

# MEMOIRE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
DE MAGISTERE EN SCIENCES ECONOMIQUES

OPTION : ANALYSE ECONOMIQUE

## *Thème*

Traitement d'un problème d'ordonnancement en  
management d'un projet industriel  
– cas de processus de construction de pipeline (PCP)  
GR4 Ø 48'' LOT N° 1 TRC-SONATRACH-

Présenté par :

**Kebieche Hicham**

Dirigé par :

**Mr. Mohamed Salah**

### لجنة المناقشة

د.خليد علي.....رئيسا

أ.د محمد الصالح.....مقرا

د. مزار منصف.....عضوا

د.غريس ع. النور.....عضوا

د.أيت سيدهم جمال.....عضوا

## Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

\* Mes parents

\* Mon frère et mes sœurs

\* La mémoire de mon défunt frère Djamel-El Dine.

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Mr Mohamed Salah mon encadreur, pour ses précieux conseils et orientations apportés pendant l'élaboration de ce travail.

Je tiens, par ailleurs, à remercier Mr Khellid Ali qui a bien voulu accepter de présider le jury, Mr Messar Moncif, Mr Gheris Abd Anour et Mr Ait Saidhoum Djamel qui ont accepté de faire partie du jury.

Je tiens également à adresser mes remerciements à tous les responsables de l'Activité Transport par Canalisation (TRC-SONATRACH) et particulièrement Mr Daoud Mohamed.



---

## **TABLE DES MATIERES**

---

# TABLE DES MATIERES

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale .....	1
CHAPITRE I: Introduction à la théorie d'ordonnement .....	7
1.1. Notions d'ordonnement .....	7
1.1.1. Définitions .....	7
1.1.2. Eléments d'un problème d'ordonnement .....	7
1.1.2.1 Les tâches .....	8
1.1.2.2. Les ressources .....	9
1.1.2.3. Les contraintes .....	10
1.1.2.3.1. Les contraintes temporelles .....	10
1.1.2.3.2. Les contraintes de ressources .....	11
1.1.3. Les objectifs et critères d'évaluation .....	11
1.2. Différents types de problèmes d'ordonnement .....	12
1.2.1. Ordonnement de projet/de production .....	12
1.2.1.1. Ordonnement de projet .....	12
1.2.1.2. Ordonnement de la production .....	12
1.2.2 Ordonnement statique/dynamique .....	14
1.2.3. Ordonnement prédictif/réactif .....	14
1.2.4. Ordonnement préemptif/ Non préemptif .....	14
1.3. Visualisation graphique d'un ordonnement .....	15
1.4. Méthodes de résolution .....	18
1.4.1. Procédures de séparation et d'évaluation .....	18
1.4.2. Théorie des graphes .....	19
1.4.2.1. Définition d'un graphe .....	19
1.4.2.2. Longueur d'un arc .....	19
1.4.2.3. Successeurs et prédécesseurs d'un sommet .....	19
1.4.2.4. Chemins et circuit- ascendants et descendants .....	19
1.4.2.5. Longueur d'un chemin, d'un circuit .....	20
1.4.2.6. Rang d'un sommet-décomposition en niveaux .....	20
1.4.3. Programmation dynamique .....	21

1.4.4. Programmation linéaire .....	22
1.4.5. Méthodes heuristiques.....	23
1.5. Caractéristiques générales des ordonnancements .....	24
1.5.1. Ordonnement admissibles.....	24
1.5.2. Ordonnements semi-actifs.....	25
1.5.3. Ordonnements actifs.....	25
1.5.4 Ordonnements sans retard.....	26
1.6. Conclusion.....	27
CHAPITRE II : Méthodes d'ordonnement de projet.....	29
2.1. Eléments du management du projet.....	29
2.1.1. Définitions .....	29
2.1.1.1. Projet.....	29
2.1.1.2. Définition du management de projets .....	30
2.1.1.3. Les phases et cycle de vie du projet .....	31
2.1.2. Structures organisationnelles .....	32
2.1.3. Décomposition structurée (WBS).....	34
2.2. Position du problème central.....	35
2.3. Modélisation du problème central .....	35
2.3.1. Formulation potentiels-tâches (PDM).....	35
2.3.2. Formulation potentiels-étapes (ADM).....	36
2.3.3. Comparaison des deux formulations .....	38
2.4. Résolution du problème central .....	39
2.4.1. Méthode de chemin critique .....	40
2.4.2. Chemin critique .....	42
2.4.3. Caractérisation des différents types de marges .....	42
2.4.3.1. Marge totale.....	42
2.4.3.2. Marge libre .....	43
2.4.3.3. Marge indépendante .....	44
2.4.3.4. Utilisation des marges.....	44
2.5. Extension du problème central.....	45
2.5.1. Durée variable .....	45
2.5.1.1. L'approche classique (PERT).....	45
2.5.1.2. L'approche simulateur .....	49

2.5.1.2.1. La méthode de Monté Carlo .....	49
2.5.1.2.2. Principe de l'approche simulateur.....	53
2.5.2. La prise en compte des coûts .....	55
2.6. Conclusion.....	58

**CHAPITRE III : Généralités sur les pipelines, et leur processus de construction .....60**

3.1. Généralités sur les pipelines .....	60
3.1.1. Définition .....	60
3.1.2. Une brève histoire des pipelines .....	60
3.1.3. Composantes d'un pipeline .....	62
3.1.4. Les importants pipelines existants .....	63
3.1.5. L'importance des pipelines .....	65
3.1.6. Les différents types de pipelines.....	66
3.1.7. L'avantage des pipelines .....	68
3.2. Le processus de construction des pipelines .....	71
3.2.1. Travaux préliminaires.....	71
3.2.2. Les spreads de la construction des pipelines .....	73
3.2.2.1. La préparation du ROW .....	73
3.2.2.2. Le Creusement.....	75
3.2.2.3. Alignement .....	78
3.2.2.4. Soudage .....	78
3.2.2.5. Revêtement .....	83
3.2.2.6. Mise en fouille.....	83
3.2.2.7. Remblayage.....	84
3.2.2.8. Nettoyage à Fond.....	85
3.2. Conclusion.....	87

**CHAPITRE IV : Etude de cas de la construction du Gazoduc GR4 .....89**

4.1. Les liens de précedence .....	90
4.1.1. Les types de liens.....	90
4.1.2. Les délais.....	92
4.2. La résolution du problème central.....	94
4.2.1. La décomposition structurée (WBS) .....	94

4.2.2. L'établissement des contraintes.....	97
4.2.3. La construction des diagrammes.....	100
4.2.4. Durées variables.....	120
4.2.4.1. La méthode PERT.....	120
4.2.4.2. La simulation Monté Carlo .....	123
4.3. Conclusion.....	129
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>132</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	
<b>ANNEXES</b>	

---

## **LISTES DES FIGURES & DES TABLEAUX**

---

## LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX

- Listes des figures

Figure 1.1 Tâche et ressource.....	08
Figure 1.2 Typologie par les ressources des problèmes d'ordonnement.....	09
Figure 1.3 Diagramme de Gantt.....	17
Figure 1.4 Exemple de graphe de précédence.....	21
Figure 1.5 Ordonnement admissible.....	24
Figure 1.6 Ordonnement semi-actif.....	25
Figure 1.7 Ordonnement actif.....	26
Figure 1.8 Ordonnement sans retard.....	26
Figure 2.1 Triangle à trois contraintes au management de projet.....	31
Figure 2.2 Exemple typique de cycle de vie d'un projet.....	32
Figure 2.3 Les trois types d'organisations.....	33
Figure 2.4 Exemple d'une décomposition structurée par unité de travail (WBS).....	34
Figure 2.5 Les deux types de formulation des graphes.....	36
Figure 2.6 Les graphes de précédences (l'exemple 2.1).....	38
Figure 2.7 Prolifération de tâches fictives.....	39
Figure 2.8 Le graphe de précédences (l'exemple 2.2).....	42
Figure 2.9 Les marges d'une activité ( <i>i</i> ).....	43
Figure 2.10 Intervalle à 95% sur la durée du projet.....	48
Figure 2.11 Construction de la fonction de répartition.....	50
Figure 2.12 Coût d'une tâche en fonction de son temps opératoire.....	55
Figure 3.1 Comparaison entre le transport par pipelines et les autres modes de transport...68	
Figure 3.2 Les typiques spreads pour la construction d'un pipeline.....	74
Figure 3.3 Les détails de la tranchée (intérieur).....	76
Figure 3.4 Les détails de la tranchée (extérieur).....	77
Figure 3.5 Les différents types de soudage et biseautage.....	79
Figure 4. 1 WBS (Work Breakdown Structure).....	96
Figure 4.2 Graphe ADM.....	115
Figure 4. 3 Graphe PDM.....	118
Figure 4. 4 Diagramme de Gantt (La ligne).....	119
Figure 4.5 Intervalle à 95% sur la durée du projet.....	121
Figure 4.6 Histogramme des fréquences (Les durées et les dates de fin de projet).....	126
Figure 4.7 Barres des indices de criticité.....	128
Figure 4.8 Barres des indices de sensibilité.....	128

- Liste des tableaux :

Tableau 1.1 Exemple de projet.....	16
Tableau 2.1 La Description et les temps opératoires (Exemple2.1).....	37
Tableau 2.2 Les contraintes de précédence (Exemple2.1).....	37
Tableau 2.3 Temps opératoires, les temps au plus tôt et au plus tard (Exemple 2.2).....	41
Tableau 2.4 Les temps optimistes, pessimistes, et les plus probables (Exemple2.3).....	47
Tableau 2.5 Les temps attendus, et les variances (Exemple2.3).....	47
Tableau 2.6 : Méthode de Monte-Carlo.....	50
Tableau 2.7 : La construction de la fonction de répartition.....	51
Tableau 2.8 : Table de nombres au hasard (Extraits).....	52
Tableau 2.9 : Table de nombres au hasard (Sélectionnés par 2).....	52
Tableau 2.10 : Méthode de Monte-Carlo : <i>générations de <math>x_i</math></i> .....	53
Tableau 3.1 : Taxonomie des pipelines.....	67
Tableau 3.2 l'EI et les différents modes de transport de fret .....	69
Tableau 4.1 Les différentes activités du projet (Tronçon prioritaire).....	95
Tableau 4.2 Les liens de précédences entre les activités du projet.....	97
Tableau 4.3 synthétique des calculs au plus tôt, au plus tard et les marges.....	116
Tableau 4.4 Les temps optimistes, pessimistes, et plus probables.....	120

---

# **INTRODUCTION GENERALE & PROBLEMATIQUE**

---



## INTRODUCTION GENERALE & PROBLEMATIQUE

La théorie d'ordonnancement est une branche de la recherche opérationnelle qui s'intéresse aux calculs de dates d'exécution optimale de tâche, parmi les domaines d'application autre que l'informatique, l'administration, elle est très applicable dans le domaine de management de projets. *Le management de projet est l'ensemble des opérations constitué par la planification, l'organisation et le contrôle systématique des ressources affectées en vue de la réalisation des objectifs du projet en ce qui concerne le coût, les délais et le rendement.* Contrairement à la planification de projets qui vise à déterminer les différentes opérations à réaliser et les moyens matériels et humains à y affecter, l'ordonnancement vise à déterminer les différentes dates correspondant aux activités. L'horizon de la planification s'exprime généralement comme un multiple de l'horizon de l'ordonnancement <sup>(1)</sup>.

Le problème de l'ordonnancement des tâches représente l'un des problèmes les plus importants dans le management de projet, il se pose lorsqu'il s'agit d'organiser dans le temps l'exécution d'un ensemble des tâches. La résolution d'un tel problème consiste à placer dans le temps des activités ou tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes de précédence...) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises par les tâches. Un ordonnancement décrit l'exécution des tâches en précisant leurs dates de début et leurs dates de fin et l'allocation des ressources au cours du temps, et vise à satisfaire un ou plusieurs objectifs.

### 1. Problématique

En management de projet, on fait habituellement distinction entre les projets linéaires qui suivent une progression linéaire dans leur réalisation, de ceux qui se progressent suivant une non-linéarité. Des projets linéaires sur une série unitaire où chaque activité est représentée par un seul type de travail, et par conséquent une ressource unique.

Parmi les grands projets qui suivent cette façon de développement autre que les autoroutes, les tunnels, et les canaux, on compte les grands projets de réalisation des pipelines.

---

1 )- Chu Chengbin et Proth J.M., L'ordonnancement et ses application, Edition Masson, Paris, 1996.

Un pipeline, est une canalisation enterrée ou aérienne transportant des biens solides (petits capsules...), liquides (eau, pétrole par exemple), ou gazeux (gaz naturel par exemple). Dans le domaine de la réalisation de ces pipelines, on parle d'un certain processus de construction des pipelines (**PCP** : Pipelines Construction Process), qui est la succession linéaire des différentes tâches et activités assurant le bon déroulement des travaux nécessaires pour la réalisation des telles canalisations (Oléoduc, gazoduc...etc.) sur la base d'une échelle temporelle.

Ces propos concernant la réalisation de ces pipelines par rapport à la littérature de la théorie d'ordonnancement, nous amènent à poser une question fondamentale :

- y a-t-il une place de la théorie d'ordonnancement via ses riches applications dans le développement de ce processus de construction des pipelines (**PCP** : Pipelines Construction Process) ?

La réponse à cette question fondamentale exige de répondre préalablement à d'autres questions secondaires :

- Que signifie-t-on par un problème d'ordonnancement, et plus particulièrement le problème d'ordonnancement de projet ?
- Qu'est-ce qu'un processus de construction des pipelines (**PCP** : Pipelines Construction Process) quelles sont les différentes tâches et activités qui le constituent ?

Le problème d'ordonnancement qui nous allons considérer dans ce travail de mémoire n'est soumis qu'à des contraintes temporelles. Nous ne traitons pas les contraintes de ressources (nous supposons que celles-ci sont illimitées et disponibles à tout moment).

## **2. Le cadre de notre étude**

Notre étude est consacrée au problème d'ordonnancement des tâches sous contraintes temporelles et incertitudes. Les contraintes temporelles que nous traitons dans ce mémoire sont de deux types : (1) les contraintes temporelles qualitatives (ou symboliques), c'est-à-dire la précedence entre les tâches (contraintes conjonctives dans la littérature), et (2) les contraintes temporelles quantitatives (ou numériques), c'est-à-dire des données temporelles relatives aux tâches comme les dates de début, les dates de fin, et les dates d'exécution. Dans cette étude, l'incertitude sur les durées des tâches se traduit par une distribution de probabilité sur un ensemble fini.

## **3. études antérieures**

Jusqu'en 1955, les praticiens de l'ordonnancement ne disposent guère que du célèbre « diagramme de Gantt » sur un tableau mural. La complexité de gestion de ce type de tableau amena les chercheurs en recherche opérationnelle (RO) à appliquer au planning la théorie des graphes<sup>(1)</sup>. La résolution de ce type de problème d'ordonnancement a déjà fait l'objet de nombreuses études. On peut regrouper les contributions à ce domaine de recherches en trois groupes : ceux qui s'intéressent à l'ordonnancement sous incertitude en utilisant des modèles probabiliste sans tenir compte les contraintes de ressources (c'est l'exemple de la thèse de doctorat en bibliographie de : *Baki Bassem, ' Planification et ordonnancement probabilistes sous contraintes temporelles', Thèse de doctorat en Informatique, Université de Caen, France, 2006*). Ceux qui se préoccupent plus particulièrement à la prise en compte des ressources et coûts pour une meilleure affectation (la thèse de doctorat de : *Koné Omar, ' Nouvelles approches pour la résolution du problème d'ordonnancement de projet à moyens limités' thèse de doctorat système industriel, Université Toulouse III, France 2009*), et ceux qui combinent entre les deux démarches. Notre contribution essaie de résoudre un problème central sous incertitude avec l'hypothèse de la disponibilité des ressources à tout moment.

#### 4. Les hypothèses

Nous travaillons dans un système de planification contenant un seul agent qui a pour but l'élaboration d'un plan composé d'une suite de tâches exécutables. Cet agent, le planificateur, analyse, choisit, gère et ordonne un ensemble des tâches reliées entre elle par des contraintes de précédence et possédant chacune un ensemble de contraintes temporelles quantitatives (une date de début, une date de fin, et des durées d'exécution). Le détail concernant le processus de construction des pipelines, est exposé en se référant à une base théorique d'une part, et d'autre part selon des expériences acquises précédemment par l'entreprise dans la réalisation des projets similaires. Dans l'estimation des tâches, le traçage d'acheminement des activités, nous supposons que l'agent possède toute les référence soient théoriques (les publications dans le domaine) ou expérimentales acquises dans des projets semblables réalisés auparavant.

Nous ne nous sommes intéressés dans ce mémoire qu'à l'ordonnancement des tâches dans un environnement certain (voire incertain) et sous des contraintes temporelles. Nous faisons aussi l'hypothèse que les ressources demandées pour l'exécution des tâches sont toujours disponibles et illimitées, ce qui n'est pas souvent vrai dans le monde réel : cette

---

1) - Brissard J. L et Polizzi. M., Des outils pour la gestion de production industrielle, AFNOR 1990, Paris.

hypothèse a pour but de se concentrer plus particulièrement sur l'ordonnancement temporel et probabiliste, sans tenir compte d'autres ressources.

## 5. Cas d'application

Nous allons appliquer notre méthode d'ordonnancement à un cas pratique de la réalisation d'un gazoduc de diamètre 48'' d'une longueur de 536 km reliant les champs pétrolifères de Rhourd-Nouss au centre national de dispatching de gaz de Hassi-R'mel, le projet est scindé en deux lot distincts :

**Lot 1 :** Ligne partant dans le sens HMD-RDN de 223 km de longueur avec tronçon prioritaire de 69 km.

**Lot 2 :** Ligne partant de HMD vers HassiR'mel, d'une longueur de 313 km, comprenant une partie rocheuse de Zalfana jusqu'à HassiR'mel.

Pour des raisons de disponibilité des données ainsi que le souci de la simplification de l'étude, nous ne prenons en considération dans notre cas que le premier lot (**Lot 1**) qui progressera dans le sens HMD vers Rhourd Nouss.

## 6. L'organisation du travail

Le plan de ce mémoire est réparti sur quatre chapitres séparés. Les deux premiers seront consacrés à l'état d'art. Après une introduction à la théorie d'ordonnancement (premier chapitre), nous détaillerons par la suite dans le deuxième chapitre, l'essentiel des techniques utilisées dans les planificateurs classiques des projets. Ces derniers seront fondés sur des hypothèses simplificatrices comme la certitude des actions et l'observabilité totale de l'environnement.

Les deux derniers chapitres seront consacrés à notre contribution. Après une brève introduction au domaine de la construction des pipelines. Nous détaillons dans le troisième chapitre les différentes activités qui composent un processus de construction de pipelines ainsi que leur séquençement. Quant à l'autre chapitre (Chapitre IV) il sera consacré à notre exemple d'application à savoir l'ordonnancement des activités constituant le processus de construction du premier lot du gazoduc appelé GR 4 de diamètre 48'' d'une longueur de 223 km reliant les champ pétrolifères de Rhourd-Nouss au premier poste de Coupure de Hassi-Massaoud .

---

# CHAPITRE I

---

Les problèmes d'ordonnement constituent un thème d'étude important de la recherche opérationnelle. Fonction complexe de la gestion de la production, les ouvrages et les articles traitant de cette problématique sont nombreux. Dans ce contexte, ce chapitre rappelle les définitions et concepts généraux relatifs aux problèmes d'ordonnement. Puis, une revue des méthodes de résolution est réalisée. Pour finir, l'approche retenue dans le cadre de notre étude est indiquée.

## 1.1. Notions d'ordonnement

### 1.1.1 Définitions

De façon générale, un problème d'ordonnement est défini ainsi : organiser dans le temps la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu des contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement, etc.) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises par les tâches (1).

Un ordonnancement (souvent appelé planning d'atelier) constitue une solution au problème d'ordonnement. Il décrit l'exécution des tâches et l'allocation des ressources au cours du temps, et vise à satisfaire un ou plusieurs objectifs. Plus précisément, on parle de problème d'ordonnement lorsqu'on doit déterminer les dates de début et les dates de fin des tâches, alors qu'on réserve le terme de problème de séquençage au cas où l'on cherche seulement à fixer un ordre relatif entre les tâches qui peuvent être en conflit pour l'utilisation des ressources (2).

Enfin, le problème d'ordonnement peut être vu comme un problème d'optimisation combinatoire, auquel il faut trouver une bonne solution, éventuellement optimale au regard d'un ou de plusieurs critères d'évaluation.

### 1.1.2. Eléments d'un problème d'ordonnement

Des notions interviennent dans la définition d'un problème d'ordonnement : les tâches, les ressources, les contraintes, et les objectifs ou critères d'optimisations. De plus, la

---

<sup>1</sup>)- Esquirol P. et Lopez., L'ordonnement, Economica, Paris, 1999. P 13.

<sup>2</sup>)- Lopez P., Roubellat F. Ordonnement de la production. Hermès Science publications, Paris, 2001.

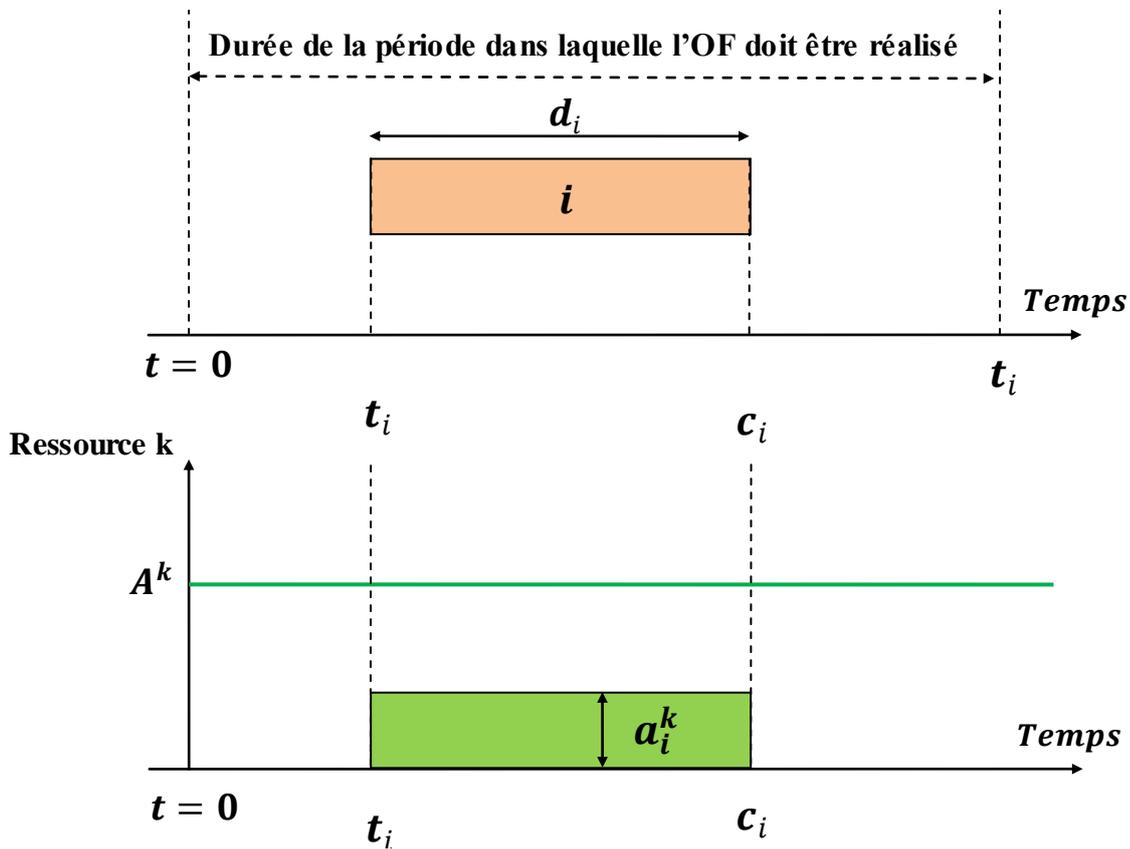
description de la décomposition en tâches constitue en général une gamme de fabrication, encore appelée procédure dans l'industrie des procédés (1).

1.1.2.1. Les tâches

une tâche  $i$  est une entité élémentaire de travail localisée dans le temps par une date de début  $t_i$  ou de fin  $c_i$ , dont la réalisation nécessite une durée  $p_i = c_i - t_i$  et qui consomme des moyens  $k$  avec une intensité  $a_{ik}$ , pour simplifier on supposera que  $a_{ik}$  est constante durant l'exécution de la tâche.

Selon les problèmes, les tâches peuvent être exécutées par morceaux ou doivent être exécutées sans interruption.

Figure 1.1 Tâche et ressource



Source : Lopez P., Roubellat F. Ordonnement de la production. Hermès Science publications, Paris, 2001.

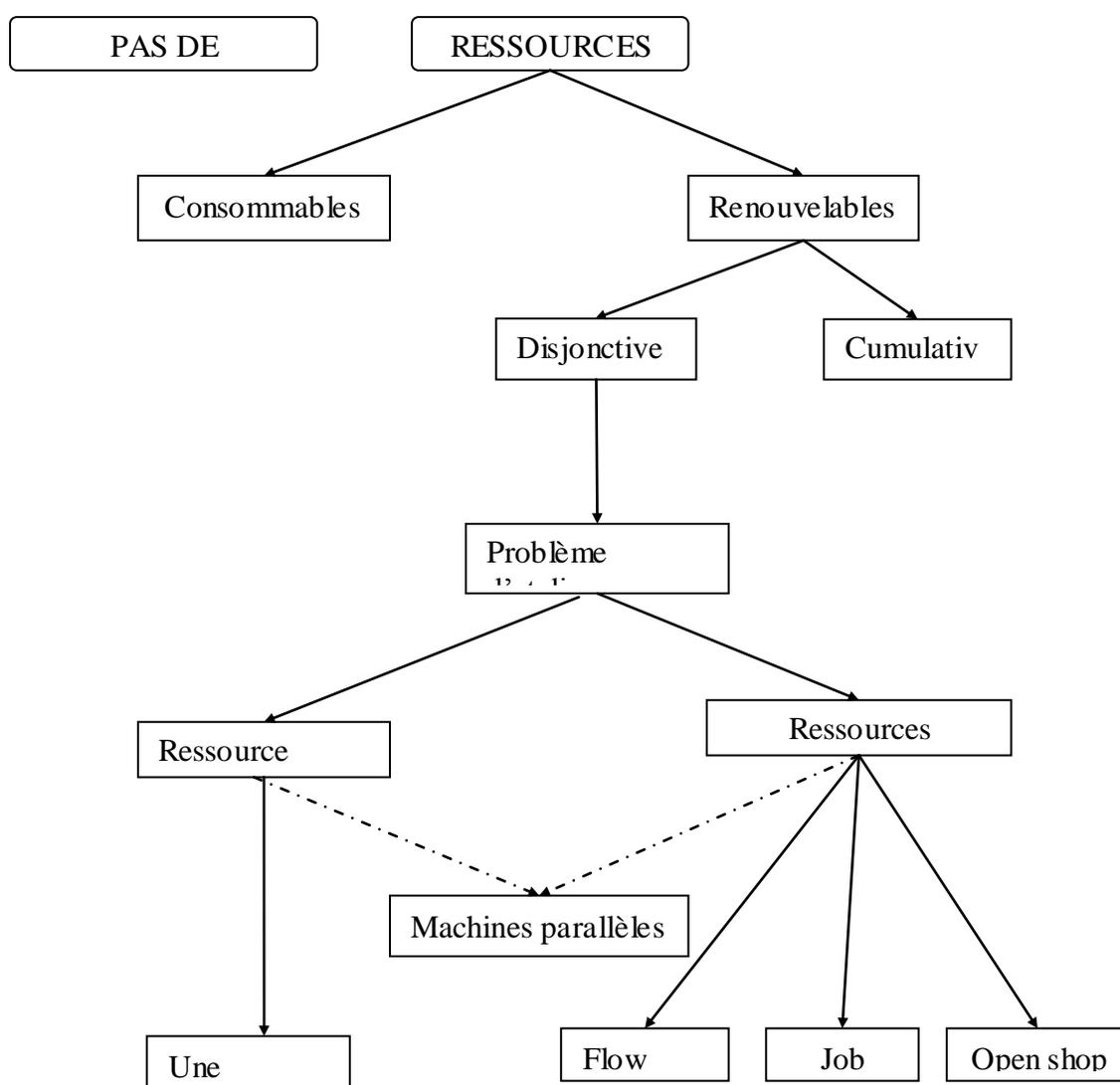
1.1.2.2. Les ressources

<sup>1</sup>)- Chu Chengbin et Proth J.M., L'ordonnement et ses applications. Masson, Paris, 1996.

Une ressource  $k$  est un moyen technique ou humain requis pour la réalisation d'une tâche, et disponible en quantité limitée : sa capacité  $A_k$ .

Une ressource est renouvelable si, lorsqu'elle est libérée par une ou plusieurs tâches, elle est à nouveau disponible en même quantité (les hommes, les machines, l'espace, l'équipement en général). Dans le cas contraire, elle est consommable (matières premières, budget, énergie etc.).

Figure 1.2 Typologie par les ressources des problèmes d'ordonnement



Source : Esquirol P. et Lopez, L'ordonnement, Economica, 1998, p. 17

On distingue les ressources disjonctives ou non partageables (machine outil) qui ne peuvent exécuter qu'une tâche à la fois et les ressources cumulatives ou partageables (équipe d'ouvriers). Le temps de préparation d'une ressource afin d'exécuter une tâche peut dépendre ou non de la tâche effectuée précédemment. Enfin, les durées des tâches ne sont pas toujours connues mais peuvent être fonction de la quantité de moyens utilisés pour leur exécution, elle-même liée à la vitesse ou la performance de la ressource.

### 1.1.2.3. Les contraintes

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre conjointement les variables de décision. Leur prise en compte permet d'avoir un ordonnancement réalisable. Deux classifications des contraintes existent : la première est classique, elle comporte les contraintes temporelles et celles liées aux ressources. La seconde distingue les contraintes endogènes qui sont liées directement au système de production et à ses performances, des contraintes exogènes indépendantes du système.

Nous considérons la première classification pour décrire les différents types de contraintes qui conditionnent l'admissibilité d'un problème d'ordonnement.

#### 1.1.2.3.1. Les contraintes temporelles

Les contraintes temporelles se décomposent en plusieurs types (1) :

Contraintes de temps alloué, issue généralement d'impératifs de gestion et relatives aux dates limites des tâches (délais de livraisons, disponibilité des approvisionnements, respect d'une date au plus tôt) ou à la durée totale d'un projet ou d'une campagne de production,

contraintes d'antériorité et plus généralement les contraintes de cohérence technologique qui décrivent le positionnement de certaines tâches par rapport à d'autres (par exemple : les contraintes de gammes dans le cas des problèmes d'ateliers)

contraintes de calendrier : ces dernières sont liées au respect des horaires de travail ou des périodes planifiées d'inactivité (maintenance préventive, vacances, etc.).

---

<sup>1</sup>) - Lopez P., Roubellat F., Op-cit p 234.

### 1.1.2.3.2. Les contraintes de ressources

Ces contraintes traduisent le fait que les ressources sont disponibles en quantité limitée (leur capacité). On parle également de contraintes de partage. Dans ce cadre, deux types de contraintes de ressources sont distingués (1) :

contraintes disjonctives : les tâches doivent être effectuées l'une après l'autre. En effet, il s'agit de ressources qui ne peuvent être utilisées que par une tâche à la fois. Dans la plupart des problèmes, il s'agit des appareils et/ou des opérateurs.

Contraintes cumulatives : la somme des besoins en ressources de tâches cumulées doit être inférieure ou égale à la capacité des ressources. Dans un problème de procédé, il s'agit souvent des matières et des utilités (énergie).

### 1.1.3 Les objectifs et critères d'évaluation

Lorsqu'on aborde la résolution d'un problème d'ordonnement, deux grands types de stratégies peuvent être choisis, visant respectivement à l'optimalité des solutions par rapport à un ou plusieurs critères, ou à leur admissibilité vis-à-vis des contraintes.

L'approche par optimisation suppose que les solutions candidates à un problème puissent être ordonnées de manière rationnelles selon un ou plusieurs critères d'évaluation numérique permettant d'apprécier la qualité des solutions. On cherchera à minimiser ou maximiser de tels critères. Le credo de l'ordonnement d'atelier reste le typique qualité/coût/délais.

Néanmoins, il est parfois difficile de traduire l'ensemble des objectifs de résolution par un ou plusieurs critères numériques. On peut dans ce cas avoir recours à une approche par satisfaction de contraintes. L'ensemble des contraintes regroupe alors à la fois des contraintes intrinsèques au problème (cohérence technologique par exemple) et des objectifs de type seuil à atteindre ou à ne pas dépasser (durée maximale, stocks plafond/plancher...). On pourra dans ce cas, se contenter d'une solution quelconque, pourvu qu'elle soit admissible(2).

## 1.2. Différents types de problèmes d'ordonnement

<sup>1</sup> )- Esquirol P. et Lopez., L'ordonnement, Economica, Paris,1999. P17.

<sup>2</sup> )- Esquirol P. et Lopez., Op-cit p 23.

La fonction ordonnancement peut être mise en œuvre dans différents contextes et pour différents objectifs. Ces deux aspects sont relativement importants car ils donnent souvent lieu à des méthodologies de modélisation et de résolution spécifiques (1).

### **1.2.1. Ordonnancement de projet / de production**

L'ordonnancement est un processus de décision qui apparaît dans la plupart des systèmes de production et de transport, ainsi que dans la gestion de projet. Dans le cadre de ces travaux, nous nous intéressons spécifiquement à l'ordonnancement d'ateliers de production.

#### **1.2.1.1. Ordonnancement de projet**

La particularité de l'ordonnancement de projet est d'étudier un projet unique, pour lequel on cherche à minimiser la durée totale de réalisation, sans tenir compte des contraintes de limitations de ressources.

Initialement limité à la gestion de grands projets, l'emploi de ces techniques, souvent fédérées sous le célèbre acronyme PERT (Program Evaluation and Review Technique), s'est sensiblement répandu aujourd'hui dans les entreprises.

#### **1.2.1.2. Ordonnancement de la production**

La fonction ordonnancement occupe une place particulière dans la gestion informatisée des flux de production au sein de l'entreprise. C'est généralement le point de rencontre entre un système informatisé et hiérarchisé de production et le système de production lui-même. C'est le lieu de l'interface entre l'élaboration de la commande et la partie opérationnelle. La planification de la production crée les ordres de fabrication qui déterminent globalement ce qui doit être fait dans une période donnée (généralement la semaine). L'ordonnancement consiste à prévoir l'enchaînement de toutes les opérations élémentaires nécessaires à la réalisation de ces ordres de fabrication sur les ressources de production, tout en tenant compte des ressources secondaires (telles que les opérateurs, les outillages...), des contraintes extérieures (maintenance préventive, calendrier de travail...) et de l'existant (tâches en cours de réalisation...).

Cette fonction trouve sa place essentiellement dans les ateliers gérés en flux poussés ayant un mode de production par lot ; mode défini par des ordres de fabrication. En effet, dans

---

<sup>1</sup>)- Pinedo. Michael L., Scheduling : Theory, Algorithms, and Systems., Springer Series in operation Research and Financial Engineering, New York 2005.

les systèmes de production manufacturiers mono-produits ou les ateliers gérés en Kanban (flux tirés), les flux de produits s'écoulent naturellement et doivent en principe s'autoréguler. Notons toutefois que pour les ateliers de type procédés, le couplage des différents modes de production (continu/discontinu) nécessite aussi une fonction ordonnancement, même pour des systèmes de production mono-produits. Les problèmes d'ordonnement d'ateliers peuvent être classés en deux catégories en fonction du nombre de machines nécessaires pour réaliser chaque tâche. La première regroupe les problèmes pour lesquels chaque tâche nécessite une seule machine, la deuxième, ceux pour lesquels chaque tâche demande plusieurs machines pour son exécution.

La première catégorie de problèmes concerne les ateliers à machines parallèles ou non dédiées. Ce type d'atelier se caractérise par le fait que plusieurs machines sont disponibles pour l'exécution d'un travail qui n'en nécessite qu'une seule. Il s'agit d'une généralisation du problème à une machine. Il est possible de distinguer trois types d'ateliers selon la durée d'exécution d'une tâche sur ces machines :

les ateliers à machine identiques : toute tâche peut s'exécuter sur n'importe quelle machine avec une même durée opératoire (à condition que la machine soit libre).

les ateliers à machines uniformes : chaque machine possède une vitesse d'exécution propre et ceci, indépendamment de la tâche à réaliser.

les ateliers à machines indépendantes (ou non reliées): la durée d'exécution d'une tâche sur une machine donnée dépend de la tâche à réaliser.

La deuxième classe de problèmes, quant à elle, englobe les ateliers composés de  $m$  stations différentes. Une station comporte une ou plusieurs machines en parallèles. Les travaux à réaliser sont constitués d'un ensemble de  $n$  opérations élémentaires, chacune doit s'exécuter sur une machine différente de celles des autres opérations. En fonction du mode de passage des opérations sur les machines, on retrouve les trois classes d'ateliers classiquement définis, à savoir le flow shop, le job shop et l'open shop.

### 1.2.2. Ordonnement statique / dynamique

Deux catégories de problèmes d'ordonnancement peuvent être distinguées en fonction du degré de connaissance que l'on a du problème à résoudre au moment de sa résolution. On parle de(1) :

problème statique lorsque les tâches à ordonner sur une période ainsi que l'état initial de l'atelier sont connus au début de la période ;

problème dynamique lorsque les décisions sont à prendre sur la période mais toutes les tâches à réaliser sur cette période ne sont pas totalement connues au début de la période.

### **1.2.3. Ordonnancement prédictif / réactif**

La fonction ordonnancement peut tenir deux rôles toujours présents dans un système de production, mais pouvant revêtir une importance relative variable(2) :

l'ordonnancement prédictif consiste à prévoir a priori un certain nombre de décisions en fonction des données prévisionnelles et d'un modèle de l'atelier;

l'ordonnancement réactif consiste à adapter les décisions prévues en fonction de l'état courant du système et des déviations entre la réalité et le modèle (ce qui est prévu en théorie). Dans ce cas, la fonction ordonnancement doit être en relation avec le système de supervision qui fait remonter les alarmes qui ne peuvent pas être traitées localement.

### **1.2.4. Ordonnancement préemptif / non préemptif**

Si les tâches peuvent être interrompues, on parle d'ordonnancement préemptif (non préemptif dans le cas contraire).

L'ordonnancement d'atelier relève en général de cas non préemptif car il est rare qu'une tâche de production soit interrompue une fois lancée, sauf en cas de dysfonctionnement a véré du système. Le cas préemptif est plus souvent rencontré en informatique, notamment dans la gestion des processus ou des threads au sein de systèmes d'exploitation multitâches.

## **1.3. Visualisation graphique d'un ordonnancement**

Le diagramme de Gantt (1) est certainement la représentation la plus ancienne, la plus répandue et la plus simple pour visualiser graphiquement l'exécution des tâches et/ou

<sup>1</sup> ) Vinvent Giard., Gestion de la production.,2 e Edition, Economica, Paris,1981. p 357.

<sup>2</sup> )- Esquirol P. et Lopez., Op-cit p 10.

l'occupation des ressources au cours du temps. Le diagramme de Gantt consiste à placer les tâches sur un graphique où le temps est en abscisse et les ressources en ordonnée. A chaque tâche est associée un segment ou une barre horizontale, de longueur proportionnelle à la durée de traitement (2).

A titre d'illustration, la Figure 1.3 visualise le diagramme de Gantt d'un ordonnancement de projet sans considération des contraintes de ressources, les tâches apparaissent en ordonnée, l'abscisse représentant le temps.

Exemple : Soit un problème d'ordonnancement composé de neuf tâches notées Aa, Ab, Ac, Ad, Ae, Af, Ba, Bb et Bc qui sont soumis à des contraintes quantitatives respectivement : 4, 2, 6, 2, 7, 4, 7, 1 et 4 unités temporelles et des contraintes qualitatives (contraintes d'intériorité) détaillées dans le tableau suivant (tableau 1.1)

Exemple (3). Neuf tâches, dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 1, sont à réaliser pour mener à bien un projet.

---

<sup>1</sup> )-Le **diagramme de Gantt** porte le nom de son créateur, Henry L. Gantt en 1917. Jusqu'en 1955, les praticiens de l'ordonnancement ne disposent guère que du célèbre « diagramme de Gantt » sur un tableau mural. La complexité de gestion de ce type de tableau amena les chercheurs en recherche opérationnelle (RO) à appliquer au planning la théorie des graphes.

<sup>2</sup> )- Brissard, J.L et Polizzi, Marc., Des outils pour la gestion de production industrielle., AFNOR 1990,Paris.

<sup>3</sup> )- Esquirol P. et Lopez., L'ordonnancement, Economica, Paris,1999. p21.

