



**HAL**  
open science

# Applications de MPM et PERT pour calculer les probabilités de respect de délai d'exécution d'un projet en BTP

Wendpanga Jacob Yougbare, Abdoulaye Compaoré

► **To cite this version:**

Wendpanga Jacob Yougbare, Abdoulaye Compaoré. Applications de MPM et PERT pour calculer les probabilités de respect de délai d'exécution d'un projet en BTP. 2016. hal-01344907

**HAL Id: hal-01344907**

**<https://hal.science/hal-01344907>**

Preprint submitted on 12 Jul 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Applications de MPM et PERT pour calculer les probabilités de respect de délai d'exécution d'un projet en BTP

W. Jacob Yougbaré

Université de Koudougou, Unité de Formation et de Recherche en Sciences Economiques et de Gestion- Koudougou, Burkina Faso

\*Correspondance: Email: jwyougby@yahoo.com ; Phone: +226 70 51 70 46

Abdoulaye Compaoré

Université de Koudougou, Unité de Formation et de Recherche en Sciences Economiques et de Gestion- Koudougou, Burkina Faso

.....  
**RÉSUMÉ.** Dans ce papier, nous nous sommes intéressés à la question de respect des délais dans les appels d'offre en BTP. Nous avons utilisé les méthodes MPM et CPM/PERT pour déterminer les durées minimale et probable d'un projet pour enfin calculer les probabilités de respect des délais prévus par l'entreprise (maître d'œuvre) et le maître d'ouvrage. Ce travail a permis de montrer qu'on peut anticiper sur les difficultés éventuelles de respect de délai d'exécution d'un projet en BTP en calculant les probabilités correspondantes. Ces probabilités peuvent permettre au maître d'œuvre de demander à revoir le contrat en négociant les délais fixés initialement. Les résultats de cette étude laissent voir que les prévisions aléatoires peuvent prédire les difficultés de respect des délais fixés dans un dossier d'appel d'offre ou un simple contrat.

**ABSTRACT.**In this paper, we were interested in the issue of timeliness of tenders in construction . We used the methods MPM and CPM / PERT to determine the minimum and likely duration of a project to finally calculate the probabilities of meeting deadlines provided by the company (contractor) and the client. This work has shown that we can anticipate the potential difficulties in respect of execution time of a construction project by calculating the corresponding probabilities. These probabilities can allow the project manager to ask to review the contract negotiating the original deadlines. The results of this study suggest see that random forecasts can predict difficulties in meeting deadlines set in a tender dossier or a simple contract.

**MOTS-CLÉS** Ordonnancement; MPM; CPM/PERT; probabilité de respect de délai; BTP ; Burkina Faso

**KEYWORDS:**scheduling; MPM; CPM / PERT ; probability of deadline compliance; BTP ; Burkina Faso

.....

---

## 1. Introduction

Tout projet de grande envergure comme la construction d'un amphithéâtre, d'un pont, d'une autoroute, d'un bâtiment, d'un barrage, se heurte à un certain nombre de problèmes cruciaux parmi lesquels figure le respect du calendrier d'exécution. Dans la plupart des cas, un projet doit être réalisé dans un délai déterminé par le maître d'ouvrage en accord avec le maître d'œuvre. Dans le cas du bâtiment et des travaux publics par exemple, les délais apparaissent dans le cahier des clauses administratives particulières du dossier Marché. Et la façon de décompter les délais, pour le cas particulier du Burkina, parce qu'elle peut être l'occasion de litiges a été définie contractuellement dans la norme NFP03-001 dans le Cahier des Clauses Administratives Générales applicables aux travaux de bâtiment faisant l'objet de marchés privés et dans le Cahier des Clauses Administratives Générales du code des marchés publics.

Ce délai étant contractuel, tout retard peut entraîner des pénalités financières. Il fait l'objet d'un article de l'acte d'engagement ou du Cahier des Clauses Administratives Particulières.

La concurrence est très rude de nos jours faisant du respect des calendriers un facteur important pour remporter des marchés. Les entreprises doivent être à mesure d'établir et de contrôler des prévisions toujours plus rigoureuses sur le délai, le budget, les coûts, etc., sous peine de se voir confronter à de graves difficultés financières ou d'organisation. Dans le domaine du bâtiment et des travaux publics (BTP), le non-respect des délais est légion dans la plupart d'exécution des projets en Afrique et le Burkina ne fait pas exception. A l'Université de Koudougou par exemple un bâtiment de niveau R+2 en construction depuis 2010 par une entreprise experte en la matière n'a été achevé qu'en 2015 pour plusieurs raisons. La bibliothèque centrale de ladite université, qui devait s'achever en décembre 2012 ne l'est pas encore, alors que le délai d'exécution était de 8 mois.

Pour réaliser un projet prévu en respectant le délai contractuel, il est nécessaire d'organiser la coordination des différents intervenants par l'établissement d'un planning prévisionnel de réalisation des travaux. Ce planning étant clairement défini par le maître d'œuvre, pourquoi certaines entreprises en viennent-elles à être hors délai? La ou les raison(s) est (ou sont)-elle(s) à chercher au niveau du planning et/ou au niveau du projet? Est-il possible de rendre ce planning plus efficace et/ou de rendre le projet plus performant ?

Pour répondre à ces interrogations, nous allons utiliser des outils issus de la recherche opérationnelle, plus précisément les méthodes d'ordonnancement de projet.

Nous nous sommes fixés un objectif principal et des objectifs spécifiques.

L'objectif principal consiste pour nous à montrer que les méthodes de recherche opérationnelle peuvent permettre aux entreprises dans les pays comme le Burkina de respecter leur engagement relatif aux marchés.

Comme objectifs secondaires, nous comptons :

- utiliser la méthode MPM pour déterminer les calendriers d'exécution des travaux d'un projet en BTP et la durée déterministe totale minimale ;
- utiliser la méthode PERT-probabilisée ou CPM pour déterminer, les calendriers (aléatoires) d'exécution des travaux et les chances de respect de délai dans l'exécution de ces travaux.

---

Le respect des délais étant un facteur important pour les entreprises dans la réalisation d'un projet, notre but est de montrer que la recherche opérationnelle, par ses méthodes, donne des outils nécessaires pour aider la prise de décision dans le cas des projets en BTP. Cela nous amène à étudier un cas pratique et réel qui est un chantier de construction de bâtiment R+5 avec sous-sol.

En gestion de projet, les outils utilisés pour la planification, qui consiste à affecter des ressources à des intervalles de temps donnés, ne suffisent pas pour prendre des décisions sur la gestion des ressources, des délais, et même des coûts. Notons d'abord que la planification n'est pas à confondre avec l'ordonnancement qui consiste à affecter des tâches identifiées à des ressources déterminées, sur des périodes de temps réservées.

Les méthodes d'ordonnancement sont des outils efficaces d'optimisation en recherche opérationnelle. Elles interviennent principalement dans les projets, la production, l'informatique et dans l'administration. Elles ont pour objectif d'aider le décideur à planifier et contrôler l'exécution d'un projet décomposable en un nombre fini de tâches. Nous voulons à travers ce papier montrer qu'on peut donc aider les acteurs du BTP à maîtriser le facteur temps. En plus, notons qu'après une enquête préliminaire sur les entreprises de BTP, au Burkina les méthodes d'optimisation en ordonnancement ne sont pratiquement pas utilisées pour le contrôle et le suivi des projets de construction. En effet, la technique la plus utilisée par les entreprises que nous avons pu approcher pendant les enquêtes, est essentiellement le diagramme (ou graphique) de Gantt qui est une technique de représentation d'un ordonnancement qu'une méthode d'optimisation en ordonnancement. Ceci nous amène à choisir une entreprise afin d'appliquer ces méthodes sur un chantier dans l'optique de comparer nos résultats avec la réalité.

