P_1(A) * P_2(A) * P_3(A) * P_4(AD)]$$

On a alors : $P_{mini}(1,1,1,2) \leq P(1,1,1,2) \leq P_{max}(1,1,1,2)$

Ensuite, pour calculer les bornes de la Valeur Acquise Espérée à un instant t, il suffit de calculer la moyenne sur l'ensemble Δ des combinaisons δ valides, des valeurs planifiées (VP) de la combinaison, pondérée par la probabilité de cette combinaison. En adaptant les formules d'Ika (2005), on obtient :

$$VAE_{mini}(t) = \frac{\sum_{\Delta}[VP(\delta) * P_{mini}(\delta)]}{\sum_{\Delta} P_{mini}(\delta)}$$

$$VAE_{max}(t) = \frac{\sum_{\Delta}[VP(\delta) * P_{max}(\delta)]}{\sum_{\Delta} P_{max}(\delta)}$$

La valeur planifiée (ou budgétisée) d'une combinaison est la somme des valeurs planifiées de chaque activité qu'elle contient (sans doublon).

En calculant ainsi les Valeurs Acquises Espérées minimale et maximale à différents temps t au cours du projet, on peut avoir une idée de la probabilité de dépense, bien plus réaliste que celle de la valeur planifiée.

2.2.2 Illustration : Application du programme à l'exemple de MacLeod et Petersen

En reprenant l'exemple de MacLeod et Petersen (1996), je vais tester l'efficacité du programme. Je précise que ce deuxième programme n'automatise que cet exemple précis car des problèmes de généralisation sont encore en cours de réglage, mais une recherche en informatique plus avancée sera susceptible de régler le problème dans le futur.

Voici l'énoncé du problème, légèrement modifié pour le cas traité. J'ai pris les données après les avoir traitées avec le compromis allocation de ressources / probabilité de terminer le projet en 55 mois, à l'étape d'allocation de ressources numéro 10, comme vu en conclusion de la partie 1. De plus, le coût supplémentaire par mois accéléré a été modifié en coût de l'activité par mois pour simplifier les calculs préliminaires.

	Données initiales				Coût de l'activité par mois
Tâches	Sommet 1	Sommet 2	a	b	
A	1	2	10	16	30 000 $
B	2	3	2	21	7 500 $
C	2	4	1	5	7 500 $
D	2	6	2	4	15 000 $
E	3	5	8	20	157 000 $
F	4	5	15	30	600 000 $
G	4	6	3	8	15 000 $
H	5	7	2	8	22 500 $
I	6	7	6	12	15 000 $
J	7	8	4	4	3 000 $

Tableau 9 : Données du problème de MacLeod et Petersen modifié

Les étapes présentées ci-dessous suivent l'algorithme modifié, présenté au paragraphe précédent (2.2.1).

La première étape est l'entrée de toutes les données du problème et des différents temps t auxquels nous souhaitons connaître la VAE.