Tableau 1.1 Exemple de projet

Tâches	D urée	Dépendence		Ressources	
		Prédece sreur	Succes seur	Ressourc e x	Ressourc e y
A a	4	-	Ac	4	6
A b	2	-	Ac	1	2
A c	6	Aa,Ab	Ad	3,5	6
A d	2	Ac	Ae	2	4
A e	7	Ad	Af	15	12
Af	4	Ae	-	6	3
Ba	7	-	Bb	18	22
B b	1	Ba	Bc	2	-
Bc	4	Bb	-	3	4

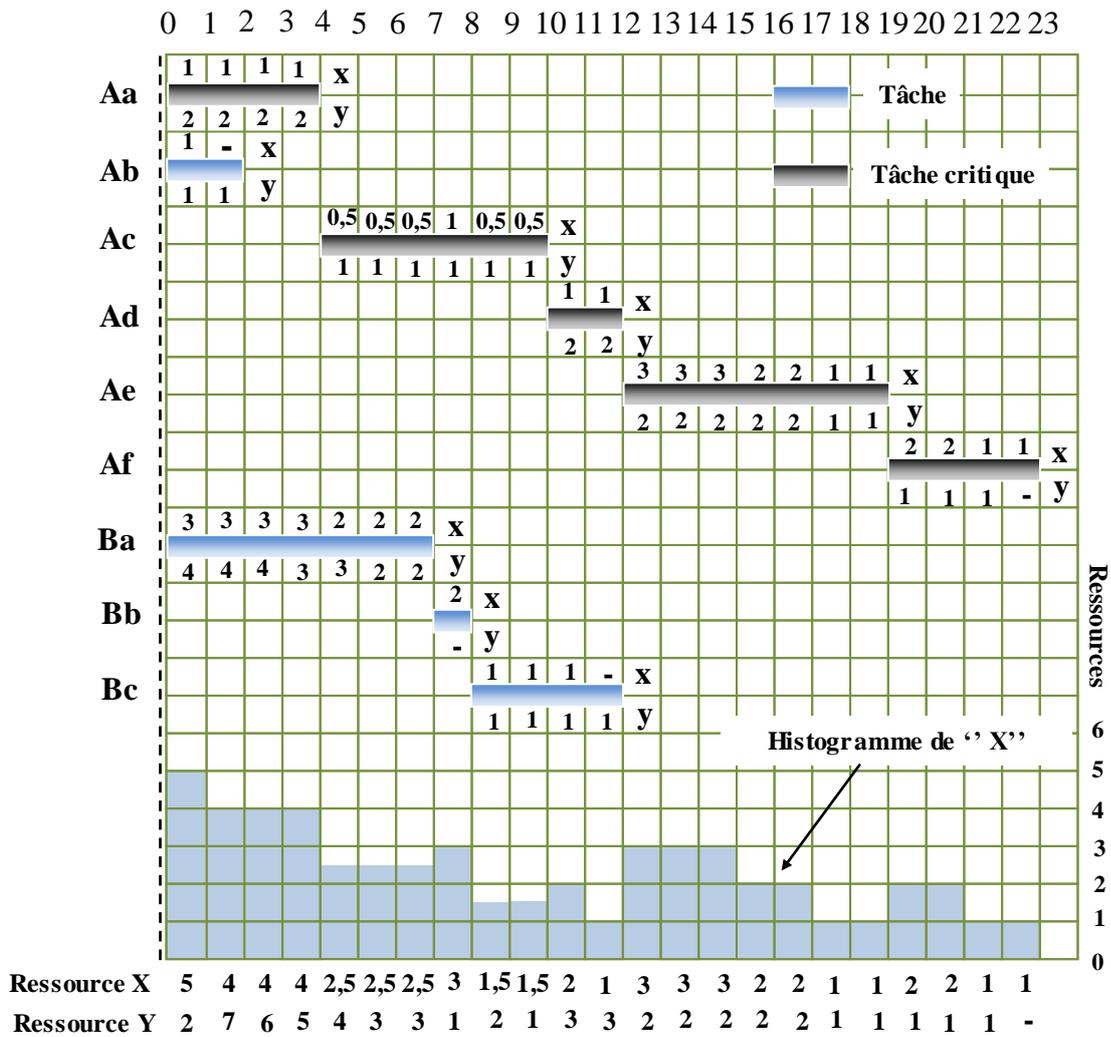
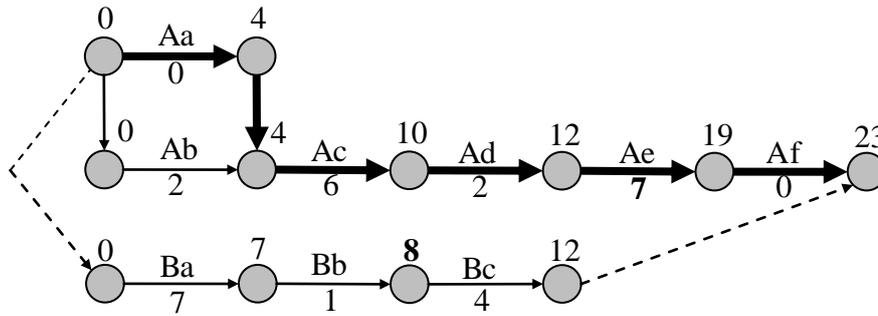
Source: Lester, Albert, Project Management – Planning and Control, 5<sup>th</sup> Edition, 2007 Elsevier. p 205

La figure 1.3, présente un diagramme de Gantt associé à une solution minimisant la durée ; le projet est achevé en vingt trois jours.

Lorsqu'un ensemble de tâches ne peut être réalisé simultanément, notamment lorsqu'elles utilisent le même ressource non partageable (problème d'atelier), le diagramme de Gantt est composé d'une ligne horizontale pour chaque ressource. Il permet de visualiser les zones

d'occupation et d'oisiveté des ressources, la séquence des opérations sur les ressources et, bien entendu, la durée de l'ordonnement.

Figure 1.3 Diagramme de Gantt



Source: Lester, Albert, Project Management – Planning and Control, 5<sup>th</sup> Edition, 2007 Elsevier. p 205

## 1.4. Méthodes de résolution

C'est la recherche Opérationnelle qui a commencé à élaborer des modèles d'optimisation programmables. Depuis, d'autres techniques, développées dans le cadre de résolution de problèmes en Intelligence artificielle, sont venues s'y joindre. Le choix d'une méthode de résolution répond toujours à une certaine problématique que l'on peut tenter de caractériser à travers quatre questions-clé : l'existence d'un modèle d'optimisation, l'exactitude des solutions, le mode de résolution (automatique/interactif) et le coût de la méthode.

Quelque soit le domaine considéré, et la modélisation mise en œuvre, un problème d'ordonnement se ramène généralement à la résolution d'un problème d'optimisation combinatoire. Aujourd'hui, différentes approches sont proposées dans la littérature pour traiter ce type de problème. Même si les méthodes de résolution sont presque aussi variées que les problèmes d'ordonnement, on distingue néanmoins trois grandes classes(1) :

Les approches mathématiques,

Les approches rattachées au domaine de l'intelligence artificielle,

Et les approches simulatoires(Les approches par simulation)

La plus part des méthodes basées sur une approche mathématiques s'épuisent sur les outils de la recherche opérationnelle. Dans ce cadre, différentes techniques sont mises en œuvre selon la complexité du problème et les objectifs visés. Cette section présente brièvement celle qui sont le plus couramment rencontrées.

### 1.4.1 Procédures de séparation et d'évaluation (PSE, aussi appelée **Branch and Bound**)

Une procédure par séparation et évaluation est une méthode d'exploration par énumération implicite de l'espace de recherche. Elle utilise une représentation de l'ordonnement sous forme d'une arborescence dont les sommets représentent chacun un sous-problème et les arcs issus d'un même sommet représentent chacun une décomposition du problème situé au sommet de l'arbre en sous-problème de taille réduite. Cette arborescence

---

<sup>1</sup>)- Lopez P., Roubellat F. Ordonnement de la production. Hermès Science publications, Paris, 2001.

est explorée de façon à éviter les branches ne contenant pas de solutions réalisables et les branches n'amenant pas à des solutions meilleures que la solution courante.

### 1.4.2 Théorie des graphes

La théorie des graphes apporte une aide incontestable à la manipulation d'un ensemble de données numériques. Elle est un support rigoureux à la fois pour la vérification de la cohérence du problème posé et pour sa résolution. Les formulations courantes liées au problème d'ordonnement passent par la définition d'un graphe manipulant des inégalités de potentiels<sup>(1)</sup>.

#### 1.4.2.1 Définition d'un graphe

Un graphe est un schéma représentant une relation binaire (entre deux entités)  $R$ . Les sommets (ou nœuds) du graphe représentent des entités (tâches, instants,...) un arc  $(i, j)$  relie deux sommets  $i$  et  $j$ , si la relation est vraie entre les deux entités. Un arc se matérialise par une flèche partant du sommet  $i$ , appelé extrémité initiale (ou origine) de l'arc, et arrivant sommet  $j$ , appelé extrémité finale de l'arc (ou destination).

Longueur d'un arc

On peut attribuer une longueur à chaque arc, lorsqu'une valeur numérique  $l_{ij}$  est associée à la relation (durée, coût, probabilité, etc.). Dans ce cas, on dit que le graphe est valué.

#### 1.4.2.3 Successeurs et prédécesseurs d'un sommet

L'ensemble des successeurs d'un sommet  $i$ , noté  $\Gamma^+(i)$ , regroupe toutes les extrémités finales des arcs ayant comme extrémité initiale  $i$ . Systématiquement, l'ensemble des prédécesseurs d'un sommet  $i$ , noté  $\Gamma^-(i)$ , regroupe toutes les extrémités initiales des arcs ayant comme extrémité finale  $i$ .

Chemins et circuit – Ascendants et descendants

Un chemin est une séquence (ou suite ordonnée) d'arcs,  $\{(i_0, i_1)(i_1, i_2), \dots, (i_{n-1}, i_n)\}$  telle que l'extrémité finale de tout arc (sauf le dernier) coïncide avec l'extrémité initiale de l'arc

---

<sup>1</sup>)- Esquirol P. et Lopez., L'ordonnement, Economica, Paris, 1999. P 27.

qui le suit dans la séquence. Un chemin peut aussi être représenté de façon plus économique, par la séquence des sommets traversés:  $\{i_0, i_1, i_2 \dots i_{n-1}, i_n\}$ . L'origine d'un chemin est l'extrémité initiale du premier arc de la séquence ; la destination d'un chemin l'extrémité finale du dernier arc de la séquence. Un chemin fini (ayant un nombre fini d'arcs) dont l'origine coïncide avec la destination est un circuit.

Un chemin élémentaire est un chemin passant au plus une fois par chaque sommet de la séquence associées. (Il n'existe aucun couple d'arcs dans la séquence ayant une même extrémité initiale ou une même extrémité finale).

Remarquons qu'il existe autant de représentations possibles et équivalentes d'un circuit élémentaire qu'il y a de permutations circulaires sur la séquence associée ; par exemple les séquences  $\{(A, B), (B, C), (C, A)\}$ ,  $\{(B, C), (C, A), (A, B)\}$  et  $\{(C, A), (A, B), (B, C)\}$  définissent un seul et même circuit élémentaire.

Un sommet  $i$  fait partie des ascendants d'un sommet  $j$ , s'il existe un chemin allant de  $i$  à  $j$ . un sommet  $j$  fait partie des descendants de  $i$ , s'il existe un chemin allant de  $i$  à  $j$ .

#### 1.4.2.5 Longueur d'un chemin, d'un circuit

Dans un graphe valué, la longueur d'un chemin (ou d'un circuit) est définie par la somme des longueurs des arcs empruntés. Lorsque le graphe n'est pas valué, la longueur d'un chemin (ou d'un circuit) est son nombre d'arcs. La première définition recouvre la seconde, un graphe non valué pouvant être vu comme un graphe valué où tous les arcs porteraient une valeur unitaire.

##### Rang d'un sommet- Décomposition en niveaux

La notion de rang (ou de niveau), n'est définie que pour les graphes sans circuit. Le rang d'un sommet  $i$  est la longueur du plus long chemin (en nombre d'arcs) ayant :

Comme origine un sommet sans prédécesseur, et

Comme destination  $i$ .

Les sommets sans prédécesseurs forment le niveau 1 d'un graphe (sommets de rang 1). Pour tout autre sommet, le rang peut être défini récursivement, en prenant le rang immédiatement supérieur au rang le plus grand sur l'ensemble de ses prédécesseurs, ce qui implique de déterminer d'abord le rang des prédécesseurs. La procédure qui suit établit ces

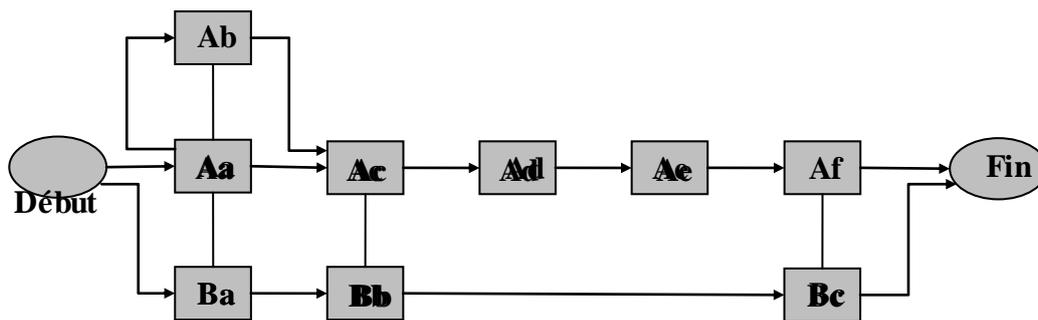
rangs progressivement et fournit la décomposition en niveaux d'un graphe sans circuit. Elle permet également la détection de circuits lorsqu'il en existe, et termine donc correctement dans tous les cas.

On travaille sur une copie  $G'$  du graphe  $G$  à décomposer, à laquelle on enlève progressivement les sommets de rang connu et les arcs qui en sont issus.

Un graphe de précedence est constitué d'un ensemble de nœuds et de deux types d'arcs. Les nœuds représentent les tâches à réaliser. Les arcs conjonctifs valués (dont la valuation représente la durée de réalisation de la tâche d'où l'arc sort), représentent les contraintes des précédences. Les arcs disjonctifs à deux sens représentent les contraintes de ressources. Pour représenter le début et la fin de l'ordonnement, deux nœuds sont rajoutés au graphe.

Ainsi l'exemple précédent du paragraphe 1.3 peut être représenté sous forme de graphe de la manière suivante :

*Figure 1.4 Exemple de tableau 1.1 en graphe de précedence*



Source: Lester, Albert, Project Management – Planning and Control, 5<sup>th</sup> Edition, 2007 Elsevier. p 205

### 1.4.3 Programmation dynamique

La programmation dynamique est une méthode d'optimisation opérant par phases (ou encore par séquence). Cette méthode de résolution est adaptée aux problèmes qui satisfont au principe d'optimalité de Bellman : une sous solution d'une solution optimale est elle-même optimale pour fonction objectif restreinte aux solutions partant de cette solution. Ce principe permet une résolution ascendante, qui détermine une solution optimale d'un problème à partir des solutions de tous les sous-problèmes. Chaque étape correspond à un sous-problème à résoudre de manière optimale en tenant compte des informations obtenues des étapes précédentes. Ceci nécessite une formulation de critère sous forme d'une relation de récurrence liant deux niveaux successifs.

Cette méthode est destinée à résoudre des problèmes d'optimisation à vocation plus générale que la méthode de séparation et évaluation. Par contre, la taille des problèmes qu'elle permet d'aborder est plus limitée (1).

#### 1.4.4 Programmation linéaire

La programmation linéaire est une des méthodes classiques de la recherche opérationnelle. Elle permet la modélisation d'un problème d'optimisation d'une fonction  $Z$  de plusieurs variables en présence de contraintes sous la forme d'un programme mathématique.

La programmation est dite linéaire si la fonction et les contraintes sont toutes des combinaisons linéaires de variables. Il comporte  $n$  variables non négatives,  $m$  contraintes d'égalité ou d'inégalité et la fonction objectif à optimiser.

$$\max \text{ ou } \min Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

$$\begin{cases} \forall i = 1..m: \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq \text{ ou } \geq b_i \\ \forall j = 1..n: x_j \geq 0 \end{cases}$$

Le coefficient de coût ou de profit de la variable  $x_j$  est noté  $c_j$  celui de la variable  $x_j$  dans la contrainte  $i$  est noté  $a_{ij}$ . La contrainte  $i$  a un second membre constant  $b_i$ . Les contraintes simples de positivité ne sont pas incluses dans les  $m$  contraintes car elles sont générées par les algorithmes.

Si les variables sont astreintes à être entières, on a un programme linéaire en nombre entiers (PLNE). Un programme linéaire en 0-1 est un cas particulier des PLNE dont les variables ne peuvent prendre que deux valeurs 0 ou 1 ; ces variables sont dites booléennes, binaires ou de décision. Enfin, à partir du moment où au moins une contraintes ou la fonction objectif n'est pas une combinaison linéaire de variable, on parle alors d'un programme non linéaire (PNL). Les PLNE et les PL en 0-1 sont plus difficiles à résoudre que les PL classique. Les PNL sont encore plus difficiles.

---

<sup>1</sup>) - Lopez P., Roubellat F. Ordonnement de la production. Hermès Science publications, Paris, 2001.

Une formulation classique du problème d'ordonnement de base est la suivante : soit  $O$  l'ensemble des opérations.  $M$  l'ensemble des machines et  $d_{ik}$  la durée opératoire de l'opération  $i$  sur la machine  $k$ . On cherche à minimiser (ou à maximiser)  $C$  (critère retenu) avec  $\{i, p\} \in O, \{k, h\} \in M$  et  $K \approx \infty$  (très grand en pratique) :

$$\begin{array}{l}
 \text{Date de début des opérations :} \\
 \text{Contraintes de précédence :} \\
 \text{Contraintes Disjonctives :}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{ll}
 t_{ik} \geq 0 & \\
 t_{ik} - t_{ih} \geq d_{ih} & \text{si } O_{ih} \text{ précède } O_{ik} \\
 t_{pk} - t_{ik} + K(1 - y_{ipk}) \geq d_{ik} y_{ipk} = 1 & \text{si } O_{ik} \text{ précède } O_{pk} \\
 t_{ik} - t_{pk} + K(y_{ipk}) \geq d_{pk} y_{ipk} = 1 & \text{autrement}
 \end{array} \right.$$

La méthode simplexe est une méthode classique de résolution de programme linéaire. Dans des cas complexes, la résolution de programmes linéaires se fera à l'aide de solveur du marché.

### 1.4.5 Méthodes heuristiques

Malgré l'évolution permanente des calculateurs et les progrès permanents de l'informatique, il existe pour plusieurs problèmes d'optimisation combinatoire une taille critique de l'espace de solutions admissibles. La méthode permettant d'obtenir une solution optimale est dans la plus part des cas prohibitive. Compte tenu de ces difficultés la plus part des spécialistes de l'optimisation combinatoire ont orienté leur recherche vers le développement des méthodes heuristiques. Une méthode heuristique est souvent définie comme une procédure exploitant au mieux la structure d'un problème, dans le but de trouver une solution de qualité raisonnable en un temps de calcul aussi faible que possible.

Une heuristique est une méthode de résolution de problèmes non fondée sur un modèle formel et qui n'aboutit pas nécessairement à une solution. Il s'agit généralement de méthodes basées sur le déroulement d'un algorithme. Le principal inconvénient est que ces méthodes sont souvent spécifiques à un type de problème donné. Les métaheuristiques sont quant à elles, des stratégies d'optimisation combinatoire basées elles-mêmes sur des heuristiques. On peut les considérer comme une réponse au problème de manque d'assurance dans les performances d'une heuristique : une heuristique permettra en général d'arriver rapidement à

une solution au problème, tandis que la métaheuristique conduira une exploration plus exhaustive de l'espace des solutions afin de s'assurer que la solution n'est pas un minimum local.

Il existe trois types de métaheuristique : les métaheuristique constructives basées sur l'idée de diminution progressive de la taille du problème, les métaheuristicues basées sur la recherche locale et les métaheuristicues évolutives inspirées des phénomènes réels, telles que les algorithmes génétiques et les algorithmes de colonies de fourmis, etc.(1).

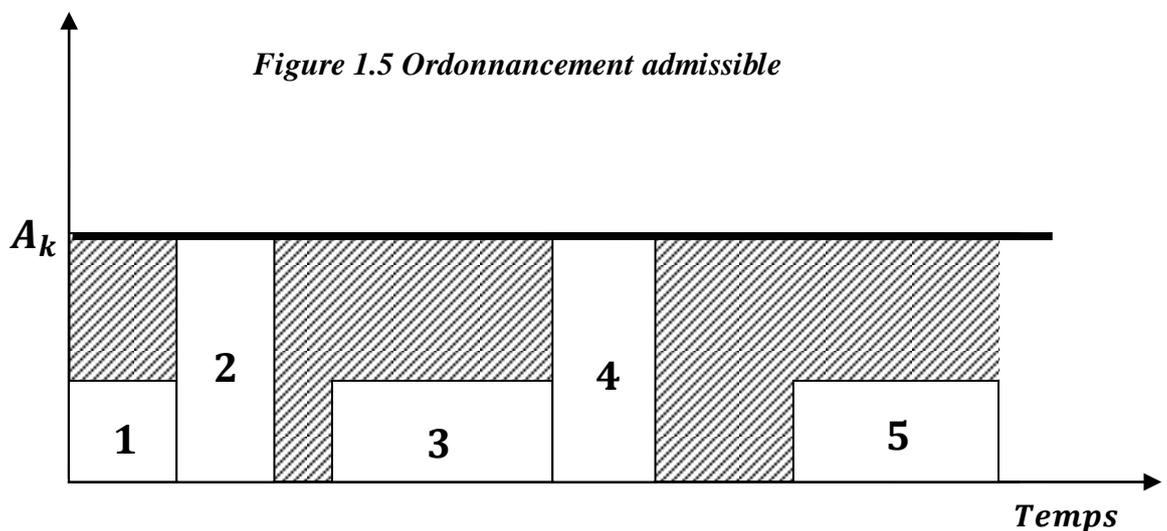
1.5. Caractéristiques générales des ordonnancements

Des sous-ensembles d'ordonnement particuliers sont ici présentés dont certains présentent des propriétés de dominance vis-à-vis de tout critère régulier.

1.5.1 Ordonnements admissibles

Un ordonnancement est dit admissible s'il respecte toutes les contraintes du problème (dates limites, précédences, limitation des ressources,...).

Exemple : considérons cinq tâches 1,2,3,4,5 telles que l'on doive respecter les contraintes de précedence  $1 < 2 < 5$  et  $3 < 4$ . Un ordonnancement admissible est représenté à Figure 1.4.



Source :Esquirol P. et Lopez., L'ordonnement, Economica, Paris,1999. p 24

On parle de glissement à gauche local lorsqu'on avance le début d'une tâche sans remettre en cause l'ordre relatif entre les tâches. Sur l'exemple ci-dessus. Bien qu'admissible,

<sup>1</sup>)- Lopez P., Roubellat F., Op-cit : p 253.

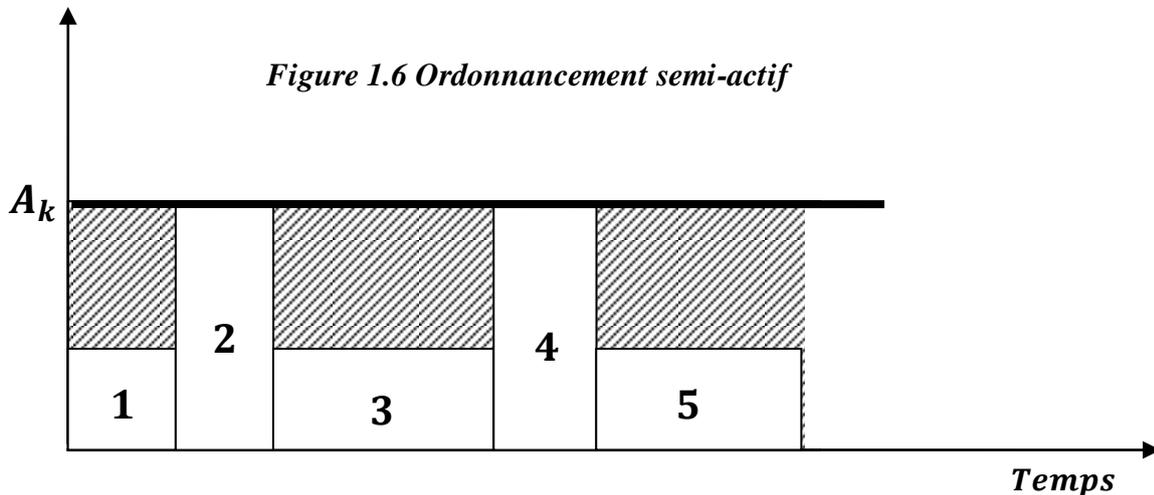
Document téléchargé depuis www.pnst.cerist.dz CERIST

la solution pourrait être améliorée du point de vue du temps total d'exécution, en faisant un glissement local de certaines tâches vers la gauche (3 et 4 d'une unité, puis 5 de trois unités).

On parle de glissement à gauche global lorsqu'on avance le début d'une tâche en modifiant l'ordre relatif entre au moins deux tâches. Sur l'exemple précédent, le positionnement de la tâche 5 juste au-dessus de la tâche 3 est admissible mais change la relation  $4 < 5$  en  $5 < 4$ .

**1.5.2 Ordonnements semi-actifs**

Dans un ordonnancement semi-actif, aucun glissement à gauche local n'est possible : on ne peut avancer une tâche sans modifier la séquence sur la ressource. Sur l'ordonnancement admissible précédent, un glissement à gauche local permet par exemple d'obtenir l'ordonnancement semi-actif de Figure 1.5.

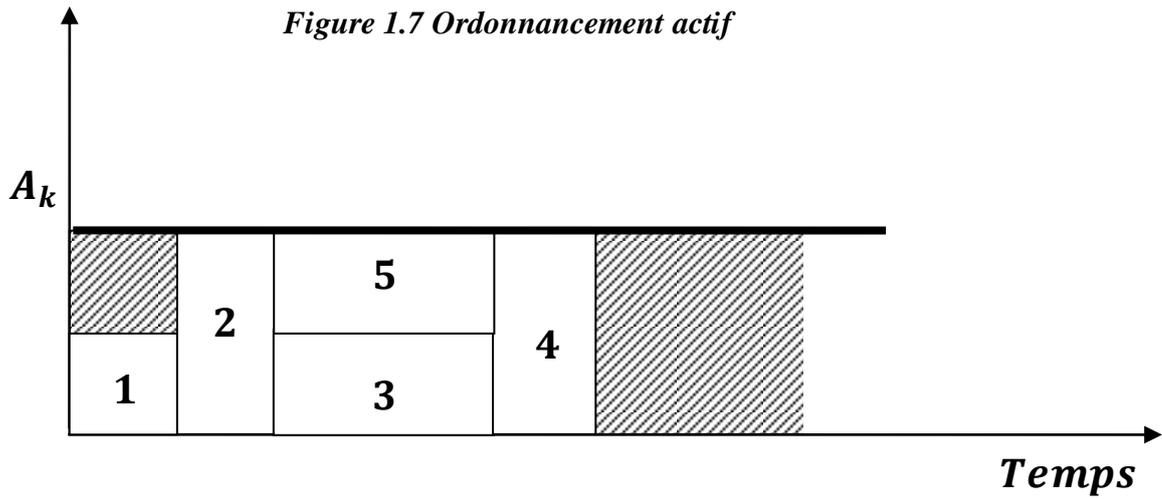


Source :Esquirol P. et Lopez, L'ordonnancement, Economica, Paris,1999.

On peut montrer que l'ensemble des ordonnancements semi-actifs est dominant pour tout critère régulier.

**1.5.3 Ordonnements actifs**

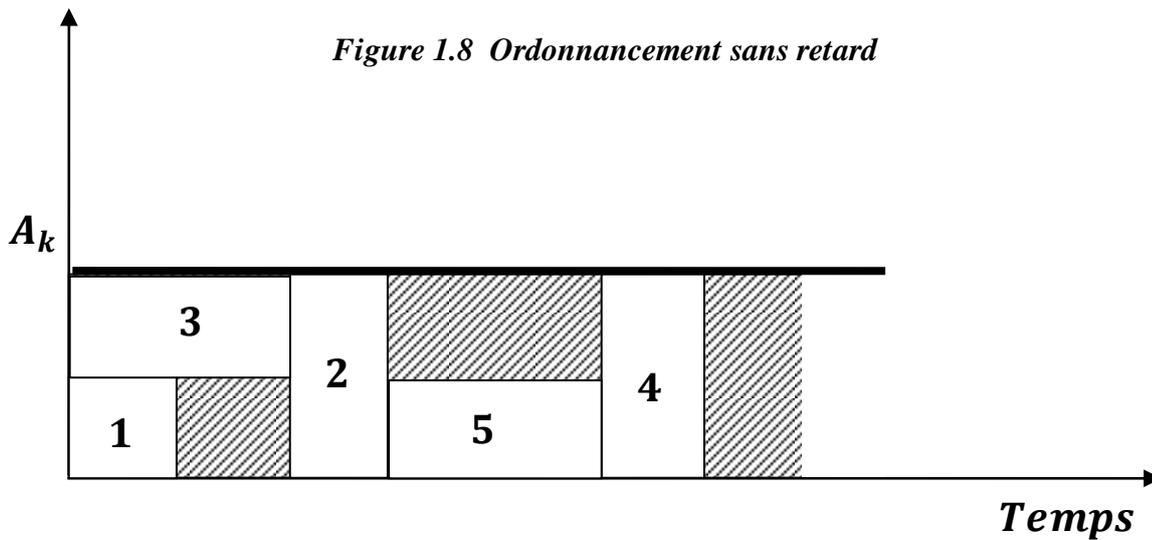
Dans un ordonnancement actif aucun glissement à gauche-local ou global- n'est possible. Aucune tâche ne peut être commencée plus tôt sans reporter le début d'une autre, comme illustré sur Figure 1.6.



Source :Esquirol P. et Lopez., op-cit:p 25.

**1.5.4 Ordonnements sans retard**

Dans un ordonnancement sans retard, on ne doit pas retarder l'exécution d'une tâche si celle-ci est en attente et si la ressource est disponible. Figure 1.7, en présente un exemple.



Source :Esquirol P. et Lopez., idem :p 25.

Notons encore qu'un ordonnancement sans retard est actif.

### 1.6. Conclusion

Nous avons introduit dans ce chapitre la théorie d'ordonnancement par des définitions concernant les principaux déterminants d'un ordonnancement (les tâches, ressources, et les contraintes), puis un paragraphe sur les différents types d'ordonnancement nous a permis de distinguer trois types d'ordonnancement : ordonnancement temps réel (informatique), d'atelier, et l'ordonnancement de projet. Après une description détaillée présentant un exemple numérique, nous avons évoqué quelques techniques, et méthodes de résolution qu'on peut les trouver dans l'abondante littérature. Enfin nous avons présenté brièvement les caractéristiques qui caractérisent un ordonnancement.

Le prochain chapitre (chapitre 2) est consacré à l'un des types d'ordonnancement présenté dans ce chapitre à savoir l'ordonnancement de projet.

---

## CHAPITRE II

---

L'ordonnement de projets fait appel à la théorie des graphes et d'autres techniques pour la modélisation et la résolution de son problème central. Dans ce qui suit dans ce

chapitre en se référant à la section 1.4.2 sur la théorie des graphes au chapitre précédent nous allons présenter comment un tel problème se modélise, puis nous exposerons les différentes méthodes de résolution. Mais avant tout nous devons avancer quelques notions concernant le domaine du management de projets (définitions, structures organisationnelles, cycle de vie d'un projet..etc.)

## 2.1. Eléments du management de projets

### 2.1.1. Définitions

#### 2.1.1.1. Projet <sup>(1)</sup>

Un projet est une entreprise (effort) temporaire, décidée en vue de produire un résultat unique, produit ou service <sup>(2)</sup>.

#### *Temporaire*

Temporaire signifie que tout projet a un début et une fin explicites. La fin se produit lorsque les objectifs du projet ont été atteints, ou lorsqu'il devient évident que les objectifs du projet ne seront pas ou ne peuvent pas être atteints, et que le projet est abandonné. Temporaire ne veut pas nécessairement dire de courte durée mais dans tous les cas la durée d'un projet est une valeur finie. Les projets ne sont pas des opérations permanentes.

En outre, temporaire ne s'applique pas au produit ou service obtenu par le projet. Beaucoup de projets sont entrepris pour obtenir un résultat durable.

#### *Produit ou service unique*

Les projets comportent l'exécution d'activités qui n'ont pas été accomplies précédemment, et qui sont donc uniques. Un produit ou un service peut être unique même s'il appartient à un domaine très vaste. Par exemple, des milliers d'immeubles de bureaux ont été édifiés, mais chaque installation est unique <sup>(3)</sup>.

#### 2.1.1.2. Définition du management de projets <sup>(4)</sup>

---

<sup>1</sup>)- A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) Third Edition, Project Management Institute, 2004.

<sup>2</sup>)- "A project is a temporary endeavor undertaken to create a unique product, service, or result".

<sup>3</sup>) - Newell.M and Grashina.M, The Project Management Question and Answer Book, AMACOM 2004.

<sup>4</sup>)- A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) Third Edition, Project Management Institute, 2004.

*Le management*<sup>(1)</sup> (ou *gestion*) de projet est l'application des connaissances, des compétences, des outils et des méthodes, aux activités d'un projet, en vue d'atteindre ou de dépasser les besoins et les attentes des *parties prenantes* du projet<sup>(2)</sup>.

*Parties prenantes d'un projet (stakeholders)*<sup>(3)</sup>

Les parties prenantes d'un projet sont les individus et les organismes activement impliqués dans le projet, ou ceux dont les intérêts peuvent être affectés en conséquence de l'exécution ou de la réalisation effective du projet. L'équipe de management du projet doit identifier toutes les parties prenantes.

Les parties prenantes principales de tout projet sont :

- Le chef de projet – personne qui est responsable du management du projet
- Le client – individu ou organisme qui utilisera le résultat du projet
- L'organisme en charge du projet
- Le sponsor (ou garant) – personne ou organisme qui assure les ressources financières du projet, en argent ou en appui.

Atteindre ou dépasser les besoins et les attentes des parties prenantes signifie que l'on trouve un équilibre entre les contraintes concurrentes, telles que :

- Contenu, coût, délai et qualité
- Besoins et attentes différentes entre les parties prenantes
- Exigences identifiées (besoins) et non identifiées (attentes)

Le chef de projet a donc essentiellement un rôle d'intégration des éléments dans tous les domaines, et de gestion des interfaces entre les divers intervenants. Il a en particulier pour objectif de piloter le déroulement du projet de façon à maintenir à tout instant le juste équilibre entre trois exigences souvent contradictoires :

- Contenu technique (et performances),
- Coûts
- délais.

A ressources égales, si l'on se rapproche d'un des pôles, on s'éloigne nécessairement des autres.

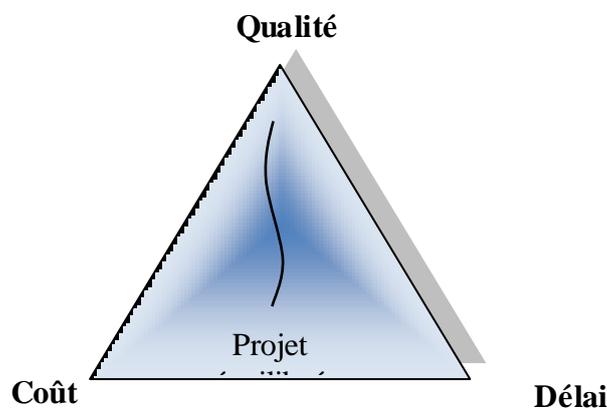
---

<sup>1</sup>)- Pour certains auteurs y a aucune différence entre les deux mots : le mot anglo-saxon « Management » se traduit en français par gestion. Pour d'autres le sens du mot « Management » est plus large et inclut gestion.

<sup>2</sup>)- "Project Management is the application of Knowledge, skills, and techniques to project activities in order to meet or exceed stakeholder needs and expectations from a project".

<sup>3</sup>)- - Newell.M and Grashina.M, The Project Management Question and Answer Book, AMACOM 2004.

Figure 2.1 Triangle à trois contraintes au management de projet



Source :Newell.M and Grashina.M, The Project Management Question and Answer Book, AMACOM 2004.

### 2.1.1.3. Les phases et cycle de vie du projet

#### *Caractéristiques des phases du projet*

Chaque phase du projet est marquée par l'achèvement d'un ou plusieurs livrables. Un *livrable* est un résultat tangible et vérifiable. Les livrables, et par conséquent les phases, sont les éléments d'un déroulement séquentiel logique, étudié pour assurer la définition correcte du résultat de projet.

La conclusion d'une phase est généralement marquée par une revue des livrables majeurs et des performances du projet, en vue de :

- a. Décider si le projet doit passer à l'étape suivante
- b. Déceler et corriger efficacement les erreurs

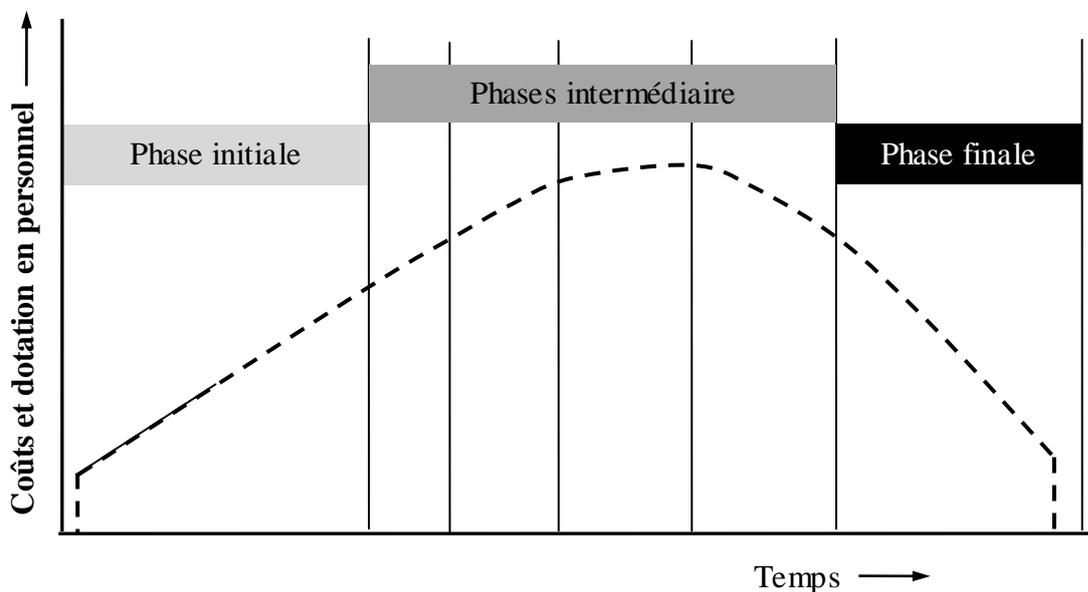
Ces revues de fin de phase sont souvent appelées *revues de projet* ou *revues de contrôle*

#### *Caractéristiques du cycle de vie du projet*

La notion de cycle de vie est utilisée pour définir le début et la fin du projet. La définition du cycle de vie permet de déterminer quelles activités de transition en fin de projet doivent être comprises, ou exclues, dans celui-ci. La succession des phases dans la plupart des cycles de vie du projet implique généralement une forme de transfert de technologie ou de livraison. Les livrables de la phase amont sont généralement approuvés avant le début de la phase suivante. Néanmoins, une phase avale peut être lancée avant l'approbation des livrables d'une

phase amont, cette pratique de recouvrement des phases est souvent appelée « exécution par chevauchement » (fast tracking).

Figure 2.2 Exemple typique de cycle de vie d'un projet



Source : A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) Third Edition, Project Management Institute, 2004.

### 2.1.2 Structures organisationnelles

La structure de l'entreprise en charge du projet lui impose souvent des contraintes quant à la disponibilité des ressources ou leurs conditions d'affectation. Les caractéristiques des structures organisationnelles des entreprises forment un large éventail, depuis le type fonctionnel (hiérarchique), jusqu'aux organisations par projets, en passant par toute une variété de structures matricielles.

- *L'organisation fonctionnelle classique* : repose sur la hiérarchie, où chaque employé a un supérieur strictement identifié. Les équipes sont regroupées par spécialités, par exemple marketing et comptabilité.

Les organisations fonctionnelles peuvent elles aussi réaliser des projets, mais le contenu du projet se limite à la fonction.

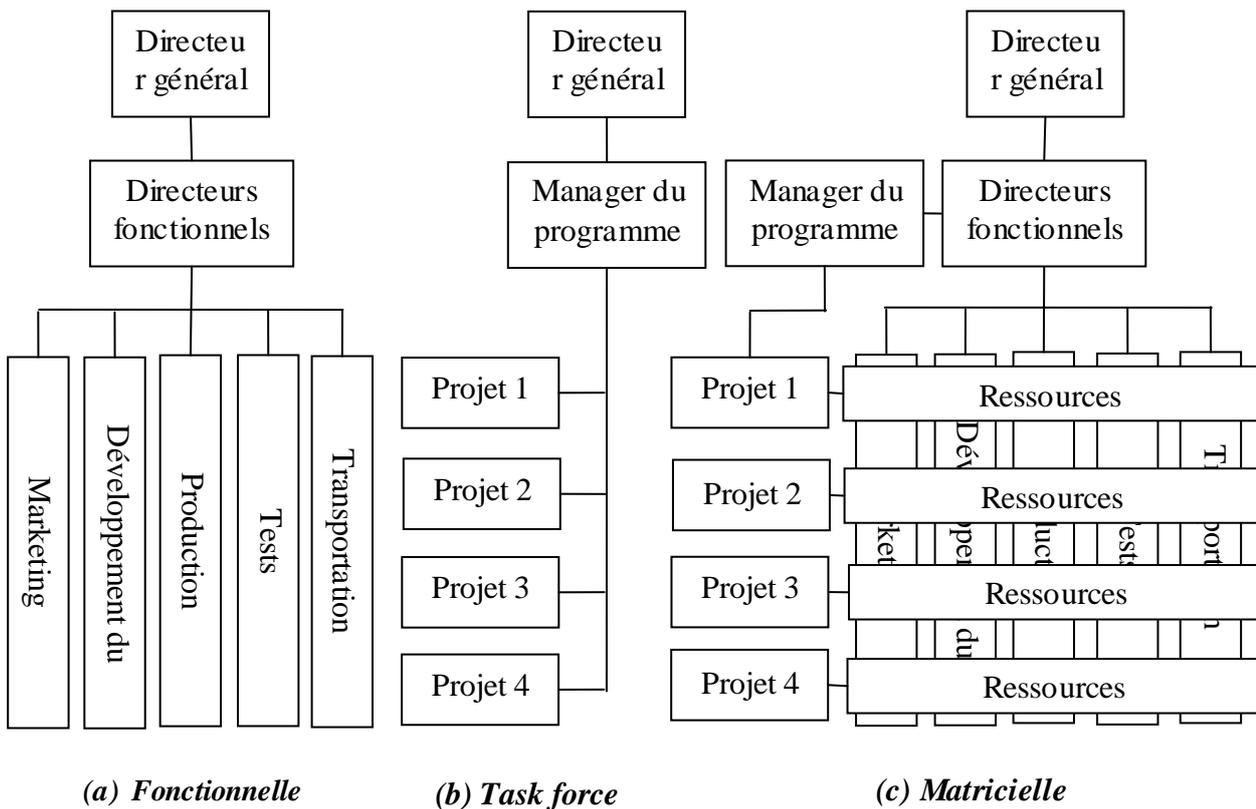
- *L'organisation par projet (task force)* : À l'autre bout de l'éventail, on trouve l'organisation par projet. Dans l'organisation par projet, les membres de l'équipe de projet sont souvent regroupés dans un même local. Une grande partie des ressources

de la structure dans des projets et les chefs de projet ont une grande marge d'indépendance et d'autorité.

- *Les structures matricielles* : représentent une combinaison des structures fonctionnelles et dédiées. Les matrices faibles conservent des caractéristiques de structures fonctionnelle set le rôle du chef de projet est plus celui d'un coordinateur ou d'un facilitateur que celui d'un patron. Les matrices fortes ressemblent beaucoup à l'organisation par projet – avec des chefs de projet à temps plein, ayant une forte autorité.

Beaucoup d'organisations modernes utilisent toutes ces structures à des niveaux différents. Par exemple, même une entreprise foncièrement hiérarchique peut créer une équipe affectée spécialement à un projet, lorsque celui-ci est critique.

Figure 2.3 Les trois types d'organisations



Source: Lester, Albert, Project Management – Planning and Control, 5th Edition, 2007 Elsvier.

2.1.3. Décomposition Structurée (Work Breakdown Structure: WBS)

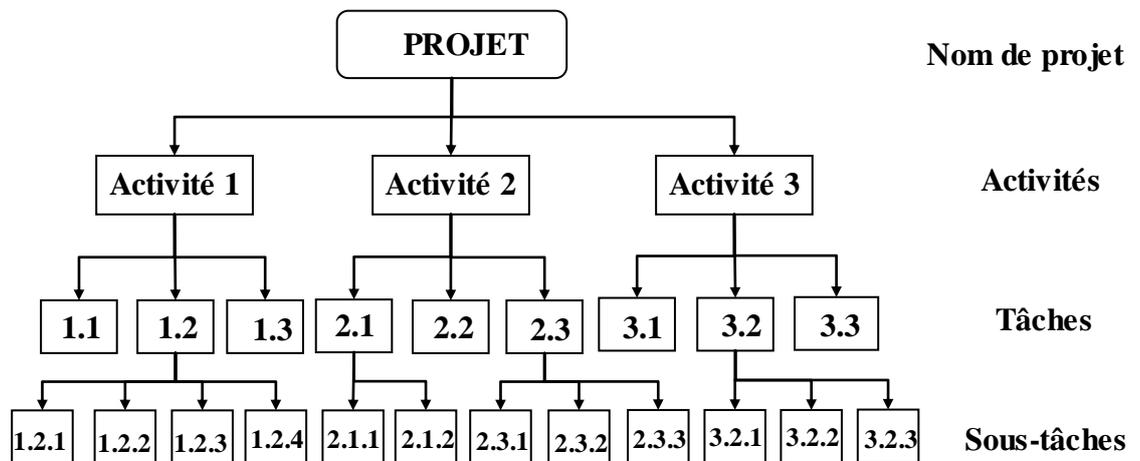
La décomposition structurée est un élément clé en management de projets. Grâce à elle, le projet est décomposé en unités élémentaires de travail (tâches) qui permettent de déterminer

le travail à accomplir, et dont les coûts et les calendriers <sup>(1)</sup>. Le principe pour créer une WBS est simple le projet est tout d'abord décomposé en sous projets. Les sous projets peuvent à leurs tours être décomposés en en activités et ainsi de suite jusqu'à ce que le niveau de décomposition souhaité soit atteint. À ce niveau, nous avons identifié les unités élémentaires de travail, ou tâches.