Dans ce papier, nous nous sommes fixés comme hypothèse principale, qui est que la non maîtrise et la non prise en compte de l'aspect aléatoire dans les plannings sont les causes de non-respect des délais d'exécution des marchés dans le domaine de BTP.

Nous avons émis également deux hypothèses secondaires :

Hypothèse 1 : les durées déterministes des tâches sont moins réalistes que celles aléatoires tenant en compte les durées vraisemblable, minimale et maximale dans les prévisions d'exécution d'un projet en BTP.

Hypothèse 2 : les durées aléatoires permettent de prédire les difficultés temporelles de respect de délais d'exécution d'un projet en BTP.

Ce papier est structuré de la manière suivante : dans la section suivante (section 2), nous décrivons le cadre théorique ; dans la section 3, nous décrivons la revue de littérature ; dans la section 4, nous décrivons les aspects méthodologiques ; dans la section 5, nous présenterons les données d'études ; dans la section 6, nous présenterons les résultats d'études ainsi que les analyses y relatives ; enfin en section 7, nous donnerons une conclusion.

## **2. Cadre théorique**

### **2.1. Notions de base en ordonnancement**

**Ordonnancer** c'est programmer dans le temps l'exécution d'une réalisation décomposable en tâches, en attribuant des ressources à ces tâches et en fixant en particulier leurs dates de début d'exécution tout en respectant des contraintes données.

Un **problème d'ordonnement** consiste à organiser dans le temps la réalisation des tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement, ...) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité de ressources requises.

Une **solution d'ordonnement** décrit les dates prévues pour l'exécution des tâches et l'allocation des ressources au cours du temps. La méthode utilisée pour l'élaboration d'un ordonnancement vise souvent à satisfaire un ou plusieurs objectifs (coûts, délais, qualité), exprimés au sein d'un ou plusieurs critères de performance. Dans un contexte d'optimisation, on cherche de plus à minimiser ou maximiser un critère, comme par exemple minimiser la durée totale de réalisation du projet.

Une **ressource dans un problème d'ordonnement** est une entité matérielle (une machine, un outil, une matière première, un lieu, . . .) ou humaine, disponible en quantité limitée, destinée à être utilisée pour la réalisation d'une ou plusieurs tâches. Sa disponibilité est généralement exprimée par une capacité propre à chaque ressource qui peut dépendre du temps ou de l'état de la ressource.

Les **tâches** sont le dénominateur commun des problèmes d'ordonnement, leurs définitions ne sont pas immédiates dans les problèmes de bâtiment, car elles dépendent de la finesse du découpage.

Une **tâche élémentaire** est considérée comme un tout indivisible. Dans un projet chaque tâche:

- est identifiée explicitement et sa non-exécution empêche de mener à bien le projet à son terme et compromet l'atteinte de certains objectifs qui peuvent être le coût, la qualité et le temps;
- se caractérise par un début et une fin clairement identifiés ;
- consomme des ressources (matières, temps, etc.) qui ont un coût et sont disponibles en quantité limitée ;
- est reliée à au moins une autre tâche par une relation d'antériorité.

Les tâches sont interdépendantes à double titre. D'une part, parce qu'elles partagent un ensemble de ressources de capacité limitée et, d'autre part, parce que des contraintes de temps entre les dates de début et de fin des tâches doivent être respectées. Ces contraintes traduisent en pratique des impératifs technologiques et organisationnels, ou correspondent à des préférences.

Un **projet** se définit comme étant un ensemble de tâches liées entre elles par des dépendances directes ou indirectes concourant à la réalisation d'un objectif, d'un but, d'un ouvrage bien déterminé. Un projet se définit sur la base d'objectifs de performances techniques, de délais, de coûts, et d'une certaine appréciation des risques encourus.

La **date de début au plus tôt** que l'on notera  $t_x$  d'une tâche  $x$  est égale à la longueur du plus long chemin (dans le graphe modélisant le problème) du début des travaux à  $x$ .

La **date de début au plus tard** que l'on notera  $t_x^*$  de  $x$  est la date maximum à laquelle on doit exécuter  $x$  sans retarder le chantier.

La **marge totale** d'une tâche  $x$  que l'on notera  $MT_x$  est le retard total qu'on peut se permettre sur  $x$  sans remettre en cause la date de fin du projet.

Les **tâches critiques** sont les tâches qui ont une marge totale nulle. Tout retard sur leur exécution entraîne un retard global sur le projet. C'est donc l'ensemble des tâches à surveiller en premier si l'on veut respecter le délai minimum de réalisation du projet.

Un **chemin critique** est un chemin constitué de tâches critiques.

La **marge libre** d'une tâche  $x$  que l'on notera  $ML_x$  est le retard total qu'on peut se permettre sur la tâche  $x$  sans retarder l'exécution d'une autre tâche qu'elle précède.

Le concept de marge prend toute son importance si on la considère dans le cadre de la conduite de la réalisation. En effet, la mise en œuvre de cette réalisation, surtout dans le domaine BTP, se déroule en milieu perturbé. Supposons que l'on ait choisi d'exécuter l'ensemble des tâches selon leurs dates au plus tôt. Au fur et à mesure que se déroule l'exécution des tâches, des perturbations peuvent survenir. Cela signifie que certaines dates de début augmentent, d'où une réduction de la marge libre des tâches correspondantes.

Les perturbations des tâches critiques permettent d'évaluer immédiatement les conséquences sur la fin du projet.

## 2.2. Méthodes de résolution d'un problème d'ordonnement

La grande majorité des méthodes utilisées pour la résolution des problèmes d'ordonnement s'appuient sur une modélisation des contraintes à l'aide d'un graphe. Deux types de méthodes sont classiquement utilisées: la **méthode MPM (Méthode des Potentiels Métra)**, issue de l'école française avec le professeur B.Roy de l'université Paris Dauphine et la **méthode PERT (Program Evaluation and ReviewTechnics)**, qui a été introduite aux États-Unis en 1958 pour la conduite du programme de recherche et de construction des fusées Polaris. Ces méthodes utilisent une représentation graphique pour résoudre le problème.

Le principe de la méthode **PERT** est de réduire la durée totale d'un projet par une analyse détaillée des tâches et de leur enchaînement. On étudie les délais sans prendre en compte les charges (ce principe reste le même pour la méthode **MPM**).

Avec la méthode **PERT**, un **graphe (sans boucle) valué** correspondant au problème est construit en modélisant:

- une tâche par un arc valué dont la valeur correspond à la durée de la tâche ;
- un sommet comme une étape signifiant que toutes les tâches qui y arrivent sont terminées et que toutes celles qui en partent peuvent commencer.

Les questions relatives aux durées d'exécution de chaque tâche et au délai total d'exécution du projet se traitent facilement lorsque les durées sont réputées certaines. Dans certains cas, il est très difficile d'apprécier la durée que prendra chaque activité. La **méthode CPM (Critical Path Method) ou PERT probabilisée** se caractérise par l'utilisation de trois évaluations pour la durée de chaque tâche: une durée optimiste, une durée pessimiste et une durée probable. A partir de ces trois données, il est possible d'établir une évaluation probable de la durée du projet à l'aide de la distribution bêta.

Dans ce cas, on tient compte du risque lié au fait de ne pas tenir dans le délai et celui du dépassement budgétaire. On approche la loi de probabilité à partir des estimations de certains paramètres clés. On dispose de deux méthodes empiriques pour obtenir ces informations chez les responsables de l'exécution d'une tâche du projet. La première consiste à poser des questions permettant d'estimer la fonction de répartition et la seconde consiste à privilégier une distribution donnée généralement choisie entre une distribution unimodale (loi bêta, loi normale, loi triangulaire) et la distribution uniforme.