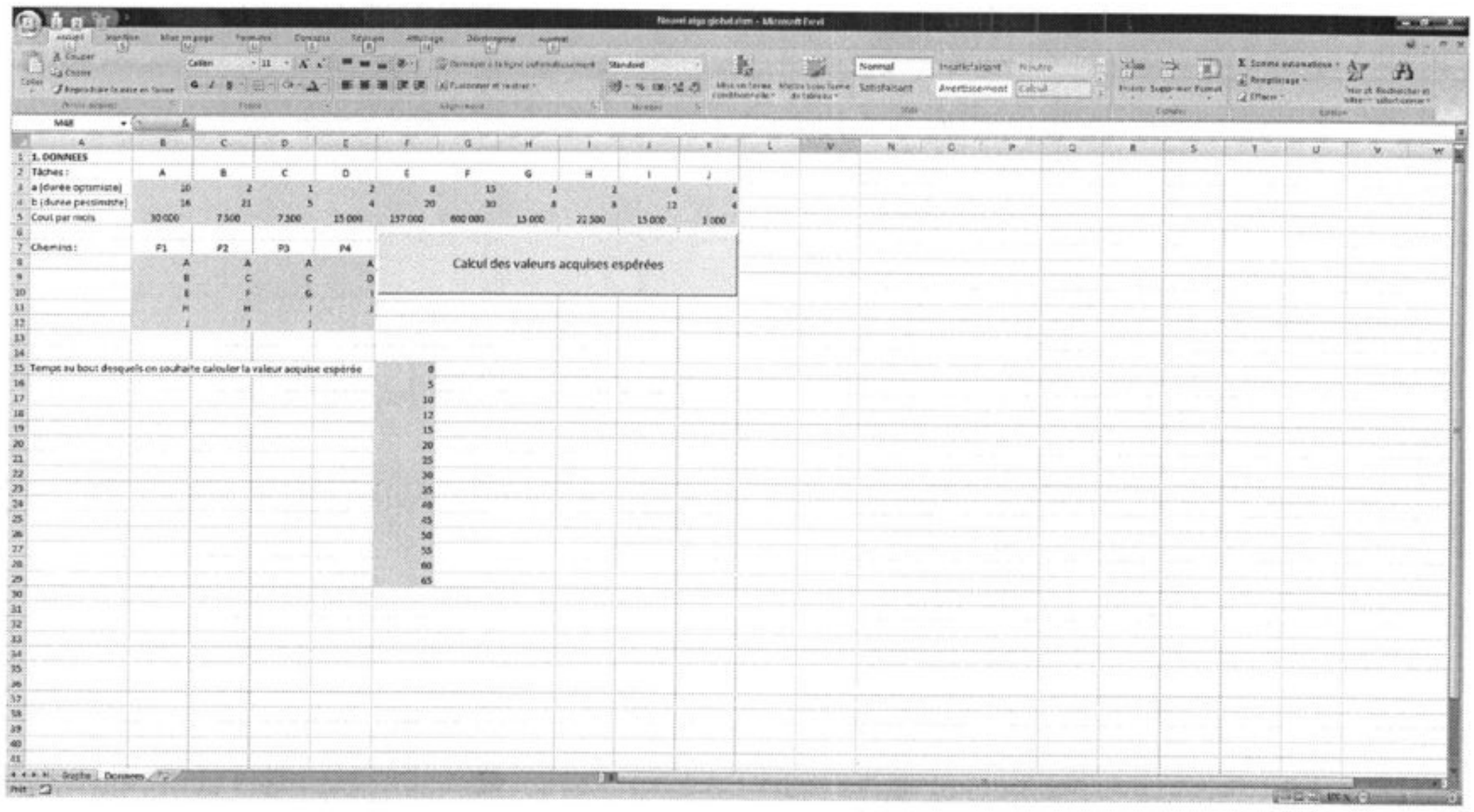


Figure 11 : Données d'entrée du problème

Un message de fin s'affiche lorsque le programme a fini l'algorithme.

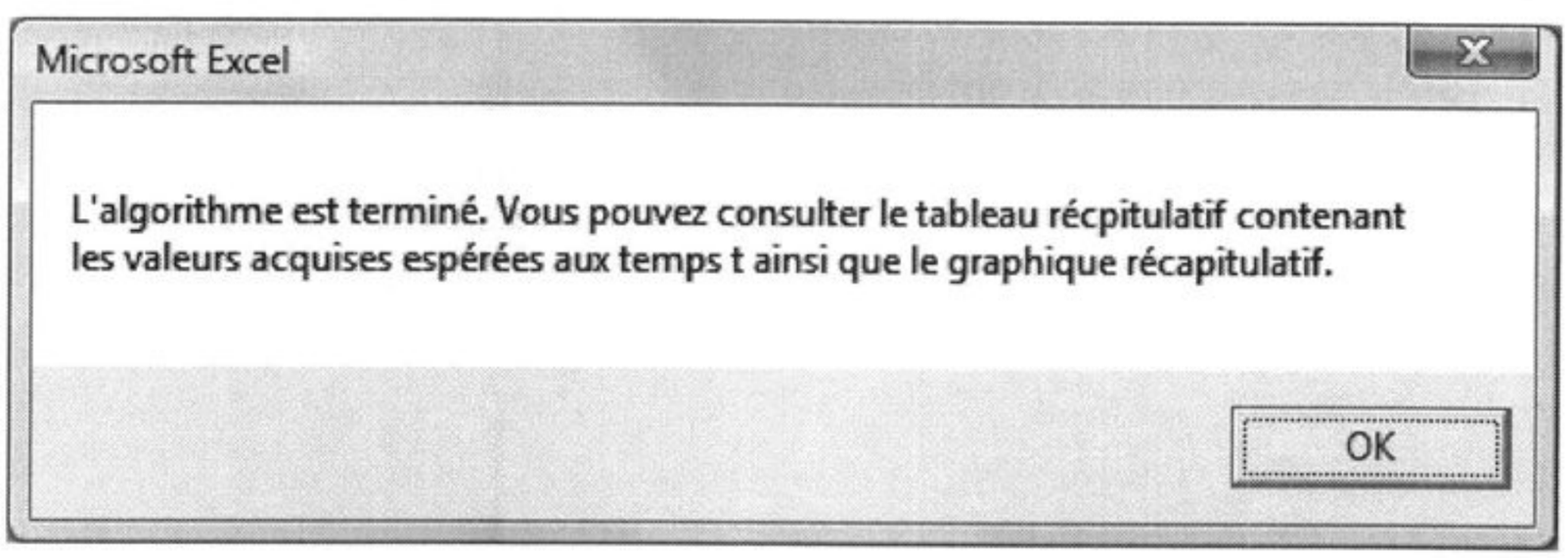
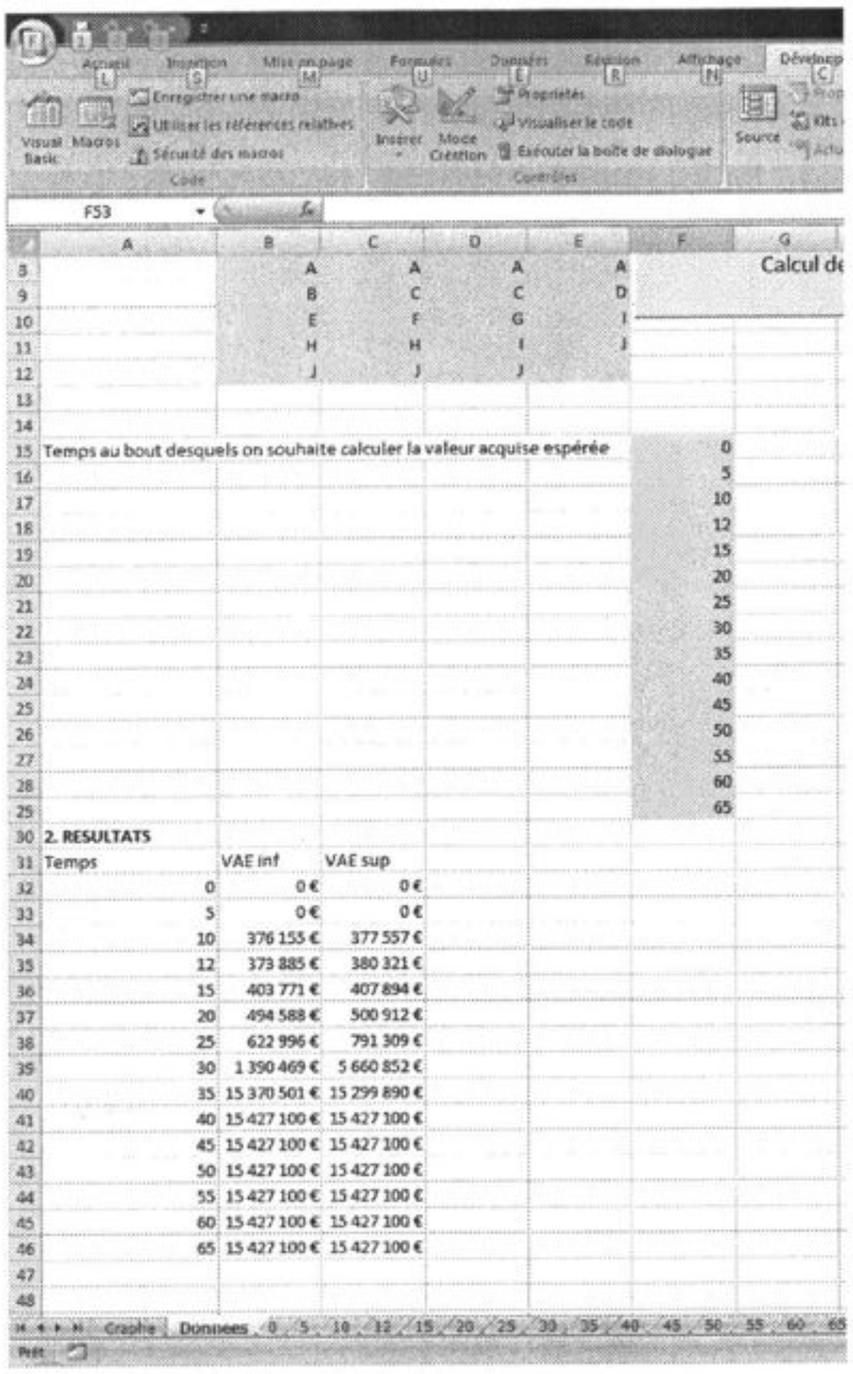