Cette méthode est basée sur le principe de « diviser pour gouverner ». En décomposant un projet complet en sous projet, on peut assigner des chefs de projet pour chaque sous projet et donc augmenter leur concentration sur leurs sous projets et obtenir de meilleurs résultats pour leurs analyses.

Cette méthode peut être appliquée à différents sujets. Au travail (WBS) comme décrit ci-dessus, à une organisation (Organisation Breakdown Structure OBS), à des ressources (Ressources Breakdown Structure RBS, ...).

Figure 2.4 Exemple d'une décomposition structurée par unité de travail (WBS)



Source :Lester, Albert., Op-Cit : p.25.

## 2.2. Position du problème central

<sup>1</sup>- Il est possible dans la plupart des projets d'identifier 95% du travail à faire en utilisant la décomposition structurée pour identifier toutes les tâches.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'ordonnement de projet. On parle parfois de *série unitaire* <sup>(1)</sup> car le résultat concerne un dessein unique, la construction d'un bâtiment, l'entretien d'une raffinerie de pétrole, la conception d'un satellite, la gestion d'une mission spatiale, etc. Un critère de base souvent retenu sur la minimisation de la durée totale de réalisation du projet.

Pour présenter les concepts et méthodes de l'ordonnement de projet, il est commode de définir un problème dit *central* où l'on ne prend pas en compte les contraintes de limitation des moyens (cela revient à supposer que les ressources sont à *capacité infinie*). Bien qu'en pratique il semble difficile de faire abstraction des *contraintes* de ressources, l'étude de ce cas permet d'analyser l'enchaînement des principales tâches d'un projet au cours du temps et d'introduire des concepts et méthodes génériques qui seront utilisés dans l'étude de problème d'ordonnement avec contraintes de ressources <sup>(2)</sup>.

### 2.3. Modélisation du problème central

Avant d'introduire les techniques de résolution, les formulations courantes liées au problème central sont présentées. Celles-ci passent par la définition de deux graphes, *potentiels-tâches* (*PDM : Precedence Diagramming Method*) et *potentiels-étapes* (*ADM : Arrow Diagramming Method*), manipulant tous deux des inégalités de potentiels, et dont la différence réside dans la sémantique associée aux sommets et aux arcs composant le graphe.

#### 2.3.1. Formulation potentiels-tâches (PDM : Precedence Diagram Method)

Dans la formulation *PDM*, les arcs représentent les contraintes de potentiels entre dates de début des tâches modélisées par les sommets. L'inégalité de base  $t_j - t_i \geq p_{ij}$  est traduite en graphe potentiels-tâches par la *Figure 2.1.(a)* <sup>(3)</sup>.

Dans ce type de représentation, on rajoute souvent deux sommets correspondant à des tâches *fictives* de début/fin de projet, de durée nulle, reliant les sommets sans prédécesseur/successeur (c'est-à-dire pouvant commencer/terminer simultanément).

#### 2.3.2 Formulation potentiels-étapes (ADM <sup>(1)</sup> : Arrow Diagram Method)

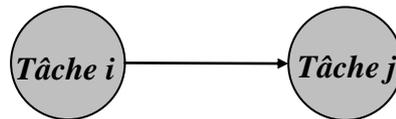
<sup>1</sup>)- Des projets linéaire comme les Pipelines, les autoroutes et les canaux où chaque activité est représentée par un seul type de travail, et par conséquent une ressource unique.

<sup>2</sup>)- Esquirol P. et Lopez., L'ordonnement, Economica, Paris,1999.

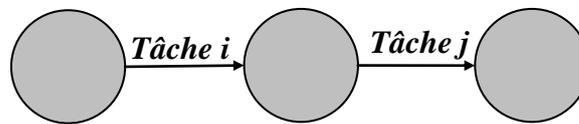
<sup>3</sup>)- Les nœuds de cette formulation (PDM) est représenté ici et dans le reste de ce mémoire en forme rectangulaire.

Dans une formulation *ADM*, les arcs du graphe représentent des tâches (réelle ou fictive), alors que les sommets caractérisent des étapes, ou évènements repérant le début ou la fin d'un ensemble de tâches. La longueur d'un arc représente la durée d'une tâche *Figure 2.1.(b)*.

*Figure 2.5 Les deux types de formulation des graphes*



*(a) Formulation PDM*



*(b) Formulation ADM*

Source: Pinedo Micheal.L., Planning and Scheduling in Manufacturing and Service., Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, New York 2005. p 53.

*Exemple 2.1* <sup>(2)</sup> : Considérant le problème d'installer un équipement pour la fabrication d'un nouveau produit. Le projet est composé de huit tâches, le *Tableau 2.* présente la description des tâches et les temps requis pour chacune :

*Tableau 2.1 La Description et les temps opératoires (Exemple 2.1)*

<sup>1</sup> )- La modélisation potentiels-étapes est très proche d'une représentation par diagramme de Gantt, chaque arc du graphe (ou tâche) correspondant à une barre du diagramme. Son pouvoir de présentation est toutefois plus limité que ne l'est celui d'une modélisation potentiels-tâches.

<sup>2</sup>)-Pinedo Micheal.L., Planning and Scheduling in Manufacturing and Service., Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, New York 2005.

Activités	Description	Durées
1	Conception graphique d'outillage de production	4 semaines
2	Préparation des dessins de fabrication	6 semaines
3	Préparation d'équipements de production pour les outils et les nouvelles pièces	10 semaines
4	Procurer l'outillage	12 semaines
5	Procurer les pièces de production	10 semaines
6	Assemblage des pièces	2 semaines
7	Installation des outillages	4 semaines
8	Mise à l'essai	2 semaines

*Tableau 2.2 Les contraintes de précédence (Exemple2.1)*

Le *Tableau 2.2* spécifie les contraintes de précédence entre les tâches :

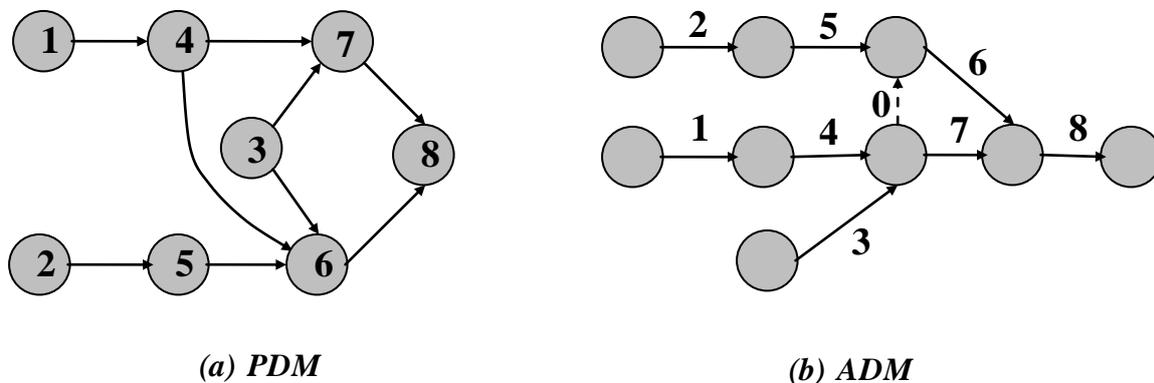
Activités	Prédécesseur immédiat	Successeur immédiat
1	-	4
2	-	5
3	-	6,7
4	1	6,7
5	2	6
6	3,4,5	8
7	3,4	8
8	6,7	-

\$

### 2.3.3. Comparaison des deux formulations

Les deux types de graphes « *représentent une seule et même logique sous deux formes différentes* »<sup>(1)</sup>. Des différences existent cependant : en potentiels-tâches, on n'a pas besoin de tâches fictives pour assurer la cohérence logique du projet ; en potentiels-étapes, on a recours à des arcs de durée nulle, à même de traduire des *conditions de séquentialité* entre étapes. Dans la **Figure 2.6**, le deuxième cas illustre cette particularité (une tâche fictive est représentée par un arc en trait pointillé).

**Figure 2.6** Les graphes de précédences (l'exemple 2.1)



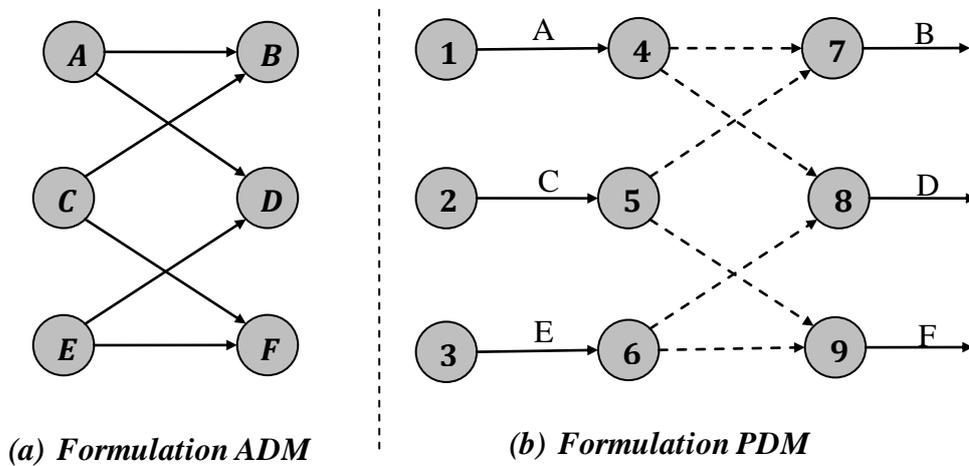
Source: PinedoMicheal.L., Planning and Scheduling in Manufacturing and Service.,Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, New York 2005.p 54.

Quand les contraintes à modéliser sont des contraintes de précedence entre tâches, on peut préférer la formulation potentiels-étapes car elle peut générer moins de sommets, mais ceci n'est pas toujours vrai. Si le système de contraintes est tel qu'il entraîne la prolifération de tâches fictives, le graphe potentiels-étapes devient vite illisible. Le cas de la **Figure 2.7**, plus complexe que la deuxième configuration de la **Figure 2.6**, illustre bien ce fait.

Enfin, l'introduction de nouvelles contraintes potentielles est directe sur un graphe potentiels-tâches (ajout des arcs correspondants) et ne nécessite pas de remanier l'ensemble des tâches fictives (ajouts, suppression), comme c'est souvent le cas pour un graphe potentiels-étapes. De même, il peut exister plusieurs modèles potentiels-étapes d'un même problème d'ordonnement, alors que le modèle potentiels-tâches est unique.

<sup>1</sup>)- Giard V., Gestion de la production, 2e édition, 1988, Economica.

Figure 2.7 Prolifération de tâches fictives



Source : Esquirol P. et Lopez., L'ordonnement, Economica, Paris,1999. p 32.

## 2.4 Résolution du problème central

Une des questions fondamentales dans la résolution concerne le calcul du délai le plus court pour la réalisation du projet. Ceci revient à rechercher le chemin le plus long sur le graphe entre le début et la fin du projet, problème qui compte parmi les plus anciens de la théorie des graphes et pour lequel on dispose d'algorithmes performants (algorithme de Bellman-Ford par exemple). On détermine ainsi un chemin critique correspondant à une séquence de tâches dont les dates de début sont imposées si l'on désire terminer au plus tôt, d'où l'appellation de la technique introduite ici, dite à *chemin critique*. Des méthodes différentes s'y rattachent, mais leurs fondements théorique sont les mêmes.

La méthode la plus connue reste sans conteste PERT (Program evaluation and review Technique). Elle est issue du contrôle de la réalisation des engins Polaris à la fin des années cinquante aux Etats-Unis. A la même époque, l'entreprise du Pont de Nemours développe CPM (*Critical Path Method*) mise en œuvre pour la construction d'une usine chimique. Par rapport à PERT, CPM permet de gérer des coûts fonctions des durées ; d'une autre côté, PERT enrichit CPM par l'introduction d'incertitude dans l'estimation des durées <sup>(1)</sup>.

<sup>1</sup>)- Esquirol P. et Lopez., L'ordonnement, Economica, Paris,1999. P 33.

### 2.4.1 Méthode de chemin critique (CPM : Critical Path Method)

Considérant  $n$  tâches soumises à des contraintes de précédence, le temps d'exécution de la tâche  $i$  est fixe et égal à  $p_i$ . L'objectif est d'optimiser le *makespan* <sup>(1)</sup>. Les algorithmes capables de nous produire un ordonnancement avec un *makespan* minimal est relativement simple, et peuvent être décrits ainsi : *commencer dans le temps zéro avec le temps d'exécution de toutes les tâches qui n'ont pas des prédécesseurs. Et chaque fois qu'une tâche achève son temps d'exécution, ils commencent les tâches qui ont des prédécesseurs avec des temps d'exécution terminés.*

Afin de décrire l'algorithme plus formellement nous avons besoin d'une certaine notation, on suppose que  $C'_i$  est la date de fin au plus tôt de la tâche  $i$  et  $S'_i$  son temps de début au plus tôt. Il est clair que  $C'_i = S'_i + p_i$  et  $\{tout\ i \rightarrow j\}$  indique que toutes les tâches sont des prédécesseurs de la tâche  $j$  <sup>(2)</sup>. L'algorithme suivant est connu par le calcul au plus tôt, il est basé sur un principe simple : une tâche peut commencer son temps d'exécution uniquement si tous ses prédécesseurs sont terminés, et le temps de début au plus tôt des tâches est égal au maximum de temps de fin au plus tôt de tous les prédécesseurs <sup>(3)</sup>.

#### Algorithme 1 : calcul au plus tôt (Forward Pass)

##### Début

##### *Etape 1*

*Poser  $t = 0$*

*Poser  $S'_i = 0$  et  $C'_i = p_i$  pour toute tâche  $i$  qui n'a pas de prédécesseur*

##### *Etape 2*

*Calculer pour chaque tâche  $i$*

$$S'_i = \max_{\{tout\ i \rightarrow j\}} C'_j$$

$$C'_i = S'_i + p_i$$

##### *Etape 3*

*Le makespan est  $C_{max} = \max(C'_1, \dots, C'_n)$*

##### Fin

<sup>1)</sup> - *Makespan* : date de fin de la dernière tâche utilisée, ou de manière équivalente durée totale du projet.

<sup>2)</sup> - cela implique que si la tâche  $i$  est un prédécesseur de la tâche  $j$ , la tâche  $i$  doit être achevée avant le début de la tâche  $j$

<sup>3)</sup> - Pinedo Micheal.L., Planning and Scheduling in Manufacturing and Service., Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, New York 2005

Le second algorithme est utilisé pour déterminer le temps au plus tard sous la supposition que le *makespan* gardé son temps minimal. Cet algorithme est connu par *l'ordonnement au plus tard*. Afin de mieux décrire cet algorithme une notation additionnelle est adoptée. On suppose que  $C_i''$  représente le temps possible de fin de la tâche  $i$  au plus tard, et  $S_i''$  le temps possible de début au plus tard de la tâche  $i$ .  $\{i \rightarrow tout j\}$  indique que toutes les tâches sont des successeurs de la tâche  $i$ .

**Algorithme 2 : calcul au plus tard (Backward Pass)**

**Début**

*Etape 1*

*Poser  $t = C_{max}$*

*Poser  $C_i'' = C_{max}$  et  $S_i'' = C_{max} - p_i$*

*Pour chaque tâche  $i$  qui n'a pas de successeurs*

*Etape 2*

*Calculer pour chaque tâche  $i$*

$$C_i'' = \min_{\{i \rightarrow tout j\}} S_j''$$

$$S_i'' = C_i'' - p_i$$

*Etape 3*

*Vérifier que  $\min(S_1'', \dots, C_n'') = 0$*

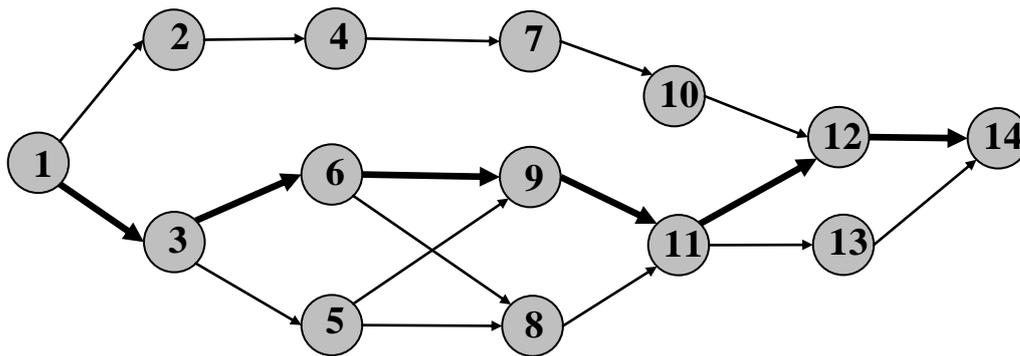
**Fin**

**Exemple 2.2** : considérant 14 tâches soumises à des contraintes de précedence (**Figure 2.8**) le temps d'exécution de chacune est donné par le tableau suivant :

**Tableau 2.3 Temps opératoires, les temps au plus tôt et au plus tard (Exemple 2.2)**

Activité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$p_i$	5	6	9	12	7	12	10	6	10	9	7	8	7	5
$C_i'$	5	11	14	23	21	26	33	32	36	42	43	51	50	56
$C_i''$	5	12	14	24	30	26	34	36	36	43	43	51	51	56

Figure 2.8 Le graphe de précédences (l'exemple 2.2)



La figure 2.8 illustre les contraintes de précédence, le temps de fin au plus tôt peut être calculé en utilisant la procédure d'ordonnement au plus tôt qui donnera un *makespan* égal à 56. Sur la base de ce *makespan* on peut procéder à l'ordonnement au plus tard. On appelle une tâche qui il a un temps de fin au plus tôt égal au temps de fin au plus tard une *tâche critique*.

#### 2.4.2. Chemin critique (Critical path)

On appelle *chemin critique*, les tâches situées sur un chemin critique : tout retard pris dans le démarrage de ces tâches (parfois dû à l'allongement de la durée d'une tâche précédente) suffit à retarder d'autant la fin du projet.

#### 2.4.3. Caractérisation des différents types de marges

##### 2.4.3.1. Marge totale (Total float)

La *marge totale* d'une tâche est le retard maximum qu'elle peut prendre par rapport à sa date de début au plus tôt, sans que cela n'affecte la durée minimale du projet. Elle est égale à l'écart qui sépare la date de début au plus tôt de la tâche, de sa date de début au plus tard <sup>(1)</sup> :

$$TF_i = C_i'' - S_i' - p_i$$

##### 2.4.3.2. Marge libre (Free float)

La *marge libre* d'une tâche est le retard maximum qu'elle peut prendre par rapport à sa date de début au plus tôt, sans que cela n'affecte ses tâches descendantes, qui conservent alors les mêmes dates de début au plus tôt :

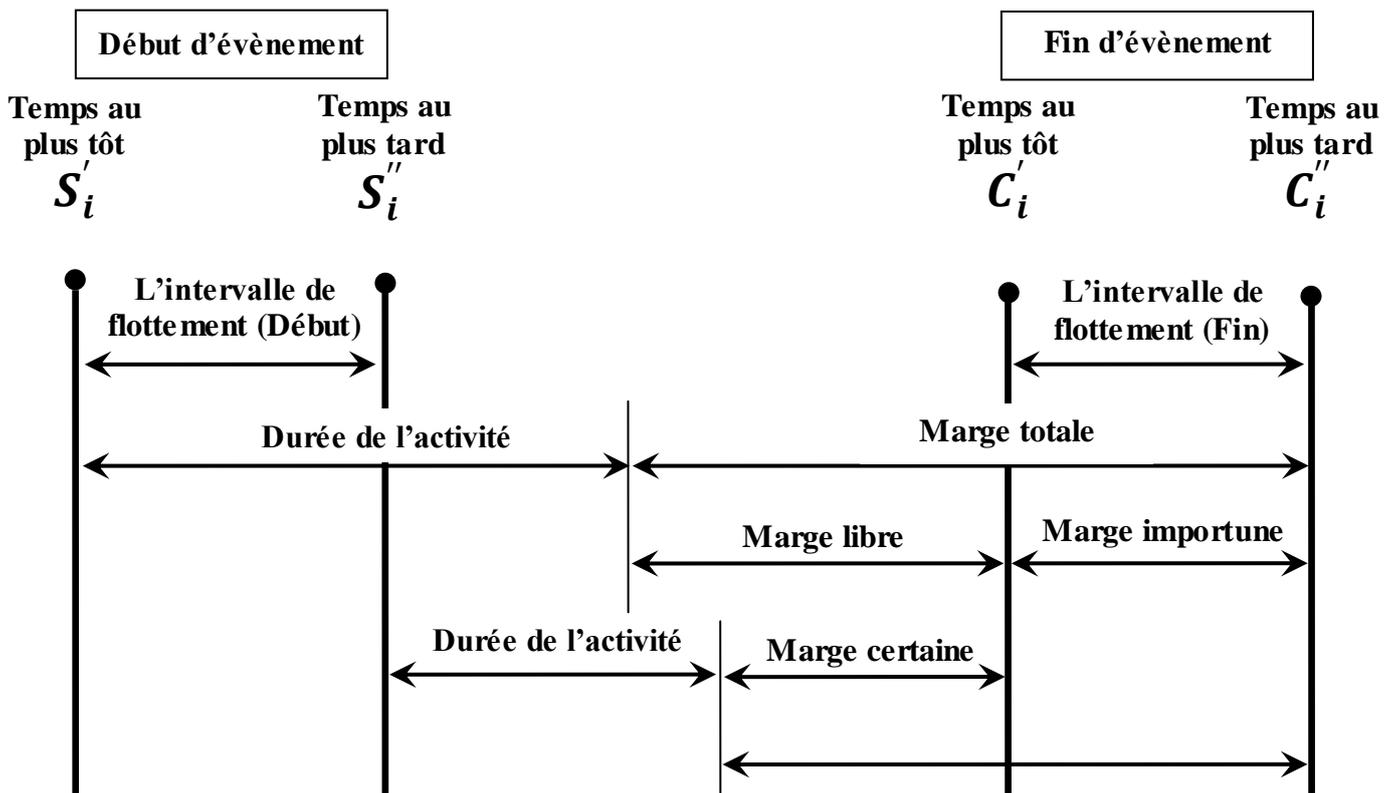
$$FF_i = C_i' - S_i' - p_i$$

<sup>1)</sup> - Esquirol P. et Lopez., Op-cit p.39.

La définition de la marge libre étant plus contraignante que celle de la marge totale, la première est toujours une fraction de la seconde <sup>(1)</sup>.

La *marge liée* est la différence entre la marge totale et la marge libre. Elle caractérise le couplage entre l'ordonnement d'une tâche et celui des tâches qu'elle précède.

Figure 2.9 Les marges d'une activité (i)



Source : Source :Lester, Albert, Project Management – Planning and Control, 5th Edition, 2007  
Elsiver.p 108

Marge libre et marge liées sont définies relativement aux tâches en aval. Il aurait été possible de les définir relativement aux tâches en amont, en évaluant à quel point l'ordonnement au plus tôt d'une tâche prive ses précédentes d'un retard possible. La dernière définition que nous donnons intègre les deux points de vue.

<sup>1</sup>)- Esquirol.P et Lopez.P, L'ordonnement, Ed, Economica, 1999.

### 2.4.3.3 Marge indépendante (Independent Float)

La *marge indépendante* (ou *certaine*) d'une tâche est l'écart positif -s'il existe- qui sépare sa date de début au plus tôt sachant que ces tâches ascendantes sont calées au plus tard, de sa date de début au plus tard sachant que ses tâches descendantes sont calées au plus tôt. Formellement <sup>(1)</sup> :

$$IF_i = C_i'' - S_i'' - p_i$$

### 2.4.3.4. Utilisation des marges

Lorsque la préoccupation dominante dans un projet est de déterminer au plus tôt, il est sage d'ordonner au plus tôt les tâches non critiques pour pallier d'éventuels aléas durant leur exécution, dans la mesure où la marge dont on dispose est suffisante. Bien souvent cependant, la prise en compte d'autres critères, liés aux ressources, qu'elles soient techniques, humaines ou budgétaire, conduit à retarder le début ou à allonger la durée de tâches non critiques, contredisant ainsi le seul critère de robustesse face aux aléas. On peut utiliser la marge totale pour classer les tâches et renforcer le contrôle d'exécution sur celles qui en ont peu car un retard trop important peut créer un nouveau chemin critique et allonger la durée du projet. Il faut garder à l'esprit que toute action sur la marge totale d'une tâche peut avoir des conséquences sur la marge totale d'autres tâches. La notion de marge libre s'avère donc plus utile pour la prise en compte d'autres critères car l'exploitation des seules marges libres évite la remise en cause de toute autre marge totale <sup>(2)</sup>.

## 2.5. Extensions du problème central

### 2.5.1. Durée variable

Dans la réalité, les durées d'exécution des tâches  $p_i$  sont le plus souvent, non pas des constantes mais des variables aléatoires. Avant la réalisation d'un projet ces données

---

<sup>1</sup>) - Esquirol.P et Lopez.P, op-cit : p 39.

<sup>2</sup>) - Esquirol.P et Lopez.P, idem : p 39.

numériques ne sont que des estimations. Pour prendre en compte l'incertitude sur ces estimations, on peut utiliser un modèle probabiliste.

Le *makespan* du projet  $C_{max}$  est alors une variable aléatoire. De nombreuses méthodes exactes ou approchées ont été développées pour calculer la distribution de  $C_{max}$  et en particulier sa moyenne  $\hat{E}(C_{max})$ , il existe deux approches différentes.

### 2.5.1.1 L'approche classique (PERT : Program Evaluation and Review Technique)

Cette approche est basée sur les principes suivants <sup>(1)</sup> :

- La durée  $p_i$  de chaque tâche du projet est considérée comme *aléatoire de distribution Bêta*. Les paramètres de la distribution Bêta sont calculés moyennant une hypothèse de calcul assez forte <sup>(2)</sup>. A partir des trois paramètres  $p_i^a$ ,  $p_i^b$  et  $p_i^m$  il suffit de poser les trois questions suivantes
  - Quelle est la durée minimum de réalisation de la tâche ?
  - Quelle est la durée maximale de réalisation de la tâche ?
  - Quelle est la durée la plus probable ?

Pour obtenir respectivement les paramètres  $p_i^a$ ,  $p_i^b$  et  $p_i^m$  qui permettent de calculer la moyenne et la variance, à partir des formules suivantes :

$$\hat{\mu} = \frac{p_i^a + 4p_i^m + p_i^b}{6}$$

$$\hat{\sigma}_i^2 = \left( \frac{p_i^b - p_i^a}{6} \right)^2$$

- On détermine *le chemin critique* du projet en se plaçant dans l'univers certain en mettant *la durée de chaque tâche égale à sa moyenne* donnée par la formule précédente. On détermine ainsi un ou plusieurs chemins critiques.
- On se place en univers incertain et on fait l'hypothèse que la durée du projet est la somme des durées des tâches du chemin critique, ce qui bien sûr est une forte hypothèse simplificatrice.

<sup>1</sup> )- Pinedo. Michael L., Planning and Scheduling in Manufacturing and Services., Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, New York 2005.

<sup>2</sup> )- on suppose que  $\alpha=2+\sqrt{2}$  et que  $\gamma=2-\sqrt{2}$

- On utilise le *théorème central limite* <sup>(1)</sup> pour approximer  $D_p$ , la loi de distribution de probabilité d'exécution du projet. Ainsi, l'espérance et la variance de la durée du projet se calculent comme la somme des espérances et des variances des tâches du chemin critique :

$$\hat{E}(C_{max}) = \sum_{i \in I_{cp}} \hat{\mu}_i$$

$$\hat{V}(C_{max}) = \sum_{i \in I_{cp}} \hat{\sigma}_i^2$$

Où  $I_{cp}$  note l'ensemble des tâches du chemin critique.

La connaissance de la loi de la durée du projet permet alors de calculer des intervalles de confiance sur la durée du projet.

**Exemple 2.3** Considérant les 14 tâches de l'exemple **Exemple 2.2** soumises aux mêmes contraintes de précédence de **Figure 2.8**. Néanmoins, les durées d'exécution sont maintenant des variables aléatoires avec les données PERT suivantes.

**Tableau 2.4 Les temps optimistes, pessimistes, et les plus probables (Exemple2.3)**

Activité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$p_i^a$	4	4	8	10	6	12	4	5	10	7	6	6	7	2
$p_i^m$	5	6	8	11	7	12	11	6	10	8	7	8	7	5
$p_i^b$	6	8	14	18	8	12	12	7	10	15	8	10	7	8

A partir des données de ce dernier tableau, et en basant sur les formules précédente on peut facilement calculer les moyennes et les variances de chaque tâches.

**Tableau 2.5 Les temps attendus, et les variances (Exemple2.3)**

Activité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----

<sup>1)</sup>- Enoncé du théorème : soit  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$   $n$  variables aléatoires indépendantes de lois quelconques,  $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_n$  les moyennes de ces variables aléatoires et  $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \dots, \sigma_n^2$  les variances ( $\sigma_i^2 = var(X_i)$ ), soit  $Z_n = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$  : Pour  $n$  suffisamment grand on démontre que l'on peut supposer en première approximation que :  $T_n = \frac{Z_n - \bar{Z}_n}{\sqrt{Var(Z_n)}}$  est une variable de Gauss centrée réduite où  $\bar{Z}_n = \bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_n$  et  $Var(Z_n) = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2$  ce résultat est valable à condition que la variance des variables  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  soit finie, et que  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sigma_i^2}{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} = 0$  pour tout  $i$ . En d'autre terme, nous pouvons dire que la variable  $T_n$  tend en loi vers une variable de Gauss, quand  $n$  tend vers l'infini.

$\hat{\mu}_i$	5	6	9	12	7	12	10	6	10	9	7	8	7	5
$\hat{\sigma}_i$	0,33	0,67	1	1,33	0,33	0	1,33	0,33	0	1,33	0,33	0,66	0	1
$\hat{\sigma}_i^2$	0,11	0,44	1	1,78	0,11	0	1,78	0,11	0	1,78	0,11	0,44	0	1

L'estimation des moyennes donne des résultats équivalents aux durées dans *Exemple 2.2* donc le chemin critique reste le même à savoir :

$$1 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 14$$

L'estimation du *makespan* est égal au *makespan* (56) calculé dans l' *Exemple 2.2* et si on calcule sa variance on obtient :

$$V(C_{max}) = \sum_{i \in I_{cp}} \hat{\sigma}_i^2 = 2,66$$

On déduit que la distribution de probabilité de D, la durée minimale d'exécution du projet est une loi normale de paramètres connus :

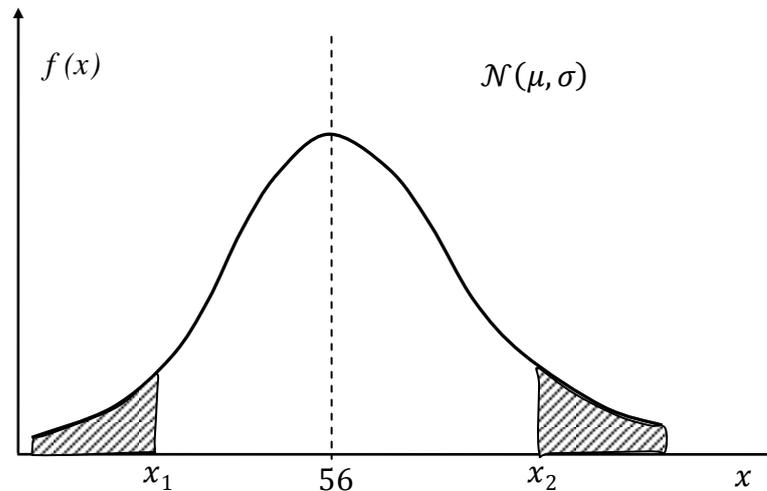
$$\mathcal{N}(56; \sqrt{7,19}) = \mathcal{N}(56; 2,66)$$

On peut donc en déduire des intervalles de confiance sur la durée du projet. Par exemple, si l'on veut déterminer un intervalle à 95% sur la durée du projet, on peut utiliser la symétrie de la courbe la normale. On cherche donc les valeurs extrêmes de l'intervalle  $[x_1, x_2]$  tel que la probabilité que la durée du projet soit entre ces deux bornes est 95% :

$$P[x_1 \leq D_p \leq x_2] = 95\%$$

Vu la symétrie de la courbe de la normale, cela signifie qu'il y aura 2,5% à chaque extrémité du graphe. Il suffit de déterminer  $x_2$  et  $x_1$  sera calculé par symétrie par rapport à  $\mu = 56$ .

Figure 2.10 Intervalle à 95% sur la durée du projet



Le tableau de (**l'annexe D**) fournit, pour la loi normale centrée réduite, notée  $Z$ , la probabilité  $P(Z > z)$ . On cherche donc  $x_2$  tel que :

$$P(D_p > x_2) = 2,5\%$$

Pour faire la lecture dans la table, il faut centrer et réduire des deux côtés de l'inégalité ci-dessus. On obtient :

$$P\left[\frac{D_p - \mu}{\sigma} > \frac{x_2 - 56}{2,66}\right] = 2,5\%$$

Dans la table de la loi Normale  $\mathcal{N}(0,1)$  on lit que :

$$P(Z > 1,96) = 2,5\%$$

On déduit que

$$\frac{x_2 - 56}{2,66} = 1,96$$

Autrement dit que :

$$x_2 = 1,96 \times 2,66 + 56 = 61,21$$

On détermine  $x_1$  comme étant le point symétrique de  $x_2$  par rapport à la moyenne  $\mu = 49,5$  :

$$x_1 = 56 - (x_2 - 56) = 50,78$$

On en déduit finalement l'intervalle suivant.

$$P(50,78 < D < 61,21) = 95\%$$

### 2.5.1.2.L'approche simulatoire

Remarquons que la méthode PERT privilégie un chemin critique. En situation aléatoire, d'autres chemins peuvent devenir critiques. Pour l'analyse des effets combinés de ces chemins critiques et sous critiques, il vaut mieux recourir à *l'approche simulateur*.

Le principe de l'approche simulateur est de faire une simulation sur base d'un scénario privilégié pour chacune des tâches. En utilisant la *Méthode de Monte-Carlo*, on peut générer différents scénarios pour les durées des tâches du projet. Ce qui permet de calculer, par exemple, la probabilité d'une tâche d'être critique <sup>(1)</sup>.

#### 2.5.1.2.1 La méthode de Monté Carlo

Nous introduisons d'abord la *méthode de Monte-Carlo*. Supposons que l'on s'intéresse à la grandeur  $X_i$  (qui représente ici la durée d'une tâche  $i$ ). il faut d'abord identifier la *fonction de répartition* de la variable  $X_i$ . Ceci est fait, par exemple, en posant une série de question du type : « *Quelle est la probabilité que la variable  $X_i$  prenne une valeur inférieure à  $x_i$  ?* »

Le *tableau 2.2* présente les résultats obtenus à cette série de question.

**Tableau 2.6 : Méthode de Monte-Carlo**

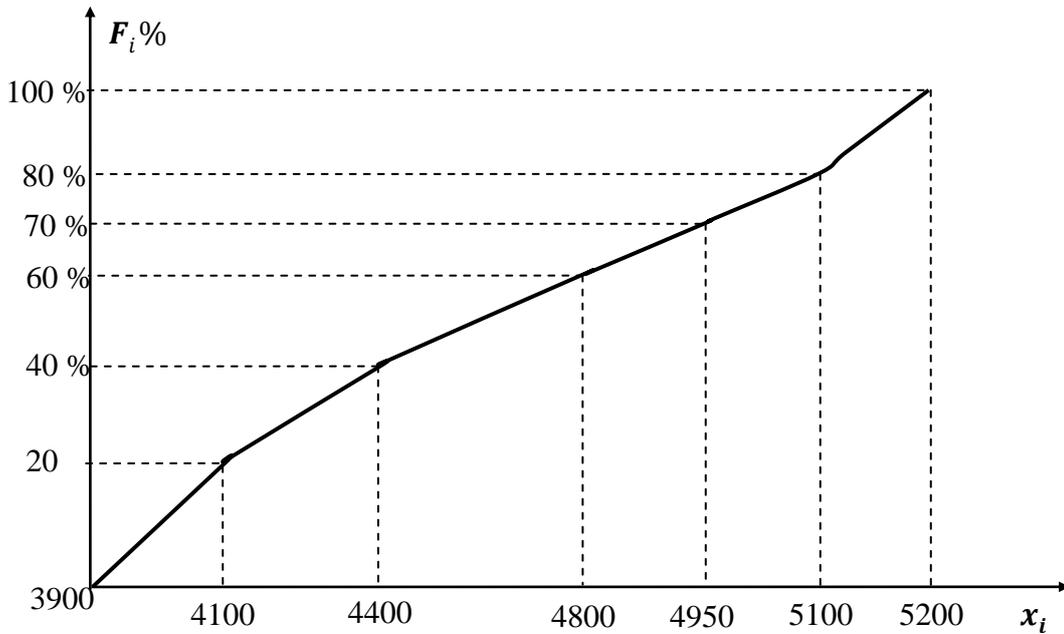
$x_i$	$P(X_i < x_i)$
3900	0%
4100	20%
4400	40%
4800	60%
4950	70%
5100	80%
5200	100%

Source : Giard V., Gestion de projets, Economica, Paris, 1991.

<sup>1</sup>)- Giard V., Gestion de projets, Economica, Paris, 1991.

On peut alors construire  $F_i(x_i) = P(X_i < x_i)$ , la *fonction de répartition par interpolation linéaire*. On choisit ici un pas de 1% pour  $F_i$  et on tabule les valeurs correspondantes de  $x_i$ . On obtient la table 5.3 où les valeurs encadrées correspondent aux points de cassure de la fonction.

Figure 2.11 Construction de la fonction de répartition



Source : Giard V., Gestion de projets, Economica, Paris, 1991.

Document téléchargé depuis www.pnst.cerist.dz CERIST

$F_i$	$x_i$	$F_i$	$x_i$	$F_i$	$x_i$	$F_i$	$x_i$
<b>0</b>	<b>3900</b>						
<b>1</b>	3910	<b>26</b>	4190	<b>51</b>	4620	<b>76</b>	5040
<b>2</b>	3920	<b>27</b>	4205	<b>52</b>	4640	<b>77</b>	5055
<b>3</b>	3930	<b>28</b>	4220	<b>53</b>	4660	<b>78</b>	5070
<b>4</b>	3940	<b>29</b>	4235	<b>54</b>	4680	<b>79</b>	5085
<b>5</b>	3950	<b>30</b>	4250	<b>55</b>	4700	<b>80</b>	<b>5100</b>
<b>6</b>	3960	<b>31</b>	4265	<b>56</b>	4720	<b>81</b>	5105
<b>7</b>	3970	<b>32</b>	4280	<b>57</b>	4740	<b>82</b>	5110
<b>8</b>	3980	<b>33</b>	4295	<b>58</b>	4760	<b>83</b>	5115
<b>9</b>	3990	<b>34</b>	4310	<b>59</b>	4780	<b>84</b>	5120
<b>10</b>	4000	<b>35</b>	4325	<b>60</b>	<b>4800</b>	<b>85</b>	5125
<b>11</b>	4010	<b>36</b>	4340	<b>61</b>	4815	<b>86</b>	5130
<b>12</b>	4020	<b>37</b>	4355	<b>62</b>	4830	<b>87</b>	5135
<b>13</b>	4030	<b>38</b>	4370	<b>63</b>	4845	<b>88</b>	5140
<b>14</b>	4040	<b>39</b>	5385	<b>64</b>	4860	<b>89</b>	5145
<b>15</b>	4050	<b>40</b>	<b>4400</b>	<b>65</b>	4875	<b>90</b>	5150
<b>16</b>	4060	<b>41</b>	4420	<b>66</b>	4890	<b>91</b>	5155
<b>17</b>	4070	<b>42</b>	4440	<b>67</b>	4905	<b>92</b>	5160
<b>18</b>	4080	<b>43</b>	4460	<b>68</b>	4920	<b>93</b>	5165
<b>19</b>	4090	<b>44</b>	4480	<b>69</b>	4935	<b>94</b>	5170
<b>20</b>	<b>4100</b>	<b>45</b>	4500	<b>70</b>	<b>4950</b>	<b>95</b>	5175

<b>21</b>	4115	<b>46</b>	4520	<b>71</b>	4965	<b>96</b>	5180
<b>22</b>	4130	<b>47</b>	4540	<b>72</b>	4980	<b>97</b>	5185
<b>23</b>	4145	<b>48</b>	4560	<b>73</b>	4995	<b>98</b>	5190
<b>24</b>	4160	<b>49</b>	4580	<b>74</b>	5010	<b>99</b>	5195
<b>25</b>	4175	<b>50</b>	4600	<b>75</b>	5025	<b>100</b>	5200

**43645 89232 00384 10858 21789**

**14093 06268 46460 97660 23490**

**61618 19275 40744 22482 12424**

**98601 19089 53166 41836 28205**

*Tableau 2.9 : Table de nombres au hasard (Sélectionnés par 2)*

**4364 589232 0038410858 21789**

**14093 06268 46460 97660 23490**

**61618 19275 40744 22482 12424**

**98601 19089 53166 41836 28205**

*Tableau 2.7 : La construction de la fonction de répartition*

...

*Tableau 2.8 : Table de nombres au hasard (Extraits)*

Par ailleurs, il faut disposer d'un générateur de nombres aléatoires. Le *tableau 2.4* prend un extrait d'une table de nombre générés au hasard.

...

Cette table (**l'annexe D**) permet de simuler des valeurs équiprobables de probabilité cumulées. Il suffit de considérer les séquences de 2 chiffres consécutifs dans cette table comme fait au **tableau 2.5**

On obtient ainsi autant de valeurs équiprobables de probabilités cumulées : 43%, 64%, 58%, 92%, 32%, 0%, 38%, 41%, 8%, 58%. Au moyen du **tableau 2.3**, on peut retrouver les valeurs correspondantes de X. On obtient ainsi les valeurs  $x_i$  de  $X_i$  reprises au **tableau 2.10**. c'est là le principe de la méthode de *Monte-Carlo*.

**Tableau 2.10 : Méthode de Monte-Carlo : générations de  $x_i$**

$i$	$F_i$	$x_i$
<b>1</b>	43 %	4460
<b>2</b>	64 %	4860
<b>3</b>	58 %	4760
<b>4</b>	92 %	5160
<b>5</b>	32 %	4280
<b>6</b>	0 %	3900
<b>7</b>	38 %	4370
<b>8</b>	41 %	4420
<b>9</b>	8 %	3980
<b>10</b>	58 %	4760

Source : Giard V., Gestion de projets, Economica, Paris, 1991.