Pour appliquer cette approche on considère la durée de chaque tâche du projet comme durée aléatoire et la distribution bêta est utilisée, et sa loi est approchée à partir des valeurs extrêmes A et B que la durée d'exécution de la tâche peut prendre, et du mode  $M_0$ .

Dans la pratique, nous devons obtenir, des responsables de la réalisation de chacune des activités x, une estimation  $A_x$  optimiste, une estimation  $B_x$  pessimiste et une estimation  $M_x$  modale. Elles doivent vérifier la relation suivante  $A_x \leq M_x \leq B_x$ . A partir de ces trois estimations, on prend comme valeur probable ou moyenne de la durée de l'activité x la valeur  $E_x$  encore appelée espérance mathématique de la durée de l'activité x, définie par:

$$E_x = \frac{A_x + 4M_x + B_x}{6}$$

La variance de la durée moyenne d'une activité x est définie par:  $\sigma_x^2 = \left( \frac{B_x - A_x}{6} \right)^2$

Cette variance permet de mesurer l'incertitude de la durée réelle de cette activité.

On détermine le(s) chemin(s) critique(s) du graphe correspondant du projet, en se plaçant dans un univers certain et en utilisant les durées moyennes des activités.

On considère ensuite que la durée du projet est aléatoire et égale à la somme des durées des activités du chemin critique identifié. On peut appliquer le théorème central limite (lorsque le nombre de tâches est supérieur à 30) pour approcher la loi de la durée totale du projet par une loi normale.

L'espérance mathématique (ou la variance) de cette loi est la somme des espérances (ou des variances) des durées des tâches du chemin critique identifié, étant donné que ce sont des variables aléatoires indépendantes. La distribution de la durée totale du projet est approximativement normale avec un temps d'achèvement moyen  $T_M$  et on a donc :

$$E(T_M) = \sum_{\text{tâche critique}} E_{ic} \text{ et } \sigma_c^2 = \sum_{\text{tâche critique}} \sigma_{ic}^2$$

Dès lors que l'on connaît la moyenne et l'écart-type de la distribution du temps de réalisation des activités et même du projet, la probabilité des différentes dates peut être calculée à l'aide d'une table de distribution normale.

La durée de la loi de la durée totale du projet permet de calculer des intervalles de confiance (aléatoire) ou la probabilité pour qu'un projet dépasse le temps imparti, il suffit de calculer la valeur normale centrée réduite (lorsque le nombre de tâches dépasse 30).

---

### 3. Revue de littérature

Les problèmes d'ordonnement de projet ont toujours été d'actualité mais les techniques de résolution ont été bien développées à partir des années 1950. Que ce soit l'ordonnement de production (productique) ou celui de projet, plusieurs auteurs en ont fait leur préoccupation le développement des méthodes de résolution et les applications à des problèmes de décision réelles dans le monde.

En 1965, J. Bentz [2] fait un aperçu général sur les problèmes d'ordonnement suite déjà à d'autres auteurs qui en avaient décrit les aspects théoriques et méthodologiques. L'auteur présente une application des mathématiques à un problème d'organisation du travail, dont les méthodes sont susceptibles d'être utilisées dans d'autres domaines des sciences humaines. Il décrit les méthodes de la recherche opérationnelle qui peuvent s'appliquer pour des domaines de sciences sociales. Il reconnaît par une conclusion que le principe fondamental en recherche opérationnelle et l'aide à la décision qui consiste à diagnostiquer le problème de décision avant de proposer une méthode est bien justifié.

J. Carlier [5] énonce une règle dans un théorème qui conduit à une méthode arborescente en essayant de cerner les contraintes les plus difficiles à gérer dans un problème d'ordonnement. L'auteur montre aussi qu'un problème d'ordonnement peut être souvent ramené à un problème de disjonction fondamentale. Pour un graphe ayant plus d'une cinquantaine de sommet, les idées développées dans son article permettent d'arbitrer définitivement les disjonctions et donc d'obtenir immédiatement l'optimum.

Pour la caractérisation de l'ensemble des ordonnements admissibles pour une certaine classe de problèmes avec limitation de ressources J. Erschler, G. Fontan et F. Roubellat [7] proposent des méthodes d'aide à la décision. Ils ont appliqué ces méthodes à des problèmes d'ordonnement de projet sous contrainte de ressources et de durée allouée en effectuant la modélisation à l'aide d'un graphe potentiel tâches non conjonctif. Les conflits pour l'utilisation des moyens introduisent donc un aspect combinatoire (ou séquentiel) dans le problème, cet aspect apparaissant dans le groupe d'arcs non conjonctifs du graphe. Une méthode d'analyse s'appuyant sur la transformation du graphe est proposée. Cette méthode permet de caractériser sur le plan temporel (marges) et séquentiel (contraintes de séquence portant sur les tâches en conflit) l'ensemble des tâches admissibles. Ces informations sont destinées à faciliter l'aide à la décision pour la conception et la conduite des ordonnements. Cette méthode est comparable à celle dite "des chemins critiques".

Un algorithme de construction d'un graphe PERT à sommets minimal est proposé par F. Sterboul et D. Wertheimer [12]. Les auteurs font la preuve de leur algorithme, illustrent par un exemple dont les résultats numériques sont présentés.

En 1982, J. Carlier et P. Chrétienne [6], développent des méthodes pour traiter les problèmes d'ordonnement. Ils rappellent d'abord les méthodes classiques de l'ordonnement telles que : CPM/PERT, méthode des potentiels, graphique de Gantt et méthodes sérielles. Ensuite, ils présentent les principales caractéristiques de ces problèmes et ils terminent en présentant des résultats sur les problèmes à une machine, les problèmes à plusieurs machines et les problèmes d'atelier. Le but de leur travail était de montrer les différentes façons d'aborder ces problèmes.

Dans la réalisation d'un projet, le problème cumulatif est l'un des soucis majeurs pour les planificateurs. Une nouvelle méthode de résolution des problèmes cumulatifs basée sur les "parties obligatoire" est proposée par A. Lahrichi en 1982 [8]. Le but de son travail était de résoudre les problèmes cumulatifs à un seul moyen où le délai de réalisation est considéré comme le critère de choix le plus important. Les avantages de sa méthode sont :

- de ne pas débiter par une heuristique mais par l'ordonnement définitif et "exact" de certaines parties de tâches bien déterminées ;
- d'utiliser un minorant de l'intensité maximale bien plus proche de la solution exacte que l'indicateur généralement utilisée qui est l'intensité moyenne.

Dans sa thèse, A. Boutemine [3], développe un logiciel d'ordonnement pour bâtiments à l'usage des petites et moyennes entreprises. Il fait un aperçu sur les méthodes d'ordonnement utilisées dans le bâtiment.

En 1985, C. Lefèvre et P.Layoyaux [9], font une note sur les problèmes d'ordonnement PERT aléatoires avec un but double. D'abord, ils présentent un bref résumé de différentes approches développées dans la littérature pour étudier les problèmes d'ordonnement PERT aléatoires. Ils construisent ensuite des bornes pour la durée moyenne d'exécution du projet. Ces bornes, dépendent uniquement des moyens et des variances des durées des tâches qui composent le projet.

En 1990, F. Badran [1] fait une introduction sur les dates échues dans l'analyse PERT-coût. Il présente une méthode d'ordonnement qui s'applique à des projets décomposés en tâches élémentaires partiellement ordonnées en supposant de plus l'existence de contraintes de dates échues imposées à certains événements. Les contraintes de dates échues provoquent des incompatibilités avec les durées des tâches élémentaires évaluées par l'utilisateur (qui sont fonction des moyens mis en œuvre). Il propose une méthode qui permet de lever ces incompatibilités en attribuant à chaque tâche une durée admissible tout en minimisant le coût global d'exécution du projet. L'intérêt de cette méthode est de permettre la réalisation d'un logiciel d'aide à la décision qui sera capable d'assister un utilisateur soumis constamment à des imprévus, en l'aidant à réévaluer les durées des tâches et à allouer au mieux les ressources. En conséquence, il évitera par une meilleure répartition, une accumulation de retards en fin de projet.