Figure 12 : Message de fin de l'algorithme

Les résultats que donne le programme sont les suivants :



	A	B	C	D	E	F	G
8		A	A	A	A	Calcul de	
9		B	C	C	D		
10		E	F	G	I		
11		H	H	I	J		
12		J	J	J			
13							
14							
15	Temps au bout desquels on souhaite calculer la valeur acquise espérée					0	
16						5	
17						10	
18						12	
19						15	
20						20	
21						25	
22						30	
23						35	
24						40	
25						45	
26						50	
27						55	
28						60	
29						65	

	A	B	C
30	**2. RESULTATS**		
31	Temps	VAE inf	VAE sup
32	0	0 €	0 €
33	5	0 €	0 €
34	10	376 155 €	377 557 €
35	12	373 885 €	380 321 €
36	15	403 771 €	407 894 €
37	20	494 588 €	500 912 €
38	25	622 996 €	791 309 €
39	30	1 390 469 €	5 660 852 €
40	35	15 370 501 €	15 299 890 €
41	40	15 427 100 €	15 427 100 €
42	45	15 427 100 €	15 427 100 €
43	50	15 427 100 €	15 427 100 €
44	55	15 427 100 €	15 427 100 €
45	60	15 427 100 €	15 427 100 €
46	65	15 427 100 €	15 427 100 €

Figure 13 : Résultats du programme

Il s'agit pour chaque temps t entré en données initiales, des Valeurs Acquises Espérées minimale et maximale du projet. Un onglet pour chaque temps t détaille les calculs.

Prenons comme exemple le temps t=12 mois :