### 2.5.1.2.2. Principe de l'approche simulateur

Une fois connues les distributions de probabilités des durées des tâches, on utilise la *méthode de Monte-Carlo* pour obtenir par simulation des durées des différentes tâches. On procède alors à un grand nombre de simulations qui permettent de tirer des enseignements impossibles à obtenir de manière analytique.

La méthode repose donc sur les principes suivants :

- On suppose connue la fonction de répartition  $P(X_i < x_i)$  de la durée  $X_i$  de la tâche  $i$  du projet qui comporte  $n$  tâches.
- On procède à  $K$  jeux de simulations (**tableau 2.7**) du problème d'ordonnement. On note  $d_{i,k}$  la durée de la tâche  $i$  dans la simulation numéro  $k$ .
- La simulation d'une durée  $d_{i,k}$  d'une tâche  $i$  pour le jeu de données  $k$  s'obtient par utilisation d'un nombre généré aléatoirement. Ce nombre à deux chiffres correspond à une probabilité exprimée en pourcentage d'une valeur de la fonction de répartition de la durée de la tâche.
- Le tableau de la fonction de répartition de la durée de la tâche  $i$  permet de passer de la valeur tirée aléatoirement de la probabilité cumulée à la valeur de la durée, notée  $d_{i,k}$ .
- Pour chaque jeu de données  $k$ , on résout le problème d'ordonnement en un univers certain. On obtient la durée minimale d'exécution du projet notée  $D_k$  pour le jeu de données numéro  $k$ . on repère également les tâches critiques pour le jeu de données.
- L'analyse statistique des  $K$  jeux de données permet d'obtenir les trois informations suivantes :
  1. Pour le projet : une estimation de l'espérance mathématique de la durée d'exécution du projet. Il suffit de faire la moyenne des  $D_k$  :

$$\bar{D} = \frac{\sum_{k=1}^K D_k}{K}$$

2. Pour chaque tâche : une estimation de la probabilité que cette tâche soit critique. Il suffit, en effet, dans chaque ligne, de compter le nombre de fois que la tâche a été critique, soit  $c_i$  et la fréquence

$$f_i = \frac{c_i}{K}$$

Est un indicateur de la probabilité que la tâche soit critique. Cet indicateur porte le nom d'*indice de criticité de la tâche*.

3. Pour chaque chemin : une estimation de la probabilité que ce chemin soit critique. Il suffit, en effet, de compter de nombre de fois que le chemin a été critique, soit  $p_i$  et la fréquence

$$\frac{p_i}{K}$$

Est l'indicateur de la probabilité que le chemin soit critique. Cet indicateur porte le nom *d'indice de criticité du chemin* <sup>(1)</sup>.

### 2.5.2. La prise en compte des coûts et des ressources

Dans ce paragraphe nous allons généraliser l'approche déterministe présentée au début lorsque nous avons posé le problème. Dans la plupart des cas il est possible de réduire le temps opératoire d'une tâche en allouant des ressources ou des budgets additionnels. On suppose pour cela qu'on possède un budget qui pourra être utilisé dans cette allocation additionnelle pour chaque tâche.

On suppose aussi que le temps opératoire des tâches est une fonction linéaire des quantités allouées. Plus de moyen est alloué, plus le temps opératoire des tâches est réduit. Il y a un temps opératoire minimal  $p_i^{min}$  et un temps opératoire maximal  $p_i^{max}$ . Le coût opératoire de la tâche  $i$  dans le temps opératoire minimal  $p_i^{min}$  est noté par  $c_i^a$ , et le coût opératoire de la même tâche dans le temps opératoire maximal est noté par  $c_i^b$ . **Figure 2.12**. Il est évident que  $c_i^a \geq c_i^b$ , la valeur  $c_i$  donc représente *le coût marginal de diminution unitaire par allongement de délai de la tâche  $i$* .

$$c_i = \frac{c_i^a - c_i^b}{p_i^{max} - p_i^{min}}$$

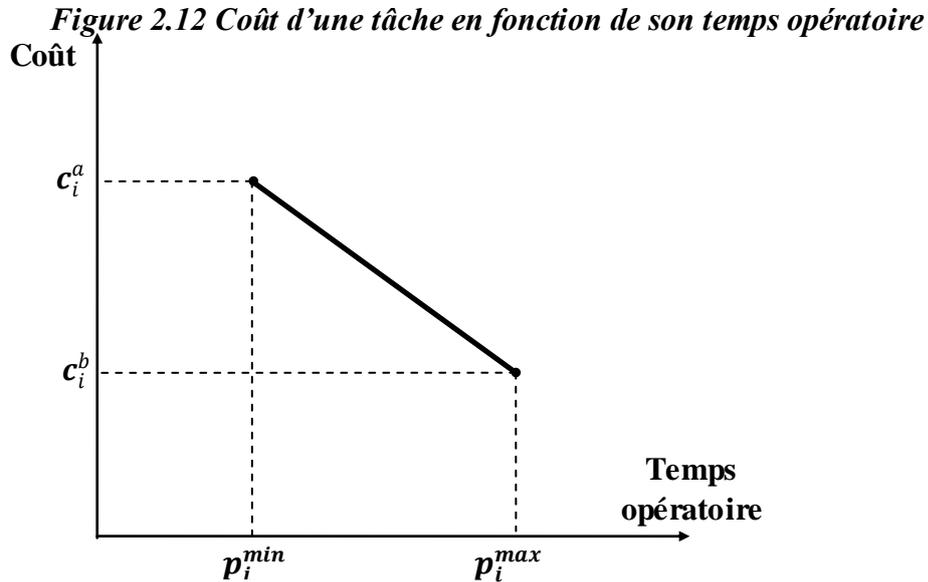
<sup>1</sup>)- Giard Vincent présente un exemple de simulation portant sur 1000 jeux de données pour l'exemple introductif, en retenant comme mode la durée de l'univers certain et en utilisant des distributions triangulaires. De ces simulations plusieurs enseignements peuvent être tirés :

- Certaines tâches qui étaient critiques dans l'univers certain n'ont plus qu'une chance sur deux d'être critiques en univers aléatoire.
- A l'inverse, certaines tâches non critiques dans l'univers certain ont une chance sur cinq d'être critique en univers aléatoire. Ceci traduit l'apparition de nouveaux chemins critiques en univers aléatoire.

En effet, on peut montrer en général que l'apparition de nouveaux chemins critiques se traduit par une augmentation de l'espérance du temps d'exécution du projet.

Ce que fait que le coût opératoire de la tâche  $i$  dans le temps unitaire  $p_i$  ou  $p_i^{min} \leq p_i \leq p_i^{max}$  est :

$$c_i^b + c_i(p_i^{max} - p_i)$$



Source: PinedoMichael.L., Planning and Scheduling in Manufacturing and Service.,Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, New York 2005. p 62.

Suppose par la suite qu'il y un coût plafond  $c_0$  encouru dans la base de temps unitaire.

Afin de déterminer le coût minimal de projet tout entier, il est nécessaire de déterminer le temps opératoire le mieux approprié pour chaque tâche des  $n$  tâches. Le problème est simple d'un point de vue de complexité, et peut être résolu par des nombreuses méthodes.

Dans le cas où cette fonction des coûts est linéaire, il est possible pour l'optimisation du problème de le formuler sous un programme linéaire. Le temps opératoire de la tâche  $i$ , et le *makespan*  $C_{max}$  sont considérés comme des variables de décision, son temps possible de début au plus tôt noté par  $x_i$  est aussi une variable de décision, s'il n'a pas de prédécesseur sinon il est égal à zéro. Les durées des tâches sont soumises à deux contraintes, à savoir :

$$p_i \leq p_i^{max}$$

$$p_i \geq p_i^{min}$$

Le coût total du projet, en relation fonctionnelle des temps opératoires  $p_1, \dots, p_n$  est égal :

$$c_0 C_{max} + \sum_{i=1}^n (c_i^b + (p_i^{max} - p_i))$$

Depuis que les termes fixes dans cette fonction des coûts ne jouent pas un rôle dans la minimisation de la fonction objective, elle est égale à :

$$c_0 C_{max} - \sum_{i=1}^n c_i p_i$$

Si  $A$  représente l'ensemble des contraintes de précédence, le problème peut être formulé comme suit :

$$\text{minimiser} \quad c_0 C_{max} - \sum_{i=1}^n c_i p_i$$

Sous contraintes :

$$S/C \left\{ \begin{array}{ll} x_k - p_i - x_i \geq 0 & \forall i \rightarrow k \in A \\ p_i \leq p_i^{max} & \forall i \\ p_i \geq p_i^{min} & \forall i \\ x_i \geq 0 & \forall i \\ C_{max} - x_i - p_i \geq 0 & \forall i \end{array} \right.$$

Ce programme linéaire possède  $2n+1$  variables de décision.

Si nous reprenons les données de l'exemple **Exemple 2.2** nous pouvons le formuler sous un programme linéaire, avec 14 tâches, en appliquant la formule  $2n+1$  nous avons donc  $2 \times 14 + 1 = 29$  variables de décision. La variable  $x_1$  peut être égale à zéro, et la fonction d'objectif a  $14+1=15$  termes.

Dans le cas des coûts non-linéaires une méthode heuristique est suppléante, il y a deux raisons d'opter par l'heuristique, l'une elle est plus pratique qu'une méthode basée sur la programmation linéaire, et l'autre elle peut être utilisée dans le cas des coûts non-linéaires <sup>(1)</sup>.

<sup>1</sup>)-Pinedo. Michael L., Planning and Scheduling in Manufacturing and Service., Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, New York 2005.,p 62.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé une introduction à l'ordonnement de projet, des éléments de management de projet sont également avancés en guise d'une introduction au management de projet, car il nous a apparait indispensable d'introduire le thème de l'ordonnement de projet, par une présentation des principales notions de domaine (les définitions, le cycle de vie d'un projet, le WBS...etc.). Après nous avons posé le problème central en présentant les deux formulations possibles et la méthode de résolution. Une extension du problème central est également traitée en évoquant deux approches différentes (approche classique, et simulateur). Dans le même contexte, nous avons avancé brièvement l'extension du problème central qui prend en compte les coûts opératoires.

---

## **CHAPITRE III**

---

### **3.1 Généralités sur les pipelines**

### 3.1.1. Définition :

Un pipeline, mot emprunté à l'anglais signifiant littéralement « ligne-tuyau »<sup>(1)</sup> est une canalisation enterrée ou aérienne transportant des biens, qu'ils soient sous forme solide (petites capsules,...), liquide (eau, pétrole, par exemple) ou gazeux (gaz naturel, par exemple).

Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol.

Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés; c'est le cas sous l'eau, au passage des fleuves, sur du pergélisol qui fond, en zone de risque sismique ou politiquement instable. Au contraire de leur investissement initial; leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrentes, au moins sur de petites et moyennes distances.

Les risques majeurs de défaillance des pipelines sont liés aux agressions (volontaires ou involontaires) de tiers et à la corrosion interne ou externe. La corrosion externe est maintenant freinée par des dispositifs de protection cathodique<sup>(2)</sup>.

### 3.1.2. Une brève histoire des pipelines :

L'utilisation des premiers pipelines remonte aux civilisations anciennes, son progrès reflète l'évolution ferme et progressive des cultures à travers le monde. Les besoins pour le développement de l'agriculture, l'expansion des villes et des agglomérations, la révolution industrielle, et la première utilisation de la machine à vapeur, la découverte du pétrole, l'introduction d'acier et de plastique dans la fabrication, et le rapide progrès de l'innovation dans les domaines de la pétrochimie, la physique, le génie mécanique, ont beaucoup contribué dans la haute technicité de la technologie des pipelines de nos jours<sup>(3)</sup>.

Avant plus de 1000 ans les romains ont utilisé des conduites en plomb dans leur aqueduc pour amener de l'eau à Rome. Bien avant 400 av.J.C les chinois ont utilisé des tubes de bambou enveloppé en cire pour transporter le gaz naturel à leur capitale Pékin pour s'éclairer.

---

1 )- Tiré du latin *pipa*, tuyau, et *linea*, ligne, le terme anglo-saxon *pipeline* - également prononcé à la française -s'applique spécifiquement aux systèmes de canalisations à haute pression (jusqu'à 100 bars) utilisés pour le transport à moyenne et grande distance des hydrocarbures liquides et gazeux.

2 )- . Moureau.M et Brace.G., Dictionnaire du pétrole et autre source d'énergie, Editions TECHNIP, Paris,2008.

3)- Antaki.A, George, Piping and pipeline Engineering, Marcel Dekker, Inc.2003.

Quant aux conduites en argile ils se sont utilisés plus avant tout ça pour le drainage par le peuple ancien d'Egypte et par certain autre peuple environ 4000 ans av.J.C.

Le plus grand progrès dans la technologie des pipelines a eu lieu au début de 18<sup>e</sup> siècle quand les premiers pipelines en fonte ont été fabriqués pour les réseaux d'eau, d'égout et du gaz. Après, un autre évènement plus important fut la première fabrication d'un pipeline en acier, qui a permis la construction des pipelines de longue distance. En 1879 et suite à la première découverte du pétrole en Pennsylvanie, en même année cet Etat d'Amérique a construit son premier pipeline en acier d'un diamètre de 6 pouce et 109 mi (176 km environ) de longueur. Neuf ans plus tard, en Amérique toujours un pipeline de 8 pouces de diamètre et de 87 mi (140 km) s'est construit, qui transporte le gaz naturel (gazoduc) de Kane et la Pennsylvanie, jusqu'au Buffalo, et New York. Le développement de ces types de pipelines a rendu plus possible le transport de n'importe quelle matière liquide ou gazeuse vers des endroits plus lointains.

Au début la fabrication de ces pipelines en acier était d'une forme ensemble et d'une seule pièce, ce qui a posé beaucoup de problèmes surtout dans la construction des pipelines de longue distance, et les difficultés en cas de fuite suite à la haute pression surtout pour les gazoducs. On s'attendait qu'au 1920 où y a eu le premier développement des arcs de soudure électrique pour les joints des pipelines, qui a permis la fabrication des anti-fuites, des hautes pressions pour les larges diamètres. Actuellement, tous les pipelines à haute pression, sont construits des tuyaux en acier avec des joints soudés, les tuyaux en acier était aussi l'un des importants innovations en technologie des pipelines de cette année de 1920.

Parmi les importantes innovations en technologie des pipelines depuis 1950 on compte :

- Introduction des nouveaux matériaux dans la fabrication des pipelines, tel que le ductile, le béton pour les aqueducs de large diamètre, et le PVC (Polyvinyl Chloride) pour les saumoducs
- L'utilisation des *pigs* pour le nettoyer l'intérieur des pipelines, et d'autres fonctions
- La possibilité de transporter plus d'une matière dans un seul pipeline
- L'application de la protection cathodique pour réduire les cas de la corrosion, et le prolongement de la durée de vie d'un pipeline

L'utilisation d'autres méthodes plus convenable pour les lits de pose, les perceuses, et les engins de forage qui peuvent creuser même au-dessous des rivières, ainsi que les machines permettant le cintrage des pipelines de grand diamètre..etc.

Depuis 1970 un grand pas a été réalisé en matière de technologie des pipelines, comprenant le début de creusement des tranchées d'une légère profondeur pour la pose des pipelines ( par exemple les techniques de forage directionnel, qui rend plus facile la pose des pipelines, même dans le cas des obstacle tel que les rivières, et les lacs), le PIM (Pipeline integrity Monitoring) pour le la détections des fuite et des corrosions ( par exemple, l'envoi des *Pigs* intelligents à travers les tuyau pour détection en cas de corrosion, fissures, ou les autres dommage). La technologie de contrôle par ordinateur, les stations des micro-ondes, et la communication via des satellites entre le siège central et les bases les plus éloignées, et la nouvelle technologie des pipelines qui peuvent transporter les matières solides d'une longue distance.

### 3.1.3. Composants d'un pipeline

Les réseaux de *transport par canalisation* (pipelines) sont composés de tronçons de conduites et d'ouvrages connexes remplissant des fonctions précises <sup>(1)</sup> :

- *Les stations d'injection ou de départ* constituent les points d'entrée du réseau de transport. Suivant leur configuration et leur position géographique ce peuvent être des stations d'atterrage, des terminaux, des stations d'entrée.
- *Les stations de compression* (pour les gaz) ou stations de pompage (pour les liquides) sont réparties régulièrement le long des réseaux de transport pour maintenir la pression et la vitesse du fluide dans les canalisations.
- *Les postes de livraison* permettent de mettre la matière transportée à disposition des destinataires intermédiaires ou finaux.
- *Les postes de sectionnement* permettent d'isoler un tronçon de canalisation afin d'assurer sa maintenance ou de limiter les conséquences néfastes en cas de fuite. Ces postes sont parfois équipés de coupure pour introduire et recevoir des pistons (*pig* en anglais), destinés à contrôler les différents paramètres d'intégrité de la canalisation : géométrie, propreté, perte de métal, fissuration, etc. La distance entre deux postes de sectionnement consécutifs dépend de la réglementation applicable, selon le fluide transporté et le pays concerné. La distance entre deux postes de coupure (ou de demi-coupure) consécutifs varie d'une dizaine de kilomètres pour de courtes antennes ou

---

1 )- Liu Henery, Pipeline EGINEERING, CRC Press LLC Lewis Publishers, 2003.

points spéciaux, à quelques centaines de kilomètres pour de grandes canalisations de transit.

- *Les postes de détente* ou *poste de régulation* permettent de diminuer la pression de fluide à l'aval. Ces postes sont souvent associés à des postes de livraison. Ils peuvent aussi séparer des portions de réseau exploités à des pressions différentes.
- *Les stations d'arrivée* marquent l'extrémité d'un réseau de transport. Ce peut être un réservoir de stockage ou le début d'un réseau aval de transport ou de distribution.

#### 3.1.4. Les importants pipelines existants <sup>(1)</sup> :

La majorité des pipelines existants aujourd'hui principalement sont des oléoducs, qu'ont été construit pendant et après la première guerre mondiale, dont la plus part sont construit pour répondre aux besoins nationaux et internationaux de cette époque caractérisée par l'instabilité. C'est l'exemple des Etats-Unis qu'ont construit les pipelines le *Big Inch* et le *Little Big Inch* pour se préserver d'une éventuelle menace des sous-marins allemands contre les bases pétroliers côtière. En 1960 suite à une grève en union maritime le *Colonial Pipeline Company* a construit un grand pipeline qui part de Houston, Texas jusqu'à New York. En 1973 l'embargo pétrolier arabe a incité la construction du pipeline Trans-Alaska qui amène de pétrole brute des champs riche jusqu'à l'emplacement de Prudhoe situé près de l'océan arctique vers le nord de l'Alaska au port de glace à Valdez sur le rivage du sud de l'Alaska.

Le **Big Inch** était un pipeline de 24 pouces (61-cm) construit pour transporter 300.000 bpj (baril par jour) du pétrole brut, et le **Little Big Inch** était un 20 pouce (51-cm) construit aussi pour transporter 235.000 bpj. Ces deux canalisations s'étendent sur une distance de Texas jusqu'à la côte est d'Amérique. Ils se sont construits par le gouvernement américain entre 1942 et 1943 (durant la deuxième guerre mondiale), après la guerre en 1947 le gouvernement a cédé ces canalisations à la compagnie TETECO (Texas Eastern Transmission Corporation), et cette dernière a les converti après pour le transport de gaz naturel. Plus tard le TETCO a bien développé les deux lignes en rendant le **Little Big Inch** comme il était pour le transport des produits pétroliers (essence, mazout, kérosène..etc), mais contrôlée cette fois par une autre compagnie le TEPPCO (Texas Eastern Products Pipeline Company)<sup>(2)</sup>.

---

1)- Liu Henery, op-cit: p.4 .

2 )- Actuellement les deux compagnies TETCO et TEPPCO sont fusionnés dans une seule compagnie le Duke Energy, laquelle a publié des intéressants brochures sur l'histoire des deux pipelines le big Inch et le Little Big inch.

Le **Colonial pipeline**, est un pipeline de 36 pouces (91 cm) à 30 pouces (76 cm), construit par la compagnie le **Colonial Pipeline** entre 1962 et 1964, cette compagnie a été fusionné dans un consortium de neuves entreprises il transporte environ 1,2 million bpj. Entre 1967 et 1987 l'une des entreprises de cet consortium, le CPS (Colonial Pipeline System ) a grandement développé l'ensemble de ce pipeline principal en ajoutant latéralement d'autres pipelines secondaires, ainsi que des stations de pompage <sup>(1)</sup>.

Le *Trans-Alaska* achevé en 1977, est un oléoduc de 48 pouces (1,22 m) de diamètre avec une longueur de 798 mi (1284 km), transportant approximativement 1,7 million bpj, soit l'équivalent de 9% de la consommation du brut en USA. Il traverse une région sismique de la montagne la plus dure par ses terrains accidentés ainsi que son climat arctique, qui était très contesté surtout par les défenseurs de l'environnement, en plus les caractéristique de la région traversé par ce pipeline a lui causé beaucoup de difficulté surtout envers la loi suite au non-respect des délais et les surcoûts du projet <sup>(2)</sup>.

Les Etats-Unis possèdent plus d'oléoducs et de gazoducs qu'un autre pays du monde environ 1,3 million mi (2,1 million km) de gazoducs et 0,25 million mi (0,4 million km) d'oléoducs, la quantité transportées du pétrole par ces pipelines est de 500 milliard tonnes en 2000, qui constitue la moitié de pétrole transporté dans le monde. Texas est l'Etat le plus grand producteur du GPL dans les Etats-Unis, avec un réseau de 4300 mi (6920 km) transportant du GPL de Texas jusqu'au centre et l'est des Etats-Unis, et la Californie.

Le FSU (Former Soviet Union) est le deuxième après les Etats-Unis en matière de longueur des réseaux pipelines construits, il avait environ 30,000 mi (50,000km) des oléoducs la plus part ont été construits après 1940. Le Comecon par exemple il transporte du pétrole de l'Urals jusqu'à l'Europe d'est d'une distance de plus 3800 mi (6115 km) – d'ailleurs le pipeline le plus long du monde- FSU il a aussi l'un des pipelines le plus long et le plus large au monde qui transporte du gaz naturel, tel que le Long Middle Asia-Central Zone de 3400 mi (5500 km) qui transporte environ 25 milliard mètre cube du gaz par an.

---

1)- le plus grand système de canalisation de nos jours avec une capacité de transporter environ 1,8 million bpj, soit l'équivalent de 10% de la consommation quotidienne des produits pétroliers aux Etats-Unis d'Amérique. On le donne le nom colonial car il transportait du pétrole de Taxas jusqu'à New York en passant par les 13 anciennes colonies.

2 )- En faisant de lui le pipeline le plus coûteux du monde, 9 milliard USD.

Au Canada les principaux pipelines sont le Interprovincial Pipeline avec un diamètre de 34 pouces (86 cm) et une longueur de 2000 mi (3220), transportant du pétrole de Manitoba and Saskatchewan jusqu'à l'Ontario, et le Trans-Mountain qui relie Edmonton, Alberta jusqu'aux raffineries en British Columbia et l'Etat de Washington aux Etats-Unis, d'une distance de plus de 825 mi (1328 km), concernant les gazoducs le Canada possède d'autre principaux pipelines qui transportent le gaz comme le Trans-Canada d'un diamètre de 36 pouces (91 cm) allongé sur une distance de 2300 mi (3700 km) de Alberta jusqu'au Montréal.

Il existe d'autres importants pipelines dans les autres parties du monde. Par exemple les pays arabes en moyen orient riche en pétrole compte exclusivement sur les pipelines pour amener leur bruts de l'intérieur des pays jusqu'aux ports pour l'exportation. Des pays comme l'Irak, l'Iran, et l'Arabie Saoudite ont des milliers de kilomètres de réseau pipeline, les plus importants sont le Trans-Arabian Pipeline de 1000 mi (1610 km) qui relie les champs pétroliers en Arabie Saoudite et le port méditerranéen de Sidon, et les plus nouveaux pipelines ont par exemple 1055 mi (1700 km) du sud iranien jusqu'au port turque de Iskenderun, le pipeline irakien jusqu'au port Yurmurtalik en Turquie.

### 3.1.5. L'importance des pipelines :

Le mode de transports via des pipelines est le mode le moins compris voire le moins apprécié par un grand public, puisqu'il est mal connu en raison de son caractère invisible par rapport aux autres modes de transport, la majorité des pipelines passent en sous-sol, et comme on dit, loin de vue loin d'esprit ! Malgré la mal reconnaissance par la majorité de public, les pipelines sont d'une importance vitale pour le bien-être et la sécurité des pays, toutes les nations modernes comptent exclusivement sur les pipelines pour transporter les commodités suivantes<sup>(1)</sup> :

- L'eau de centres et bases de traitement jusqu'aux maisons et autres destinations pour le besoin public, et individuel de cette matière vitale
- L'égout des maisons et les déchets des usines jusqu'au bases de traitement
- Le gaz naturel n'importe où il se trouve pour le consommateur mêmes s'il situé à des milliers de kilomètres plus loin, pour qu'il soit disponible pour les ménages, dans les usines, les écoles, et les centres électriques

---

1 )- Liu Henery, idem: p.4 .

- Le pétrole brute des champs pétroliers jusqu'aux raffineries
- Les produits pétroliers raffinés (l'essence, gas-oil, mazout, etc.) de raffinerie jusqu'aux cités.

Sans compter des centaines d'autres matières transportées sous des formes liquides, gazeuses, et solides, le réseau des pipelines sans doute est le lien vital de toute civilisation moderne.

### 3.1.6. Les différents types de pipelines :

On peut regrouper les pipelines dans plusieurs groupes, suivant le critère pris. Selon les produits transportés on a les aqueducs qui transportent des eaux, les saumoducs pour l'évacuation des égouts, les gazoducs, et les oléoducs, qui transportent le pétrole et les autres produits raffinés (comme l'essence, le gas-oil, etc.).

Cependant le meilleur regroupement des pipelines d'un point de vue scientifique et analytique est celui qui les classifie selon la base de la mécanique de fluide, qui s'intéresse plus particulièrement aux matières transportées dans les pipelines. Selon ce critère on trouve les flots incompressibles d'une seule phase (comme les aqueducs, et les oléoducs), les flots compressibles d'une seule phase (tel que les gazoducs), il y a aussi les flots des mélanges solides-liquides en double phase, et les flots des mélanges liquide-gazeux en double phases, ainsi que les fluides non-newtoniens, et finalement les flots des capsules.

Il existe d'autres façons pour le classement des pipelines, par exemple selon l'environnement où le pipeline est installé, il y a les offshore des larges, et les pipelines d'intérieur (englobent les pipelines qui traversent les plaines, ainsi que ceux qui traversent les régions montagneuses). Ils peuvent se classer aussi selon la matière dont les tuyaux sont fabriqués, il y a les pipelines fabriqués en acier, en fonte, en plastique...etc. les divers classements des pipelines se trouvent dans le **tableau 3.1**.

Selon les matières transportées
1. Aqueducs (Water pipelines)
2. Saumoducs (Sewers)
3. Gazoducs (Natural Gas pipelines)
4. Oléoducs ( Oil pipelines)

*Tableau 3.1 : Taxonomie des pipelines.*

5. Les pipelines des matières solides (houille, les déchets solides...etc.)
6. Autres ( oxygénoduc, chimique, déchets toxiques...etc.)
<b>Selon la base de la mécanique de fluides</b>
1. Flots incompressibles une seule phase
2. Flots compressibles d'une seule phase
3. Flots de mélanges solide-liquide en double phases
4. Flots de mélange liquide-gaz en double phase
5. Flots des capsules double phases
6. Fluides non-newtoniens
<b>Selon l'environnement</b>
1. Offshores (Offshore pipelines)
2. Pipelines intérieurs (Inland pipelines)
3. Pipelines internes (In-plant pipelines)
4. Pipelines en montagne (Cross-mountain pipelines)
5. Pipelines spatiaux ( Space pipelines)
<b>Selon la position</b>
1. Pipelines souterrains ( Underground Pipelines)
2. Pipelines de surface (Aboveground Pipelines)
3. Pipelines suspendus (Elevated Pipelines)
4. Pipelines sous-marain (Underwater-submarine) pipelines
<b>Selon la matière des tuyaux</b>
1. Pipelines en acier
2. Pipelines en plastique
3. Pipelines en fonte
4. Pipeline en Béton, et autres( en argile, verre, ...etc.)

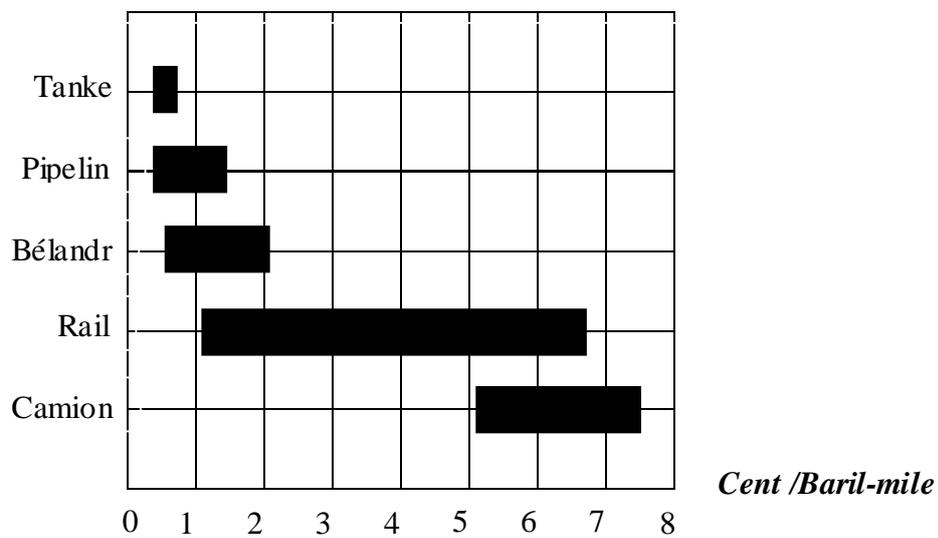
### 3.1.7. L'avantage des pipelines :

Pour transporter des grandes quantités de fluide (liquide et gaz) Le pipeline est le moyen le plus avantageux des moyens de transport existant dans le monde, même pour le transport des matières solide, parmi ses avantages on compte <sup>(1)</sup> :

1 )- Liu Henery, Pipeline Engineering, CRC Press LLC Lewis Publishers, 2003.

- *Economiques dans toutes circonstances* : une capacité de transporter des grandes quantités des matières fluides voire solides, en haut débit à travers les régions les plus difficiles (terrains accidenté, climat aride,...etc.) avec des coûts les plus bas par rapport aux autres modes de transports, routiers, et ferroviaires. Egalement, les grands fonds consacrés pour l'investissement dans la construction des pipelines, à bas coûts opérationnels tel que la maintenance et autres, rendent les prix des matières transportées par les pipelines les moins susceptibles au taux d'inflation par rapport aux autres biens transportés par route ou par train.

Figure 3.1 Comparaison entre le transport par pipelines et les autres modes de transport



Source : Liu Henery, op-cit: p.14 .

- *Moindre consommation d'énergie* : l'intensivité d'énergie consommée le long d'un pipeline, et la plus basse en comparaison avec la transportation par route ou par voie ferroviaire. Le **EI** l'intensivité de l'énergie est défini comme le quotient de la l'énergie consommée par unité de poids en cargaison diviser sur l'unité de distance le *Btu tonne/mile*.

Tableau 3.2 l'EI et les différents modes de transport de fret

Mode	EI <sup>(*)</sup> (Btu/TM)	Circonstance
Aéroplane	37 000	Moyenne
Camions	2300	Moyenne
Rails	680	Moyenne
Bélandre	540	Moyenne
Pipelines (Oléoducs)	450	Moyenne

Pipelines (matière solide)	1500	3-ft diamètre, 300 mi
Pipeline hydraulique des capsules (HCP)	700	3-ft diamètre, 300 mi
Pipeline pneumatique des capsules (PCP)	1800	20 pouce de diamètre, système des tubes expresse (Tubexpress System)

(\*) **EI** (Energy Intensiveness) c'est le Btu/TM, est une unité standard britannique, qui mesure l'énergie consommée par tonne-mile d'un cargo transporté, selon des circonstances normales (moyennes), pour les pipelines qui transportent des matières liquides (les oléoducs par exemple), la valeur de l'EI diminue lorsque la vitesse du flot le diamètre du pipeline s'augmente, contrairement aux pipelines qui transportent des matières solides (houille) l'EI s'augmente quand la longueur du pipeline se diminue.

Source : Liu Henery, op-cit: p.14 .

- *Amis de l'environnement.* Cela vient principalement de fait que la plus part des pipelines sont construits au sous-sol. Ils ne posent pas de problème écologique comme la pollution de l'air, contrairement aux autres modes de transport routier, et ferroviaire, et ça sans compter les espèces tuées dans les routes et les rails, ainsi que l'embouteillage et le bruit causé par ces derniers moyens de transport. Un pipeline peut polluer la terre et les rivières dans le cas d'une fuite suite à une agression ou une corrosion (externe et interne), cependant les accidents de la route des camions transportant des hydrocarbures, où l'éventuel déraillement d'un train, provoquent la même chose et peut être pire.
- *Plus sécurisés pour l'homme.* C'est spécialement vrai pour les pipelines qui transportent des liquides, et des mélanges liquide-solide, sauf pour les pipelines qui transportent le gaz (gazoduc). Les gazoducs avec la haute pression peuvent provoquer des explosions mortelles pour les humains, ce qui le même risque qu'un accident des camions, ou des trains transportant la même matière. Bref les pipelines est le moyen de transport le plus sûr, et le moins dangereux pour l'homme par rapport aux autres moyens de transports terrestres <sup>(1)</sup>.

1)- lors d'un rapport basé sur des statistiques publiées par le département américain de transportation , durant 12 ans période entre 1988 et 1999, la nombre moyen des morts (blessés) des pipelines par an était 23 (107), y compris les gazoducs 21 (92), et 2 (15) des pipelines qui transportent des matières toxiques. Contrairement au nombre des gens tués (blessés) par les camions sur la même période était de 5162 (133167). [Liu Henery, Pipeline Engineering, CRC Press LLC Lewis Publishers, 2003. Chap 1, p.15].

- *Non affectés par le climat.* Le temps n'affecte pas les pipelines parce que la plus part des pipelines se construisent au-dessous de la terre, ou enroulé par des anticorrosion externe en cas des pipelines suspendus.
- *Haut degré de fonctionnement automatique.* Ceci fait de pipeline, le moins d'intensivité du travail de tous les autres modes de transport <sup>(1)</sup>.
- *Degré de sécurité.* Le transport via les pipelines est la mode le plus sécurisé contre le vol ou les éventuels attaques terroristes, que les autres modes de transports routiers, et ferroviaire. Il est aussi difficile pour un terroriste d'attaquer un pipeline souterrain et causer des graves dommages qu'un camion transportant des hydrocarbures, un pont, ou un centre électrique. En outre, les pipelines sont généralement construits dans des endroits isolés, inaccessibles aux populations sauf les stations de départ et d'arrivée. Même en cas d'une réelle attaque contre un pipeline, le réseau pipeline est généralement doté d'un arsenal des appareils de détection et de surveillance, qui rend facile la réparation et l'établissement de l'état opérationnel du pipeline et en courte durée <sup>(2)</sup>.

### 3.2. Le processus de construction des pipelines (PCP: Pipelines Construction Process)

La construction des pipelines généralement s'enchaîne suivant une progression linéaire des évènements, tel que les chaînes de montage dans les usines, chacune des activités constituant cette séquence se relie et s'inter-dépendent par des contraintes de précédence, et chacune doit être achevée au temps consacré, et ressources affectée pour maintenir la continuité de cette progression. C'est l'exemple de creusement de la tranchée pour la pose d'un pipeline il ne pourrait pas être démarré sans avoir le droit de passage ROW (Right-of-

---

1)- Notons qu'elle a un niveau de vie très bas, une société où le travail nécessite une main-d'œuvre importante, le niveau de vie très élevé aux Etats-Unis est généralement vient de degrés très haut de fonctionnement automatique.

2)- Les gazoducs, ainsi que les aqueducs sont les pipelines qui demandent plus de sécurité que les autres types de pipelines, pour deux raisons, l'une que ces derniers types de pipelines généralement traversent des zones peuplées, et l'autre la nécessité de ces de biens dans la vie quotidiens des citoyens.

Way) et la préparation de ce ROW aussi. De plus, s'il y aurait un retard dans une activité quelconque de ce processus, il pourrait entraîner tout le projet et peut être retardé l'achèvement de tout le projet. Communément les auteurs, et praticiens de domaine donnent le nom de processus, à cette séquence, *Le processus de construction des pipelines* <sup>(1)</sup>.

La procédure impliquée dans le planning, et la construction d'un nouveau pipeline dépend de plusieurs facteurs comprenant la matière transportée (fluide ou solide), le type de pipeline (oléoduc, gazoduc, ou autre), la longueur du pipeline et l'environnement où il sera construit (dans un milieu urbain, isolé, offshore, le climat est-ce qu'il chaud, froide le taux d'humidité.etc.). Cependant, il y a plutôt de similitudes que dissimilitudes dans la construction de différents types de pipelines.

Quelqu'un qui comprend la façon dont il se construit un système d'un certain pipeline il sera très facile pour lui de concevoir la construction des autres types de pipeline <sup>(2)</sup>. Ce qui suit dans cette section est le processus de construction d'un pipeline en acier que ce soit un gazoduc ou oléoduc :

### 3.2.1 Travaux préliminaires

Avant le début de la construction d'un pipeline l'entreprise doit passer d'abord par une étape préalable des études, et de collecte des informations concernant le terrain, le climat. Et via des estimations approximatives, elle doit savoir l'origine et la destination de ce pipeline, des informations techniques nécessaires tel que la matière transportée, et les autre caractéristiques approximativement la longueur et le diamètre, le type de pipeline utilisé. Des informations économiques sur le capital investi, les coûts, et les dépenses prévues, et d'autres considérations pratiques <sup>(3)</sup>.

Ces calculs et estimations approximatives avant le lancement de projet, sont très importants dans la conception d'un pipeline ainsi que l'étude de faisabilité économique de projet.

#### **La sélection de la route.**

---

1 )- Miesner O Thomas and Leffler William L., Oil and Gas Pipelines in Nontechnical Language, Pennwell Corporation, Tulsa, Oklahoma (2006).

2)-Liu Henery, Pipeline EGINEERING, CRC Press LLC Lewis Publishers, 2003. Chap 12 p.333.

3 )- Miesner O Thomas and Leffler William L., op-cit : p. 137.

Parmi les travaux préliminaire l'entreprise devrait aussi déterminer le route, via des études géologiques de sol et topographique de terrain pour avoir des données nécessaire pour la conception du pipeline, et la préparation prochaine de la route, ce qui est indispensable pour l'acquisition de ROW.

### **L'acquisition de ROW.**

Généralement les pipelines se construisent sur des longues distances, et d'une longueur de ROW qui varie entre 15 et 30 m, il arrive parfois que la route sélectionnée se croise avec des propriétés privées des particuliers, ce qui exige la régularisation rapide du problème avec les propriétaires concernés pour faciliter l'obtention de l'agrément de ROW <sup>(1)</sup>.

Dans ce cas l'acquisition de ROW pour la construction d'un pipeline se faite par l'une des deux façons. Soit par un processus volontaire en cas d'entente sur le droit de passage - en négociant l'achat avec les propriétaires privés de terrain traversé, pour la location, ou autres. Soit par un processus involontaire d'expropriation pour cause d'utilité publique en cas de désaccord.

### **Sondage et test de sol, et la collection d'autres données.**

Après l'acquisition du ROW, l'entreprise de construction, commence d'entreprendre les investigations géotechniques nécessaires, et déterminer s'il y a des nappes phréatiques, des rochers, et la collection des autres informations indispensable le long de la route pour le design et la conception du pipeline.

### **3.2.2 Les spreads de la construction des pipelines.**

Les pipelines se construisent via une combinaison des moyens humaines (manager, ingénieurs, et les équipes de travail...etc.), et des moyens matériels (les équipements, matières premières...etc.), ce processus se déroule selon des unités de travail qu'on le donne le nom de *Spreads* <sup>(2)</sup> **Figure 3.2.** Chaque *spread* se déplace le long de la ligne en exécutant les tâches ordonnée, telle une chaîne de construction des usines. Par conséquent une ligne courte comprend un seul *spread*, et une longue peut comprendre plusieurs *spreads*.

La construction des pipelines implique les activités suivantes :

- 
- 1)- l'agrément par l'Etat, ça diffère d'un pays à autre, dans certains pays comme les Etats-Unis par exemple le lancement d'un projet exige non seulement l'agrément de l'Etat fédéral, mais aussi la permission des autres agence comme l'U.S. Department of Transportation, et les organisations environnementales, l'US. Enviremental Protection Agency, et l'U.S. Forestry Service.
  - 2)- Spread : unité de travail qui assure l'ensemble des opérations nécessaires à la pose d'une canalisation. [Moureau.M et Brace.G., Dictionnaire du pétrole et autre source d'énergie, Editions TECHNIP, Paris,2008.]

### 3.2.2.1 La préparation du ROW.

Après le travail préliminaire, la construction commence finalement, en donnant le feu vert aux travailleurs de commencer d'abord la préparation de ROW pour faciliter le déplacement des autres engins sur le long de ROW. Ils utilisent les Bulldozers pour dégager le ROW et pour niveler la terre en retirant les arbres et arbrisseaux gênant le passage, ainsi que la réalisation des bretelles d'accès provisoire sur la route. Généralement les couches arables, doivent se débarrasser de la route en les stockant au-dessous de la route <sup>(1)</sup>.

Les principales tâches de cette activité sont : la clôture, le déblaiement, et le nivellement.

#### **La clôture (Fencing).**

Pendant la préparation du ROW l'équipe de travail doit clôturer la superficie de la route pour s'assurer du non pénétration d'une bête ou autre espèce dans le corridor pendant le travail. En outre, cette clôture détermine bien les espaces qui doivent être surveillée pendant les pauses, à un éventuel risque de vol ou autre. Pendant ce temps les équipes de cette tâche doivent traduire les travaux préliminaires des ingénieurs de la topographie en mettant des jalons et des paramètres dans des endroits précis, aidant pour repérer les grands rochés sous-terrain, et nappes phréatiques...etc.

#### **Déblaiement (Clearing)**

Cette tâche consiste principalement au dégagement total de la route, tous obstacles pouvant gêner le passage des équipements et le déroulement ordinaire des travaux, doivent

---

1)- Miesner O Thomas and Leffler William L., Oil and Gas Pipelines in Nontechnical Language, Pennwell Corporation, Tulsa, Oklahoma (2006).