Plusieurs auteurs se sont intéressés aux problèmes d'ordonnement aussi bien les aspects théoriques que les aspects applications comme C. Mancel [10], C. Briand [4], L. Ritzman, L. Krajewski [11] et bien d'autres.

## 4. Méthodologie

Dans cette section, nous justifierons le choix méthodologique et le champ d'investigation de l'étude, ensuite nous indiquerons les outils qui ont été utilisés et enfin nous préciserons le mode de traitement des données qui ont été collectées.

Nous avons visité tout d'abord les chantiers en souffrance à l'Université de Koudougou, où nous avons la possibilité de suivre l'évolution puis nous nous sommes intéressés à des chantiers à Ouagadougou. C'est ainsi que pour pouvoir récolter des données nécessaires pour l'étude, nous avons été sur un chantier à Ouagadougou sous ordre du directeur Technique(DT) de la société maître d'ouvrage. C'est un chantier de construction d'un bâtiment administratif de l'État : bâtiment R+5 avec sous-sol. La durée d'exécution est de 24 mois plus 63 jours accordés par l'Etat pour un retard prévisible constaté et confirmé par l'Etat.

Nous avons retenu dans le cadre de cette étude deux instruments d'investigation. Le premier, sous forme de questionnaires se base sur une interrogation systématique des acteurs du chantier et le second est sous forme d'entretiens avec les acteurs du chantier. Cette enquête a été faite sur le chantier mais aussi au siège, auprès des acteurs du chantier et d'autres chantiers similaires.

Sur le chantier, nous nous sommes fait aider par le chef de chantier, qui a bien voulu nous faire visiter le chantier et répondre à nos questions. Nous avons donc vu l'état d'avancement des travaux. D'après le conducteur de travaux, à la date du 18 Novembre 2013, le chantier était à un taux d'exécution de 65%. Nous avons été informés que les travaux avaient été suspendus pour rehaussement du 14 au 21 septembre 2012. D'après le chef de chantier, cette suspension est due au fait qu'après le démarrage des travaux, il a été constaté que le chantier était sur une nappe phréatique. En rajoutant ce temps de suspension au délai d'exécution le conducteur des travaux reste optimiste sur le respect du délai.

Les personnes à qui nous nous sommes intéressés pour cette enquête sur le chantier objet d'étude sont: le directeur technique, le conducteur des travaux et le chef de chantier. Notons que cette partie de notre enquête s'est déroulée au siège où nous avons obtenu les durées prévisionnelles d'exécution des différentes tâches par une exploitation du planning d'exécution. Nous avons obtenu ce planning chez le conducteur des travaux qui a bien voulu nous montrer la méthode de sa lecture des documents techniques du dossier qui ont été utilisés pour soumettre à l'appel d'offre. Pour les autres données nous nous sommes servis d'un questionnaire. Il s'agit pour nous de déterminer les informations suivantes sur chaque tâche:



- une estimation  $A_x$  optimiste de la durée minimale d'exécution de l'activité si toutes les circonstances de déroulement s'avéraient particulièrement favorables en se posant la question quelle est la durée minimale de  $x$ ?
- une estimation  $B_x$  pessimiste de durée maximale d'exécution de l'activité si tout ce qui peut aller bien tournait mal, et prenait un maximum de temps (à l'exception des catastrophes, accidents, grèves, etc.) en se posant la question quelle est la durée maximale de  $x$ ?
- une estimation  $M_x$  modale, correspondant à la durée vraisemblable d'exécution de l'activité, soit le temps normal que l'estimateur juge sur la base de son expérience, devoir se produire dans des circonstances normales en se posant la question quelle est la durée la plus probable de  $x$ ?

Après avoir obtenu les informations utiles, nous avons utilisé la méthode MPM pour déterminer la durée minimale du projet, les marges totale et libre de chaque tâche et les tâches critiques du projet. Dans cette application, nous avons considéré les informations (durées des tâches) contenues dans le dossier technique en considérant que ce sont des durées déterministes.

Nous avons utilisé ensuite la méthode CPM ou PERT-probabilisée pour déterminer la durée minimale la plus probable du projet, les marges totale et libre de chaque tâche, les tâches critiques du projet. Dans cette application, nous avons considéré les informations obtenues sur le chantier après enquêtes (durées aléatoires des tâches).

Dans les deux cas, nous ne considérons pas les contraintes de ressources dans la mesure où ces informations ont manqué, pas par faute de requête de notre part mais pour des raisons objectives à l'entreprise responsable du chantier.

Après application des méthodes MPM et CPM, nous avons calculé les probabilités suivantes :

- de respect du délai prévu ;
- de respect de la durée minimale dans le cas déterministe.

Nous avons déterminé les intervalles de confiance à 10% et 5% de risque d'erreur.

## 5. Données d'études de cas

Après les entretiens, le dépouillement du dossier technique soumis pour l'appel d'offre, nous avons fait la synthèse des informations et les résultats sont consignés dans les 11 tableaux suivants (tableau 1 à tableau 11). Notons que chaque tableau représente un groupe de tâches selon la désignation des ouvrages figurants sur le planning. Les durées sont exprimées en jours, de même que les estimations  $A_x, B_x$  et  $M_x$ .

Nous résumons donc par les tableaux suivants (tableau 1 à tableau 11) la synthèse des tâches, leurs durées (déterministe, optimiste, probable et pessimiste) ainsi que les contraintes de précédence.

**Tableau1. - Tâches du terrassement+ cuvelage : durées et contraintes**

Label	Tâche x	Durée	$A_x$	$B_x$	$M_x$	Contraintes
A1	Excavation pour fondation radier	34	20	50	37	néant
A2	Béton de propreté	29	14	40	34	7 jours après A1
A3	Remblais des parois	15	7	21	14	1 jours après le début de B7 et 7 jours après la fin de B6 ; et à50% d'exécution de B.

**Tableau2. -Tâches relatives à infrastructure/sous-sol et préfabrication des prédalles et poutres : durées et contraintes**

Label	Tâche x	Durée	$A_x$	$B_x$	$M_x$	Contraintes
B	Préfabrication des prédalles et poutres	392	300	700	400	à 1/3 d'exécution de A2 et 14 jours après la fin de A1
B1	Béton de fondation	22	14	35	25	7 jours après la fin de A2 et 5,4% d'exécution de B
B2	Béton armé pour dallage	22	14	40	21	B1 fini et B à 10,7% d'exécution
B3	Structure en élévation	22	15	35	23	14 jours après B1 ; B2 à 2/3 d'exécution et B à 14,3%.
B4	Pose des	22	10	30	24	49 jours après la fin de B3 et à 32,1% d'exécution de B.

	poutres,nervures et hourdis					
<b>B5</b>	Béton armé pour dalle de compression	14	7	35	15	63 jours après la fin de B3 ; B4 à 2/3 d'exécution et B à 35%.
<b>B6</b>	Maçonnerie d'agglos	20	6	28	16	14 jours après C1 et 42,9% de B.
<b>B7</b>	Étanchéité sur voile sous-sol	15	7	30	18	7 jours après B6 et 50% de B.
<b>B8</b>	Enduit sur maçonnerie	20	7	40	27	16 jours après B6 ; 50% de B7 ; 49% de A3 et 50,3% de B

**Tableau 3. –Tâches "Gros œuvre, étanchéité"niveau RDC : durées et contraintes**

Label	Tâche x	Durée	A <sub>x</sub>	B <sub>x</sub>	M <sub>x</sub>	Contraintes
<b>C1</b>	Structure en élévation	11	4	20	14	B4 fini et B5 à moitié fini et B à 37,5%
<b>C2</b>	Pose des poutres, prédalles	10	3	21	10	5 jours après A3 ; B8 à 2/3 de d'exécution et B à 55,4%.
<b>C3</b>	Béton armé pour dalle de compression	6	2	14	7	5 jours après C2 et B à 59,2% d'exécution.
<b>C4</b>	Maçonnerie en agglos	18	7	35	19	D1 fini ; D2 à 50% et B à 64,5% d'exécution.
<b>C5</b>	Enduit au mortier de ciment	19	10	35	21	6jours après D1 ; C4 à 1/3 d'exécution ; D2 à 99% et B à 66,1%.
<b>C6</b>	Étanchéité des salles d'eau	21	6	35	23	7 jours après D2 ; D3 à 99% ; C4 à 80% et B à 68,1% d'exécution.