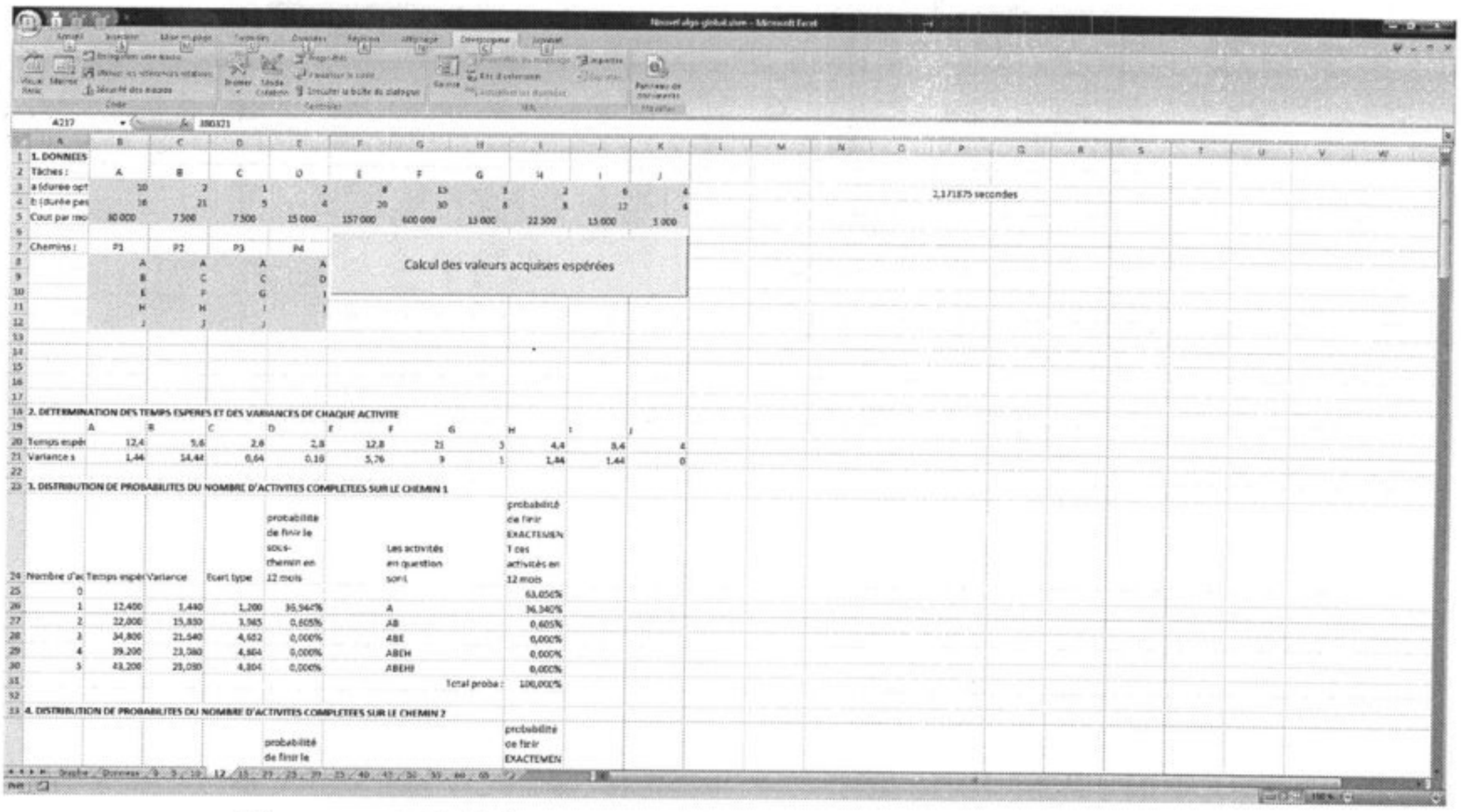


Figure 14 : Calculs du temps espéré et de la variance de chaque activité

Pour commencer, comme Ika (2005), le temps espéré et la variance de chaque activité sont calculés.

Puis pour chaque chemin, la probabilité d'avoir terminé exactement de 0 à m activités le long du chemin (m étant le nombre d'activités du chemin).

Une fois ces calculs effectués pour chaque chemin, les nombres d'activités dont la probabilité est non nulle sont listés par chemin :

53	**6. DISTRIBUTION DE PROBABILITES DU NOMBRE D'ACTIVITES COMPLETEES SUR LE CHEMIN 4**								
54	Nombre d'activit	Temps espé	Variance	Ecart type	probabilité de finir le sous-chemin en 12 mois		Les activités en question sont		probabilité de finir EXACTEMENT ces activités en 12 mois
55	0								63,056%
56	1	12,400	1,440	1,200	36,944%		A		36,374%
57	2	15,200	1,600	1,265	0,571%		AD		0,571%
58	3	23,600	3,040	1,744	0,000%		ADI		0,000%
59	4	27,600	3,040	1,744	0,000%		ADIJ		0,000%
60								Total proba :	100,000%
61									
62	**7. FORMULATION DU NOMBRE D'ACTIVITES TERMINEES POSSIBLES PAR CHEMIN**								
63	Ch1 : contient :	0 1 2 3							
64	Ch2 : contient :	0 1 2							
65	Ch3 : contient :	0 1 2 3							
66	Ch4 : contient :	0 1 2							

Figure 15 : Calculs des probabilités pour un chemin

A partir de la formulation des différents cas possibles, la liste des combinaisons numériquement possible est listée (dans ce cas 144 combinaisons), puis différentes informations sont calculées : la combinaison des noms des activités est déduite, puis le test de réfutation (comme vu précédemment) détermine si la combinaison est valide ou pas. Puis les activités sont listées sans doublon (car le calcul de la valeur planifiée de la combinaison en a besoin). Ensuite, les probabilités minimale et maximale que cette combinaison sont calculées, et pour finir la valeur planifiée de ce sous-chemin est indiquée dans la dernière colonne. La différence principale par rapport à Ika (2005) est que la méthode suit des étapes fixes et ne dépend pas d'une décision au cas par cas.