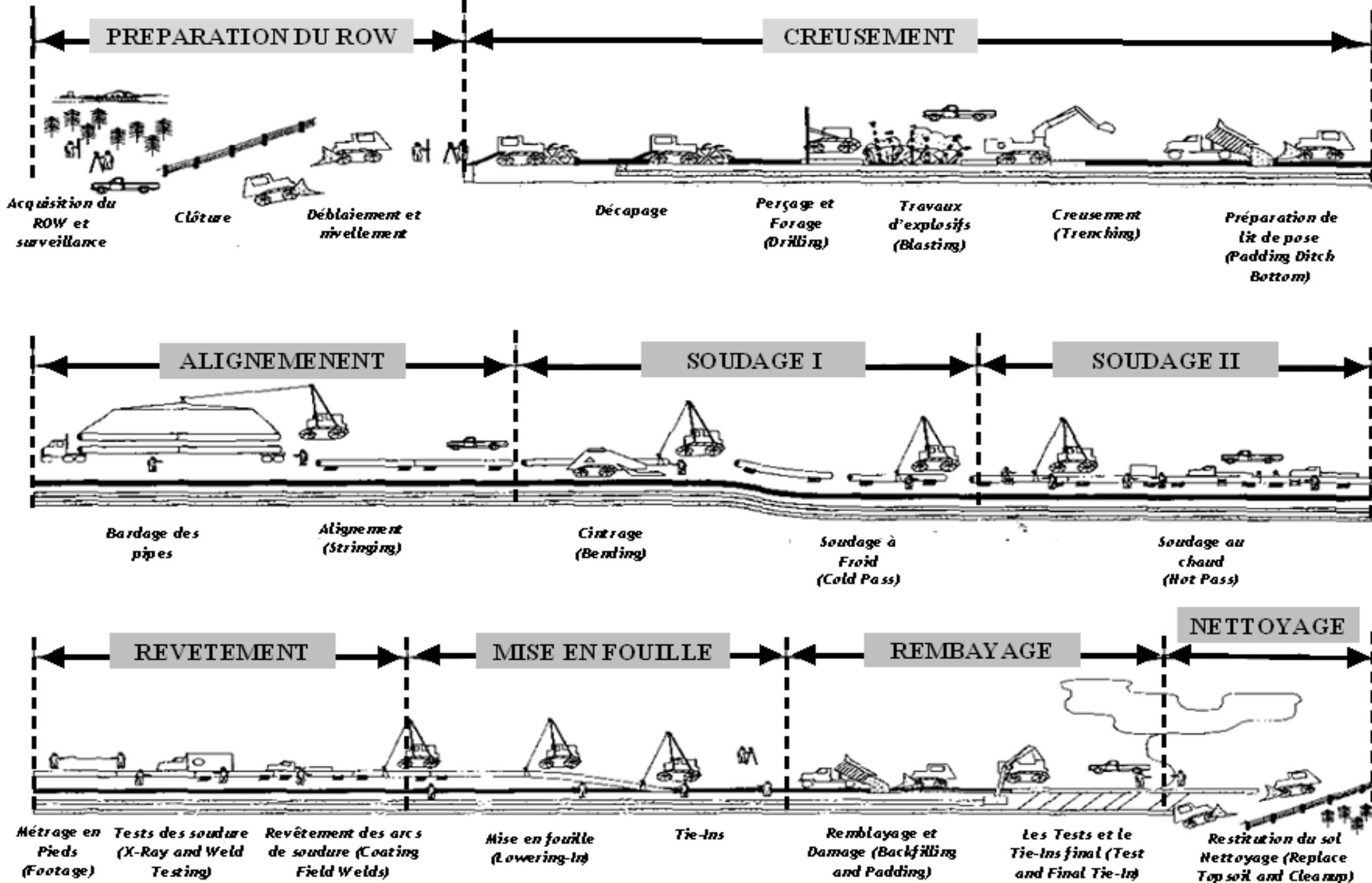


Figure 3.2 Les typiques spreads pour la construction d'un pipeline

Source : Mohitpour, M, Golshan, H, Murray, A, Pipelines Design and Construction: Typical Approach, McGraw-Hill, 1990, p.424.

être débarrassé, pour ce faire les bulldozers débarrassent tous les arbres et arbrisseaux, en les stockant dans des endroits spéciaux réservés pour le stockage.

### **Nivellement (Grading).**

La route sélectionnée pour le ROW par fois passe par des terres accidentées, l'équipe de cette tâche doit s'occuper d'aplanir la terre, et de mettre à niveaux le long de la route.

### **3.2.2.2. Le Creusement (Ditching)**

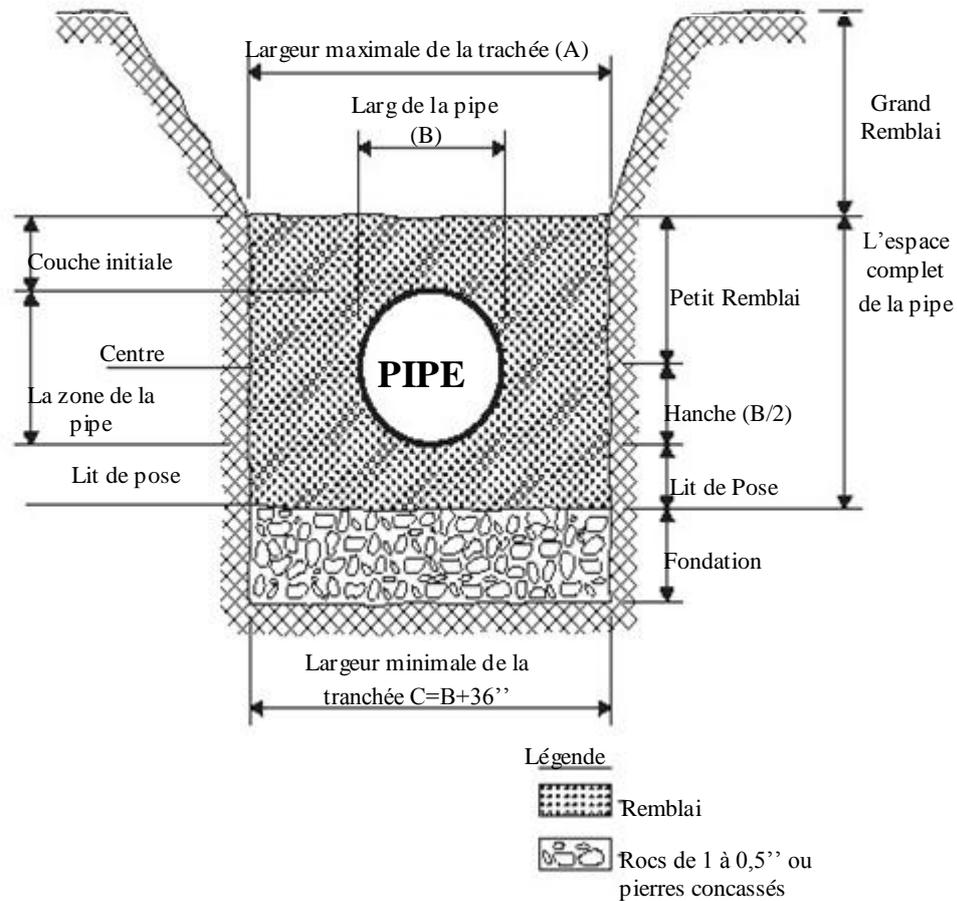
L'entreprise de construction de pipeline examine en biais de son personnel qualifié (ingénieurs et techniciens...) attentivement les caractères essentiels du sol, les endroits traversés par le ROW pour prendre décision après sur la ligne exacte où sera tracée. Habituellement les lignes prennent le centre du ROW avec un peu de décalages. Concernant la ligne exacte de creusement sur le long de ROW, parfois cette étape d'activité de creusement vient après l'activité de l'alignement, mais dans la majorité des cas pour éviter les surcoûts et le retard dans les tâches c'est la ligne de tranchée qui détermine le chemin juste pour aligner après les pipes par le bardage bout à bout.

Après l'achèvement complet de l'étape initiale de la préparation du ROW, l'équipe de creusement peut entamer leur travaux de creuser une tranchée rectangulaire, ou trapézoïde le long de la route, la longueur ainsi que la profondeur de la tranchée dépend de diamètre des pipes **Figure 2.2**. D'une manière générale la pose d'un pipeline nécessite au minimum 1 m de profondeur pour réduire les risques de dommage dans le pipe suite à des activités humaines, agriculture, et le nivellement de terrain. Les principaux problèmes rencontrés pendant le creusement sont les solides rochers, et les nappes phréatiques, pour ces deux problèmes il pourrait les éviter dans la sélection de la route aux travaux préliminaires, cependant l'entreprise peut utiliser d'autres méthodes pour débarrasser les rochers comme l'explosif<sup>(1)</sup>.

---

1 )- : Mohitpour. M, Golshan.H, Murray.A, Pipelines Design and Construction: Typical Approach, McGraw-Hill, 1990. p 442.

Figure 3.3 Les détails de la tranchée (intérieur).



Source : Shashi Menon, Pipeline Planning and Construction Field Manual, Elsevier Inc. New York, 2011, p.349.

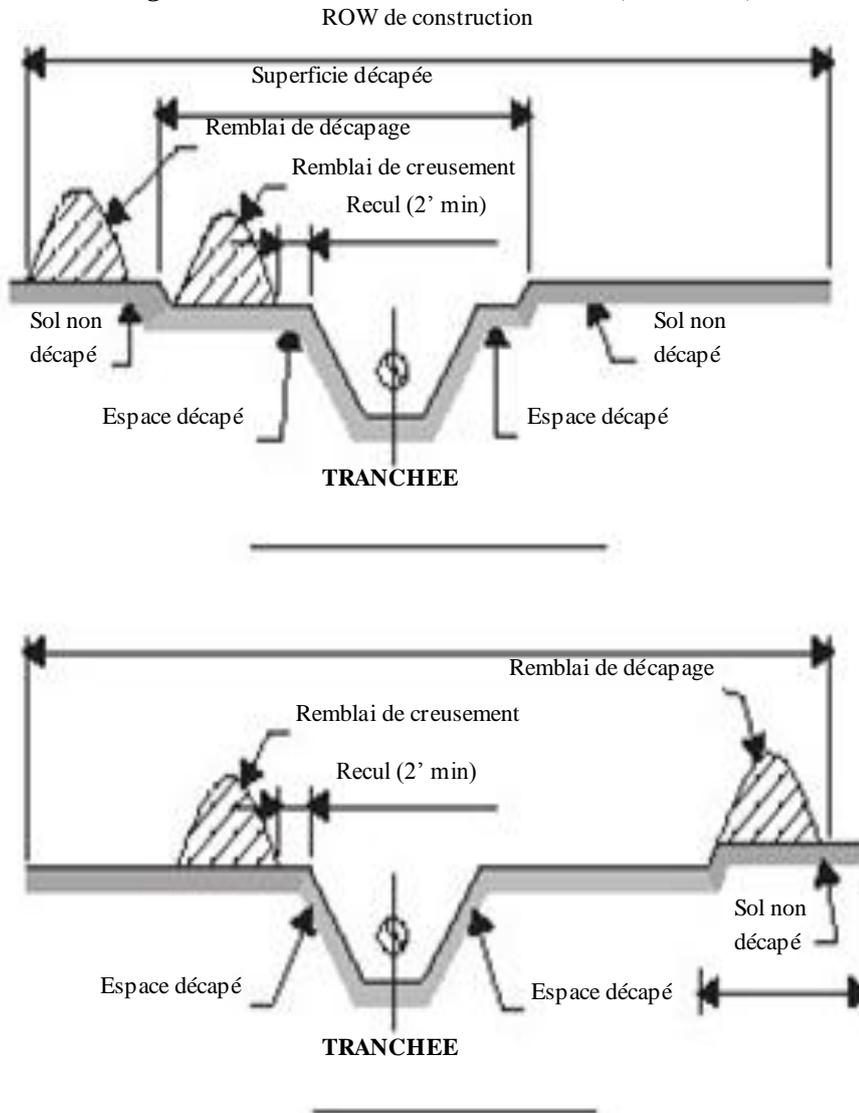
Dans la surface du ROW déterminée précédemment, l'équipe de la présente activité commence les travaux du creusement, en dégagant d'abord toutes les obstacles rencontrés le long du corridor. Ils (les ouvriers) coupent les arbres, arrachent les autres végétations gênantes, et débarrassent les grands rochers qui encombrant le passage et le déroulement normal des travaux.

Dans des temps passés les entreprises de la construction, n'étaient pas restreintes par la fixation préalable du ROW, ce qui avait rendu plus facile l'cheminement des travaux avec plus de flexibilité, après les choses sont évoluées surtout avec l'avènement des associations environnementales qui réclament l'impact sur l'environnement, Les agences gouvernementales qui imposent des règlements, et qui exigent des normes, ainsi que les procès judiciaires des propriétaires privés. Toutes ces restrictions et autres ont obligé les

entreprise de la construction à déterminer auparavant le corridor du ROW pour limités l'impact sur l'environnement, et diminuer les charges et surcoûts provenant des indemnisations aux propriétaires privés.

Bien qu'il y plusieurs méthodes de ségrégation des remblais, la méthode illustré dans la **figure 2.3** est acceptable de point de vue de distribution idéale de superficie du ROW, les remblais sont stockés juste à côté de la tranchée, l'un après l'autre, le plus proche de la tranchée est le remblai fin pour le remblayage initial, et l'autre qui contient des matières solides comme les débris pour le remblayage final. Dans la plus part des cas à l'exception de la surface des travaux, le corridor de la construction doit avoir au minimum 25 ft de largeur avec la ségrégation adéquate du stockage des remblais pendant les opérations.

**Figure 3.4 Les détails de la tranchée (extérieur).**

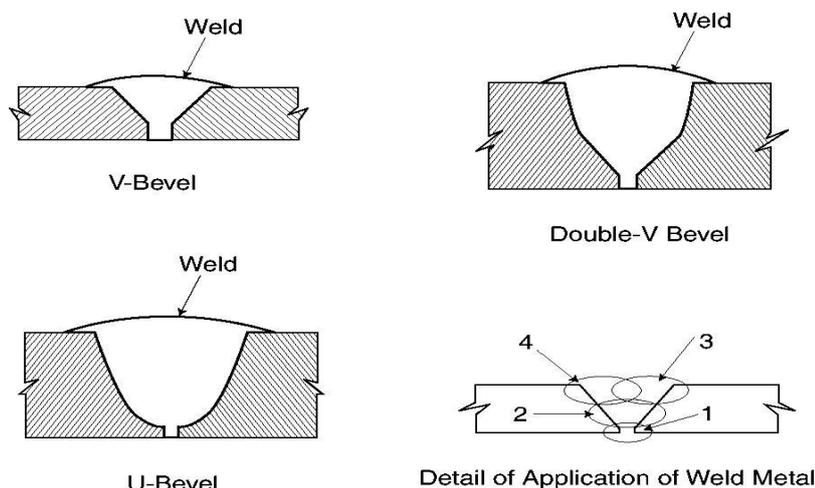


Source: Shashi Menon, Pipeline Planning and Construction Field Manual, Elsevier Inc. New York, 2011,p.344.

### 3.2.2.3 Alignement (Stringing).

Généralement avant le début de cette activités les pipes doivent être déjà prêts dans des dépôts pas loin de corridor, après la fin totale ou partielle des tâches nécessaire pour le creusement de la tranchée, l'activité de l'alignement peut se commencer, elle consiste principalement de bardage des pipes des lieux de stockage dans des dépôts préparés auparavant, jusqu'au corridor, et plus exactement auprès de la ligne déterminée par le long de la tranchée. Une chose très importantes dans cette activité et dans tout le processus de construction est de bien protéger les pipes de s'abîmer surtout les revêtements de protection cathodique.

Les moyens nécessaires pour cette activité sont : les chauffeurs de camion pour le bardage des pipes, des machinistes pour le chargement et le décharge des pipes, et des travailleurs pour le travail manuel nécessaire <sup>(1)</sup>.



### 3.2.2.4. Soudage (Welding).

Le soudage peut se définit ici comme la liaison entre deux ou plusieurs sections (pipes) d'un pipeline par la fusion de la matière (acier, cuivre, aluminium, ou autres matières comme le plastique). Pour les pipes en métal, le soudage demande l'application de la chaleur afin de fondre la matière des joints, le soudage des pipes en cuivre, en laiton, et en plomb se réfèrent souvent à la procédure de *brasure*. Quant au pipes de plastique, le soudage s'effectue par une

1 )- Shashi Menon, Pipeline Planning and Construction Field Manual, Elsevier Inc. New York, 2011,

procédure qu'on l'appelle *Fusion*, avec la possibilité d'utilisation du solvant pour fondre le pipe dans les joint, sans avoir appliqué de la chaleur<sup>(1)</sup>.

Avant la transportation des pipes au champ des travaux, les deux extrémités de chaque pipe doit être biseautés dans les usines spéciales de fabrication. Le Biseautage (Beveling), impliquer le découpage dès les bouts tranchants d'un angle habituel de 30°, pour permettre aux matières de soudure de pénétrer facilement entre les circonférences des deux pipes l'un et l'autre par un 60° de sillon ( V-Bevel) **Figure 2.1** . Comme ça, chaque pipe serait prête pour le ramener au site de construction.

Durant la construction sur le site, le soudage ne débutera que lorsque les deux bouts biseautés de deux pipes attenants soient bien nettoyés manuellement de caresse, rouille, et les autres solvants immédiatement avant le soudage par des brosses métalliques. Après les pipes s'alignent soigneusement d'un léger décalage entre les deux attenants des pipes, ce petit décalage calculé permettre la pénétration de la soudure ultérieurement. Une telle précision dans l'alignement des pipes bouts à bout n'est possible que via des lourds engins spéciaux, ainsi que l'expérience des soudeurs de pipe d'accomplir cette complexe opération, en utilisant les serre-joints des pipes (une largeur de 8 puce de diamètre). Après, c'est avec des point-soudés que l'alignement soit maintenu, avec assez de robustesse. Cette opération initiale d'habitude s'appelle le premier soudage (First Pass) <sup>(2)</sup>.

Le Soudage deuxième s'effectuer après le refroidissement des matières, elle commence par le desserrage d'abord des serre-joints, et puis d'entamer le soudage des joint (Hot Pass).

Le soudage dans le champ de travail, peut être fait, soit manuellement, semi-automatiquement, ou automatiquement.

- *Soudage manuel* : le soudage manuel utilise des tiges (électrodes) et une machine portative qui génère l'électricité nécessaire pour alimentation, la machine produit des arcs électrique pour fondre la pointe de la tige,

---

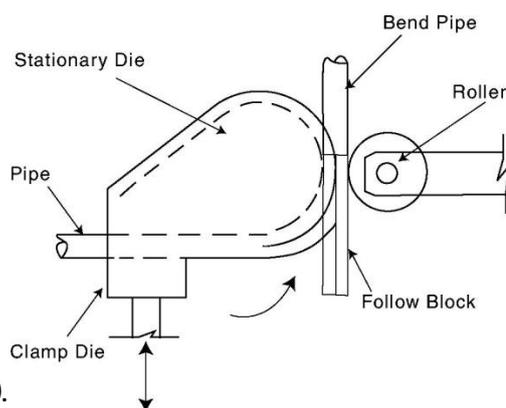
1)- Liu Henery, Pipeline Engineering, CRC Press LLC Lewis Publishers, 2003. Chap 12 p.339.

<sup>2)</sup>- Dans les régions froides, ou bien si les bouts attenants des pipes sont mouillés à cause par exemple de la pluie, la neige, de la rosée et autres, les bouts doivent passer par une étape de préchauffage avant le premier soudage

fusionnant les bouts des pipes tous ensemble, cette tige possède un revêtement spécial qui produit un gaz inerte protégeant les joints de l'oxydation.

- *Soudage semi-automatique* : en plus de l'utilisation des arcs électriques, et des électrodes, en soudage semi-automatique la machine émet des courants continus des gaz inerte, comme le carbone bioxyde, l'hélium, et l'argon qui protègent les joints, et l'empêchent de se réagir avec l'oxygène.
- *Soudage automatique* : semblable au soudage semi-automatique à l'exception au processus complètement automatisé (exigeant une intervention manuelle minimale <sup>(1)</sup>).

L'une des premières tâches à effectuer pendant l'activité de soudage est le cintrage. A la suite d'alignement des pipes le long de la ligne tracée par la tranchée, une sous-équipée débute le cintrage des pipes l'un après l'autre, en prenant soin toujours aux joints et aux revêtements de la protection cathodique.



Cintrage (Bending).

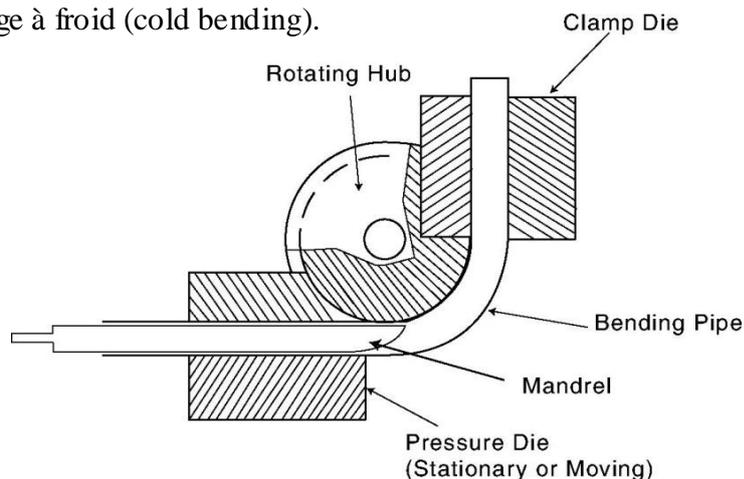
Le pipeline doit avoir un minimum de flexibilité pour qu'il soit adapté aux changements de la direction, de l'élévation dans la tranchée. Pour des tels changements dans la tranchée les pipes doivent être cintrés soit avant de les ramener aux sites des travaux c'est-à-dire dans les usines de fabrications ou sur le site de construction. L'équipe de cette opération de cintrage utilise des équipements pour le cintrage hydrauliques des pipes sur le site. Les ingénieurs spécialistes de l'opération s'occupent d'abord aux calculs avec exactitude, et aux mesures nécessaires pour chaque courbure, et inflexion le long de la tranchée, ensuite les machinistes et suivant les ordres, et les plans des techniciens commencent l'opération de cintrage en utilisant

1 )- il est utilisé dans les usines de fabrication avec une très haute qualité de soudure.

des équipements hydrauliques spécial, l'opération exige aussi le travail manuel des manœuvres <sup>(1)</sup>.

### La méthode de cintrage à froid (Cold Bending Method)

Les pipes en aciers peuvent le plus souvent être cintrés suivant les changements soudains dans la direction et l'élévation de la tranchée, dans la plus part des cas le cintrage des pipes d'acier peuvent convenablement s'effectue sur le champ de travail (en plein air) en utilisant la méthode cintrage à froid (cold bending).



### La méthode de cintrage à chaud (Hot Bending Method)

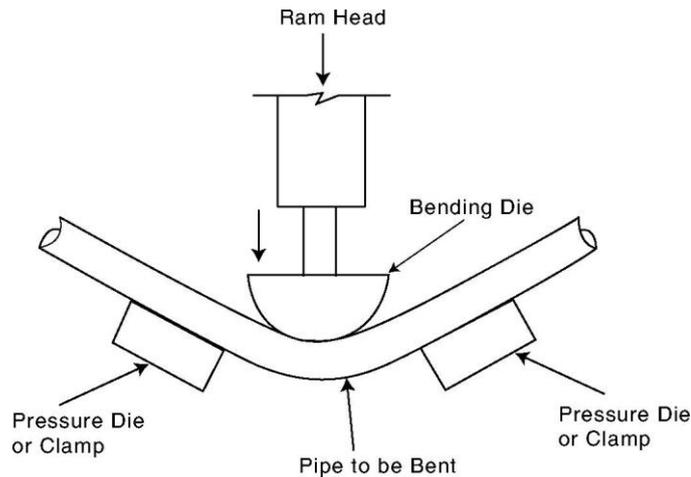
Cette méthode donne des bons résultats que la méthode précédente, mais elle est très encombrante sur les champs de construction (en plein air). Elle est utilisée dans les usines de fabrication.

Quand une pipe s'est cintrée, il n'y a pas que les parties croisées qui se déforment, les circulaires de la forme ovales ainsi que l'épaisseur de pipe aussi se réduisent sous l'effet de l'extension. Ce phénomène s'appelle **l'épaississement** (*Thinning*). Avant chaque tentative de cintrage le calcul de l'ovalité attendu, et l'épaississement de la pipe doit être fait pour établir un tableau, les degrés de l'ovalité, et de l'épaississement ne doivent pas dépasser les limites prédéfinies. Les différentes méthodes de cintrage produisent des degrés différents d'ovalité et d'épaississement :

1. *Le cintrage par la compression (Compression Bending)* : il s'établit en compressant la pipe par rouleau mobile contre et autour d'une matrice (dé) ayant les mêmes radius pour les besoins de cintrage.

1 )- : Mohitpour. M, Golshan.H, Murray. Op -cit: p 433.

2. *Le cintrage par le tirage ( Draw Bending )* : elle est presque comme la méthode précédente sauf qu'en cintrage dans cette méthode on insère un mandrin dans l'autre bout de la pipe pour préserver la forme de la pipe. Cette méthode donne des bons résultats avec moins d'ovalité, et un bon contrôle de l'épaississement par rapport au méthode de cintrage par la compression.



3. *Le cintrage par piston (Ram Bending)* : un piston avec une tête hémisphérique se pousse contre une côte de la pipe fixée sur deux points contiguë, pivotée par deux blocs, rouleaux ou crampons. Pour sa simplicité, la méthode de cintrage par piston est la plus utilisée aux champs des travaux (en plein air), malgré que son degré de précision soit le plus faible par rapport aux autres méthodes. Elle produit des larges ovalité.

L'opération cintrage peut être commencée avant et après le creusement de la tranchée. Dans les terrains à caractère stables le creusement commence normalement avant le cintrage et les autres tâches reliées. Cependant pour éviter les coûts et le retard en cas de creusement dans des terrains à caractère instable, le cintrage, l'revêtement des joints ainsi que le soudage viennent prioritaires de l'excavation de la trachée <sup>(1)</sup>.

1)- Mohitpour. M, Golshan.H, Murray .A, Pipelines Design and Construction: Typical Approach, Mcgraw-Hill, 1990,p.434.

### 3.2.2.5. Revêtement (Coating).

Toutes surfaces soudées sur les pipes nécessitent un nettoyage ainsi qu'un revêtement avant tout test non-destructif. Quoique les pipes arrivent au ROW avec un revêtement résistant contre la corrosion, l'équipe de travail applique un revêtement additionnel sur les soudures et répare tous les défauts d'usine et dommages des travaux pour se prévenir de la corrosion. Le revêtement des pipes est d'une matière spéciale pour les pipelines. Ils empêchent par exemple le contact de l'eau avec l'acier et la matière de la pipe causant de la corrosion. La pipe doit être auparavant nettoyée par des appareils propulseurs qui enlèvent toutes les déchets, et les matières indésirables autour de la circonférence de la pipe <sup>(1)</sup>.

La surface de la pipe doit être libre de toutes matières étrangères, et polluantes, comme :

1. Les résidus du soudage, les ordures, les résidus abrasifs, et tout le reste des bandes
2. Les polluants organiques comme la grasse, et le pétrole
3. Les sels solubles, et tout ce qui réagit avec le fer pendant la corrosion.

### 3.2.2.6. Mise en fouille (Lowering-in).

L'équipe de la mise en fouille, commence l'opération de la pose dès qu'une partie ou toute l'activité de revêtement s'achève, le personnel de cette activité comprend des ingénieurs opérateurs, des ouvriers, et des conducteurs des camions. Les opérateurs lancent les équipements, les ouvriers s'occupent de travail manuel, en déplaçant les cales et les supports, et les autres travaux manuels nécessaire. Les conducteurs conduisent les camions qui tirent les cales, et remorquent les autres engins.

Quand le soudage et le revêtement est terminés, les pipes vont être suspendu près de la tranchée par des engins spéciaux. Ensuite le pipeline va se baisser graduellement dans le fond de la tranchée. Dans le cas des terres rocheuses, il est parfois nécessaire de préparer le lit de pose par des matières fines (Pending Materials) avant la mise en fouille du pipeline, pour préserver le revêtement de la détérioration <sup>(2)</sup>.

---

1)- Shashi Menon, Pipeline Planning and Construction Field Manual, Elsevier Inc. New York, 2011,p.351.

2 )- Les pipes en acier ne nécessitent pas de matière de lit de pose, contrairement aux pipes en fer, et en béton, qui demandent la préparation de lit de pose par des matières appropriées tel que le gravier. [ Liu Henery, Pipeline Engineering, CRC Press LLC Lewis Publishers, 2003. Chap 12 p.335.]

**Lit de pose (Padding).**

Les pipes se mettent en fouille par des *Sidbooms* qui travaillent tous ensemble. D'abord les revêtements des pipes doivent être inspectés encore une fois avant la mise en fouille par des détecteurs spéciaux. Après par des berceaux (qui roule le long où la pipe se baisse) ou des larges ceintures non-abrasives les pipes se mettent en fouille toute en considérant la longueur des pipes, et l'état du terrain. L'équipe de travail s'occupe à contrôler l'équilibre des pipes pendant la mise en fouille en installant des éléments nécessaire pour l'équilibrage <sup>(1)</sup>.

Le lit de pose demande une préparation (Padding) en cas de rencontres à des rochers durs ou autres obstacles. La préparation du lit de pose s'effectue en plaçant au minimum 150 mm du sable ou gravier fin pour protéger les revêtements des pipes de dommage en cas de contact avec des matières tranchantes. Les pipes impliquent aussi l'utilisation des sacs de sable (*Sandbags*) comme des supports.

Dans la préparation de lit de pose, l'équipe de cette activité se tâche aussi à installer des supports latéraux le long de la tranchée pour préserver les pipe de s'ovaliser à cause de la surcharger, et des supports longitudinaux pour restreindre les mouvements. Le personnel de cette opération se compose, d'ingénieurs opérateurs, des conducteurs des engins, et des ouvriers.

**3.2.2.7.Remblayage (Backfilling).**

Le remblayage implique le déplacement du remblai pour le remettre de nouveau dans la trachée, si les conditions sont convenables l'opération s'effectue d'une manière directe. Le remblai ne doit pas être utilisé dans la préparation de lit de pose <sup>(2)</sup>. Dans la plus part des cas le remblai contient des matières nuisibles pour les pipes et leurs revêtements (les grands rochers, les débris...etc.), pour cela l'équipe de travail doit être très prudent dans le remblayage. Généralement pour la protection des revêtements des pipes les praticiens divisent l'activité en deux étapes successives.

- Première étape : le petit remblai, soit par le travail manuel, ou par des machines spéciales. L'équipe de travail, commence dans cette étape de

---

1 )- : Mohitpour. M, Golshan.H, Murray .A, op -cit: p 443.

2)- Shashi Menon, Pipeline Planning and Construction Field Manual, Elsevier Inc. New York, 2011,p.353.

nettoyer le remblai de tous les rochers et les débris pouvant briser le revêtement des pipes pendant le remblayage.

- Deuxième étape : le grand remblai, après l'achèvement de la première étape, les pipes seront suffisamment enterrées, ce qui rend possible le commencement de grand remblai par les remblayeuses (*Backfiller*).

Après, vient le tour du *compactage*. Avec des machines spéciales les conducteurs commencent de damer légèrement le remblai pour le rendre plus compact. Pendant l'accomplissement de ce damage la ligne tracée par le remblayage doit avoir une hauteur entre 0,5 et 1 m de niveau normal de la terre pour éviter l'érosion. Il est important aussi de laisser des ouvertures spéciales pour le drainage naturel de l'eau <sup>(1)</sup>.

Le personnel nécessaire pour le bon déroulement de cette activité sont: les ingénieurs opérateurs, les ouvriers, et les conducteurs des engins. Les ingénieurs opérateurs s'occupent du côté technique et le contrôle de l'activité, les ouvriers effectuent les travaux manuels nécessaires, et les conducteurs transportent le matériel, et remorquent les engins.

#### **3.2.2.8. Nettoyage à Fond (Cleanup).**

Le nettoyage ici comprend la restitution du ROW, de l'espace des travaux, et les tous accès temporaires. C'est la dernière activité de processus qui implique le rétablissement de l'état initial de site tel qu'il était avant le projet. Les importantes tâches de l'activité sont d'abord le nettoyage du site, l'enlèvement des clôtures, l'accumulation des débris et des restes dans des dépôts spéciaux pour les transporter après. Tous les détritrus, les débris et les déchets des travaux (rubans, les tiges, les restes du biseautage...etc.) doivent être débarrassés de la surface, en les accumulant puis les chargeant dans des camions, pour les jeter dans les décharges de décombres.

Souvent les travaux de creusement et de remblayage provoquent un changement dans la surface du ROW qui nécessite l'aplanissement et le nivellement. Concernant le drainage des eaux, l'équipe de travail s'occupe aussi de préparer des ouvertures spéciales pour l'évacuation naturelle des eaux, pour éviter la stagnation des eaux dans des endroits particuliers qui peuvent causer l'érosion et l'affaissement du terrain. Et si le ROW a traversé des terrains agricoles, il est de la charge de l'équipe de le restituer, en utilisant les moyens nécessaires.

---

1)- Mohitpour. M, Golshan.H, Murray.A, Pipelines Design and Construction: Typical Approach, Mcgraw-Hill, 1990,p.445.

Les plaques de signalisation des dangers ou autres indications dans des points sur le long du ROW doivent être érigé, ainsi que la clôture des endroits inaccessibles. L'activité doit immédiatement succéder le remblayage, et la mise en fouille. Le personnel mobilisé sont les ingénieurs opérateurs, les ouvriers, et les conducteurs des engins.

### 3.2. Conclusion

Ce chapitre aborde le processus de construction des pipelines (PCP). Pour ce faire nous avons avancé tout d'abord des généralités sur les pipelines (définitions et types de pipelines ses avantages, les composantes d'un pipeline...etc.). Un processus de construction d'un pipeline est la succession linéaire des activités assurant le bon déroulement des travaux de réalisation d'un pipeline (gazoduc, oléoduc...etc.) selon une échelle temporelle, et sous des contraintes qui porte sur la disponibilité des ressources, et les contraintes temporelles comme les délais. En vue d'exposer les différentes activités constituant ce processus, nous avons les détaillé selon leurs priorité, en commençant par les travaux préliminaire, en passant par le soudage, le revêtement, et la mise en fouille, et en terminant par la dernière activité à savoir le nettoyage des sites de travaux.

---

## CHAPITRE IV

---

### Introduction

Le chapitre précédent sur le processus de construction des pipelines sert ici essentiellement dans deux objectifs principaux, le premier pour introduire d'abord le sujet de domaine de la construction des pipelines, et le seconde pour mieux faire la distinction entre les différentes activités qui composent ce processus, et par conséquent l'estimation approximative des temps opératoire de chacune, eu égard bien sûr des considérations plus pratiques en se référant à des projets comparables réalisés antérieurement.

En s'inspirant de tous ce que nous avons vu dans les deux premiers chapitres sur le management de projet et la théorie d'ordonnement de projet, nous essayons ici de suivre une méthodologie de traitement des données de projet (présenté dans l'annexe B) comme nous l'avons vu dans la partie théorique, après et pour résoudre notre problème central nous utiliserons les techniques d'ordonnement exposées déjà dans le deuxième chapitre mais avant d'introduire tout ça nous préférons d'abord présenter quelques éclaircissements pratiques concernant l'adaptation de ce qu'on appelle les liens de précédences entre les activité.

## 4.1. Les liens de précédences

Dans le chapitre précédent les liens de précedence entre les activités se modélise par défaut de type Fin-Début, c'est-à-dire une activité ne peut commencer que lorsqu'une autre activité précédente soit achevée à cent pour cent. Néanmoins, et d'un point de vue pratique ces liens de précedence entre les activités ne se limitent pas seulement dans ce type de Fin-Début, dans ce que suit nous allons exposer succinctement les autres liens possibles entre les activités.

### 4.1.1. Les types de liens

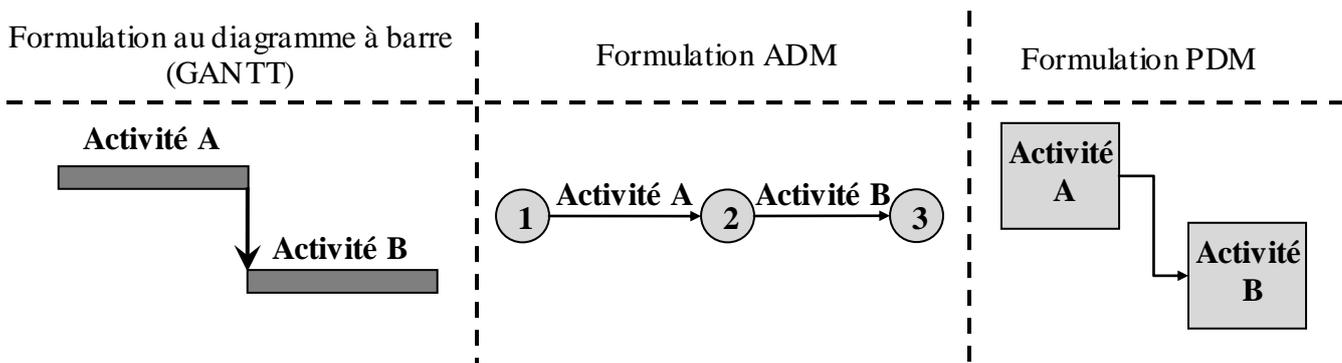
Un lien est une relation entre le début ou la fin d'un antécédent et le début ou la fin d'un successeur. Il existe quatre types de liens (classés du plus fréquent au plus rare) <sup>(1)</sup> :

- **Fin à début** ( de la fin de l'antécédent au début du successeur),
- **Début à Fin** (du début de l'antécédent au début du successeur),
- **Fin à Fin** ( de la fin de l'antécédent à la fin du successeur),
- **Début à fin** (du début de l'antécédent à la fin du successeur).

Ces différents types de liens sont présentés ci-après.

#### *Liens de type « fin à début »*

Les liens de type « fin à début » sont les plus fréquents (environ 80% des liens effectivement rencontrés dans les réseaux). L'exemple précédent de lien de type « fin à début » :

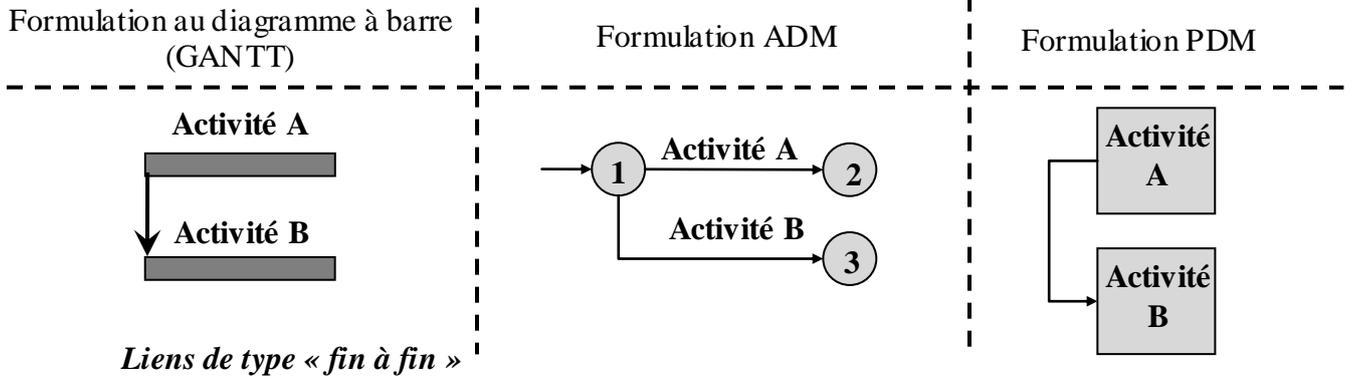


Il signifie : l'activité B (le successeur) peut débuter lorsque l'activité A (l'antécédent) est terminée. Il ne signifie pas que la tâche B doit être débuté lorsque l'activité A est terminée. L'activité B débute à la fin de l'activité A ou plus tard.

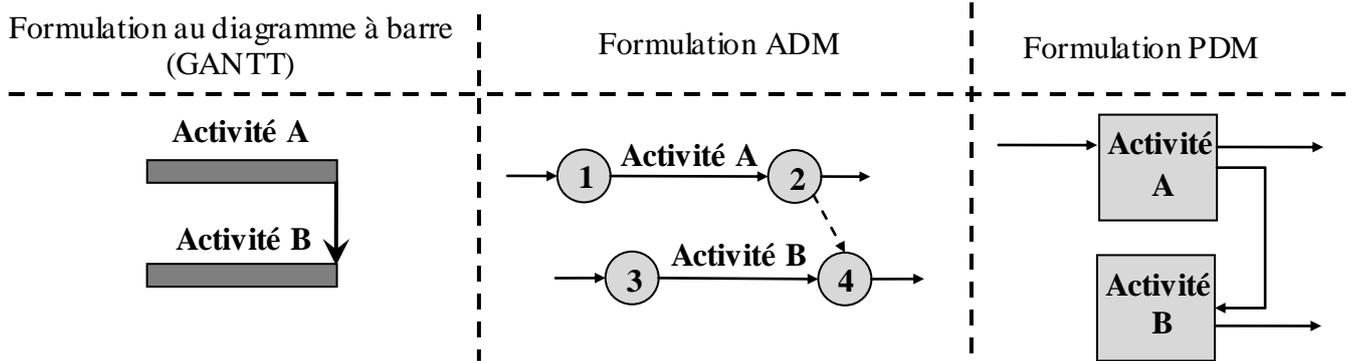
#### *Liens de type « début à début »*

1) - Vallet.G, Technique de planification de projets, 3e Edit, Dunod, Paris, 2003.

Environ 10 % des liens rencontrés dans les réseaux sont des liens de type « début à début ». Il signifie : l'activité B (le successeur) peut débuter lorsque la tâche A (l'antécédent) est commencée. L'activité B débute au début de l'activité A ou plus tard. Dans ce cas l'antécédent et le successeur peuvent se trouver en parallèle.



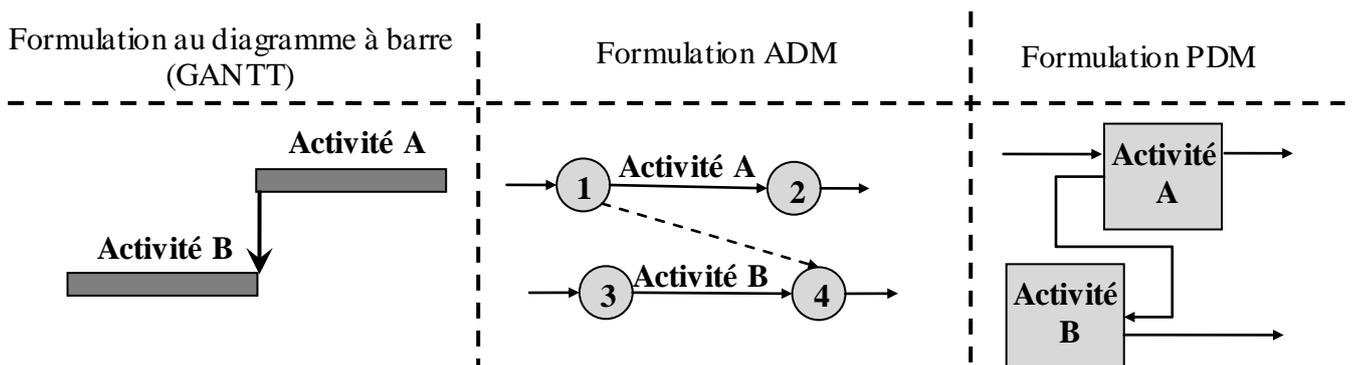
Les liens de type « fin à fin » sont aussi fréquemment rencontrés que les liens de type « début à début ».



Il signifie : l'activité B (le successeur) peut se terminer lorsque l'activité A (l'antécédent) est terminée. L'activité B se termine à la fin de l'activité A ou plus tard. Ici encore, l'antécédent et le successeur peuvent se trouver en parallèle.

**Liens de type « début à fin »**

Les liens de type « début à fin » sont très rares dans les réseaux des projets.