**Tableau 4. - Tâches du niveau R+1 : durées et contraintes.**

Label	Tâche x	Durée	A <sub>x</sub>	B <sub>x</sub>	M <sub>x</sub>	Contraintes
<b>D1</b>	Structure en élévation	14	5	35	14	C3 fini et B à 60,7%.
<b>D2</b>	Pose des poutres,nervures et hourdis	20	6	30	21	8 jours après C3 ; D1 à moitié fini et B à 62,5%.
<b>D3</b>	Béton armé pour dalle de compression	9	3	21	12	D2 fini ; C4 à 1/3 d'exécution et B à 66,3%.
<b>D4</b>	Maçonnerie en agglos	20	6	40	21	E1 fini ; C6 à 75% d'exécution et B à 71,4% d'exécution.
<b>D5</b>	Enduit au mortier de ciment	21	6	40	23	7 jours après E2 ; E3 à 66% ; et 66% de D4 et B à 75% d'exécution.
<b>D6</b>	Étanchéité des salles d'eau	19	7	40	22	7 jours après D4 ; D5 à 1/3 d'exécution ; B à 78,6 % et J2 à 2,1 %.

**Tableau 5. - Tâches du niveau R+2 : durées et contraintes**

Label	Tâche x	Durée	A <sub>x</sub>	B <sub>x</sub>	M <sub>x</sub>	Contraintes
<b>E1</b>	Structure en élévation	13	6	25	15	7 jours après D2 ; 99 % de D3 ; 80 % de C4 et 68,1 % de B.
<b>E2</b>	Pose des poutres, prédalle	14	6	35	18	C4 fini ;7 jours après D3 ; 40% de E1 ; 30% de C6; 70% de C5 et B à 69,6%.
<b>E3</b>	Béton armé pour dalle de compression	8	3	14	10	E2 fini ; 1 jour après C6 ; 35% de D4 et 73,47% de B
<b>E4</b>	Maçonnerie en agglos	20	6	40	24	8 jours après D4 ; 5,3% de D6 ; 2,1% de J2 ; 3,6% de K et 78,8% de B
<b>E5</b>	Enduit au mortier de ciment	21	10	40	23	7 jours après D5 ; 70 % de D6 ; 60 % de F1 ; 4,3 % de J1 ; 8,4 % de J2 ; 8,7 % de K et 82,14 % de B
<b>E6</b>	Étanchéité des salles d'eau	19	10	35	26	F3 fini ; 87,75 % de B; 18,7 % de J1 ; 17,6 % de J2 et 17,4 % de K

**Tableau 6. - Tâches du niveau R+3 : durées et contraintes**

Label	Tâche x	Durée	A <sub>x</sub>	B <sub>x</sub>	M <sub>x</sub>	Contraintes
F1	Structure en élévation	14	6	30	18	D5 fini ; E4 à 35% ; D6 à 42,1% ; B à 80,6% ; J2 à 5% et K à 6, 32%.
F2	Pose des poutres, prédalle	14	5	30	20	8 jours après D5 ; F1 à 50% ; E5 à 48% ; E4 à 70% ; D6 à 78,9% ; B à 32,4% ; J1 à 4,3% ; J2 à 8,8% et K à 9%.
F3	Béton armé pour dalle de compression	7	2	14	9	F2 fini ; E5 à 71,4% ; B à 85,9% ; J1 à 14,4% ; J2 à 14,3% et K à 14,6%.
F4	Maçonnerie en agglos	19	7	28	22	G2 fini, G3 à 12, 5% ; B à 93,1% ; J1 à 34,5% ; J2 à 26,5% ; K à 25,7% et L1 à 6,5%.
F5	Enduit au mortier de ciment	21	10	35	25	6 jours après G2 ; H1 à 33,3% ; B à 96,4% ; F4 à 66,6% ; J1 à 43,9% ; J2 à 31,5% ; K à 30,9% ; et L1 à 11,33%.
F6	Étanchéité des salles d'eau	18	6	30	20	F5 fini ; G4 à 65 % ; H2 à 42,8 % ; J1 à 58,9 % ; J2 à 40,3 % et L1 à 18 %.

**Tableau 7. - Tâches du niveau R+4 : durées et contraintes**

Label	Tâche x	Durée	A <sub>x</sub>	B <sub>x</sub>	M <sub>x</sub>	Contraintes
G1	Structure en élévation	13	6	28	16	F3 fini ; B à 87,75% ; J1 à 18,7% ; J2 à 17,6% et K à 17,4%.
G2	Pose des poutres, prédalle	14	5	20	16	7 jours après F3 ; G1 à 12,5 % E6 à 36,8 % ; J2 à 20,3% ; K à 35,6% et L1 à 2% ; B à 82,4% ; J1 à 24,5
G3	Béton armé pour dalle de compression	8	2	14	10	G2 fini ; B à 93,1% ; J1 à 34,5% ; J2 à 26,5% ; K à 27,7% et L1 à 6,5%.
G4	Maçonnerie en agglos	20	7	40	23	3 jours après F4, F5 à 40 % ; H1 à 80 % ; B à 98,5% ; J1 à 49,6 % ; J2 à 34,8 % ; K à 34 % ; et L1 à 13,6 %.
G5	Enduit au mortier de ciment	20	6	40	25	4 jours après F5 ; G4 à 75 % ; F4 à 11 % ; H2 à 50% ; J1 à 39,5% ; J2 à 40,7% ; K à 29,5% et L1 à 17,7%.
G6	Étanchéité des salles d'eau	19	6	40	25	G5 fini ; I1 à 28,6% ; J2 à 50% ; K à 47% et L1 à 25%.

**Tableau 8. - Tâches du niveau R+5 : durées et contraintes**

Label	Tâche x	Durée	A <sub>x</sub>	B <sub>x</sub>	M <sub>x</sub>	Contraintes
H1	Structure en élévation	21	6	40	25	1 jour après G3 ; F4 à 50% ; B à 93,8% ; J1 à 40,3% ; J2 à 30,3% ; K à 30% et L1 à 9,3%.
H2	Pose des poutres, prédalle	21	7	40	25	6 jours après F4 ; H1 à 71,4% ; G4 à 15% ; F5 à 50% ; B à 99,5% ; J1 à 52,5% ; J2 à 36,9 % ; K à 35,6 % et L1 à 15 %.
H3	Béton armé pour dalle de compression	9	2	20	15	1 jour après G4 ; H2 à 85,7 % ; F6 à 50 % ; J1 à 64,7 % ; J2 à 43,7 % ; K à 42,3 % et L1 à 20,7 %.
H4	Maçonnerie en agglos	18	7	35	21	I1 fini ; G6 à 50 % ; I2 à 45 % ; J1 à 80,6 % ;
H5	Enduit au mortier de ciment	18	7	35	21	J2 à 53,8% ; K à 51,7% et L1 à 28,76% ; 7 jours après G6.
H6	Béton armé pour escalier	17	7	35	21	H5 fini ; I5 à 86,3% ; I6 à 23,3% ; I7 à 50% ; J2 à 60% ; K à 65,2% et L à 39,6%.
H7	Béton armé pour acrotère et forme de pente	18	6	35	21	2 jours après H6 ; I6 à 50% ; K à 76% ; L1 à 41,6% et L2 à 8,6%.
H8	Étanchéité des salles d'eau	18	6	35	21	16 jours après H6 ; I6 à 91,7% ; J2 à 82,35% ; J3 à 7,3%.