1110		Refusé 0				
1111	A A A A	Correct	A	1,63%	35,07%	372 000 €
1112	A A A AD	Correct	AD	0,03%	0,57%	414 000 €
1120		Refusé 0				
1121	A A AC A	Refusé : C				
1122	A A AC AD	Refusé : C				
1130		Refusé 0				
1131	A A ACG A	Refusé : C				
1132	A A ACG AD	Refusé : C				
1200		Refusé 0				
1201		Refusé 0				
1202		Refusé 0				
1210		Refusé 0				
1211	A AC A A	Refusé : C				
1212	A AC A AD	Refusé : C				
1220		Refusé 0				
1221	A AC AC A	Correct	AC	0,00%	1,88%	391 500 €
1222	A AC AC AD	Correct	ACD	0,00%	0,57%	433 500 €
1230		Refusé 0				

Graphe | Donnees | 0 | 5 | 10 | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 6

Figure 16 : Formulation des combinaisons possibles et calculs associés, dans le programme VBA

Combinaison	Enoncé des activités	Limite inférieure : produit des probabilités (indépendance entre les chemins)	Limite supérieure : minimum des probabilités (dépendance entre les chemins)	Valeur planifiée de la combinaison
0 0 0 0	Aucune	0,00%	0,00%	0 $
1 1 1 1	A A A A	16,38%	60,87%	372 000 $
1 1 1 2	A A A AD	1,03%	4,10%	414 000 $
1 2 2 1	A AC AC A	0,30%	8,27%	391 500 $
1 2 2 2	A AC AC AD	0,02%	4,10%	433 500 $
1 2 3 1	A AC ACG A	0,00%	0,00%	466 500 $
1 2 3 2	A AC ACG AD	0,00%	0,00%	508 500 $
2 1 1 1	AB A A A	0,29%	1,20%	444 000 $
2 1 1 2	AB A A AD	0,02%	1,20%	486 000 $
2 2 2 1	AB AC AC A	0,01%	1,20%	463 500 $
2 2 2 2	AB AC AC AD	0,00%	1,20%	505 500 $
2 2 3 1	AB AC ACG A	0,00%	0,00%	538 500 $
2 2 3 2	AB AC ACG AD	0,00%	0,00%	580 500 $
3 1 1 1	ABE A A A	0,00%	0,00%	2 453 600 $
3 1 1 2	ABE A A AD	0,00%	0,00%	2 495 600 $
3 2 2 1	ABE AC AC A	0,00%	0,00%	2 473 100 $
3 2 2 2	ABE AC AC AD	0,00%	0,00%	2 515 100 $
3 2 3 1	ABE AC ACG A	0,00%	0,00%	2 548 100 $
3 2 3 2	ABE AC ACG AD	0,00%	0,00%	2 590 100 $

Tableau 10 : Liste des combinaisons possibles à t=13 mois

En conclusion, les Valeurs Acquises Espérées minimale et maximale sont calculées comme vue précédemment (moyenne des valeurs planifiées des combinaisons pondérées par les probabilités d'avoir réalisé cette combinaison) :

3132	ABE A ACG A	Refusé : C				
3200		Refusé 0				
3201		Refusé 0				
3202		Refusé 0				
3210		Refusé 0				
3211	ABE AC A A	Refusé : C				
3212	ABE AC A AD	Refusé : C				
3220		Refusé 0				
3221	ABE AC AC A	Correct	ABEC	0,00%	0,00%	2 473 100 €
3222	ABE AC AC A	Correct	ABECD	0,00%	0,00%	2 515 100 €
3230		Refusé 0				
3231	ABE AC ACG	Correct	ABECG	0,00%	0,00%	2 548 100 €
3232	ABE AC ACG	Correct	ABECGD	0,00%	0,00%	2 590 100 €
9. CONCLUSION						
373 885 €						
380 321 €						

Figure 17 : Affichage des Valeurs Acquises Espérées minimale et maximale

Le principe est répété pour chaque temps entré en données initiales (de 0 à 65 mois, cf. ci-dessous), et les résultats sont centralisés sur la page de résultats :

2. RESULTATS			
Temps	VAE inf	VAE sup	
0	0 €	0 €	
5	0 €	0 €	
10	376 155 €	377 557 €	
12	373 885 €	380 321 €	
15	403 771 €	407 894 €	
20	494 588 €	500 912 €	
25	622 996 €	791 309 €	
30	1 390 469 €	5 660 852 €	
35	15 370 501 €	15 299 890 €	
40	15 427 100 €	15 427 100 €	
45	15 427 100 €	15 427 100 €	
50	15 427 100 €	15 427 100 €	
55	15 427 100 €	15 427 100 €	
60	15 427 100 €	15 427 100 €	
65	15 427 100 €	15 427 100 €	

Graphe | Donnees | 0 | 5 | 10 | 12 | 15 | 20 | 25

Figure 18 : Affichage des résultats

Comme pour le programme du compromis allocation de ressources / probabilité de terminer le projet à temps, un graphe permet de mieux se rendre compte de la répartition des coûts le long du projet. Il représente la Valeur Acquise Espérée