Il signifie : la tâche B (le successeur) peut se terminer lorsque l'activité A (l'antécédent) est commencée. L'activité B se termine au début de l'activité A ou plus tard. Dans ce cas, le successeur peut se trouver chronologiquement avant l'antécédent.

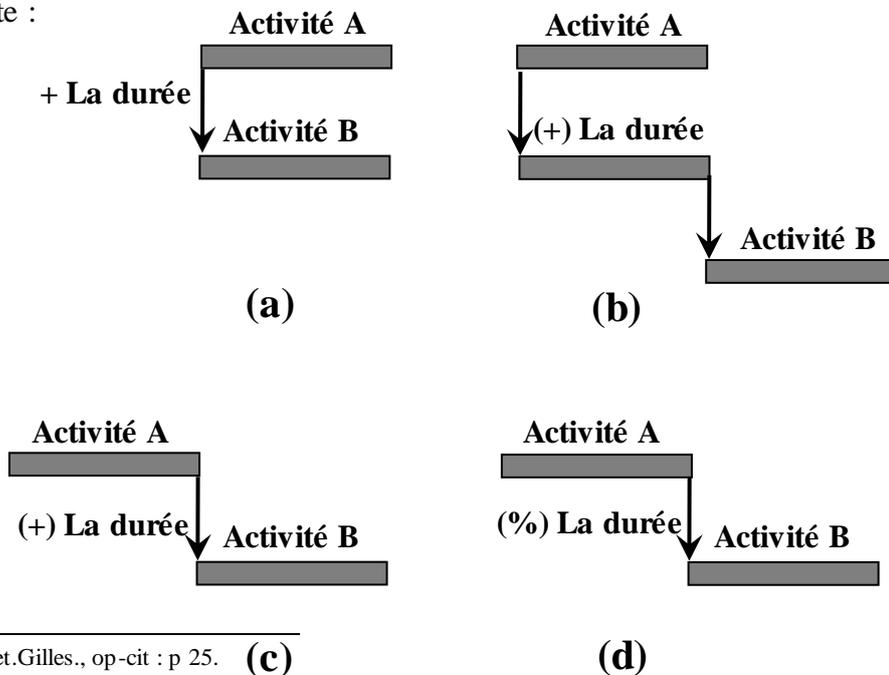
**4.1.2 Les délais**

Un lien est une relation entre deux évènements : le début ou la fin de l'antécédent, et le début ou la fin du successeur. Le lien signifie : l'évènement successeur peut avoir lieu en même temps que l'évènement antécédent ou après (autrement dit, pas avant). Un lien peut également être caractérisé par une valeur (positive ou négative) : le délai du lien.

Le délai indique la durée minimale (en valeur algébrique) qui doit séparer l'évènement successeur de l'évènement antécédent.

Dans l'exemple de lien de type « début à début », l'activité B pouvait débuter dès le début de l'activité A. L'activité B ne peut réellement débuter qu'après un écart du temps après le début de l'activité A. Le lien de type « début à début » doit donc être caractérisé par un délai ce qui se représente comme suit <sup>(1)</sup> :

Ce lien (désormais caractérisé par un délai) se lit ainsi : l'activité B peut débuter une durée après le début de l'activité A, ou après. Le délai permet d'indiquer une période d'attente, et évite de créer une activité fictive intermédiaire, ce qui se traduit de la façon suivante :



1 )- Vallet.Gilles., op-cit : p 25. (c)

Document téléchargé depuis www.pnst.cerist.dz CERIST

Un délai négatif sur un lien permet d'indiquer que l'évènement successeur peut avoir lieu avant l'évènement antécédent. Un délai positif est appelé un *retard* (en anglais un « lag »). Un délai négatif est appelé une *avance* (en anglais un « lead »).

Les délais de liens peuvent être exprimés en unité de temps (jours calendaires, jours ouvrés, semaine, mois, etc.) ou parfois aussi en pourcentage de l'antécédent ; par convention, le pourcentage d'un lien concerne la durée de l'antécédent .*Figure 4. (d)*.

## 4.2. La résolution du problème central

### 4.2.1. Décomposition Structurée (Work Breakdown Structure : WBS)

Avant d'entamer les calculs d'ordonnement nous devons d'abord convertir la liste (**Tableau 4.1**) en tâches à réaliser pour compléter le projet. Pour ceci nous utilisons la décomposition structurée (ou structure de découpage du projet) . Comme nous avons vu déjà dans le deuxième chapitre sur l'ordonnement de projet, une décomposition structurée (WBS) est une décomposition hiérarchique, axée sur les tâches, et les activités du travail. Cette méthode est basée sur le principe de « diviser pour mieux gouverner ».

Dans notre cas le WBS <sup>(1)</sup> divise l'ensemble du projet en plusieurs sous-ensembles, les activités, et chaque activité est divisée en tâches. De haut en bas chaque niveau du projet propose des sous-niveaux, jusqu'à arriver au niveau final, nous avons trois niveaux dans notre cas, le premier représente le nom du projet, après au deuxième les principales activités qui composent le projet, et enfin les différentes tâches dans le niveau final.

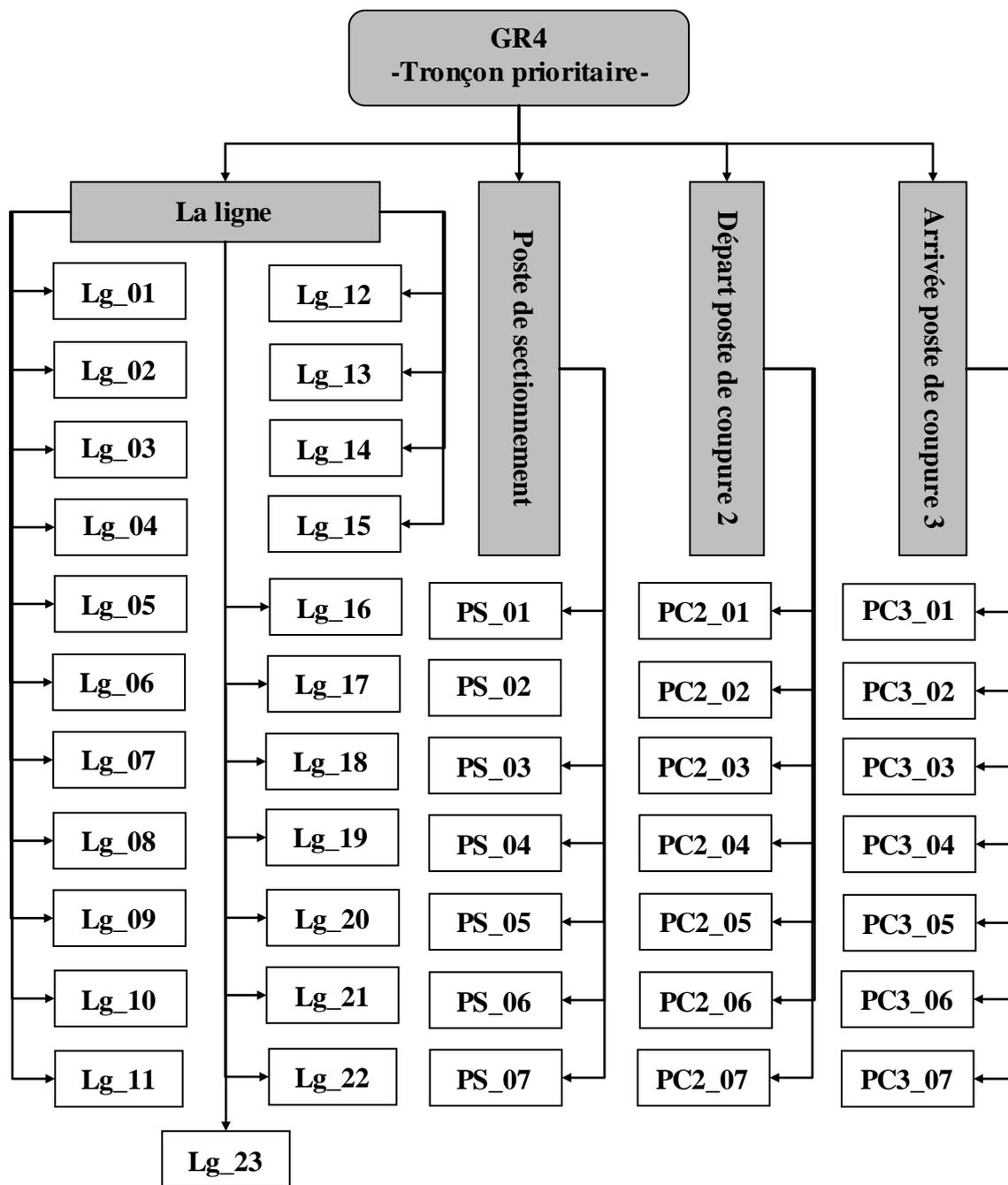
---

<sup>1</sup> ) - L'une des règles les plus importantes du Work Breakdown Structure est appelée la règle des 100%, qui indique que le WBS doit comprendre la totalité du travail défini par le projet, dans notre cas d'étude nous ne nous prenons que le premier lot, à savoir la construction de 223 km reliant les champs pétrolifères de Rhourd Nouss au premier poste de Coupure de Hassi Massaoud .

La ligne		Poste de sectionnement	
<b>Lg_01</b>	Topographie	<b>PS_01</b>	Génie-civil
<b>Lg_02</b>	Ouverture piste	<b>PS_02</b>	Montage
<b>Lg_03</b>	Construction piste	<b>PS_03</b>	instrumentation
<b>Lg_04</b>	Tranchées	<b>PS_04</b>	Système SCADA
<b>Lg_05</b>	Bardage	<b>PS_05</b>	Raccordements
<b>Lg_06</b>	Cintage-Préalignement	<b>PS_06</b>	Essai de performance
<b>Lg_07</b>	Soudage ligne	<b>PS_07</b>	Mise en service
<b>Lg_08</b>	Radiographie	<b>Départ poste de coupure 2</b>	
<b>Lg_09</b>	Enrobage	<b>PC2_01</b>	Génie-civil
<b>Lg_10</b>	Lit de pose	<b>PC2_02</b>	Montage
<b>Lg_11</b>	Mise en fouille	<b>PC2_03</b>	instrumentation
<b>Lg_12</b>	Raccordements	<b>PC2_04</b>	Système SCADA
<b>Lg_13</b>	Protection Cathodique provisoire	<b>PC2_05</b>	Raccordements
<b>Lg_14</b>	Pré-Remblai	<b>PC2_06</b>	Essais de performance
<b>Lg_15</b>	Essai Hydrostatique	<b>PC2_07</b>	Mise en service
<b>Lg_16</b>	Fourreau PEHD	<b>Arrivée poste de coupure 3</b>	
<b>Lg_17</b>	Pré-Remblai fourreaux PEHD	<b>PC3_01</b>	Génie-civil
<b>Lg_18</b>	Essais fourreaux PEHD	<b>PC3_02</b>	Montage
<b>Lg_19</b>	Système SCADA	<b>PC3_03</b>	Instrumentation
<b>Lg_20</b>	Bornage	<b>PC3_04</b>	Système SCADA
<b>Lg_21</b>	Remblai	<b>PC3_05</b>	Raccordements
<b>Lg_22</b>	Mise en service	<b>PC3_06</b>	Essais de performance
<b>Lg_23</b>	Remise en état	<b>PC3_07</b>	Mise en service

**Tableau 4.1 Les différentes activités de tronçon prioritaire**

Figure 4.1 La décomposition structurée (WBS)



Source: Diagramme élaboré par l'étudiant selon les données du projet ( Tronçon prioritaire)

#### 4.2.2. L'établissement des contraintes

Dans la résolution d'un problème central comme le nôtre il y a deux types de contraintes. Des contraintes temporelles quantitatives (les durées des tâches), et des contraintes temporelles qualitatives, c'est-à-dire les liens de précédence entre les tâches. Dans ce qui suit dans ce paragraphe, nous allons établir ces contraintes, mais avant nous préférons présenter quelques détails concernant ces contraintes.

- *Les contraintes temporelles qualitatives (les liens de précédence entre les tâches)* : Ces liens sont établis par la méthode à dire d'expert, guidée par les données historiques, doit être utilisée chaque fois que possible.
- *Les contraintes temporelles quantitative (les durées)* : Par estimation analogique également appelée estimation « Top-down », l'estimation par analogie utilise la durée réelle d'une tâche similaire antérieure comme base d'estimation pour donner la durée d'une tâche à réaliser. Et comme la méthode paramétrique est intégrée dans l'analogique. Cette dernière exige une analyse statistique importante pour vérifier la pertinence des critères.

**Tableau 4.2 Les liens de précédences entre les activités du projet**

**Tableau des activités (Tronçon prioritaire)**

	<b>Description</b>	<b>Durée (semaine)</b>	<b>Prédécesseur</b>
<b>Lg_01</b>	Topographie	9	-
<b>Lg_02</b>	Ouverture piste	8	<b>Lg_01 DD+4 semaines</b>
<b>Lg_03</b>	Construction piste	16	<b>Lg_01 FD</b>
<b>Lg_04</b>	Tranchées	20	<b>Lg_01 FD</b>
<b>Lg_05</b>	Bardage	20	<b>Lg_02 FD</b>
<b>Lg_06</b>	Cintage-Préalignement	18	<b>Lg_05 DD+4 semaines</b>
<b>Lg_07</b>	Soudage ligne	22	<b>Lg_06 DD+4 semaines</b>
<b>Lg_08</b>	Radiographie	21	<b>Lg_07 DD+4 semaines</b>
<b>Lg_09</b>	Enrobage	18	<b>Lg_03 FD</b>
<b>Lg_10</b>	Lit de pose	21	<b>Lg_04 FD</b>
<b>Lg_11</b>	Mise en fouille	9	<b>Lg_10 DD+12 semaines</b>

Lg_12	Raccordements	10	Lg_09 FD
Lg_13	Protection Cathodique provisoire	8	Lg_11 DD+4 semaines
Lg_14	Pré-Remblai	12	Lg_10 DD+12 semaines
Lg_15	Essai Hydrostatique	8	Lg_09 FD
Lg_16	Fourreau PEHD	12	Lg_11 DD+4 semaines
Lg_17	Pré-Remblai fourreaux PEHD	12	Lg_16 DD+4 semaines ; Lg_08 FD ; Lg_13 FD
Lg_18	Essais fourreaux PEHD	8	Lg_17 DD+4 semaines
Lg_19	Système SCADA	8	Lg_17 DD+4 semaines
Lg_20	Bornage	12	Lg_12 FD ; Lg_14 FD ; Lg_15 FD
Lg_21	Remblai	14	Lg_18 FD ; Lg_19 FD
Lg_22	Mise en service	8	Lg_21 DD+4 semaines ; Lg_20 FD ; PS_07 FD ; PC2_07 FD ; PC3_07 FD
Lg_23	Remise en état	14	Lg_21 FF
PS_01	Génie-civil	18	Lg_02 DD+4 semaines
PS_02	Montage	12	PS_01 DD+8 semaines
PS_03	instrumentation	12	PS_01 FD
PS_04	Système SCADA	9	PS_02 FD
PS_05	Raccordements	10	PS_02 FD
PS_06	Essai de performance	8	PS_03 FD ; PS_04 FD ; PS_05 FD
PS_07	Mise en service	8	PS_06 FD
PC2_01	Génie-civil	9	Lg_02 DD+4 semaines
PC2_02	Montage	12	PC2_01 FD
PC2_03	instrumentation	10	PC2_02 FD
PC2_04	Système SCADA	9	PC2_02 FD
PC2_05	Raccordements	8	PC2_03 FD ; PC2_04 FD
PC2_06	Essais de performance	12	PC2_05 DD+4 semaines
PC2_07	Mise en service	8	PC2_06 FD
PC3_01	Génie-civil	9	PC2_01 DD+4 semaines
PC3_02	Montage	12	PC3_01 FD
PC3_03	Instrumentation	10	PC3_02 FD
PC3_04	Système SCADA	9	PC3_02 FD

<b>PC3_05</b>	Raccordements	8	<b>PC3_03 FD ; PC3_04 FD</b>
<b>PC3_06</b>	Essais de performance	12	<b>PC3_05 DD+4 semaines</b>
<b>PC3_07</b>	Mise en service	8	<b>PC3_06 FD</b>

Il est à noter que les liens de précédence dans notre cas d'étude ne se modélisent pas par défaut en lien de type fin-à-début. Dans la pratique on rencontre fréquemment des cas des tâches où ils débutent simultanément, la même chose pour les cas où le début d'une certaine tâche ne peut avoir lieu qu'à après avoir achevé une certaine partie d'une tâche précédente. C'est l'exemple (**Tableau 4.2**) de la tâche **Lg\_02 : Ouverture piste**, il ne commence que lorsqu'on mobilise le minimum de ses ressources nécessaire pour lancer la tâche précédente **Lg\_01 : Topographie**, ce décalage est estimé généralement par un pourcentage.

Pour agencer des tels cas ou une tâche ne commence qu'après l'achèvement d'une partie d'une autre tâche précédente, nous adoptons un lien entre ces tâches de type début-à-début, avec l'ajout bien sûr d'un décalage positif dans ce lien, dans le **Tableau 4.2** la tâche **Lg\_02 : Ouverture piste**, son lien de dépendance est écrit ainsi : **Lg\_01 DD+4 semaines**, et cela se lit par la manière suivante : la tâche **Lg\_02 : topographie et piquetage** ne commence qu'après le début de la tâche **Lg\_01 Topographie**, par un retard de 4 semaines.

Un délai positif est appelé un *retard* (en anglais un « lag »). Un délai négatif est appelé une *avance* (en anglais un « lead »). Dans notre cas nous n'avons que des délais positifs entre certaines tâches <sup>(1)</sup>.

<sup>1</sup> )- La plus part des logiciels aujourd'hui sont muni de cette fonctionnalité des délais dans les liens de précédence entre les tâche, c'est l'exemple de notre logiciel PRIMA VERA lequel nous avons l'utilisé dans les calculs d'ordonnement.

### 4.2.3. La construction des diagrammes

Pour la construction des diagrammes nous allons procéder à des calculs nécessaires en appliquant la méthode *CPM* pour l'ordonnancement au plus tôt, et au plus tard, ce qui nous faciliteront après le calcul des marges, et par conséquent la détermination du chemin critique.

- **Ordonnancement au plus tôt (Forward Pass) :**

L'ordonnancement au plus tôt détermine le début au plus tôt des différentes tâches notées  $S'_i$ <sup>(1)</sup> en partant de nœud de début (figure 4.2 Graphe sous forme de ADM). La tâche **Lg\_01 : Topographie**, peut commencer au plus tôt en 0 puisqu'elle est reliée fictivement au nœud de début  $S'_{lg\_01} = 0$ . La deuxième tâche **Lg\_02 : Ouverture piste**, ne commence pas directement après la fin de la tâche précédente (les prédécesseurs dans le **Tableau 4.2**) mais commence après 4 semaines de début de la tâche **Lg\_01** (soit un délai de 4 semaines), nous formulons :

$$S'_{lg\_02} = S'_{lg\_01} + 4 \text{ semaines} = 4 \text{ semaines}$$

Avec des tâches (via leurs sommets bien entendu) s'interdépendant par des liens de type début-à-début, nous procédons à de pareil calcul au plus tôt, nous avons exclusivement dans les quatre activités constituant le « tronçon prioritaire » :

$$S'_{lg\_06} = S'_{lg\_05} + 4 \text{ semaines} = 16 \text{ semaines}$$

$$S'_{lg\_07} = S'_{lg\_06} + 4 \text{ semaines} = 20 \text{ semaines}$$

$$S'_{lg\_08} = S'_{lg\_07} + 4 \text{ semaines} = 24 \text{ semaines}$$

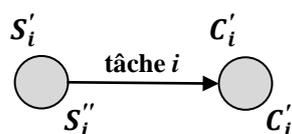
$$S'_{lg\_11} = S'_{lg\_10} + 12 \text{ semaines} = 41 \text{ semaines}$$

$$S'_{lg\_13} = S'_{lg\_11} + 4 \text{ semaines} = 45 \text{ semaines}$$

$$S'_{lg\_14} = S'_{lg\_10} + 12 \text{ semaines} = 41 \text{ semaines}$$

$$S'_{lg\_16} = S'_{lg\_11} + 4 \text{ semaines} = 45 \text{ semaines}$$

<sup>1</sup>- Nous notons par  $S'_i$  le temps de début au plus tôt de la tâche  $i$ , et par  $C'_i$  le temps de fin au plus tôt de cette même tâche. Et nous doublons les primes de ces notation quand il s'agit respectivement de temps de début et de fin au plus tard  $S''_i$  et  $C''_i$ .



$$S'_{lg_{17}} = S'_{lg_{16}} + 4 \text{ semaines} = 49 \text{ semaines}^1$$

$$S'_{lg_{18}} = S'_{lg_{17}} + 4 \text{ semaines} = 57 \text{ semaines}$$

$$S'_{lg_{19}} = S'_{lg_{17}} + 4 \text{ semaines} = 57 \text{ semaines}$$

$$S'_{lg_{22}} = S'_{lg_{21}} + 6 \text{ semaines} = 71 \text{ semaines}$$

Jusqu'ici pour les tâches de l'activité de la *pose de ligne*, quant aux autres activités nous avons pour l'activité de *poste de sectionnement* (notées **PS\_00**):

$$S'_{ps_{01}} = S'_{lg_{02}} + 4 \text{ semaines} = 8 \text{ semaines}$$

$$S'_{ps_{02}} = S'_{ps_{01}} + 8 \text{ semaines} = 16 \text{ semaines}$$

Pour l'activité *Départ poste de coupure 2* (notées **PC2\_00**) :

$$S'_{pc2_{01}} = S'_{lg_{02}} + 4 \text{ semaines} = 8 \text{ semaines}$$

$$S'_{pc2_{06}} = S'_{pc2_{05}} + 4 \text{ semaines} = 43 \text{ semaines}$$

Et pour l'arrivée *poste de coupure 3* (notées **PC3\_00**):

$$S'_{pc3_{01}} = S'_{pc2_{01}} + 4 \text{ semaines} = 12 \text{ semaines}$$

$$S'_{pc3_{06}} = S'_{pc3_{05}} + 4 \text{ semaines} = 47 \text{ semaines}$$

Du reste, la tâche **Lg\_03** : *Construction piste*, débute dès la fin de la tâche **Lg\_01** : *Topographie*, et comme le lien entre ces deux tâches est par défaut de type fin-à-début le temps de fin au plus tôt de la tâche **Lg\_01** : *Topographie*,  $C'_{lg_{01}}$  n'est que le temps de début au plus tôt  $S'_{lg_{03}}$  de la tâche **Lg\_03** : *Construction piste* nous procédons aux calculs au plus tôt comme suit :

$$S'_{lg_{03}} = C'_{lg_{01}} = S'_{lg_{01}} + 9 \text{ semaines} = 9 \text{ semaines}$$

La même chose pour la tâche **Lg\_04** : *Tranchée*, qui débute dès la fin de la tâche **Lg\_01** : *Topographie*, son temps de début au plus  $S'_{lg_{04}}$  égal à :

$$S'_{lg_{04}} = C'_{lg_{01}} = S'_{lg_{01}} + 9 \text{ semaines} = 9 \text{ semaines}$$

La tâche **Lg\_05** : *Bardage*, succède la tâche **Lg\_02** : *Ouverture piste*, par un lien de type fin-à-début que veut dire que son temps de début au plus tôt  $S'_{lg_{05}}$  n'est que le temps de fin au plus tôt de la tâche **Lg\_02** : *Ouverture piste*, donc :

$$S'_{lg_{05}} = C'_{lg_{02}} = S'_{lg_{02}} + 8 \text{ semaines} = 12 \text{ semaines}$$

<sup>1</sup> )- Le temps de début au plus de cette tâche n'est égal qu'au temps de fin au plus tôt de la tâche **Lg\_13** : *Protection cathodique provisoire*, correspond au temps maximal parmi les prédécesseurs, c'est ce que nous allons le constater ultérieurement en calculant au plus tôt dans le cas des tâches simultanées convergentes.

Nous procédons de la même façon aux calculs pour toutes les tâches qui se relient par défaut par le lien de type fin-à-début, nous avons alors :

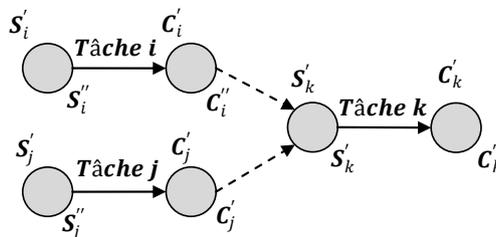
$$\begin{aligned}
 S'_{lg_{09}} &= C'_{lg_{03}} = S'_{lg_{03}} + 16 \text{ semaines} = 25 \text{ semaines} \\
 S'_{lg_{10}} &= C'_{lg_{04}} = S'_{lg_{04}} + 20 \text{ semaines} = 29 \text{ semaines} \\
 S'_{lg_{12}} &= C'_{lg_{09}} = S'_{lg_{09}} + 18 \text{ semaines} = 43 \text{ semaines} \\
 S'_{lg_{15}} &= C'_{lg_{09}} = S'_{lg_{09}} + 18 \text{ semaines} = 43 \text{ semaines} \\
 S'_{lg_{17}} &= C'_{lg_{13}} = S'_{lg_{13}} + 8 \text{ semaines} = 53 \text{ semaines}
 \end{aligned}$$

En calculant au plus tôt nous rencontrons le cas des tâches simultanées convergentes <sup>(1)</sup>, c'est-à-dire un nœuds ou sommet (le début d'une tâches au plus tôt) avec plus d'un prédécesseurs. Dans des tels cas la méthode de CPM <sup>(2)</sup>, stipule qu'on prenne le temps maximal parmi les temps des prédécesseurs, nous avons dans un premier lieu le nœud numéroté n° 24 du temps de début au plus tôt de la tâches **Lg\_17 : Pré-remblai fourreaux PEHD**, nous déterminons le temps au plus tôt par un maximum :

$$\begin{cases}
 S'_{lg_{17}} = \max \{ S'_{lg_{08}} + 21 \text{ sm} ; S'_{lg_{13}} + 8 \text{ sm} ; S'_{lg_{16}} + 4 \text{ sm} \} = 53 \\
 \text{ou} \\
 S'_{lg_{17}} = \max \{ C'_{lg_{08}} ; C'_{lg_{13}} ; S'_{lg_{16}} + 4 \text{ sm} \} = 53
 \end{cases}$$

Nous désignons par la notation *sm* l'unité du temps par semaine. Il est à remarquer que ne nous pouvons pas prendre le temps de fin au plus tôt  $C'_{lg_{16}}$  de la tâche **Lg\_16 : fourreaux PEHD** dans le calcul au plus tôt, car le lien entre cette dernière tâche et son successeur la

<sup>1</sup>)- Le cas des tâches simultanées convergentes est le cas contraire des tâches successives où les tâches viennent l'une après l'autre dans un seul chemin, deux ou plusieurs tâches simultanées convergentes tendent vers un point commun :



<sup>2</sup>)- la même chose pour l'algorithme d'ordonnement au plus tôt (Forward Pass).

tâche **Lg\_17** : *Pré-remblai fourreaux PEHD* est de type : début-à-début plus un délai de 4 semaines, donc nous formulons  $S'_{lg_{16}} + 4 sm$  le temps de début au plus tôt plus le délai.

Nous déterminons la date au plus tôt par le maximum de même avec les sommets à plus de prédécesseur nous avons la tâches **Lg\_20** : *Bornage* :

$$S'_{lg_{20}} = \max \{S'_{lg_{12}} + 10 sm; S'_{lg_{14}} + 12 sm; S'_{lg_{15}} + 8 sm\} = 53$$

ou bien si nous prenons en considération les temps de fin au plus tôt  $C'_i$  :

$$S'_{lg_{20}} = \max \{C'_{lg_{12}} = 53; C'_{lg_{14}} = 53; C'_{lg_{15}} = 51\} = 53$$

Dans le cas des nœuds (sommets) avec des prédécesseurs qui ont des temps de fin au plus tôt équivalents nous prenons cette même valeur dans le calcul. C'est le cas de la tâche **Lg\_21** : *Remblai*, laquelle précédée par deux tâches aux temps de fin au plus tôt équivalents, les tâches, **Lg\_18** : *Essais fourreaux PEHD*, et **Lg\_19** : *Système SCADA*, nous formulons :

$$\left\{ \begin{array}{l} S'_{lg_{21}} = \max \{S'_{lg_{18}} + 8 sm; S'_{lg_{19}} + 8 sm\} = 65 \\ ou \\ S'_{lg_{17}} = \max \{C'_{lg_{18}}; C'_{lg_{19}}\} = 65 \end{array} \right.$$

Pour le point de convergence dans le sommet correspondant au temps de début au plus tôt de la tâches **Lg\_22** : *Mise en service*, nous calculons :

$$\left\{ \begin{array}{l} S'_{lg_{22}} = \max \left\{ \begin{array}{l} S'_{lg_{20}} + 12 sm; S'_{lg_{21}} + 6 sm; S'_{ps_{07}} + 8 sm; \\ S'_{pc2_{07}} + 8 sm; S'_{pc3_{07}} + 8 sm \end{array} \right\} = 71 \\ ou \\ S'_{lg_{22}} = \max \{C'_{lg_{20}}; S'_{lg_{21}} + 6 sm; C'_{ps_{07}}; C'_{pc2_{07}}; C'_{pc3_{07}}\} = 71 \end{array} \right.$$

La même remarque pour le sommet convergent de temps au plus tôt de la tâche **Lg\_17** : *Pré-remblai fourreaux PEHD*, ne nous pouvons pas prendre le temps de fin au plus tôt de la tâches **Lg\_21** : *Remblai*, puisque le lien entre cette dernière et la tâche **Lg\_17** : *Pré-remblai fourreaux PEHD*, est de type : début-à-début avec un délai de 6 semaines.

Quant à l'activité *poste de sectionnement*, nous avons le nœud (sommet) de convergence n° : 49 correspondant au temps au plus tôt de la tâche **PS\_06** : *Essai de performance*, ses prédécesseurs sont les tâches ; **PS\_03** : *instrumentation*, **PS\_04** : *système SCADA* et **PS\_05** : *Raccordement*, entre le temps de fin au plus tôt de ces tâches suivant l'algorithme de la méthode CPM nous procédons aux calculs comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} S'_{ps\_06} = \max \{ S'_{ps\_03} + 12 \text{ sm} ; S'_{ps\_04} + 9 \text{ sm} ; S'_{ps\_05} + 10 \text{ sm} \} = 38 \\ \text{ou} \\ S'_{ps\_06} = \max \{ C'_{ps\_03} ; C'_{ps\_04} ; C'_{ps\_05} \} = 38 \end{array} \right.$$

Dans les deux activités des postes de coupure nous avons respectivement deux nœuds (sommets) de convergence, aux n° : 57 et n° : 67, nous procédons au même calcul au maximum comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} S'_{pc2\_05} = \max \{ S'_{pc2\_03} + 10 \text{ sm} ; S'_{pc2\_04} + 9 \text{ sm} \} = 39 \\ \text{ou} \\ S'_{pc2\_05} = \max \{ C'_{pc2\_03} ; C'_{pc2\_04} \} = 38 \\ \\ S'_{pc3\_05} = \max \{ S'_{pc3\_03} + 10 \text{ sm} ; S'_{pc3\_04} + 9 \text{ sm} \} = 43 \\ \text{ou} \\ S'_{pc3\_05} = \max \{ C'_{pc3\_03} ; C'_{pc3\_04} \} = 43 \end{array} \right.$$

Pour finir le calcul au plus tôt le plus important est de déterminer le temps cumulé à la fin de la dernière tâche du projet (Tronçon prioritaire). En considérant les remarques précédentes sur le calcul au plus tôt ( les différents types de lien, et les points de convergence) et en suivant les différents chemins possibles, nous arrivons à un temps cumulé de 79 semaines <sup>(1)</sup>, ce montant est calculé à partir de dernier point de convergence de la première activité (la pose de la ligne) à savoir le nœud numéroté n° : 38 et cela se fait en ajoutant les temps de la dernière tâches **Lg\_21 : Mise en service**, laquelle a le temps le plus grand (maximum) parmi les temps des tâches prédécesseurs et nous calculons comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} C'_{lg\_22} = S'_{lg\_22} + 8 \text{ sm} = 79 \text{ sm} \\ \text{ou} \\ S'_{lg\_22} = (S'_{lg\_21} + 6 \text{ sm}) + 8 \text{ sm} = 79 \text{ sm} \end{array} \right.$$

<sup>1</sup> )- le temps de fin au plus tôt de la tâche **Lg\_21 : Remblai** est le même que le temps de fin au plus tôt de la tâches **Lg\_22 : Mise en service**, la même chose pour le temps de fin au plus tôt de la tâches **Lg\_23 : Remise en état**, sauf que cette dernière est reliée avec la tâche **Lg\_22 : Mise en service** par un lien de type : fin-à-fin.

- **Ordonnement au plus tard (Backward Pass) :**

En utilisant une procédure duelle, nous commençons le calcul d'ordonnement au plus tard de la manière suivante. Partant du nœud de fin, pour lequel la date de fin au plus tôt coïncide avec la date de fin au plus tard :

$$C'_{lg\_22} = C''_{lg\_22} = 79 \text{ sm}$$

Et le temps de début au plus tard des tâches finales sont obtenues en soustrayant les durées opératoires de chacune, nous avons :

$$S''_{lg\_22} = C''_{lg\_22} - 8 \text{ sm} = 71 \text{ sm}$$

$$S''_{lg\_21} = C''_{lg\_22} - (8 \text{ sm} + 6 \text{ sm}) = 65 \text{ sm}$$

$$C''_{lg\_20} = C''_{lg\_21} - 8 \text{ sm} = 71 \text{ sm}$$

$$S''_{lg\_20} = C''_{lg\_20} - 12 \text{ sm} = 59 \text{ sm}$$

Nous retranchons à la date au plus tard la durée de la dernière tâche. Nous déterminons ainsi la date de fin au plus tard des tâches de *mise en service* des autres activités : **PS\_07**, **PC2\_07** et **PC3\_07**

$$C''_{ps\_07} = C''_{lg\_22} - 8 \text{ sm} = 71 \text{ sm}$$

$$C''_{pc2\_07} = C''_{lg\_22} - 8 \text{ sm} = 71 \text{ sm}$$

$$C''_{pc3\_07} = C''_{lg\_22} - 8 \text{ sm} = 71 \text{ sm}$$

Les tâches **Lg\_17** : *Pré-Remblai fourreaux PEHD*, **Lg\_18** : *Essai fourreaux PEHD*, et **Lg\_19** : *Système SCADA*, qui sont reliées à la tâche **Lg\_21** : *Remblai*, par des liens de type fin-à-début, leurs temps de fin au plus tard de chacune est égal au temps de début au plus tard de cette dernière tâche :

$$C''_{lg\_18} = C''_{lg\_19} = S''_{lg\_21} = 65 \text{ sm}$$

Nous marquons ensuite à rebours les nœuds n°24, 30, 32 et 34 <sup>(1)</sup> :

$$S''_{lg\_18} = S''_{lg\_19} = C''_{lg\_21} - 8 \text{ sm} = 57 \text{ sm}$$

$$S''_{lg\_17} = C''_{lg\_17} - 12 \text{ sm} = 53 \text{ sm}$$

$$C''_{lg\_16} = C''_{lg\_17} - 4 \text{ sm} = 62 \text{ sm}$$

<sup>1</sup>)- la tâche **Lg\_21** : *Remblai*, termine en même temps avec **Lg\_22** : *Remblai*, et **Lg\_23** : *Remblai*, ce qui fait qu'ils ont le même temps de fin au plus tôt, par conséquent, le calcul au plus tard à partir n'importe quel nœuds de ces tâches donne le même résultat.

$$S''_{lg_{16}} = C''_{lg_{16}} - 12 \text{ sm} = 53 \text{ sm}$$

La même chose avec les tâches **Lg\_12** : *Raccordement*, **Lg\_14** : *Pré-remblai* et **Lg\_15** : *Essai hydrostatique* lesquelles reliées par défaut avec la tâche **Lg\_20** : *Bornage* :

$$C''_{lg_{12}} = C''_{lg_{14}} = C''_{lg_{15}} = S''_{lg_{20}} = 59 \text{ sm}$$

Donc nous calculons au plus tard pour ces tâches :

$$S''_{lg_{15}} = C''_{lg_{15}} - 8 \text{ sm} = 51 \text{ sm}$$

$$S''_{lg_{14}} = C''_{lg_{14}} - 12 \text{ sm} = 47 \text{ sm}$$

$$S''_{lg_{12}} = C''_{lg_{12}} - 10 \text{ sm} = 49 \text{ sm}$$

Pareillement pour la tâche **Lg\_13** : *Protection cathodique provisoire* :

$$C''_{lg_{13}} = S''_{lg_{17}} = 53 \text{ sm}$$

$$S''_{lg_{13}} = C''_{lg_{13}} - 8 \text{ sm} = 45 \text{ sm}$$

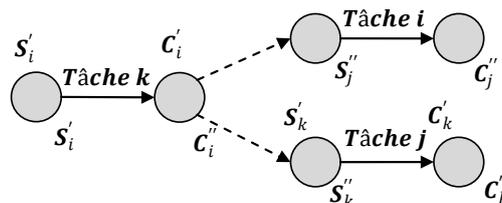
Contrairement au calcul au plus tôt qui prend le temps maximal parmi les temps des tâches simultanées convergentes, l'ordonnancement au plus tard conformément à l'algorithme CPM prend le temps minimal. En parcourant le chemin de calcul au plus tard nous arrivons au nœud n° : 16 où convergent deux tâches simultanées la tâche **Lg\_12** : *Raccordement* et **Lg\_15** : *Essai hydrostatique*, nous procédons au calcul par le minimum comme suit <sup>(1)</sup> :

$$\left\{ \begin{array}{l} C''_{lg_{09}} = \min\{C''_{lg_{12}} - 10 ; C''_{lg_{15}} - 8\} = 49 \\ \text{ou} \\ C''_{lg_{09}} = \min\{S''_{lg_{12}} ; S''_{lg_{15}}\} = 49 \end{array} \right.$$

Et par conséquent le début au plus tard de la tâche **Lg\_09** : *Enrobage*, est à égal à :

$$S''_{lg_{09}} = C''_{lg_{09}} - 18 = 31$$

<sup>1</sup>)- Le calcul par le minimum (voire par le maximum, dans le cas de calcul au plus tôt) se fait lorsqu'on arrive aux points (nœuds) où convergent deux ou plusieurs tâches simultanées. Il est à noter qu'un point de convergence en calculant au plus tôt n'est qu'un point de divergence en calculant au plus tard et vice versa :



Pour les nœuds (sommets) dits de subdivision, c'est-à-dire des nœuds qui ne sont pas numérotés dans le diagramme, le principe de calcul reste le même. Sauf qu'en cas des liens de type début-à-début on calcule au plus tard par rapport au temps de début en prenant en considération le temps de décalage. Nous avons dans un premier lieu les tâches **Lg\_18** : *Essais fourreaux PEHD* et **Lg\_19** : *Système SCADA*, qui convergent tout les deux dans un nœud de subdivision correspondant à 4 semaines après le début de la tâche **Lg\_17** : *Pré-remblai fourreaux PEHD*, nous calculons de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} S''_{lg_{17}} = \min\{S''_{lg_{18}} - 4 \text{ sm} ; S''_{lg_{19}} - 4 \text{ sm}\} = 53 \text{ sm} \\ \text{ou} \\ S''_{lg_{17}} = \min\{C''_{lg_{18}} - (8 \text{ sm} + 4 \text{ sm}) ; C''_{lg_{19}} - (8 \text{ sm} + 4 \text{ sm})\} = 53 \text{ sm} \end{array} \right.$$

Nous avons aussi les deux tâches **Lg\_13** : *Protection cathodique provisoire*, **Lg\_16** : *Fourreau PEHD*, qui convergent simultanément dans un nœud de subdivision correspondant au temps de 4 semaines après le début de la tâches **Lg\_11** : *Mise en fouille*, nous calculons :

$$\left\{ \begin{array}{l} S''_{lg_{10}} = \min\{S''_{lg_{13}} - 4 \text{ sm} ; S''_{lg_{16}} - 4 \text{ sm}\} = 41 \text{ sm} \\ \text{ou} \\ S''_{lg_{10}} = \min\{C''_{lg_{13}} - (8 \text{ sm} + 4 \text{ sm}) ; C''_{lg_{16}} - (12 \text{ sm} + 4 \text{ sm})\} = 41 \text{ sm} \end{array} \right.$$

Nous précédons de la même façon avec les tâches **Lg\_11** : *Mise en fouille* et **Lg\_14** : *Pré-remblai*, qui convergent simultanément dans un nœud de subdivision non numéroté correspondant au 12 semaines après le début de la tâche **Lg\_10** : *Lit de pose* :

$$\left\{ \begin{array}{l} S''_{lg_{11}} = \min\{S''_{lg_{11}} - 12 \text{ sm} ; S''_{lg_{14}} - 12 \text{ sm}\} = 29 \text{ sm} \\ \text{ou} \\ S''_{lg_{11}} = \min\{C''_{lg_{13}} - (9 \text{ sm} + 12 \text{ sm}) ; C''_{lg_{16}} - (12 \text{ sm} + 12 \text{ sm})\} = 29 \text{ sm} \end{array} \right.$$

Après, nous poursuivons les calcul d'ordonnancement au plus tard comme avant, nous avons pour les deux tâches , **Lg\_03** : *construction piste* et **Lg\_04** : *Tranchées* les temps de début et de fin au plus tard respectivement :

$$C''_{lg_{03}} = S''_{lg_{09}} = C''_{lg_{09}} - 18 \text{ sm} = 31 \text{ sm}$$

$$S''_{lg_{03}} = C''_{lg_{03}} - 16 \text{ sm} = 31 \text{ sm}$$

$$C''_{lg_{04}} = S''_{lg_{10}} = C''_{lg_{10}} - 21 \text{ sm} = 29 \text{ sm}$$

$$S''_{lg\_04} = C''_{lg\_04} - 20 \text{ sm} = 9 \text{ sm}$$

Et jusqu'au là ces dernières tâches convergent simultanément dans un nœud commun numéroté n° 2 nous calculons le temps de fin au plus tard de la tâche **Lg\_01** : *Topographie* ainsi :

$$\left\{ \begin{array}{l} C''_{lg\_01} = \min\{C''_{lg\_03} - 16 \text{ sm} ; C''_{lg\_04} - 20 \text{ sm}\} = 9 \text{ sm} \\ \text{ou} \\ C''_{lg\_01} = \min\{S''_{lg\_12} ; S''_{lg\_15}\} = 9 \text{ sm} \end{array} \right.$$

Quand-il s'agit de lien de type début-à-début en ordonnancement au plus tard le calcul s'effectue par rapport au temps de début au plus de la tâches suivante, nous avons le chemin à partir de la tâche **Lg\_08** : *Radiographie* jusqu'à la tâche **Lg\_05** : *Bardage* nous calculons au plus tard :

$$S''_{lg\_08} = C''_{lg\_08} - 21 \text{ sm} = 32 \text{ sm}$$

$$S''_{lg\_07} = S''_{lg\_08} - 4 \text{ sm} = 28 \text{ sm}$$

$$S''_{lg\_06} = S''_{lg\_07} - 4 \text{ sm} = 24 \text{ sm}$$

$$S''_{lg\_05} = S''_{lg\_06} - 4 \text{ sm} = 20 \text{ sm}$$

Après nous arrivons à la tâches **Lg\_02** : *Ouverture piste*, laquelle reliée nous seulement avec cette dernière tâche **Lg\_05** : *Bardage* mais avec des tâches appartenant aux autres activité qui sont **PS\_01** : *Génie civil* et **PC2\_01** : *Génie civil* par un lien de type début-à-début, nous calculons <sup>(1)</sup>:

$$S''_{lg\_02} = \min\{S''_{lg\_05} - 8 \text{ sm} ; S''_{ps\_01} - 4 \text{ sm} ; S''_{lg\_pc2\_01} - 4 \text{ sm}\} = 12 \text{ sm}$$

Pour finir nous calculons le temps de début au plus tard de la tâche **Lg\_01** : *Topographie*, comme suit :

$$S''_{lg\_01} = C''_{lg\_01} - 9 \text{ sm} = 9 \text{ sm}$$

Au sommet (nœud) numéroté dans le diagramme n° 01 les deux temps de début au plus tôt et au plus tard sont égaux  $S'_{lg\_01} = S''_{lg\_01}$ , et comme toutes les tâches du réseau ont été traitées le calcul au plus tard s'arrête.