**Tableau 9. - Tâches de "Toiture Terrasse" : durées et contraintes**

<b>Label</b>	<b>Tâche x</b>	<b>Durée</b>	<b>A<sub>x</sub></b>	<b>B<sub>x</sub></b>	<b>M<sub>x</sub></b>	<b>Contraintes</b>
<b>I1</b>	Structure en élévation	14	6	30	19	H3 et F6 fini ; G5 à 80% ; J1 à 70,5% ; J2 à 47,4% ; K à 45,8% et L1 à 23,6%.
<b>I2</b>	Pose des poutres,prédalle	14	7	30	20	5 jours après G5 ; I1 à moitié fini ; G6 à 15 %; J1 à 76,9%; J2 à 51,3 %; K à 49,4 % et L1 à 26 %.
<b>I3</b>	Béton armé pour acrotère	24	10	30	25	I2 fini ; H4 à 38,9 %; G6 à 99,5 %; I4 à 45 %; J1 à 86,3%; J2 à 56,7 %; K à 54,5 %; et L1 à 31 %.
<b>I4</b>	Maçonnerie en agglos creux	14	6	30	14	I1 fini ; G6 à 50 %; I2 à 45 %; J1 à 80,6 %;
<b>I5</b>	Enduit au mortier de ciment	22	10	40	24	J2 à 53,8% ; K à 51,7% et L1 à 28,76% ;7 jours après G6.
<b>I6</b>	Enduit extérieur et raccordements	60	20	100	65	H4 fini ; I5 à 22,7 %; H5 à 38,8 %; I3 à 58,3 %; J1 à 58,6 %; J2 à 62,6 %; K à 60 % et L1 à 31 %.
<b>I7</b>	Forme de pente	14	7	28	16	J1 fini ; I6 à 11,7 %; I5 à 68,2 %; I3 à 83,3 %; H5 à 72% ; J2 à 64,7% ; K à 62,8% et L1 à 37,66%.
<b>I8</b>	Étanchéité sur dalle et relevé	28	7	40	35	33 jours après K; J3 à 59,7% ; L1 à 79,3% et L2 à 79,3%.



de l'aspect aléatoire dans l'exécution des tâches? Quelles sont les chances de respecter le calendrier d'exécution des tâches, inscrit dans le dossier d'appel d'offre ?

Compte tenu du nombre élevé des tâches et de leurs contraintes, nous avons établi le tableau de précedence qui comportait beaucoup de redondances. La suppression des redondances a été faite lors de la construction du graphe à cause du nombre très élevé des prédécesseurs de certaines tâches. Au départ, le graphe comportait plus de 300 arcs au total y compris les redondants, mais après suppression, nous avons obtenu moins de 90 arcs non redondants. L'établissement du tableau de précedence nous a permis de déterminer les niveaux d'exécution du projet nécessaire à la construction du graphe.

En appliquant la technique de détermination des niveaux dans un graphe, nous avons obtenu 52 niveaux.

Nous nous sommes servis de ces niveaux pour faciliter la construction des graphes. Il a été nécessaire de calculer les valeurs des arcs dans les graphes après les modélisations (en variables déterministe et aléatoire).

Nous rappelons que les données obtenues nous ont permis d'identifier trois types de contraintes de successions entre les tâches qui sont les successions strictes, les successions avec des attentes et les successions avec chevauchement.

Compte tenu du nombre élevé des tâches, le graphe MPM n'est pas lisible sur une feuille de papier de format A4. Notons que la détermination des ordonnancements s'est faite directement sur le graphe MPM.

La **méthode MPM** nous a permis de déterminer le chemin critique du projet en considérant les durées déterministes. Elle a permis d'obtenir la durée totale minimale d'exécution du projet qui est de 771,057 jours soit 772 jours durée totale minimale approchée.

La méthode nous a permis de déterminer les dates de début (au plus tôt et au plus tard) et les marges (libres et totales) de toutes les tâches du projet. Nous avons regroupé tous ces résultats dans le tableau 12.

**Tableau 12. - Synthèse des résultats par la méthode MPM**

Label	Durée	$t_x$	$t_x^*$	$MT_x$	$ML_x$	Label	Durée	$t_x$	$t_x^*$	$MT_x$	$ML_x$
<b>A1*</b>	34	0,000	0,000	0,000	0,000	<b>B3*</b>	22	113,667	113,667	0,000	0,000
<b>A2*</b>	29	41,000	41,000	0,000	0,000	<b>B4*</b>	22	184,667	184,667	0,000	0,000
<b>A3</b>	15	259,667	260,317	0,650	0,650	<b>B5</b>	14	199,333	199,667	0,333	0,333
<b>B</b>	392	50,667	55,832	5,165	5,160	<b>B6*</b>	20	231,667	231,667	0,000	0,000
<b>B1*</b>	22	77,000	77,000	0,000	0,000	<b>B7</b>	15	258,667	259,317	0,650	0,000
<b>B2*</b>	22	99,000	99,000	0,000	0,000	<b>B8*</b>	20	267,667	267,667	0,000	0,000

<b>C1*</b>	11	206,667	206,667	0,000	0,000	<b>D1</b>	14	302,000	303,000	1,000	1,000
<b>C2*</b>	10	281,000	281,000	0,000	0,000	<b>D2*</b>	20	310,000	310,000	0,000	0,000
<b>C3*</b>	6	296,000	296,000	0,000	0,000	<b>D3*</b>	9	330,000	330,000	0,000	0,000
<b>C4</b>	18	320,000	324,000	4,000	3,800	<b>D4*</b>	20	354,660	354,660	0,000	0,000
<b>C5</b>	19	329,800	334,370	4,570	2,900	<b>D5</b>	21	367,860	368,670	0,810	0,810
<b>C6*</b>	21	338,910	338,910	0,000	0,000	<b>D6</b>	19	381,674	404,790	23,116	0,000
<b>E1</b>	13	338,910	341,660	2,750	1,890	<b>F1</b>	14	389,681	412,797	23,116	1,799
<b>E2</b>	14	346,000	347,670	1,670	0,860	<b>F2</b>	14	409,960	431,277	21,317	0,000
<b>E3</b>	8	361,660	362,660	1,000	0,920	<b>F3</b>	7	423,960	445,277	21,317	0,000
<b>E4</b>	20	382,681	405,797	23,116	0,000	<b>F4*</b>	19	477,016	477,016	0,000	0,000
<b>E5</b>	21	399,880	421,197	21,317	0,000	<b>F5*</b>	21	493,509	493,509	0,000	0,000
<b>E6</b>	19	430,960	455,024	24,064	24,064	<b>F6</b>	18	516,316	516,509	0,193	0,000
<b>G1</b>	13	430,960	460,391	29,431	29,431	<b>H1*</b>	21	486,516	486,516	0,000	0,000
<b>G2*</b>	14	462,016	462,016	0,000	0,000	<b>H2</b>	21	506,316	507,512	1,196	1,003
<b>G3*</b>	8	476,016	476,016	0,000	0,000	<b>H3</b>	9	525,316	525,509	0,193	0,193
<b>G4</b>	20	503,316	503,509	0,193	0,000	<b>H4</b>	18	549,809	551,503	1,694	1,417
<b>G5*</b>	20	518,509	518,509	0,000	0,000	<b>H5</b>	18	564,513	565,513	1,000	0,004
<b>G6*</b>	19	538,513	538,513	0,000	0,000	<b>H6*</b>	17	586,517	586,517	0,000	0,000
<b>H7</b>	18	607,057	716,037	108,980	108,980	<b>I5*</b>	22	564,513	564,513	0,000	0,000
<b>H8</b>	18	626,521	716,037	89,516	89,516	<b>I6</b>	60	571,501	572,497	0,996	0,996
<b>I1*</b>	14	534,509	534,509	0,000	0,000	<b>I7*</b>	14	579,517	579,517	0,000	0,000
<b>I2</b>	14	543,509	544,505	0,996	0,000	<b>I8*</b>	28	706,037	706,037	0,000	0,000
<b>I3</b>	24	557,509	558,505	0,996	0,000	<b>J1</b>	140	393,860	415,177	21,317	0,000
<b>I4</b>	14	549,809	552,205	2,396	1,400	<b>J2</b>	238	376,676	399,792	23,116	0,000
<b>J3*</b>	164	607,057	607,057	0,000	0,000	<b>L1</b>	320	430,960	451,057	20,097	24,256
<b>K*</b>	251	372,660	372,660	0,000	0,000	<b>L2*</b>	140	595,017	595,017	0,000	0,000