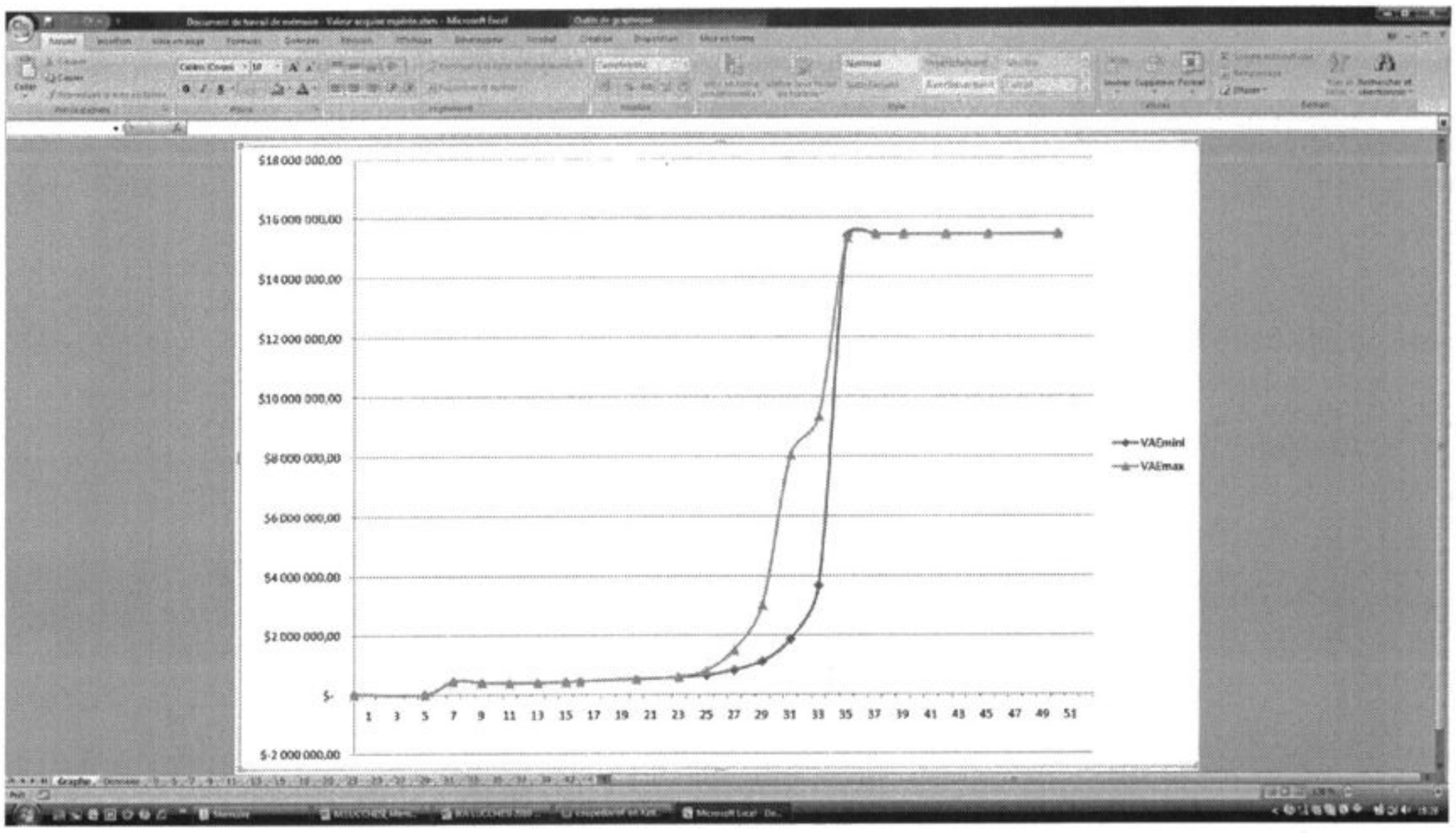


Figure 19 : Graphe récapitulatif des résultats

On peut remarquer que la VAEmini et la VAEmaxi suivent la même tendance, qu'elles sont quasi-identiques en début et en fin de projet, et que l'écart entre les deux est important lorsqu'il y a une forte variation de la valeur de celles-ci.

Dans le but de comparer la valeur planifiée du projet et sa Valeur Acquise Espérée, voici ci-après les tableaux représentants la valeur planifiée calculée selon les standards PERT/CPM, ainsi que les résultats de la Valeur Acquise Espérée minimale et maximale pour des temps répartis sur toute la durée du projet :

Période	Activités terminées	VP
[0;12,4[		$ -
[12,4;15[	A	$ 372 000,00
[15;15,2[	AC	$ 391 500,00
[15,2;20[	ACD	$ 433 500,00
[20;22[	ACDG	$ 508 500,00
[22;28,4[	ABCDG	$ 580 500,00
[28,4;34,8[	ABCDGI	$ 706 500,00
[34,8;36[	ABCDEGI	$ 2 716 100,00
[36;40,4[	ABCDEFGI	$ 15 316 100,00
[40,4;44,4[	ABCDEFGHI	$ 15 415 100,00
[44,4;∞]	ABCDEFGHIJ	$ 15 427 100,00