<sup>1</sup>)- nous procédons au même calcul d'ordonnancement au plus tard avec les tâches des autre activités (Poste de sectionnement, et les postes de coupure). Et nous arrivons à un temps de début au plus tard minimal de 12 semaines.

• Les marges et le chemin critique

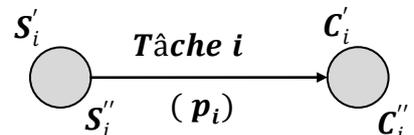
Les calculs au plus tôt et au plus tard aboutissent à une étape cruciale laquelle consiste à en déduire des marges utiles pour déterminer l'ensemble des tâches qui sont critiques (qui ne permet aucun retard dans l'exécution) et les tâches non critiques qui possèdent des marges de liberté. Dans ce qui suit nous allons à partir de ce que nous avons déjà calculé en ordonnancement au plus tôt et au plus tard, calculer les marges des différentes tâches, puis nous déterminerons l'ensemble des tâches constituant le chemin critique.

D'abord en se référant aux définitions concernant les marges dans le deuxième chapitre nous allons appliquer les mêmes méthodes présentées pour calculer les marges (marge totale, et marge libre. Par définition une marge totale est le nombre de jours (semaines) dont la tâche peut être décalée sans décaler la fin de projet. A l'intérieur de cette même marge, la marge libre est définie comme le nombre de jours (unité du temps) dont la tâche peut être décalée sans n'en décaler aucune autre. La marge libre donc, est inférieure ou égale à sa marge totale.

La marge totale représente le délai maximal de mise en exécution d'une tâche, par définition elle égale :

(La marge totale) :  $TF_i = C''_i - S'_i - p_i$

(La marge libre) :  $FF_i = C'_i - S'_i - p_i$



En appliquant ces dernières formules sur les résultats obtenus dans les calculs au plus tôt et au plus tard nous déduisons :

▪ Activité « pose de la ligne »

- Les marges totales :

$$TF_{lg\_01} = C''_{lg\_01} - S'_{lg\_01} - p_{lg\_01} = 9 - 0 - 9 = 0 ;$$

$$TF_{lg\_03} = C''_{lg\_03} - S'_{lg\_03} - p_{lg\_03} = 31 - 9 - 16 = 6 ;$$

$$TF_{lg\_05} = C''_{lg\_05} - S'_{lg\_05} - p_{lg\_05} = 40 - 12 - 20 = 8 ;$$

$$TF_{lg\_07} = C''_{lg\_07} - S'_{lg\_07} - p_{lg\_07} = 50 - 20 - 22 = 8 ;$$

$$TF_{lg\_09} = C''_{lg\_09} - S'_{lg\_09} - p_{lg\_09} = 49 - 25 - 18 = 6 ;$$

$$TF_{lg\_02} = C''_{lg\_02} - S'_{lg\_02} - p_{lg\_02} = 16 - 4 - 8 = 12 ;$$

$$TF_{lg\_04} = C''_{lg\_04} - S'_{lg\_04} - p_{lg\_04} = 29 - 9 - 20 = 0 ;$$

$$TF_{lg\_06} = C''_{lg\_06} - S'_{lg\_06} - p_{lg\_06} = 42 - 16 - 18 = 8 ;$$

$$TF_{lg\_08} = C''_{lg\_08} - S'_{lg\_08} - p_{lg\_08} = 53 - 24 - 21 = 8 ;$$

$$TF_{lg\_10} = C''_{lg\_10} - S'_{lg\_10} - p_{lg\_10} = 50 - 29 - 21 = 0 ;$$

$$TF_{lg\_11} = C'_{lg\_11} - S'_{lg\_11} - p_{lg\_11} \\ = 50 - 41 - 9 = 0 ;$$

$$TF_{lg\_13} = C'_{lg\_13} - S'_{lg\_13} - p_{lg\_13} \\ = 53 - 45 - 8 = 0 ;$$

$$TF_{lg\_15} = C'_{lg\_15} - S'_{lg\_15} - p_{lg\_15} \\ = 59 - 43 - 8 = 8 ;$$

$$TF_{lg\_17} = C'_{lg\_17} - S'_{lg\_17} - p_{lg\_17} \\ = 65 - 53 - 12 = 0 ;$$

$$TF_{lg\_19} = C'_{lg\_19} - S'_{lg\_19} - p_{lg\_19} \\ = 65 - 57 - 8 = 0 ;$$

$$TF_{lg\_21} = C'_{lg\_21} - S'_{lg\_21} - p_{lg\_21} \\ = 79 - 65 - 14 = 0 ;$$

$$TF_{lg\_23} = C'_{lg\_23} - S'_{lg\_23} - p_{lg\_23} \\ = 79 - 65 - 14 = 0 ;$$

- Les marges libres :

$$FF_{lg\_01} = C'_{lg\_01} - S'_{lg\_01} - p_{lg\_01} \\ = 9 - 0 - 9 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_03} = C'_{lg\_03} - S'_{lg\_03} - p_{lg\_03} \\ = 25 - 9 - 16 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_05} = C'_{lg\_05} - S'_{lg\_05} - p_{lg\_05} \\ = 32 - 12 - 20 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_07} = C'_{lg\_07} - S'_{lg\_07} - p_{lg\_07} \\ = 42 - 20 - 22 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_09} = C'_{lg\_09} - S'_{lg\_09} - p_{lg\_09} \\ = 43 - 25 - 18 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_11} = C'_{lg\_11} - S'_{lg\_11} - p_{lg\_11} \\ = 50 - 41 - 9 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_13} = C'_{lg\_13} - S'_{lg\_13} - p_{lg\_13} \\ = 53 - 45 - 8 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_15} = C'_{lg\_15} - S'_{lg\_15} - p_{lg\_15} \\ = 51 - 43 - 8 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_17} = C'_{lg\_17} - S'_{lg\_17} - p_{lg\_17} \\ = 65 - 53 - 12 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_19} = C'_{lg\_19} - S'_{lg\_19} - p_{lg\_19} \\ = 65 - 57 - 8 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_21} = C'_{lg\_21} - S'_{lg\_21} - p_{lg\_21} \\ = 79 - 65 - 14 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_23} = C'_{lg\_23} - S'_{lg\_23} - p_{lg\_23} \\ = 79 - 65 - 14 = 0 ;$$

$$TF_{lg\_12} = C'_{lg\_12} - S'_{lg\_12} - p_{lg\_12} \\ = 59 - 43 - 10 = 6 ;$$

$$TF_{lg\_01} = C'_{lg\_14} - S'_{lg\_14} - p_{lg\_14} \\ = 59 - 41 - 12 = 6 ;$$

$$TF_{lg\_16} = C'_{lg\_16} - S'_{lg\_16} - p_{lg\_16} \\ = 61 - 45 - 12 = 4 ;$$

$$TF_{lg\_18} = C'_{lg\_18} - S'_{lg\_18} - p_{lg\_18} \\ = 65 - 57 - 8 = 0 ;$$

$$TF_{lg\_20} = C'_{lg\_20} - S'_{lg\_20} - p_{lg\_20} \\ = 71 - 53 - 12 = 6 ;$$

$$TF_{lg\_22} = C'_{lg\_22} - S'_{lg\_22} - p_{lg\_22} \\ = 79 - 71 - 8 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_02} = C'_{lg\_02} - S'_{lg\_02} - p_{lg\_02} \\ = 12 - 4 - 8 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_04} = C'_{lg\_04} - S'_{lg\_04} - p_{lg\_04} \\ = 29 - 9 - 20 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_06} = C'_{lg\_06} - S'_{lg\_06} - p_{lg\_06} \\ = 34 - 16 - 18 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_08} = C'_{lg\_08} - S'_{lg\_08} - p_{lg\_08} \\ = 45 - 24 - 21 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_10} = C'_{lg\_10} - S'_{lg\_10} - p_{lg\_10} \\ = 50 - 29 - 21 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_12} = C'_{lg\_12} - S'_{lg\_12} - p_{lg\_12} \\ = 53 - 43 - 10 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_01} = C'_{lg\_14} - S'_{lg\_14} - p_{lg\_14} \\ = 53 - 41 - 12 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_16} = C'_{lg\_16} - S'_{lg\_16} - p_{lg\_16} \\ = 57 - 45 - 12 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_18} = C'_{lg\_18} - S'_{lg\_18} - p_{lg\_18} \\ = 65 - 57 - 8 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_20} = C'_{lg\_20} - S'_{lg\_20} - p_{lg\_20} \\ = 65 - 53 - 12 = 0 ;$$

$$FF_{lg\_22} = C'_{lg\_22} - S'_{lg\_22} - p_{lg\_22} \\ = 79 - 71 - 8 = 0 ;$$

▪ Activité « postes de sectionnement »

- Les marges totales :

$$TF_{ps\_01} = C''_{ps\_01} - S'_{ps\_01} - p_{ps\_01} \\ = 43 - 8 - 18 = 17 ;$$

$$TF_{ps\_03} = C''_{ps\_03} - S'_{ps\_03} - p_{ps\_03} \\ = 55 - 26 - 12 = 17 ;$$

$$TF_{ps\_05} = C''_{ps\_05} - S'_{ps\_05} - p_{ps\_05} \\ = 55 - 28 - 10 = 17 ;$$

$$TF_{ps\_07} = C''_{ps\_07} - S'_{ps\_07} - p_{ps\_07} \\ = 71 - 46 - 8 = 17 ;$$

$$TF_{ps\_02} = C''_{ps\_02} - S'_{ps\_02} - p_{ps\_02} \\ = 45 - 16 - 12 = 17 ;$$

$$TF_{ps\_04} = C''_{ps\_04} - S'_{ps\_04} - p_{ps\_04} \\ = 55 - 28 - 9 = 18 ;$$

$$TF_{ps\_06} = C''_{ps\_06} - S'_{ps\_06} - p_{ps\_06} \\ = 63 - 38 - 8 = 17 ;$$

- Les marges libres :

$$FF_{ps\_01} = C'_{ps\_01} - S'_{ps\_01} - p_{ps\_01} \\ = 26 - 8 - 18 = 0 ;$$

$$FF_{ps\_03} = C'_{ps\_03} - S'_{ps\_03} - p_{ps\_03} \\ = 38 - 26 - 12 = 0 ;$$

$$FF_{ps\_05} = C'_{ps\_05} - S'_{ps\_05} - p_{ps\_05} \\ = 38 - 28 - 10 = 0 ;$$

$$FF_{ps\_07} = C'_{ps\_07} - S'_{ps\_07} - p_{ps\_07} \\ = 54 - 46 - 8 = 0 ;$$

$$FF_{ps\_02} = C'_{ps\_02} - S'_{ps\_02} - p_{ps\_02} \\ = 28 - 16 - 12 = 00 ;$$

$$FF_{ps\_04} = C'_{ps\_04} - S'_{ps\_04} - p_{ps\_04} \\ = 37 - 28 - 9 = 0 ;$$

$$FF_{ps\_06} = C'_{ps\_06} - S'_{ps\_06} - p_{ps\_06} \\ = 46 - 38 - 8 = 0 ;$$

▪ Activité « Départ poste de coupure 2 »

- Les marges totales :

$$TF_{pc2\_01} = C''_{pc2\_01} - S'_{pc2\_01} - p_{pc2\_01} \\ = 21 - 8 - 9 = 4 ;$$

$$TF_{pc2\_03} = C''_{pc2\_03} - S'_{pc2\_03} - p_{pc2\_03} \\ = 47 - 29 - 10 = 8 ;$$

$$TF_{pc2\_05} = C''_{pc2\_05} - S'_{pc2\_05} - p_{pc2\_05} \\ = 55 - 39 - 8 = 8 ;$$

$$TF_{pc2\_07} = C''_{pc2\_07} - S'_{pc2\_07} - p_{pc2\_07} \\ = 71 - 55 - 8 = 8 ;$$

$$TF_{pc2\_02} = C''_{pc2\_02} - S'_{pc2\_02} - p_{pc2\_02} \\ = 37 - 17 - 12 = 8 ;$$

$$TF_{pc2\_04} = C''_{pc2\_04} - S'_{pc2\_04} - p_{pc2\_04} \\ = 47 - 29 - 9 = 9 ;$$

$$TF_{pc2\_06} = C''_{pc2\_06} - S'_{pc2\_06} - p_{pc2\_06} \\ = 63 - 43 - 12 = 8 ;$$

- Les marges libres :

$$FF_{pc2\_01} = C'_{pc2\_01} - S'_{pc2\_01} - p_{pc2\_01} \\ = 17 - 8 - 9 = 0 ;$$

$$FF_{pc2\_03} = C'_{pc2\_03} - S'_{pc2\_03} - p_{pc2\_03} \\ = 39 - 29 - 10 = 10 ;$$

$$FF_{pc2\_05} = C'_{pc2\_05} - S'_{pc2\_05} - p_{pc2\_05}$$

$$FF_{pc2\_02} = C'_{pc2\_02} - S'_{pc2\_02} - p_{pc2\_02} \\ = 29 - 17 - 12 = 0 ;$$

$$FF_{pc2\_04} = C'_{pc2\_04} - S'_{pc2\_04} - p_{pc2\_04} \\ = 38 - 29 - 9 = 0 ;$$

$$FF_{pc2\_06} = C'_{pc2\_06} - S'_{pc2\_06} - p_{pc2\_06}$$

$$\begin{aligned}
 &= 47 - 39 - 8 = 0 ; \\
 FF_{pc2_07} &= C'_{pc2_07} - S'_{pc2_07} - p_{pc2_07} \\
 &= 63 - 55 - 8 = 0 ;
 \end{aligned}$$

$$= 55 - 43 - 12 = 0 ;$$

▪ **Activité « Arrivée poste de coupure 3 »**

- **Les marges totales :**

$$\begin{aligned}
 TF_{pc3_01} &= C''_{pc3_01} - S'_{pc3_01} - p_{pc3_01} \\
 &= 25 - 12 - 9 = 4 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 TF_{pc3_02} &= C''_{pc3_02} - S'_{pc3_02} - p_{pc3_02} \\
 &= 37 - 21 - 12 = 4 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 TF_{pc3_03} &= C''_{pc3_03} - S'_{pc3_03} - p_{pc3_03} \\
 &= 47 - 33 - 10 = 4 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 TF_{pc3_04} &= C''_{pc3_04} - S'_{pc3_04} - p_{pc3_04} \\
 &= 47 - 33 - 9 = 5 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 TF_{pc3_05} &= C''_{pc3_05} - S'_{pc3_05} - p_{pc3_05} \\
 &= 55 - 43 - 8 = 4 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 TF_{pc3_06} &= C''_{pc3_06} - S'_{pc3_06} - p_{pc3_06} \\
 &= 63 - 47 - 12 = 4 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 TF_{pc3_07} &= C''_{pc3_07} - S'_{pc3_07} - p_{pc3_07} \\
 &= 71 - 59 - 8 = 4 ;
 \end{aligned}$$

- **Les marges libres :**

$$\begin{aligned}
 FF_{pc3_01} &= C'_{pc3_01} - S'_{pc3_01} - p_{pc3_01} \\
 &= 21 - 12 - 9 = 0 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 FF_{pc3_02} &= C'_{pc3_02} - S'_{pc3_02} - p_{pc3_02} \\
 &= 33 - 21 - 12 = 00 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 FF_{pc3_03} &= C'_{pc3_03} - S'_{pc3_03} - p_{pc3_03} \\
 &= 43 - 33 - 10 = 0 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 FF_{pc3_04} &= C'_{pc3_04} - S'_{pc3_04} - p_{pc3_04} \\
 &= 42 - 33 - 9 = 0 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 FF_{pc3_05} &= C'_{pc3_05} - S'_{pc3_05} - p_{pc3_05} \\
 &= 51 - 43 - 8 = 0 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 FF_{pc3_06} &= C'_{pc3_06} - S'_{pc3_06} - p_{pc3_06} \\
 &= 59 - 47 - 12 = 0 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 FF_{pc3_07} &= C'_{pc3_07} - S'_{pc3_07} - p_{pc3_07} \\
 &= 67 - 59 - 8 = 0 ;
 \end{aligned}$$

• **Chemin critique**

Finalement, une tâche critique est une tâche à marge nulle. Un *chemin critique* d'un point de vue pratique est défini comme l'ensemble (et non la succession) des tâches dont la marge est nulle <sup>(1)</sup>. Dans notre étude, le chemin critique englobe l'ensemble des tâches suivantes :

<sup>1)</sup>)- Vallet. G, Techniques de planification de projets, 3e Edit, Dunod, Paris, 2003.

**Lg\_01** : Topographie ; **Lg\_04** : Tranchée ; **Lg\_10** : Lit de pose ; **Lg\_11** : Mise en fouille ; **Lg\_13** : Protection cathodique provisoire ; **Lg\_17** : Pré-remblai fourreaux PEHD ; **Lg\_18** : Essai fourreaux PEHD ; **Lg\_19** : Système SCADA ; **Lg\_21** : Remblai ; **Lg\_22** : Mise en service ; **Lg\_23** : Remise en état. A différents instants y a des tâches critiques ont lieu en parallèle.

**Figure 4.2 Graphe ADM**

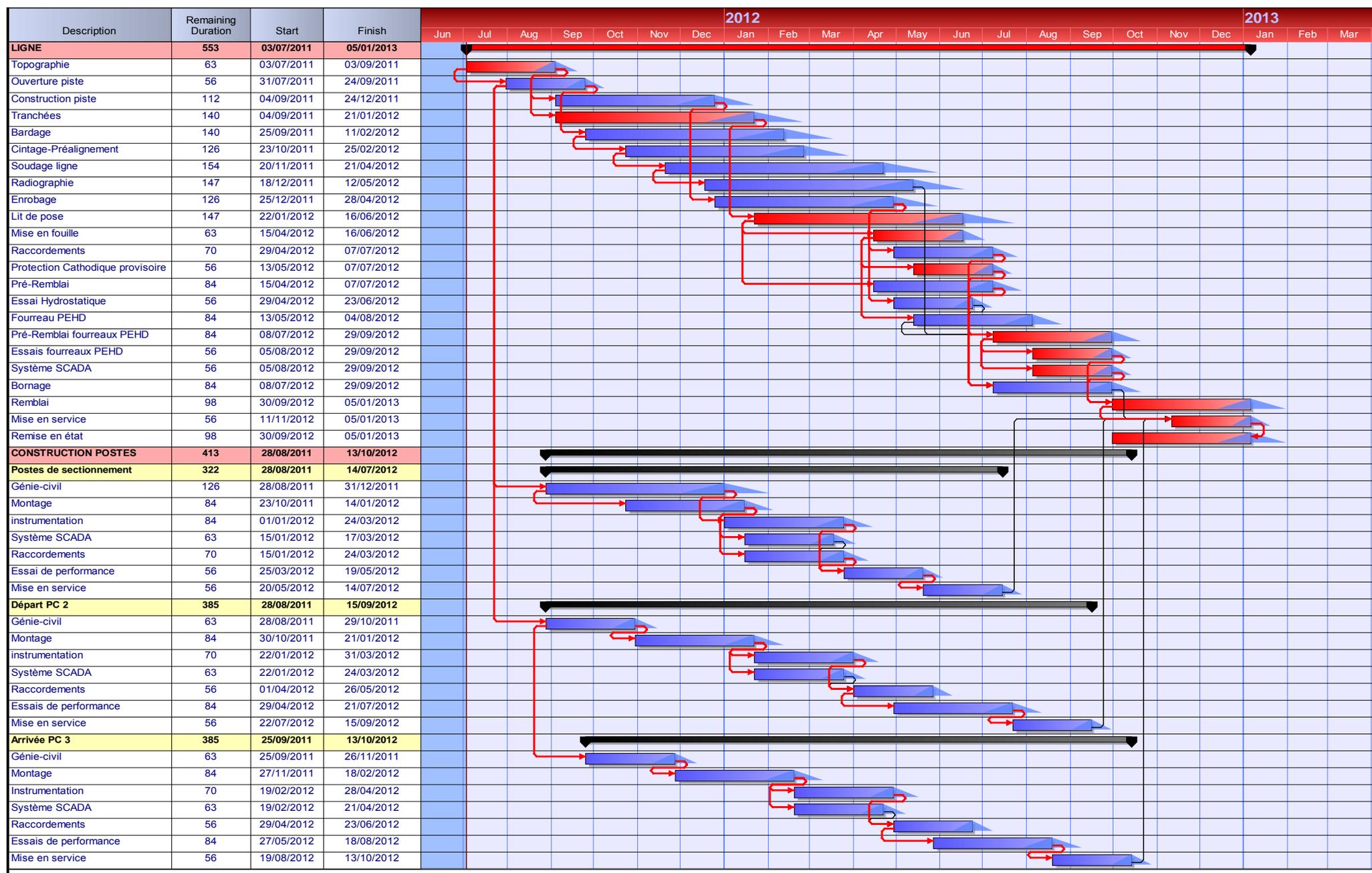
Tableau 4.3 synthétique des calculs au plus tôt, au plus tard et les marges

a	b	c	d	e	f	g	h
Activité	nœud	Durée (semaine)	TL <sub>e</sub>	TE <sub>e</sub>	TE <sub>b</sub>	D-f-c Marge totale	e-f-c Marge libre
Lg_01	1 → 2	9	9	9	0	0	0
Lg_02	3 → 4	8	16	12	4	4	0
Lg_03	2 → 5	16	31	25	9	6	0
Lg_04	6 → 7	20	29	29	9	0	0
Lg_05	4 → 8	20	40	32	12	8	0
Lg_06	9 → 10	18	42	34	16	8	0
Lg_07	11 → 12	22	50	42	20	8	0
Lg_08	13 → 14	21	53	45	24	8	0
Lg_09	15 → 16	18	49	43	25	6	0
Lg_10	17 → 18	21	50	50	29	0	0
Lg_11	19 → 20	9	50	50	41	0	0
Lg_12	21 → 22	10	59	53	43	6	0
Lg_13	23 → 24	8	53	53	45	0	0
Lg_14	25 → 26	12	59	53	41	6	0
Lg_15	27 → 28	8	59	51	43	8	0
Lg_16	29 → 30	12	61	57	45	4	0
Lg_17	24 → 31	12	65	65	53	0	0
Lg_18	32 → 33	8	65	65	57	0	0
Lg_19	34 → 35	8	65	65	57	0	0
Lg_20	26 → 36	12	71	65	53	6	0
Lg_21	35 → 37	14	79	79	65	0	0
Lg_22	38 → 39	8	79	79	71	0	0
Lg_23	40 → 41	14	79	79	65	0	0

<b>PS_01</b>	42 → 43	18	43	26	8	17	0
<b>PS_02</b>	44 → 45	12	45	28	16	17	0
<b>PS_03</b>	43 → 46	12	55	38	26	17	0
<b>PS_04</b>	47 → 48	9	55	37	28	18	0
<b>PS_05</b>	45 → 49	10	55	38	28	17	0
<b>PS_06</b>	49 → 50	8	63	46	38	17	0
<b>PS_07</b>	50 → 51	8	71	54	46	17	0
<b>PC2_01</b>	52 → 53	9	21	17	8	4	0
<b>PC2_02</b>	53 → 54	12	37	29	17	8	0
<b>PC2_03</b>	54 → 57	10	47	39	29	8	0
<b>PC2_04</b>	55 → 56	9	47	38	29	9	0
<b>PC2_05</b>	57 → 58	8	55	47	39	8	0
<b>PC2_06</b>	59 → 60	12	63	55	43	8	0
<b>PC2_07</b>	60 → 61	8	71	63	55	8	0
<b>PC3_01</b>	62 → 63	9	25	21	12	4	0
<b>PC3_02</b>	63 → 64	12	37	33	21	4	0
<b>PC3_03</b>	64 → 67	10	47	43	33	4	0
<b>PC3_04</b>	65 → 66	9	47	42	33	5	0
<b>PC3_05</b>	67 → 68	8	55	51	43	4	0
<b>PC3_06</b>	69 → 70	12	63	59	47	4	0
<b>PC3_07</b>	70 → 71	8	71	67	59	4	0



Figure 4.4 Diagramme de Gantt (La ligne)



Source : diagramme à barre (GANTT) du tronçon prioritaire fourni par le logiciel PRIMAVERA® PERTMaster

## 4.2.4. Durées variables

## 4.2.4.1. La méthode PERT

Les données numériques ci-dessus - en particulier les durées des activités- ne sont en réalité que des estimations. Pour prendre en compte l'incertitude sur ces estimations on utilisera un modèle probabiliste. En se référant aux méthodes et techniques exposées déjà au deuxième chapitre sur l'ordonnancement de projets, là où nous avons fait distinction entre deux approches probabilistes, nous allons utiliser ces deux approches pour le traitement des données de notre cas pratique. L'une dite classique figurée par la méthode PERT, et l'autre simulateur basée sur la simulation Monte Carlo.

*Tableau 4.4 Temps optimistes, pessimistes, et les plus probables*

Activité	$p_i^a$	$p_i^m$	$p_i^b$	$Esp(p_i)$	$Var(p_i)$
Lg_01	47	63	79	<b>63</b>	<b>28,44444444</b>
Lg_04	105	140	175	<b>140</b>	<b>136,1111111</b>
Lg_10	63	84	105	<b>84</b>	<b>49</b>
Lg_11	21	28	35	<b>28</b>	<b>5,444444444</b>
Lg_13	42	56	70	<b>56</b>	<b>21,7777778</b>
Lg_17	21	28	35	<b>28</b>	<b>5,444444444</b>
Lg_18	42	56	70	<b>56</b>	<b>21,7777778</b>
Lg_19	42	56	70	<b>56</b>	<b>21,7777778</b>
Lg_21	35	42	49	<b>42</b>	<b>5,444444444</b>
Lg_22	42	56	70	<b>56</b>	<b>21,7777778</b>
Lg_23	74	98	122	<b>98</b>	<b>64</b>
$\Sigma$				<b>553</b>	<b>295,2222</b>

Illustrons ces principes sur notre cas pratique. *Le tableau 4.4*<sup>(1)</sup>, fournit, pour les dix activités critiques du projet, les valeurs extrêmes et le mode permettent de calculer la

<sup>1</sup>- Il est évident que dans le cas de deux ou plusieurs tâches qui débutent ou terminent simultanément, nous ne prenons en compte que le temps d'une tâche unique en cas d'égalité. Dans le cas d'inégalité ou le cas des tâches qui débutent simultanément avec un retard nous prenons uniquement le temps de décalage.

moyenne et la variance de la durée de chaque tâche critique par les formules précédemment citées. Ceci est fait dans les deux dernières colonnes du tableau.

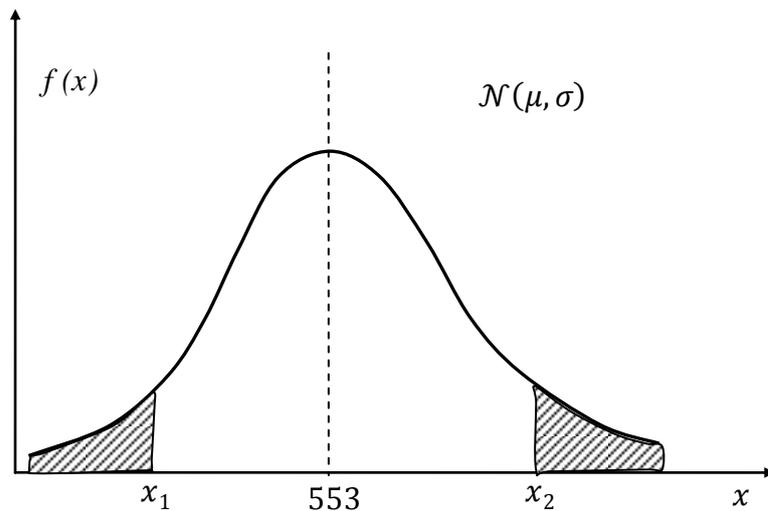
On en déduit que la distribution de probabilité de  $D$ , la *durée minimale d'exécution du projet* est une loi normale de paramètres connus :

$$\mathcal{N}(553; \sqrt{295,22}) = \mathcal{N}(553; 17,182)$$

On peut donc en déduire des **intervalles de confiance sur la durée du projet**. Par exemple, si l'on veut déterminer un *intervalle à 95% sur la durée du projet*, on peut utiliser la symétrie de la courbe de la loi normale (voir la figure 4.5). On cherche donc les valeurs extrêmes de l'intervalle  $[x_1, x_2]$  tel que la probabilité que la durée du projet soit entre ces deux bornes est 95% :

$$P[x_1 \leq D_p \leq x_2] = 95\%$$

**Figure 4.5** Intervalle à 95% sur la durée du projet



Vu la symétrie de la courbe de la loi normale, cela signifie qu'il y aura 2,5% à chaque extrémité du graphe. Il suffit de déterminer  $x_2$  et  $x_1$  sera calculé par symétrie par rapport  $\mu = 553$ . Le tableau de l'**annexe D** fournit, pour la loi normale centrée réduite, notée  $Z$ , la probabilité  $P(Z > z)$ . On cherche  $x_2$  tel que :

$$P(D_p > x_2) = 2,5\%$$

Pour faire la lecture dans la table, il faut centrer et réduire des deux côtés de l'inégalité ci-dessus. On obtient :

$$P\left[\frac{D_p - \mu}{\sigma} > \frac{x_2 - 553}{17,182}\right] = 2,5\%$$

Dans la table de la loi Normale  $\mathcal{N}(0,1)$  on lit :

$$P(Z > 1,96) = 2,5\%$$

On en déduit que

$$\frac{x_2 - 553}{17,182} = 1,96$$

Autrement dit que :

$$x_2 = 1,96 \times 17,182 + 553 = 586,676$$

On détermine  $x_1$  comme étant le point symétrique de  $x_2$  par rapport à la moyenne  $\mu = 553$  :

$$x_1 = 553 - (x_2 - 553) = 519,323$$

On déduit finalement l'intervalle suivant.

$$P(519,323 < D < 586,676) = 95\%$$

On peut affirmer qu'il y a 95% de chance que le projet s'achève dans cet intervalle de plus d'un mois. Il est à remarquer cependant que *l'utilisation du théorème central limite suppose d'avoir au moins une trentaine d'activité dans le chemin critique*. Or dans notre cas, on dispose à peine de 10 activités. On est à la limite des conditions d'utilisation du théorème !

#### 4.2.4.2. La simulation Monte Carlo

La méthode PERT en cas d'incertitude dans les durées des tâches, est très utile pour nous aider à prévoir des probabilités d'achèvement d'une tâche, ou de *makespan*. Quand la méthode PERT utilise la loi de distribution Beta, et la loi normale pour déterminer ces prévisions, il y a un sérieux défaut dans les résultats. Ainsi, l'hypothèse avancée par la méthode PERT est que le chemin critique reste le même sous toutes les conditions. Une telle hypothèse sans doute, est très aventureuse d'un point de vue analytique. Dans des conditions différentes, il est possible que le chemin critique prenne d'autres tournures, ce qui provoquera évidemment un changement dans toutes les dates prévues, y compris la date prévue pour l'achèvement du projet.

Afin de prévoir une date d'accomplissement du projet où le chemin critique prend en compte toutes les conditions possibles, la simulation Monte Carlo est suppléante.

La simulation Monte Carlo, n'est pas une technique déterministe comme les autres techniques habituellement utilisées. « *La simulation Monte Carlo, est la méthode par laquelle on utilise des nombres au hasard pour échantillonner une loi de probabilité. Ces nombres au hasard sont*

reliés avec des probabilités relatives (fréquences) d'un élément qui va être simulé afin que des valeurs plus probables de cet élément soient choisies avec justesse. Avec échantillonnage et avec un nombre suffisant des itérations, la méthode Monte Carlo recrée ses données en distributions <sup>(1)</sup>.

La technique de simulation Monte Carlo est communément utilisée dans l'ordonnancement probabiliste. Le fond de l'ordonnancement probabiliste est la "génération par ordinateur" (Computer-generated) des chemins critiques.

Dans ce qui suit nous allons adopter une approche simulateur pour le traitement des données du projet. D'abord, le développement d'un ordonnancement probabiliste nécessite qu'on exprime par une loi de probabilité chaque ou/et toutes durées possibles des tâches. La distribution la plus utilisée est la loi de *distribution triangulaire* <sup>(2)</sup>.

Cette procédure présume que les différentes étapes de l'ordonnancement (Estimation, calculs au plus tôt, au plus tard, etc.) sont tous accomplis. Etant donnée le planning, et les distributions des durées des tâches, le fond de la simulation Monte Carlo est la dérivation des réalisations ou la synthèse des résultats appropriés des durées des tâches.

Dans un temps avant l'avènement des ordinateurs, les ingénieurs et les mathématiciens en vue de générer des nombres au hasard, utilisent des tables de nombres au hasard (**Tableau 2.4** Chapitre II). Actuellement, le calcul de ces nombres au hasard est assez difficile. Dans notre cas le logiciel *Primavera PERTMaster* <sup>(3)</sup> génère automatiquement des nombres au hasard pour simuler les durées des tâches.

---

<sup>1)</sup> – Uher, Thomas.E (Thomas Edward), Programming and Scheduling Techniques, First Published (2003), UNSW PRESS.

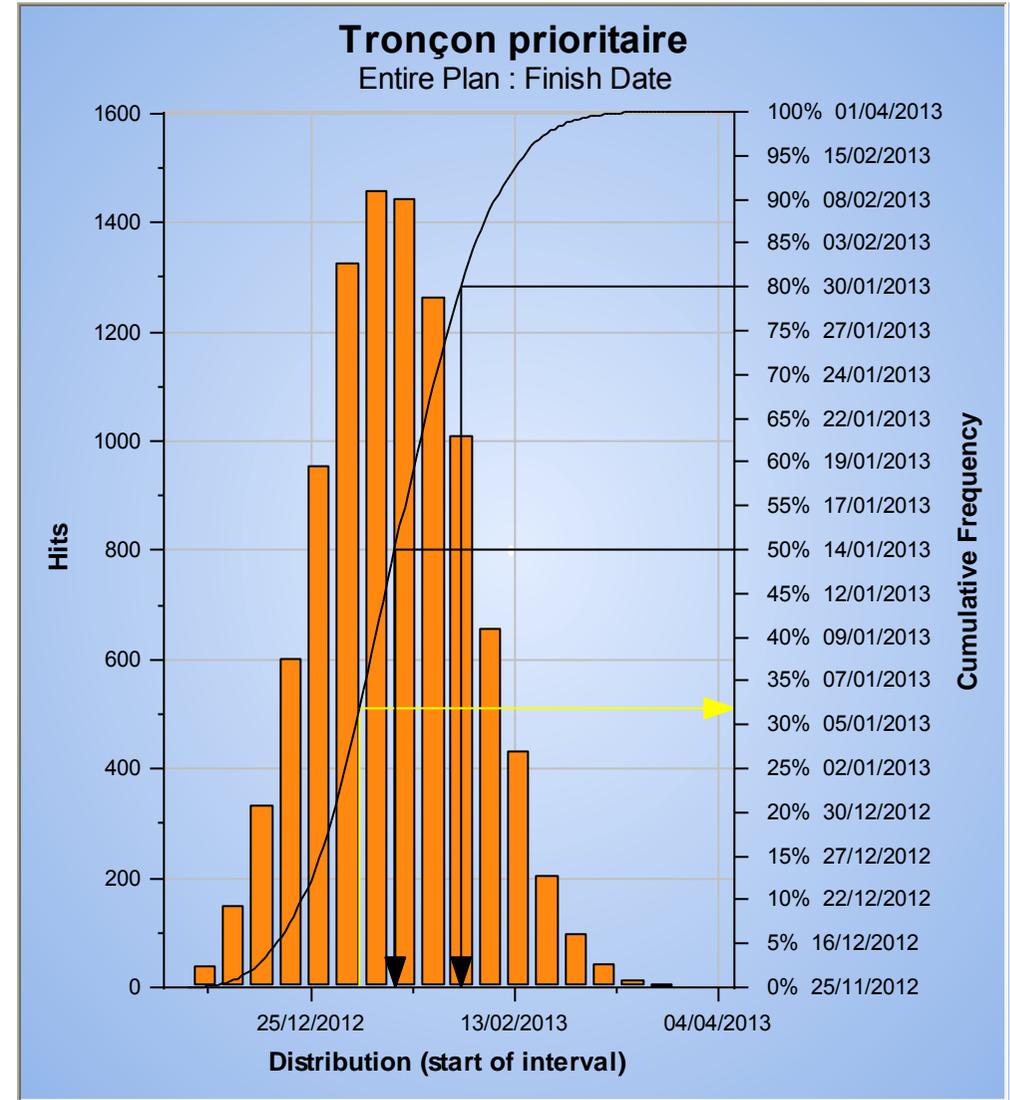
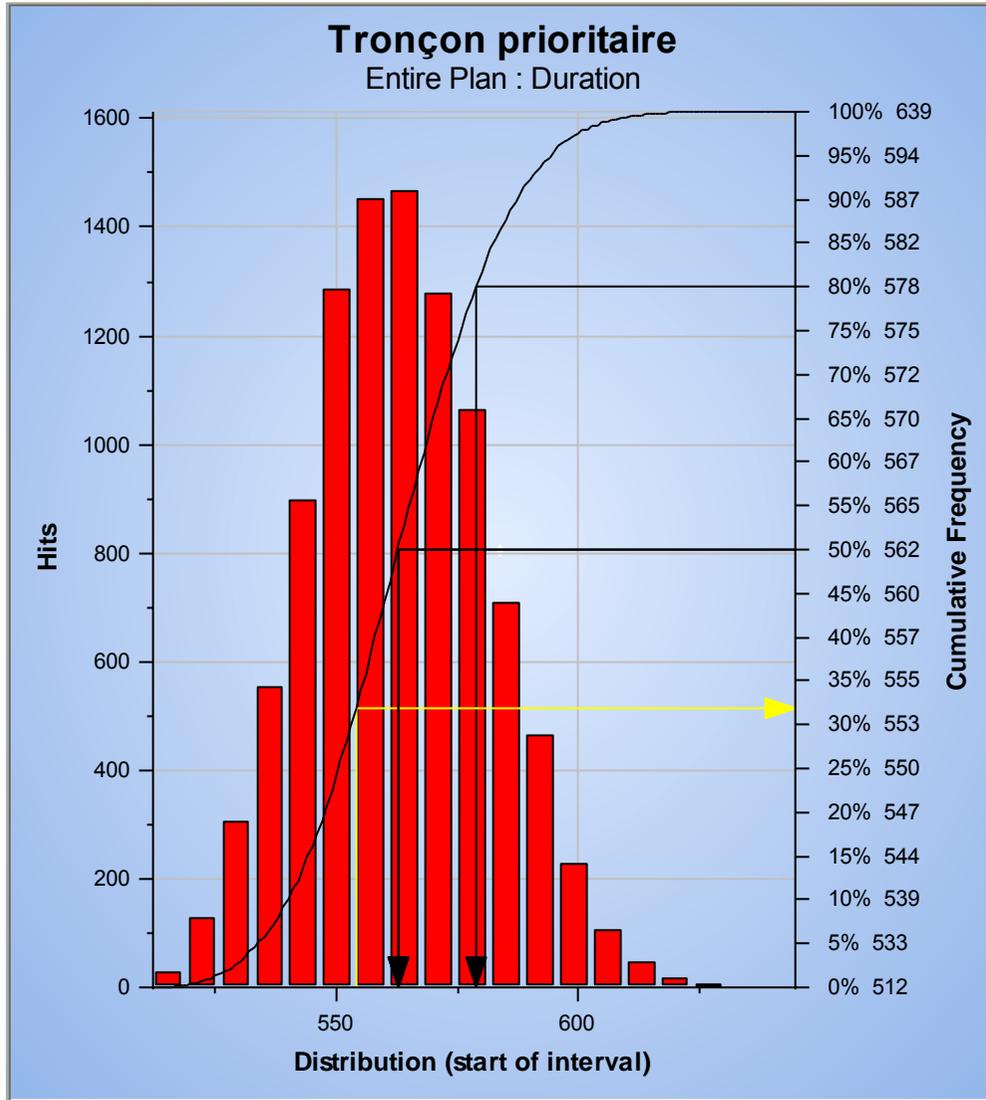
<sup>2)</sup> – Cette loi indique que la probabilité d'avoir une durée quelle conque s'accroît linéairement de la valeur minimale jusqu'à la valeur la plus probable. Et de ce dernier point elle est linéairement décroissante jusqu'à la valeur maximale.

<sup>3)</sup> - Primavera PERTMaster est un logiciel développé par la compagnie PRIMAVERA permettant de gérer les risque projet. PERTMaster permet de prendre en compte l'incertitude inhérente à la durée et aux coûts des tâche, il est possible d'ajouter des tâches et des ressources, ou encore de modifier les caractéristiques de tâches. En outre, il permet de déclarer les corrélations entre les incertitudes des tâches leurs durées et coûts, il es possible de choisir des valeurs de corrélation en – 100% et 100%. PERTMaster permet de faire la planification des tâches, il dispose d'un module intégré capable de réaliser l'ensemble des calculs nécessaires à la planification de projet en intégrant les dimensions durées, coût, et ressources. Les incertitude d'estimations sont manipulées selon les méthodes de simulations Monte Carlo, et Latin Hypercube Sampling afin d'estimer la durée et le coût d'un projet. PERTMaster permet aussi une gestion multi-projets.

Nous allons procéder à 10000 itérations, le logiciel nous produira des résultats sous des graphes schématisant les différents temps prévus de chaque tâche ainsi que la date prévue d'achèvement de projet.

Après le lancement de simulation le logiciel nous récapitulera toutes les données dans des graphes représentatifs l'un des principaux outputs d'une simulation Monte Carlo, sont *l'histogramme des fréquences*, et les *barres des indices de criticité*. L'histogramme des fréquences (**Figure 4.6** et **Figure 4.7**) représente les probabilités d'achèvement de projet dans chaque date possible. L'histogramme nous indique clairement que le projet ne peut pas être achever avant le premier avril 2013, qui est l'équivalent de 639 jours. Donc il y a presque 100% de chance de finir le projet le premier avril 2013 au plus tôt. Nous observons aussi qu'il y a seulement 32% de chance pour qu'on puisse achever le projet dans la date déterministe correspondant au 05 janvier 2013. Le graphe affiche aussi un minimum de 512 jours (soit le 25/11/2012) et un maximum de 639 jours (soit le 01/04/2013). Nous constatons que la méthode PERT donne des estimations plus optimistes par rapport à la méthode de simulation Monte-Carlo. En outre l'approche simulatoire dans des résultats plus ou moins proche de la réalité qu'une méthode classique d'un point de vue pratique. Il est très aisé cependant de conclure l'optimisme de la méthode classique (PERT) dans ses prévisions ça d'une part, d'autre part elle ne donne pas des indications concernant les autres chemins du réseau.