\* Indique que la tâche est jugée critique après calculs

De même que le graphe MPM, le graphe CPM n'est pas lisible sur une feuille de papier de format A4 et la détermination des ordonnancements s'est faite directement sur le graphe CPM.

La **méthode CPM** nous a permis de déterminer le chemin critique du projet en considérant les durées aléatoires. Elle a permis d'obtenir la moyenne de la durée totale minimale d'exécution du projet qui est de 889,503 jours.

La méthode nous a permis de déterminer les dates de début (au plus tôt et au plus tard) et les marges (libres et totales), les espérances mathématiques et les écart-types des durées de toutes les tâches du projet. Nous avons regroupé tous ces résultats dans le tableau 13.

## ARIMA

**Tableau 13. –Synthèse des résultats par la méthode PERT probabilisée**

Label	E <sub>x</sub>	σ <sub>x</sub>	t <sub>x</sub>	t <sub>x</sub> *	MT <sub>x</sub>	ML <sub>x</sub>	Label	E <sub>x</sub>	σ <sub>x</sub>	t <sub>x</sub>	t <sub>x</sub> *	MT <sub>x</sub>	ML <sub>x</sub>
<b>A1*</b>	36,333	25,000	0	0	0	0,000	<b>F3</b>	8,667	4,000	478,072	510,656	32,584	0,000
<b>A2*</b>	31,667	18,778	43,333	43,333	0	0,000	<b>F4*</b>	20,500	12,250	544,461	544,461	0	0,000
<b>A3</b>	14,000	5,444	290,233	291,457	1,224	1,224	<b>F5</b>	24,167	17,361	562,814	564,511	1,697	0,572
<b>B*</b>	433,333	4444,444	53,889	53,889	0	0,000	<b>F6*</b>	19,333	16,000	589,236	589,236	0	0,000
<b>B1*</b>	24,833	12,250	77,289	77,289	0	0,000	<b>G1</b>	16,333	13,444	486,739	526,419	39,68	39,681
<b>B2*</b>	23,000	18,778	126,956	126,956	0	0,000	<b>G2*</b>	14,833	6,250	528,461	528,461	0	0,000
<b>B3*</b>	23,667	11,111	142,289	142,289	0	0,000	<b>G3*</b>	9,333	4,000	543,294	543,294	0	0,000
<b>B4*</b>	22,667	11,111	214,956	214,956	0	0,000	<b>G4*</b>	23,167	30,250	574,178	574,178	0	0,000
<b>B5*</b>	17,000	21,778	230,067	230,067	0	0,000	<b>G5</b>	24,333	32,111	591,553	593,103	1,55	0,672
<b>B6*</b>	16,333	13,444	265,9	265,9	0	0,003	<b>G6*</b>	24,333	32,111	617,908	617,908	0	0,000
<b>B7*</b>	18,167	14,694	289,233	289,233	0	0,000	<b>H1*</b>	24,333	32,111	554,711	554,711	0	0,000
<b>B8*</b>	25,833	30,250	298,317	298,317	0	0,000	<b>H2</b>	24,500	30,250	577,653	577,906	0,253	0,253
<b>C1*</b>	13,333	7,111	238,567	238,567	0	0,000	<b>H3*</b>	13,667	9,000	598,903	598,903	0	0,000
<b>C2*</b>	10,667	9,000	315,561	315,561	0	0,000	<b>H4</b>	21,000	21,778	631,236	636,654	5,418	2,715
<b>C3*</b>	7,333	4,000	331,228	331,228	0	0,000	<b>H5</b>	21,000	21,778	649,241	650,279	1,038	0,000
<b>C4</b>	19,667	21,778	356,561	360,006	3,445	3,244	<b>H6*</b>	21,000	21,778	678,993	678,003	0,000	0,000
<b>C5</b>	21,500	17,361	366,361	375,528	9,167	9,167	<b>H7</b>	20,833	23,361	702,837	868,67	165,833	165,833
<b>C6</b>	22,167	23,361	378,441	378,911	0,47	0,000	<b>H8</b>	20,833	23,361	715,466	868,67	153,204	153,204
<b>D1*</b>	16,000	25,000	338,561	338,561	0	0,000	<b>I1*</b>	18,667	16,000	612,569	612,569	0	0,000
<b>D2*</b>	20,000	16,000	346,561	346,561	0	0,000	<b>I2</b>	19,500	14,694	621,558	625,323	3,765	0,000
<b>D3*</b>	12,000	9,000	366,561	366,561	0	0,000	<b>I3</b>	23,333	11,111	642,12	644,823	2,703	1,666
<b>D4</b>	21,667	32,111	395,066	396,228	1,162	1,162	<b>I4</b>	15,333	16,000	630,333	637,923	7,59	4,887
<b>D5</b>	23,000	32,111	411,228	411,358	0,13	0,091	<b>I5*</b>	24,333	25,000	649,241	649,241	0	0,001
<b>D6</b>	22,500	30,250	427,269	459,853	32,584	0,000	<b>I6</b>	63,3333	177,778	657,389	658,427	1,038	0,000
<b>E1</b>	15,167	10,028	378,441	379,494	1,053	1,053	<b>I7*</b>	16,5000	12,250	665,837	665,837	0	0,989
<b>E2*</b>	18,833	23,361	385,561	385,561	0	0,000	<b>I8</b>	31,1667	30,250	820,67	858,337	37,667	37,666
<b>E3*</b>	9,500	3,361	404,228	404,228	0	0,500	<b>J1</b>	171,6667	1736,111	430,319	472,747	42,428	9,844
<b>E4</b>	23,667	32,111	428,462	461,046	32,584	0,000	<b>J2</b>	308,3333	3402,778	420,794	453,378	32,584	0,000
<b>E5</b>	23,667	25,000	447,545	480,129	32,584	0,000	<b>J3*</b>	186,6667	1111,111	702,837	702,837	0	0,000
<b>E6</b>	24,833	17,361	486,739	519,322	32,583	32,583	<b>K*</b>	316,6667	2500,000	415,728	415,728	0	0,000
<b>F1</b>	18,000	16,000	436,745	469,329	32,584	0,000	<b>L1</b>	351,6667	1736,111	486,739	520,436	33,697	33,697
<b>F2</b>	19,167	17,361	458,905	491,489	32,584	0,000	<b>L2*</b>	166,6667	1111,111	688,503	688,503	0	0,000

\* Indique que la tâche est jugée critique après calculs

Les calculs des probabilités donnent les résultats suivants :

- 5,80% comme la probabilité de respecter le délai de 735 jours qui est le délai contractuel ;



- 11,59% comme la probabilité de respecter la durée de 772 jours qui est la durée totale minimale d'exécution du projet. Cette durée correspond à la durée totale minimale d'exécution du projet seulement sur la base des informations relatives aux durées d'exécution des tâches, contenues dans le dossier d'appel d'offre ;
- l'intervalle de confiance à 90% de chance de la moyenne de la durée totale minimale d'exécution du projet avec les données aléatoires est [869 ; 910] (valeurs extrêmes approchées) ;
- l'intervalle de confiance à 95% de chance de la moyenne de la durée totale minimale d'exécution du projet avec les données aléatoires est [865 ; 914] (valeurs extrêmes approchées).