Tableau 11 : Valeur Planifiée au cours du projet

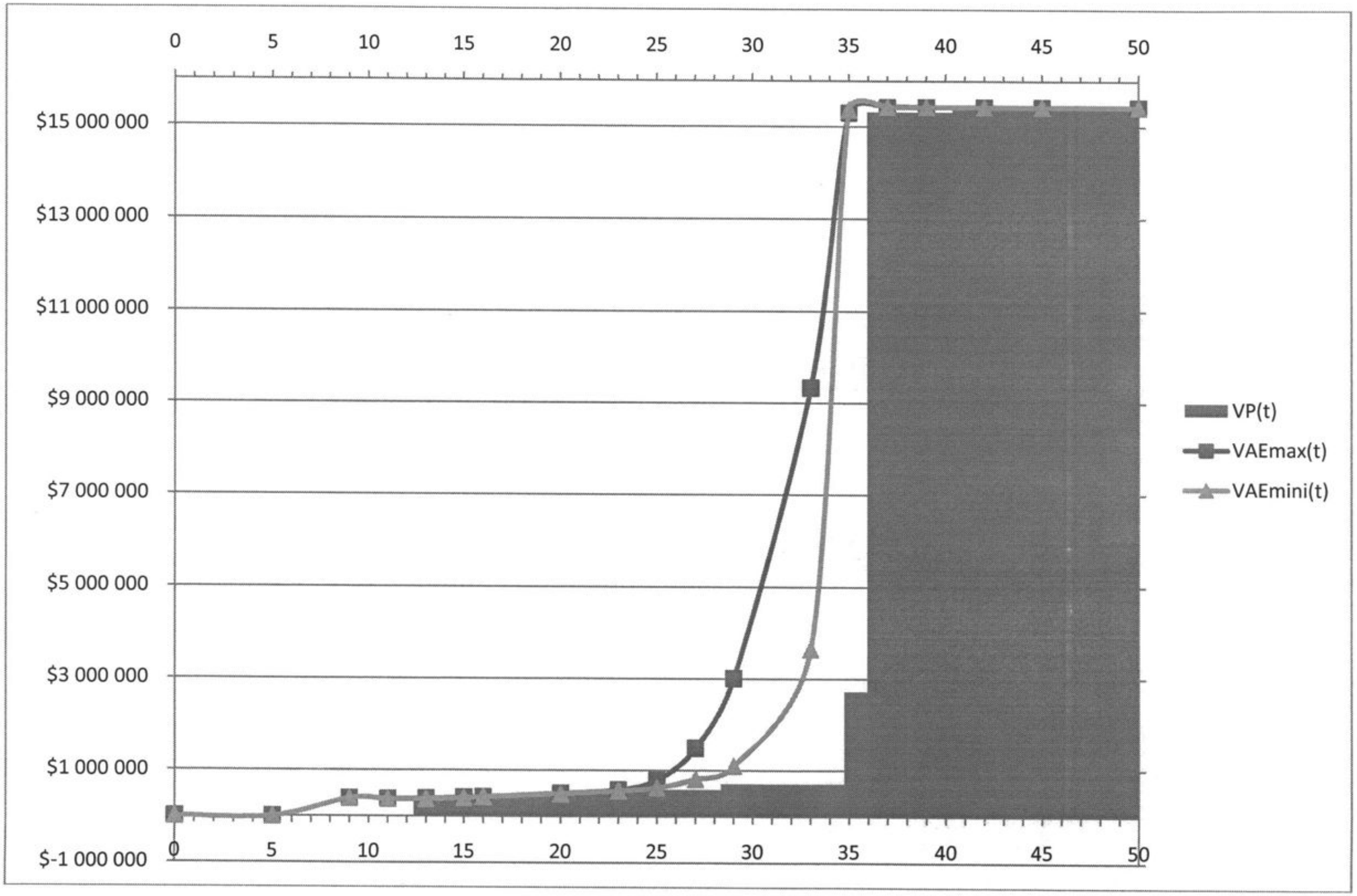


Figure 20 : Graphe représentant la valeur planifiée et les Valeurs Acquises Espérées minimale et maximale au cours du projet

t	VAEmini	VAEmaxi
0	$ -	$ -
5	$ -	$ -
9	$ 389 285	$ 389 853
11	$ 373 877	$ 377 235
13	$ 376 094	$ 385 158
15	$ 403 771	$ 407 894
16	$ 426 486	$ 424 931
20	$ 494 588	$ 500 912
23	$ 559 824	$ 580 292
25	$ 622 996	$ 791 309
27	$ 810 461	$ 1 486 434
29	$ 1 101 584	$ 3 008 848
33	$ 3 647 660	$ 9 329 165
35	$ 15 370 501	$ 15 299 890
37	$ 15 427 100	$ 15 427 100
39	$ 15 427 100	$ 15 427 100
42	$ 15 427 100	$ 15 427 100
45	$ 15 427 100	$ 15 427 100
50	$ 15 427 100	$ 15 427 100

Tableau 12 : Valeurs Acquises Espérées minimale et maximale au cours du projet

En superposant les deux graphes, on se rend compte que les courbes de Valeur Acquise Espérée semblent plus précises (car elles sont continues) alors que les barres d'histogramme représentant la simple valeur planifiée conviennent moins bien à la planification des dépenses, car elles dépendent directement de la durée des activités et non de la probabilité des durées.

2.3 Bilan

L'analyse de la valeur acquise basée sur les méthodes de planification PERT/CPM est un outil puissant qui aide les gestionnaires de projet à évaluer la performance de leurs projets. Cependant son utilisation trop souvent réservée aux projets de grande ampleur, mais surtout sa complexité d'utilisation en font un outil trop peu utilisé de la part des gestionnaires de projet. Une solution pour remédier à ce problème est de doter le gestionnaire de projet d'un outil permettant de simplifier l'utilisation de cette méthode en améliorant sa pertinence et en simplifiant son utilisation.

Cet outil a montré sa force dans l'exemple de MacLeod et Petersen (1996), en automatisant entièrement les calculs pour donner de façon simple sous forme de tableau et de graphique explicite les données nécessaires au gestionnaire de projet pour faire ses choix. Cependant, l'outil a été approché par la gestion de projet. Il a besoin maintenant d'une approche par l'informatique pure (dont je n'ai pas les connaissances) pour généraliser cet exemple à n'importe quel cas de projet.

Conclusion

L'analyse de la valeur acquise est un outil puissant de mesure de la performance des projets. Elle repose sur une planification de base PERT / CPM. Que ce soit les erreurs liées aux données de base PERT / CPM ou celles liées à la configuration particulière des réseaux dans PERT, elles peuvent compromettre l'obtention d'une bonne mesure de la valeur acquise. L'hypothèse d'indépendance des durées des chemins est également sujette à des erreurs non négligeables.

La solution PNET a permis de réduire de telles erreurs et de reprendre l'analyse de la valeur acquise espérée en contexte d'interdépendance des chemins, dans les conditions d'un PERT à deux estimations. Il a donc été possible d'apprécier, d'un point de vue théorique, les probabilités de réalisation de la valeur acquise à tout instant. La méthode illustrée, même si elle démontre qu'une analyse de la valeur acquise est possible dans les conditions de dépendance statistique des durées des chemins et d'un PERT avec deux estimations, a cependant des limites.

Dans l'analyse du compromis coût d'allocation de ressources supplémentaires / probabilité de terminer le projet à temps, l'hypothèse de linéarité du coût des activités est restrictive car elle ne considère pas le cas des activités pour lesquelles le débours est encouru seulement en fin de réalisation. Cependant, remettre en cause cette hypothèse ne semble pas pensable au vue de sa difficulté.

Mais le plus important peut-être, c'est que la solution PNET pose un problème d'analyse combinatoire complexe. C'est pourquoi le développement d'un programme VBA sous Microsoft Excel est nécessaire et permet d'automatiser ces lourds calculs, et

de simplifier l'utilisation de la part du gestionnaire de projet. Il a aussi montré qu'il était possible de créer ce genre de programmes simples, qui pourraient être intégrés à des logiciels plus performants s'ils étaient retravaillés par des informaticiens.

Les gestionnaires de projet sont assez sceptiques quant à l'utilisation des techniques quantitatives les plus robustes et il est justifié de croire qu'ils le seront encore plus s'il s'agit de problèmes plus abstraits que l'incertitude. On pourrait leur proposer ce type de solution pour connaître leur et déterminer si oui ou non ils seraient plus enclins à utiliser des méthodes comme la valeur acquise, si les outils étaient simplifiés.

Par ailleurs, j'ai constaté que le calcul des probabilités de réaliser exactement r tâches à un temps t donné offrait deux alternatives : soit on garde les deux extrema et on traite la probabilité minimale et maximale jusqu'au bout du calcul, soit on peut utiliser la méthode PNET entre les sous-groupes pour chaque combinaison, regrouper les chemins les plus corrélés et déterminer la probabilité d'obtenir cette combinaison comme le produit des chemins représentatifs des sous-groupes alors créés par corrélation. Il serait intéressant dans le cadre d'un prolongement de ma recherche, de tester cette alternative. Cette méthode serait freinée par une théorie lourde, donc des temps de calculs allongés, mais l'outil serait alors encore plus efficace et pertinent.

Références

[1] Abdelnour, J., Ang, A. H-S., & Chaker, A.A. (1975). Analysis of activity networks under uncertainty, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 101, p. 373-87

[2] Anbari, F. (2003). Earned value project management method and extensions, Project Management Journal, Vol. 34, No 4, p. 12-23

[3] Archibald, R.D, & Villoria, R.L. (1967), Network-based management systems (PERT/CPM), New York : John Wiley & Sons.

[4] Chan, F.T.S. (1997), Resource management in project scheduling through simulation, International Journal of Computer Applications in Technology, Vol. 10, No 1/2, p. 81 – 89.

[5] Fleming, Q.W. & Koppelman, J.M. (2006). Earned value project management, 3rd edition. Project Management Institute.

[6] Fleming, Q.W. & Koppelman, J.M. (2004). If EVM is so good... Why isn't it used on all projects. The Measurable News, Spring 2004.

[7] Golenko-Ginzburg, D. (1988). On the distribution of activity time in PERT, Journal of the Operational Research Society, Vol. 39, No 8, p. 767 –771.

[8] Ika, L.A. (2005). Analyse de la valeur acquise en contexte d'interdépendance des chemins : la solution PNET, ASAC 2005.

[9] Kuehn, U. (2007). Earned Value Management – Why Am I Being Forces to Do It ?, 2007 AACE International Transactions.

[10] Liess, O. & Michelon, P. (2007). A constraint programming approach for the resource-constrained project scheduling problem, Annals of Operations Research, Vol. 157, Issue 1, p. 25-36

[11] MacLeod, K.R. & Petersen, P.F. (1996). Estimating the tradeoff between resource allocation and probability of on-time completion in project management, Project Management Journal, Vol. 27, n°1, p. 26-33.

[12] Mingus, N. (2002). Alpha Teach Yourself Project Management In 24 Hours, Indianapolis : Alpha

[13] Omar, A. (2009). Uncertainty in Project Scheduling – Its Use in PERT/CPM Conventional Techniques, Cost Engineering, Vol. 51, No 7, 9. 30-34.

[14] PMI (2004). A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), Third Edition.

[15] Provost, M.A., Alain, M., Leroux, Y. & Lussier, Y. (2006). Normes de présentation d'un travail de recherche, 2e édition, Trois-Rivières : Les éditions SMG.

[16] Robinson P.B. (1997). The performance measurement baseline – a statistical view, Project management journal, Vol. 28, Issue 2, p.47-52.

[17] Soroush, H.M. (1994). The most critical path in a PERT network : a heuristic approach, Journal of the Operational Research Society, Vol. 45, No 3, p. 287-300.