Ces différentes probabilités nous permettent de déduire avec respectivement 10% et 5% de risque d'erreur, que la non maîtrise et la non prise en compte de l'aspect aléatoire dans les plannings de construction objet de notre étude de cas, sont les causes de non-respect des délais d'exécution. Ceci fait que notre hypothèse principale est vérifiée dans notre étude de cas.

La détermination des ordonnancements permet d'affirmer que les durées déterministes des tâches sont moins réalistes que celles aléatoires tenant en comptes les durées vraisemblable, minimale et maximale dans les prévisions d'exécution d'un projet en BTP à partir de notre étude de cas. En effet, on se rend compte que le délai prévu et la durée totale minimale sont trop en deçà de la moyenne de la durée totale minimale d'exécution du projet. Ceci fait que notre hypothèse secondaire 1 est vérifiée dans notre étude de cas.

La détermination des intervalles de confiance en utilisant les durées aléatoires permettent de prédire les difficultés temporelles de respect de délai d'exécution d'un projet en BTP. En effet, avec les intervalles de confiance, on sait prédire si le délai est plus ou moins réaliste. Ceci fait que notre hypothèse secondaire 2 est vérifiée dans notre étude de cas.

Après toutes ces analyses, deux résultats importants sont à retenir :

- premièrement, en tenant compte des informations déterministes contenues dans le dossier d'appel d'offre qui a permis à l'entreprise d'avoir le marché, les résultats montrent que la durée totale minimale est de 772 jours contre 735 jours comme délai. Cette situation montre que l'application des méthodes d'aide à la décision, peuvent permettre aux différents acteurs dans le cas d'un marché de prédire, si oui ou non les délais fixés par les soumissionnaires à un appel d'offre sont plus réalistes;
- deuxièmement, en tenant compte de l'aspect aléatoire des durées d'exécution des tâches d'un projet, les résultats montrent qu'en moyenne la durée totale minimale qui est de 889,503 jours est d'une part loin du délai fixé par l'entreprise et d'autre part loin du délai fixé pour la fin des travaux du projet. Ceci peut vouloir dire que les entreprises ne tiennent pas compte de l'aspect aléatoire qui peut donner une idée de la tendance centrale de la durée d'un projet donné.

## 7. Conclusion

Dans ce papier, nous nous sommes intéressés à la question de respect des délais dans les appels d'offres qui est une question importante aussi bien pour les pays développés que ceux en développement comme le cas du Burkina. Cette question est d'autant plus cruciale pour le cas des travaux en BTP. Il n'est pas rare de voir des bâtiments, des routes, des barrages en construction dont la fin des travaux peine à arriver. Nous nous intéressons donc à cette question puisque tous les marchés d'appels d'offre précisent les délais des travaux. Où se trouve le problème si les délais sont précisés dans les cahiers de charge lors des appels d'offre ? Dans ce papier, nous avons comparé les informations sur les durées des différentes activités d'un projet de construction d'un bâtiment R+5 avec sous-sol, d'une part, en considérant qu'elles sont déterministes et d'autre part en posant des questions sur ces activités afin de déterminer les durées aléatoires engendrées. L'utilisation de ces informations nous permet grâce aux méthodes MPM, PERT/CPM de déterminer les durées minimale et probable du projet pour enfin calculer les probabilités de respect des délais fixés par l'entreprise (maître d'œuvre). En effet, c'est après avoir présenté nos résultats à l'entreprise que le gouvernement burkinabè après entrevue avec le chef de l'entreprise affirme reconnaître il était impossible pour l'entreprise de respecter le délai. C'est après cette entrevue qu'un délai supplémentaire a été accordé pour la fin des travaux.

Ce travail a permis d'anticiper en trouvant que les probabilités de respect des délais étaient trop faibles ce qui pouvait permettre au maître d'œuvre de revoir en négociant les délais fixés initialement.

Après avoir modélisé notre problème tenant compte des informations obtenues sur le chantier d'une part et les informations contenues dans le dossier d'appel d'offre, nous avons appliqué la méthode MPM pour déterminer les ordonnancements avec les données déterministes relatives aux tâches et nous avons appliqué la méthode CPM avec les durées aléatoires des tâches. Les calculs ont montré qu'il y a 5,80% de chance de respecter le délai fixé et 11,59% de chance de respecter les prévisions déterministes (durée totale minimale prévue par l'entreprise).

Ces résultats bien que limités à cette étude laissent voir que les prévisions aléatoires peuvent prédire les difficultés de respect des délais fixés dans un dossier d'appel d'offre.

Nous recommandons d'utiliser les données aléatoires pour délimiter à l'avance les extrémités les plus probables (inférieure et supérieure) de durée totale d'exécution d'un projet ce qui peut permettre d'examiner les délais proposés dans les dossiers de candidature soumis à un appel d'offre.

Nous pensons que la prise en compte des ressources (main-d'œuvre, machines, budget, etc.) pourrait davantage éclairer les décideurs pour notre étude de cas et de façon générale pour les travaux en BTP.

## 8. References

- [1] Badran, F., "Introduction des dates échues dans l'analyse PERT-coût," Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle, 1990, tome 24, n°1, 15-27.
- [2] Bentz, J. "Aperçu sur les problèmes d'ordonnement," Mathématiques et sciences humaines, 1965, tome 13, 3-21.
- [3] Boutemine, A. "Vers un logiciel d'ordonnement pour bâtiment à l'usage des PME et PMI," Thèse soutenue le 28 septembre 1985 à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [4] Briand, C., "Analyse d'intervalles pour l'ordonnement d'activités." Thèse soutenue le 7 décembre 2009 à l'Université Paul Sabatier de Toulouse

- [5] Carlier, J. "Disjonction dans les ordonnancements," Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle, 1975, tome 9, n°2, 83-100.
- [6] Carlier, J. et Chretienne, P., "Un domaine très ouvert : les problèmes d'ordonnement," Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle, 1982, tome 16, n°3, 175-217.
- [7] Erschler, J., Fontan, G. et Roubellat, F., "Potentiels sur un graphe non conjonctif et analyse d'un problème d'ordonnement à moyens limités". Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle, 1979, tome 13, n°4, 363-378.
- [8] Lahrichi, A., "Ordonnements. La notion de parties obligatoires et son application aux problèmes cumulatifs," Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle, 1982, tome 16, n°3, 241-262.
- [9] Lefèvre C. et Laroyaux P. "Note sur les problèmes d'ordonnement PERT aléatoire". Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle, 1985, tome 19, n°1, 27-33.
- [10] Mancel C. "Modélisation et résolution de problèmes d'optimisation combinatoire issus d'applications spatiales". Thèse soutenue le 25 juin 2004 à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse
- [11] Ritzman, L. et Krajewski, L., "Management des opérations," 2<sup>ème</sup> édition, Pearson Education, France, 2010
- [12] Sterboul, F. et Wertheimer, D., "Comment construire un graphe PERT minimal," Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle, 1981, tome 15, n°1, 85-98.
-