Figure 4.6 Histogramme des fréquences (Les durées et les dates de fin de projet)



Source : des histogrammes générés par le logiciel PRIMAVERA PERTmaster V8 sur la base de données de notre projet.

d'ailleurs, le plus avantageux de cette approche simulatoire est qu'elle nous fournit par des indices. Ces indices ne concernent pas uniquement le chemin critique, mais tous les chemins constituant le réseau. L'indice de criticité nous permet d'identifier les tâches qui sont susceptibles de provoquer des retards dans la réalisation du projet <sup>(1)</sup>.

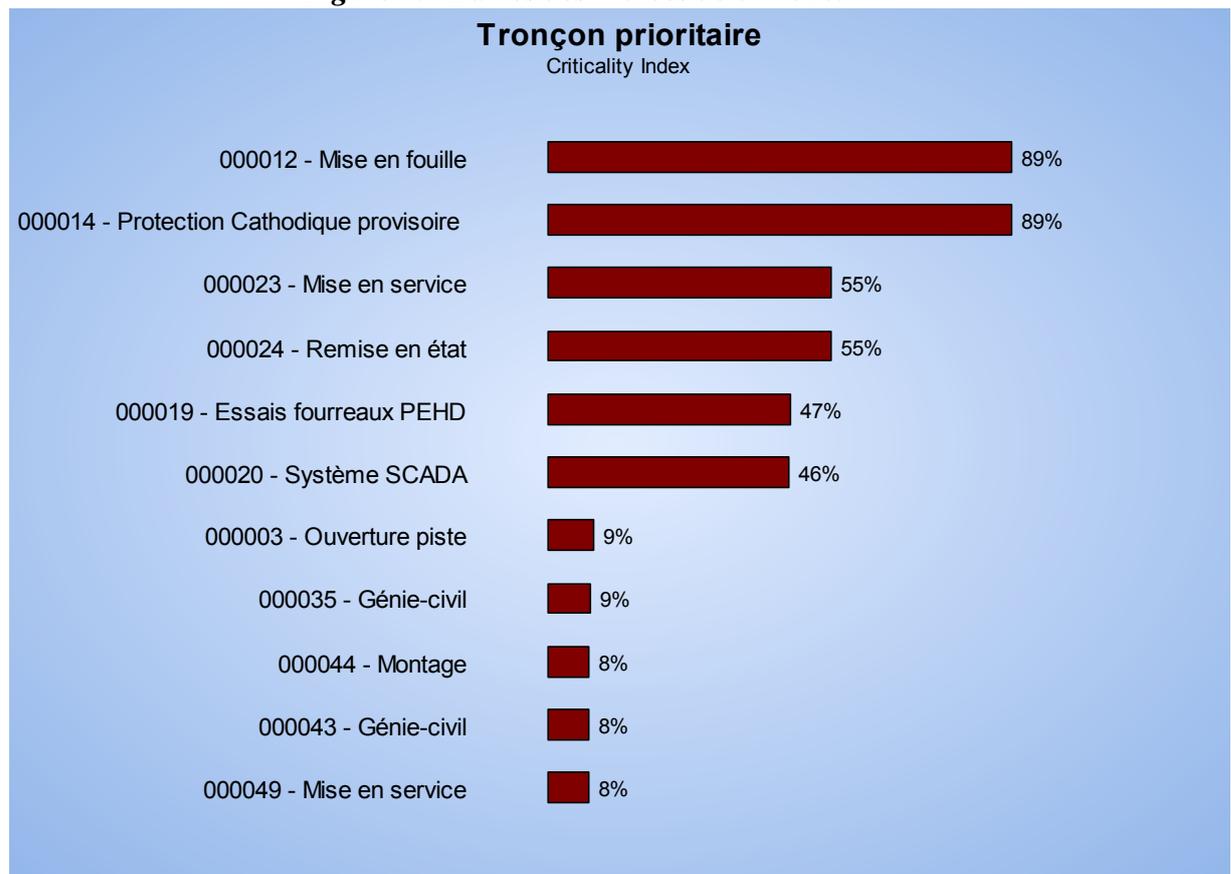
Les barres des indices de criticité (**Figure 4.7**), nous fournit en pourcentage par les probabilités de chaque tâche d'être critique, les autres tâches critique à une criticité entière (100%) ne se figurent pas sur notre graphe. Nous focalisons notre intention ici sur les tâches qui se trouvent hors le chemin critique dans l'univers déterministe et les tâches qui n'ont pas une criticité à 100%. Ces indices dans le graphe (**Figure 4.7**) indique que nous avons une criticité différente de zéro soit 9% de la tâche **Lg\_02 : Ouverture piste** qui se trouve derrière un point de divergence après 4 semaines de début de la tâche **Lg\_01 : Topographie** représentant d'après le diagramme de la **Figure 4.2** une autre orientation pour le chemin critique, cela veut dire qu'on a 9 % que le chemin critique prenne le parcours de la tâche **Lg\_02 : Ouverture piste**. Autrement dit, le chemin : **Lg\_02 → Lg\_05 → Lg\_06 → Lg\_07 → Lg\_08 → Lg\_13 → Lg\_15 → Lg\_19** est plus susceptible d'être critique en comparaison avec les autres chemins qui constituent les réseaux. Ce chemin est dit *subcritique* <sup>(2)</sup>. (Voir les **Figure 4.2** et **Figure 4.3**). Il est très intéressant pour le planificateur ou pour le chef de projet de prévoir des chemins dits subcritique, car dans l'exécution des tâches, le chemin critique peut prendre d'autres orientations sous des conditions improbables. Ce dernier chemin d'après les indices de criticité est le plus susceptible d'être critique parmi les autres chemins constituant le réseau.

La simulation peut nous fournir par d'autres résultats qui sont les indices de sensibilité. L'indice de sensibilité donne une indication de combien la durée d'une tâche peut affecter la durée d'une autre tâche ou le durée du projet tout entier. Il peut être utiliser pour identifier les tâches qui sont les plus susceptibles de causer des retards dans la date de fin de projet. La sensibilité de la durée d'une tâche mesure la corrélation <sup>(3)</sup> entre sa durée et la durée d'une autre tâche où la durée totale du projet. La tâche avec la durée de sensibilité la plus élevée est la tâche la plus susceptible d'augmenter la durée du projet (**Figure 4.8**).

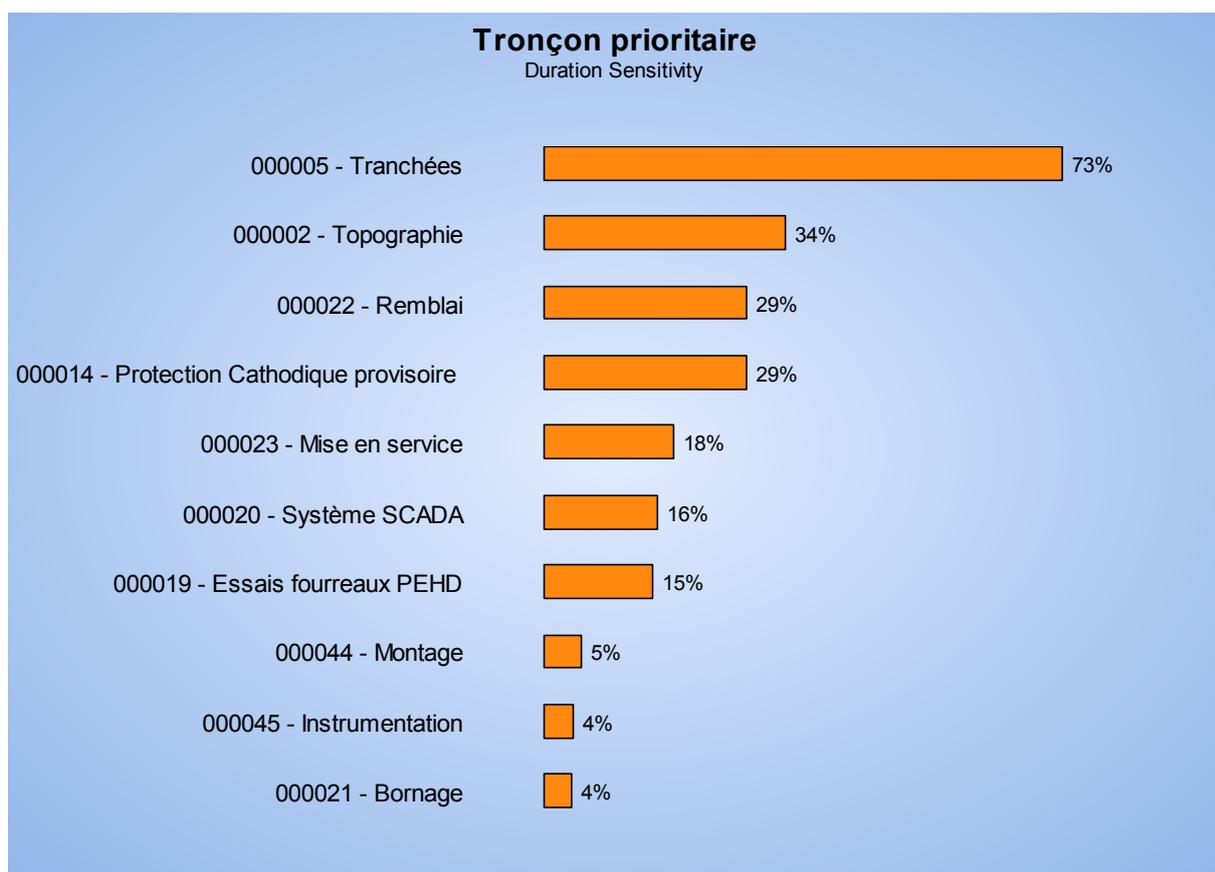
<sup>1</sup> )- Si par exemple, une tâche a un indice de criticité à 100%, cela signifie que pendant l'analyse peu importe la variation de la durée le chemin critique inclus toujours cette tâche. Inversement, des tâches avec un indice de criticité faible ou nul sont beaucoup moins susceptible de causer un retard dans la date de fin du projet.

<sup>2</sup> )- Phélizon Jean-François., Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle, Ed Economica, 1998.

<sup>3</sup> )- corrélation des rangs de Spearman.

**Figure 4.7 Barres des indices de criticité.**

Source : les barres des indices de criticité parmi les outputs du PRIMAVERA

**Figure 4.8 Barres des indices de sensibilité.**

### 4.3. Conclusion

Ce chapitre représente la partie pratique de ce travail de mémoire. Nous avons essayé de résoudre le problème central d'un projet de construction d'un pipeline (gazoduc GR 4 Lot n° : 1). Avant de commencer la résolution du problème, nous avons avancé succinctement des élargissements concernant les liens de dépendance. Dans le chapitre deuxième sur l'ordonnement de projet, les liens entre les tâches se modélisent uniquement de type : fin-à-début. Par contre, dans la pratique l'utilisation de ce même lien, trouve ses limites surtout dans le cas des tâches qui commencent, ou terminent simultanément (avec des décalages du temps le plus souvent). Pour cela nous avons présenté dans un premier lieu les autres types de liens de dépendances (début-à-début, début-à-fin, et fin-à-fin), et leurs adaptations avec les deux formulations existantes (ADM et PDM).

La résolution du problème commence par la suite via une décomposition structurée (WBS). Cette décomposition nous permet de mieux distinguer entre les différentes tâches et activités du processus. Après cette décomposition nous avons établi les contraintes (contraintes quantitatives, et qualitatives), cet établissement est basé sur un fondement théorique d'un part, et d'autre part sur des considérations pratiques issues de l'expérience de l'entreprise dans ce domaine de construction, en se référant bien entendu aux données des projets similaires réalisés antérieurement. Nous avons procédé ensuite aux calculs d'ordonnement (au plus tôt, et au plus tard). Le principe des calculs est le même que celui exposé dans le chapitre sur l'ordonnement de projet, sauf l'utilisation de logiciel. Nous avons utilisé le logiciel PRIMAVERA dans ces calculs. Dès la saisie des données nécessaires pour l'ordonnement (les durées, les contraintes...etc), le logiciel nous fournira par tous résultats importants dans l'analyse, à savoir les calculs d'ordonnement (au plus tôt, et au plus tard), les marges, et la date de fin de projet. Notons ici que la durée d'un projet (*le makespan*) est déterminé par la durée de la dernière tâche achevée de la pose de la ligne, les temps et durées des autres activités (postes de scionnement, poste de coupure,...etc.) se trouvent à l'intérieur de ce temps total, c'est pour cela que nous avons concentré sur le traitement des tâches de la pose des lignes.

Après, nous avons procédé à des durées variables (variables aléatoires). Dans la réalité la durée de chacune de ces tâches n'est qu'une variable déterminée par une estimation simple de fixer les durées possibles d'une tâche par un temps maximal, minimal et un autre plus probable.

En supposant que la durée d'une tâche est une variable aléatoire, nous avons appliqué d'abord la méthode dite classique (PERT), pour estimer et prévoir les durées, et le *makespan*. Et puis nous avons adopté une autre approche dit simulateur, en appliquant les techniques de simulation Monte-Carlo lesquelles sont utilisées dans une méthode différente d'estimation qui ne concentre pas uniquement l'étude sur le chemin critique mais prennent en considération tous les chemins constituant le réseau, et fournir d'autres résultats importants à propos des tâches et des chemins dits subcritiques (les indices de criticité, de sensibilité).

---

## **CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES**

---

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans ce travail de mémoire, nous avons étudié un problème d'ordonnancement. La majeure partie concerne le problème d'ordonnancement de projet. L'ordonnancement des activités qui constituent un processus de construction d'un pipeline est également traité.

Dans un premier lieu (distinctement les deux premiers chapitres) nous avons introduit les méthodes d'ordonnancement. A partir de la modélisation utilisant la théorie des graphes nous avons quand même présenté brièvement les autres méthodes, et techniques utilisées dans la littérature (la programmation linéaire et dynamique, l'heuristique...etc.).

De façon générale, comparée à d'autres domaines d'application de la théorie d'ordonnancement (l'ordonnancement temps réel en informatique, gestion de production...), l'ordonnancement de projet est considéré par les théoriciens voire les praticiens d'ordonnancement d'atelier comme le cas particulier des machines en parallèle avec un nombre infini de machines, nous avons consacré tout un chapitre détaillant les différentes méthodes de modélisation, de résolution et ses extensions. Une introduction au management de projet nous a apparait indispensable pour se familiariser avec les concepts liés au domaine, nous avons avancé succinctement pour cela les plus importants éléments du management de projet (définition d'un projet, le cycle de vie d'un projet...etc.).

Nous avons également muni chaque méthode de résolution par des exemples numériques qui aident à mieux exposer les techniques de résolution dans un univers certain comment dans un ordonnancement sous incertitudes. Une extension du problème central en prenant en compte les contraintes qui portent sur la disponibilité des ressources et les coûts opératoires des tâches vient par la suite.

Après les deux premiers chapitres introductifs nous avons introduit le thème de la construction des pipelines, toute en commençant par des généralités concernant les pipelines avant d'introduire l'essentiel du chapitre à savoir le processus de construction des pipelines et le détail des activités et phases qui les caractérisent. Par définition un processus de construction d'un pipeline (**PCP** : Pipeline Construction Process) est la succession linéaire des activités assurant le bon déroulement des travaux de réalisation d'un pipeline (gazoduc, oléoduc...etc.) sur la base d'une échelle temporelle, et sous des contraintes qui portent sur la disponibilité des ressources, et les contraintes temporelles comme les délais.

Dans le dernier chapitre (le cas pratique) de ce document nous avons proposé une résolution d'un problème central de construction d'un pipeline (le cas du gazoduc GR 4-Lot n° 1). En prenant les données de projet, nous avons opté pour une méthodologie de se référer à chaque fois aux chapitres théoriques pour organiser la résolution du problème. Cette méthodologie nous a facilité non seulement de procéder aux calculs simples d'ordonnancement, mais aussi de mieux faire distinguer l'issue des formulations avancées d'une part, et d'autre part elle nous a permis la mise en évidence de l'état d'art comparativement aux propos pratiques du cas. En se mettant dans un univers certain, nous avons procédé aux calculs habituels d'ordonnancement au plus tôt et au plus tard qui nous a permis de déduire les marges et le chemin critique. Puis en se mettant encore une fois dans un univers incertain, nous avons appliqué la méthode classique pour estimer et prévoir les dates et les durées éventuelles du *makespan*. Une approche simulateur est également adoptée laquelle considérée comme la meilleure façon de consolider voire supplanter une méthode classique plus optimiste connue par ses défauts d'approximations surtout dans le cas des chemins critiques avec des tâches critiques assez nombreuses. En appliquant sur notre cas pratique les techniques exposées dans le premier chapitre sur l'ordonnancement de projet, nous avons conclu des résultats variés, les plus importantes concernent: la différence entre les deux formulations (PDM et ADM) dans l'application, l'adaptation des liens de dépendance, et les méthodes probabilistes. Pour les deux formulations, si on considère que l'ADM par sa clarté et son adaptation à un diagramme à barre (diagramme de Gantt), comme la formulation la mieux adaptée pour les études de recherches et développement. La formulation en PDM est plus facile pour un nombre important des utilisateurs vue sa simplicité et son opérationnalité. Cependant, les liens de précédence et les nœuds de cette dernière formulation deviennent illisibles dans le cas des projets à un nombre important des tâches et des activités. La deuxième remarque concerne les liens de précédence entre les tâches, théoriquement les liens de précédence (pour les deux formulations) se modélisent par défaut sur la base d'un lien de type : fin-à-début. Par contre dans la pratique, des cas particuliers montrent la nécessité de faire appel au reste des types de lien (début-à-début, début-à-fin, début-à-début) pour mieux traduire les liens entre ces tâches. Quant à la dernière remarque elle concerne les méthodes probabilistes, ce travail adopte une autre approche dite simulateur qu'elle est considérée comme suppléante à l'approche classique (PERT). Nous

avons entamé le chapitre pratique par des élargissements concernant les liens de dépendance entre les tâches.

En perspective pour la suite de ce travail, notamment sur l'ordonnancement de projet, il nous apparaît particulièrement intéressant de travailler sur les extensions du problème central, en prenant compte les ressources, et les coûts opératoires des tâches.

Dans notre étude nous avons supposé que les contraintes de ressources sont illimitées, nous proposons dans un prolongement futur de ce travail d'enlever l'hypothèse de ressources inépuisables et de travailler sur les problèmes d'ordonnancement de projet sous contraintes de ressources (**RCPS**P : Resource-Constrained Project Scheduling Problem).

---

## **BIBLIOGRAPHIE**

---

**BIBLIOGRAPHIE**▪ **Livres**

**Antaki.A, George**, Piping and pipeline Engineering, Marcel Dekker, Inc.2003.

**Azoulay P., Dassonville P.**, Recherche opérationnelle de gestion, Presse universitaire de France 1976.

**Bennett F. Lawrence.**, The Management of Construction : A Project Life Cycle Approach, Butterworth Heinmann, First Edition, 2003, UK.

**Bondy J.A. and Murty U. SR.**, Graphe Theory., Springer Inc, New York, 2008.

**Bondy J.A. and Murty U. SR.**, Graphe Theory with Application., NORTH-HOLLAND, New York, 1982.

**Brissard, J.L et Polizzi, Marc.**, Des outils pour la la gestion de production industrielle., AFNOR 1990,Paris.

**Brucker Peter.**, Scheduling Algorithms, Springer Inc, Fifth Edition, 2007, New York.

**Chu Chengbin et Proth J.M.**, L'ordonnancement et ses applications., Masson, Paris, 1996.

**Droesbeke F., Hallin M., Lefevre Cl.**, Les graphes par l'exemple, Ellipses, 1987.

**Esquirol P. et Lopez**, L'ordonnancement, Economica, Paris,1999.

**Faure R., Lemaire B., Picoulean C.**, Précis de recherche opérationnelle, Dunod, 2004.

**Faure R., Roucairol C., Tolla P.**, Chemins et flots, ordonnancements. Gauthier-villars.1976.

**Giard V.**, Gestion de la production et des flux, 3<sup>e</sup> édition, 2003, Economica.

**Giard V.**, Gestion de projets, Economica, Paris, 1991.

**Goodpasture . J.**, Quantitive Methods in Project Management, J. Ross Publishing, 2004, New York.

**Hendrickson. C. and Tung Au.**, Project Management for Construction, Prentice – Hall Inc, New Jersy, 1989.

**Herrmann. Jeffrey W.**, Handbook of Production Scheduling., Springer Inc, New York 2006.

**Henze W. Jimmy.**, Construction Planning and Scheduling, Pearson Prentice – Hall., Third Edition, 2004, New Jersy.

**Hutching. Jonathan F.**, Project Scheduling Handbook, Marcel Dekker Inc, New York,2004.

**Kerzner. Harold.**, Project Management : A System Approach to Planning, Scheduling, and Controlling, Controlling., Jonh Wiley & Sons, Inc., Thenth Edition, 2009 , Hoboken, New Jersey.

**Lester, Albert**, Project Management – Planning and Control, 5<sup>th</sup> Edition, 2007 Elsvier.

**Liu Henerly**, Pipeline Engineering, CRC Press LLC Lewis Publishers, 2003.

**Lopez P., Roubellat F.** Ordonnancement de la production. Hermès Science publications, Paris, 2001.

**Lpschutz Seymour**, Mathématiques pour informaticiens, Série Schaum, McGraw-Hill,1983.

**Mohitpour. M, Golshan.H, Murray.A**, Pipelines Design and Construction: Typical Approach, Mcgraw-Hill, 1990.

**Phélizon Jean-François.**, Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle, Ed Economica, 1998.

**Pinedo Michael L.**, Planning and Scheduling In Manufacturing and Service., Springer Series in Operations Research and Financial engineering, New York , 2005.

**Pinedo Michael L.**, Scheduling : Theory, Algorithms and Systems., Springer Series in Operations Research and Financial engineering, New York , 2008.

**Shashi Menon**, Pipeline Planning and Construction Field Manual, Elsvier Inc. New York, 2011.

**Uher, Thomas.E (Thomas Edward)**, Programming and Scheduling Techniques, First Published (2003), UNSW PRESS.

**Vallet.G**, Technique de planification de projets, 3<sup>e</sup> Edit, Dunod, Paris, 2003.

**Vallet.G**, Technique de suivi de projets, 3<sup>e</sup> Edit, Dunod, Paris, 2003.

**Vallet.G**, Technique d’analyse de projets, 3<sup>e</sup> Edit, Dunod, Paris, 2003.

**W.L.Price.**, Introduction aux graphes et aux réseaux, Masson et CIE, Paris, 1974.

#### ▪ Thèses et mémoires

**Baki Bassem**, “ Planification et ordonnancement probabilistes sous contraintes temporelles”, Thèse de doctorat en Informatique, Université de Caen, France, 2006.

**Boulouaret Fateh et Kissoum Khaled**, “ Ordonnancement et Optimisation des Déménagements des appareils de forage Work-Over (DTM) au champ de Hassi Messaoud’ ”, , Ecole Nationale Supérieure de Statistique et d’Economie Appliquée (Ex INPS), Alger 2011.

**Chabi Smail et Nafi Hassen**, “ Système d’ordonnancement des tâches à la réalisation d’un projet ”, Ecole Nationale Supérieure de Statistique et d’Economie Appliquée (Ex INPS), Alger 2010.

**Koné Omar**, “ Nouvelles approches pour la résolution du problème d’ordonnancement de projet à moyens limités ” thèse de doctorat système industriel, Université Toulouse III, France 2009.

---

# ANNEXES

---

**ANNEXE A : Présentation de l'organisme d'accueil.****I - Présentation de l'Entreprise SONATRACH****1 – L'Entreprise SONATRACH :**

SONATRACH (société national pour le transport et la commercialisation des Hydrocarbures) a été créé par décret n°63.491 du 31.12.1963 paru dans le journal officiel du 10.01.64. Ce décret a été amendé et complété par le décret n°98-48 du 11 février 1998 portant statut de la société national pour la recherche, la production, le transport, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures.

Progressivement la SONATRACH se transforme en une société intégrée présent à tous les stades de l'industrie pétrolière de la recherche à la distribution du plan quinquennal 1979-1984 elle se restructurera en donnant naissance à 17 entreprise :

**Quatre (04) Entreprises de production :**

NAFTAL :(raffinage distribution qui donna naissance quelque temps après :

NAFTEC :(raffinage)

ENIP : industrie

ENPC : industrie des plastiques et du caoutchouc

ASMIDAL : engrais

**Trois (03) Entreprises de réalisation :**

ENGTP : Grand travaux pétroliers

ENGCB : Génie civil et bâtiments

ENAC : Canalisation

**Six (06) Entreprises de services :**

ENAGEO : Géophysique

ENAFOR et ENTP : Forage

ENEP : Engineering pétrolière

CERHYD : Centre de recherche en hydrocarbures

Quatre (04) Entreprises de Gestion de Zone Industrielle implantée à : ARZEW, SKIKDA, HASSI – R'MEL et HASSI - MESSAOUD.

**2 - Missions & Objectifs :**

La prospection, la recherche, et l'exploitation.

Le développement, l'exploitation et la gestion des ressources de transport de stockage et de chargement.

La commercialisation.

La liquéfaction du gaz naturel, le traitement et la valorisation hydrocarbures gazeux.

Le développement de toute forme d'activité conjointe en Algérie ou à l'étranger avec des sociétés Algériennes

La prise de détention de tout portefeuille d'action.

Les prises de participations et autres valeurs mobilières dans toute société existante ou à crée en Algérie ou à l'étranger

L'étude, la promotion et valorisation de toute autre forme et sources d'énergie.

Approvisionnement de toute activité ayant un lien direct avec l'industrie des hydrocarbures.

**3 – Organisation :**

La société SONATRACH dont le siège se trouve à Hydra est organisée comme suit :

La direction générale

Les structures à caractères technique ou social au niveau du siège

Les branches opérationnelles qui sont :

la branche Exploitation, Recherche et développement

la branche Hydrocarbures  
 la branche liquéfaction et transport des hydrocarbures  
 la branche commercialisation des hydrocarbures gazeux  
 la branche filiales et participation  
 management interne  
 stratégie planification économie

## **II - Présentation de l'Activité Transport par Canalisations**

### **1 – Présentation :L'Activité Transport par Canalisation (TRC)**

Objet de notre présentation fait partie de la SONATRACH et a été créé en 1988 par la fusion des deux directions : TRANSPORT et CANALISATION son siège est à SIDI ARCINE (BARAKI).

Consciente de son rôle politique et économique dans le processus d'industrialisation ; l'entreprise a procédé pendant une dizaine d'années (1971-1982) à une extension de son adéquation avec l'accroissement de la production des hydrocarbures ce qui s'est traduit par la réalisation de différents ouvrages « gazoducs et oléoducs » dans :

- la réalisation
- l'exploitation

### **2 – Missions :**

Le transport par Pipe-line des hydrocarbures, liquide et gazeux de puis les centres de production jusqu'aux terminaux d'ARZEW, Bejaïa, Skikda, à partir des hydrocarbures sont exportés.

Le réseau de transport des hydrocarbures géré par SH –TRC alimente également les raffineries nationales, les unités GNL (gaz naturel liquéfié) et GPL (gaz de pétrole liquéfié) ainsi que les réseaux de distribution du gaz.

Le stockage de distribution et le changement des hydrocarbures au moindre coût, compatible avec une saine gestion financière.

L'élaboration des plans de développement et d'exploitation en matière de transport des hydrocarbures.

Le développement et la réalisation des projets d'extension de renouvellement et valorisation du potentiel existant.

La maintenance, l'entretien et la protection du patrimoine de l'activité transport.

### **3 – Organisation :**

L'activité transport par canalisation s'articule autour de quatre directions centrales fonctionnelles et de deux divisions à savoir :

#### **3. 1 Direction Etudes & Planification :**

La direction organisation et planification (DOP) ayant pour mission d'organiser le travail d'une manière rationnelle par le biais d'organigrammes (actualiser éventuellement en cas de dysfonctionnement)

#### **3. 2 Direction Finances :**

La direction finances (DF) a pour responsabilité de faire la consolidation de la trésorerie de TRC (mouvement de trésorerie de toutes les unités recette et dépenses de la gestion financière et comptable du siège

#### **3. 3 Direction juridique :**

La direction juridique (DJ) a pour responsabilité la gestion des dossiers juridique (contentieux, contrats, assurances)

### **3. 4 Direction Administration Siège :**

La direction administration siège (DAS) a pour responsabilité essentielle la gestion administrative du personnel des structures du siège en matière notamment de paie tenue des dossiers du personnel et gestion sociale.

### **3. 5 Direction des Ressources humaines**

La direction des Ressources Humaines (DRH) a pour mission la définition de la politique du personnel et de développement des ressources humaines planification, recrutement, gestion des carrières et gestion de la formation.

### **3. 6 Division Etudes & Développement :**

La division étude et développement (EDV) a pour responsabilités d'étudier tout projet de développement de la branche Transport par canalisation (TRC) en rapport avec la technique nouvelle dans le but de développer et réaliser les objectifs de la branche transport.

La division études et développement est composée de :

La direction exécution des projets

La direction études et technologie

La direction administration et finances

### **3. 7 Division Exploitation :**

La division exploitation (EXL) est l'une des importante divisions que possède la TRC elle a pour mission de transporter les hydrocarbures liquide et gazeux par pipe-lines dans les meilleurs conditions et de l'assurer jusqu'aux terminaux de Bejaia, Arzew, Skikda et Alger par des stations d'intermédiaire.

La division exploitation est composée des structures suivantes :

une coordination des opérations chargée de la coordination et du contrôle d'exécution des programmes de transport.

une direction maintenance chargée de prendre en charge les opérations de révisions générales des machines tournantes et des opérations spéciales sur les canalisations et ouvrages concentrés

### **Sept (07) directions opérationnelles chargées de l'exécution des programmes de transport des hydrocarbures :**

REGION TRANSPORT OUEST	(ARZEW)
REGION TRANSPORT EST	(SKIKDA)
REGION TRANSPORT CENTRE	(BEJAIA)
REGION TRANSPORT IN-AMENAS	
REGION TRANSPORT HAOUD EL HAMRA	(HASSI MASSOUD)
DIRCTION GPDF	(EL ARICHA)
DIRCTION GEM	(OUED SAFSAF)
DIRECTION MAINTENANCE	(LAGHOUAT) (DML)
DIRECTION MAINTENANCE	(BISKRA) (DMB)
DIRECTION REPARATION CANALISATION	(ARZEW) (DRC)

**ANNEXE B : Définition du projet.****1. Consistance des travaux :**

Le projet appelé GR4 consiste en la réalisation d'un gazoduc de diamètre 48'' d'une longueur de 536 km reliant les champs pétrolifères de Rhourd Nous au centre national de dispatching de gaz de Hassi R'mel, avec tous les ouvrages annexes décrits dans le volet physique ci-après ;

Le délai d'exécution global est de 27 mois avec **livraison en 18 mois d'un tronçon d'urgence de 69 km** allant du PC2 Zina au PC3 HMD.

**Montant du contrat est de : 32.499.980.595,80 DA**

**Date de signature du contrat :**

**Date de l'ODS :**

**Date de démarrage des travaux : 03/07/2011**

**2. Volet physique :****a- Le Lot n° 01 comprend :**

- Une ligne de diamètre 48'' de longueur 223 km reliant Rhourd Nous au poste de coupure de Hassi Messaoud.
- Un Terminal Départ à Rhoud Nous.
- Trois (03) postes de coupure (Gassi Touil, Station Zina et Hassi Messaoud).
- Neuf (09) Postes de Sectionnement.
- Pots de purge.
- Une station d'intégration des besoins voix et données du GR4 aux systèmes de transmission et de SCADA des gazoducs GR1/GR2.
- Un système de protection cathodique télé géré.

**b- Le Lot n° 02 comprend :**

- Une ligne de diamètre 48'' et de longueur 313 km reliant le poste de coupure N° 03 sis Hassi Messaoud (Non Inclus) au CNDG actuel.
- Trois (03) postes de coupure (OUARGLA SC3, Zelfana et Hassi R'mel) aux PK respectives 336+250, 437+200 et 530+500.
- Treize (13) postes de sectionnement.
- Une gare de racleur arrivée au CNDG Actuel à Hassi R'mel.
- Pots de purge.
- Une solution d'intégration des besoins voix et données du GR4 aux systèmes de transmission et de SCADA des gazoducs GR1/GR2.
- Un système de protection cathodique télé géré.

**3. Volet Financier :**

- **Montant du marché : 32.499.980.595,80 DA (H.T)**
  - ❖ Lot 1 : 14.852.230.075,01 DA
  - ❖ Lot 2 : 17.647.750.520,79 DA
  - ❖ Avance forfaitaire pour le lot 1 : 15% soit 2.227.834.511,24 DA

- ❖ Avance forfaitaire pour le lot 2 : 15% soit 2.647.162578,10 DA

Il est à noter que le montant des fournitures ne sera payé qu'à la réception sur site. Il concerne :

- Lot 1 : 5.200.000.000,05 DA
- Lot 2 : 4.100.000.000,00 DA

#### 4. Schéma synoptique : Voir plan ci-joint en annexe

#### 5. Présentation du site

##### 5.1 Données du tracé :

###### ❖ Lot n° 01 :

- ✓ **PK 0 au PK 200** : le tracé est facilement accessible à partir de la RN n°3.
- ✓ **PK 0 au PK 200** : Absence de couverture réseau téléphonique, inexistence d'énergie électrique, utilisation de panneaux solaires pour les ouvrages du GR4
- ✓ **PK 0 au PK 74** : le tracé longe la RN n°3 avec un intervalle variant de 15 à 5 km jusqu'à rejoindre la RN n°3 au PK 98.
- ✓ **PK 210** : Aéroport Ville de HMD

###### ❖ Lot n° 02

- ✓ **PK 310** : proximité de la ville de Ouargla
- ✓ **PK 337** : le tracé passe à proximité de la Station et base vie SH (prévision d'installation base intermédiaire)
- ✓ **PK 420** : Prévoir base secondaire de 350 personnes à Zelfana

##### 5.2 Données topographiques

###### ❖ Lot n° 01 :

- ✓ **PK 1** : Traversée de nappe à la sortie du TD
- ✓ **PK 74** : Croisement de la RN n°3 à la station Gassi Touil et 2 pipes 40'' et 24''
- ✓ **PK 98** : Croisement de route RN n°3.
- ✓ **PK 223** : Présence d'un réseau de collectes, puits et routes à l'approche du PC n°3 Hassi Messaoud.

###### ❖ Lot n° 02 :

- ✓ **Du PK 223 au PK 262** : Présence de collectes, puits et routes
- ✓ **PK 270** : le tracé traverse un escarpement important.
- ✓ **PK 310** : le GR4 traverse la RN 49 (El Goléa – Ouargla).
- ✓ **PK 312** : traversée de collectes du champ de Berkaoui.
- ✓ **PK 336** : Croisement GR1/GR2 à deux reprises.
- ✓ **PK 405** : Traversée oued M'zab 400 ml.
- ✓ **PK 465** : Croisement de la nappe à l'approche de la station SP3.
- ✓ **A partir du PK 465**, présence de nombreux oueds.
- ✓ **PK 476** : Traversée de la RN 1

- ✓ **PK 480** : Traversée de la nappe.

### 5.3 Données géologiques du Sol :

#### ❖ Lot n° 01 :

- ✓ **Du PK 0 au PK 223** : Terrain plat sablonneux (dunes de sable), sans obstacles majeurs.
- ✓ **PK 105** : Zone sablonneuse.

#### ❖ Lot n° 02 :

- ✓ **Du PK 223 au PK 336** : terrains meubles et sablonneuse
- ✓ **Du PK 336 au PK 405** : Terrain rocailleux
- ✓ **Du PK 405 au PK 412** : Présence de roche dure
- ✓ **Du PK 412 au PK 437** : terrains durs excavables (tuf compact)
- ✓ **Du PK 437 au PK 457** : Semi Rocheux
- ✓ **Du PK 457 au PK Final** : rocheux.

### 5.4 Gisements d'emprunts :

#### ❖ Lot n° 01 :

Existence de gisement de tuf le long du tracé et disponibilité de matériaux pour le pré remblai et fond de fouille.

#### ❖ Lot n° 02 :

Existence de tuf, et rareté de matériaux pour pré remblai et lit de pose du PK 437 jusqu'au PK final.

### 5.5 Condition climatiques :

- ✓ **Du PK 0 au PK 536** : le climat est rude et se distingue par une chaleur torride atteindre en été des températures entre 50° C à 55° et des vents de sable fréquents durant les mois de Février, Mars et Avril.
- ✓ **Du PK 405 au PK 536** : Région soumise aux crues des oueds existants, climat rigoureux en hiver, températures au-dessous de 0° C.

## 6. Méthodologie

Consiste à définir l'ensemble des méthodes qui permettent de réaliser le projet dans les délais impartis, au moindre coût et conforme à la qualité attendue.

### 6.1 Installation des bases :

Nous préconisons l'installation de deux types de bases, base principale et base secondaire.

#### a. Base principale :

Elle sera implantée à Hassi Messaoud dès la mise en vigueur du contrat, elle aura une capacité de 600 personnes. Elle aura à abriter

- La direction du projet LOT N° 1 temporairement
- La direction du LOT N° 2
- LE personnel du maître de l'Ouvrage

- Le personnel de chantier et de la double jointing
- Le personnel de la logistique
- Le bureau d'étude

En outre, elle aura à assurer les missions suivantes :

- Entretien du matériel.
- Chaudronnerie.
- Entreposage des équipements.
- Préfabrication etc...

Le choix du site est motivé par les raisons suivantes :

- Hassi Messaoud est le centre du tracé.
- L'existence d'une mini base, à agrandir.
- La proximité du parc à tube et la DJ et du tronçon d'urgence.

#### **b. Bases secondaire (foraines) :**

Leur implantation doit obéir à l'ordre chronologique des priorités méthodologiques de la réalisation comme ci-dessous :

1. SC3 (LOT2) PK 336, capacité 350 personnes
2. Gassi Touil (LOT1) PK 73, capacité 350 personnes
3. Hassi R'mel (LOT2) PK 534, capacité 100 personnes
4. Zelfana PK 417 (LOT2), capacité 350 personnes

Pour les nécessités de gestion du projet, il est impératif de disposer des équipements des 3 bases de HMD, SC3 et Gassi Touil au même temps.

Quant à la création des bases de Zelfana et Hassi R'mel, elles seront équipées à partir des 3 bases précédentes au fur et à mesure de l'évolution des travaux.

### **6.2 Engineering :**

Pour des considérations de chronologie, il est nécessaire de lancer l'engineering dès à présent et consistent à ce qui suit :

- Etude ligne (levé topo et profils en long, PTL, ...) par Cosider
- Etude des O.C (implantation, terrassement, G.C, ...) par Cosider
- Etude géotechnique (à sous-traiter)
- Etude du système SCADA (à sous-traiter)
- Etude protection cathodique (à sous-traiter)
- Etude de danger et l'impact sur l'environnement (à sous-traiter)

### **6.3 Procurement**

La direction des approvisionnements et de la sous-traitance, dès à présent, préparer les cahiers de charges sous la supervision de la division, dans l'attente de la remise des spécifications techniques.

Les directions concernées sont invitées à :

- Lister les équipements par discipline

- Identification et validation des équipements par le maître de l'ouvrage
- Finaliser les cahiers de charges
- Lancer les commandes

La priorité doit être accordée à la mise à disposition des équipements relatifs au tronçon d'urgence PC3 à PC2 conformément au délai de 18 mois imposé par le contrat.

#### **6.4 De l'organisation**

##### **a. Organisations des chantiers :**

Le projet est scindé en deux lots distincts :

- **Lot 1 :** Ligne partant dans le sens HMD-RDN de 223 km de longueur avec tronçon prioritaire de 69 km.
- **Lot 2 :** Ligne partant de HMD vers Hassi R'mel, d'une longueur de 313 km, comprenant une partie rocheuse de Zelfana jusqu'à Hassi R'mel.

Au vu de la présente configuration, nous préconisons la création de deux pôles opérationnels indépendants.

Les pôles à créer se structurent selon l'organigramme en vigueur au sein de l'entreprise.

##### **b. Progression des fronts de travail**

Les deux fronts s'installent, dans un premier temps, à HMD pour que chaque front élabore son budget prévisionnel ; et compte tenu des données contractuelles, la priorité sera accordée au tronçon, reliant le PC3 HMD à PC2 Zina, qu'il y a lieu de démarrer dès la mise en vigueur du contact.

La base principale de HMD sera rattachée au pôle du Lot n° 2 qui preste les services au pôle du Lot n° 1 jusqu'à l'installation de la base secondaire prévue aux environs de Gassi Touil pour accueillir la direction du Lot n° 1.

Le front du Lot n° 1 progressera dans le sens HMD vers Rhourd Nouss.

Le front du Lot n° 2 progressera dans le sens HMD vers Hassi R'mel.

##### **c. Ordonnancement des opérations**

L'ordonnancement des opérations obéira au processus de réalisation existant dans l'entreprise.

##### **d. Implantation de la DJ ( Double Jointing)**

Le double jointage des 536 km de tube concerne environ la moitié de la quantité des joints à réaliser au titre du projet à savoir 25 000, toutes épaisseurs confondues.

L'installation de la station de double jointage de tubes est à prévoir à Hassi Messaoud pour raison de proximité du parc à tube du maître de l'ouvrage.

La station de double jointage est disponible au sein de l'entreprise, cependant il convient de la remettre en marche dès à présent.

##### **e. Synchronisation**

Il s'agit de la mobilisation, par le directeur du pôle, des moyens au moment voulu pour la mise en concordance des actions visant l'optimisation des potentialités engagées, voire la performance. Autrement dit,

- Rechercher les meilleurs scénarios de réalisation
- Planifier les différentes actions à entreprendre

- Eviter la discontinuité dans l'enchaînement des tâches

Cela passe nécessairement par :

- La mise à plat virtuelle de l'ensemble des imputs nécessaires à la tâche.
- Positionner dans le temps et dans l'espace la mobilisation des ressources humaines, matérielles et consommables.
- Mise en œuvre des actions concourant à la réalisation de la tâche ciblée.

La synchronisation, dans notre cas, qui consiste en la réalisation d'un ouvrage si complexe, de surcroît un pipeline de diamètre 48'', doit impérativement être assurée par le directeur.

### 6.5 Chemin critique :

Le chemin critique se caractérise par un ou plusieurs facteurs pouvant mettre en péril le planning de réalisation ; raison pour laquelle, il est important d'accorder une attention particulière à :

- **Lot n° 1** : Livraison à temps des équipements et incorporables pour **le tronçon d'urgence d'une longueur de 69 km reliant HMD à Zina.**
- **Lot n° 2** : Prendre les mesures nécessaires pour l'ouverture de la tranchée longue de 313 km constituée majoritairement de sol rocheux.

## ANNEXE C : Les lois de distribution.

### La distribution uniforme

La *distribution uniforme* postule que *toutes les valeurs comprises entre la valeur minimale A et la valeur maximale B sont équiprobables*. Si l'on note  $X$  la variable aléatoire, il est facile de voir (**Figure 1**) que :

- Sa *fonction de densité de probabilité*  $f(x)$  est donnée par (cas continu) :

$$f(x) = \frac{1}{b - a}$$

- Sa *fonction de répartition*  $F(x) = P(X < x)$  est donnée par (cas continu) :

$$F(x) = P(X < x) = \frac{x - a}{b - a}$$

Avec bien sûr  $F(x) = P(X < a) = 0$  et  $F(b) = P(X < b) = 1$

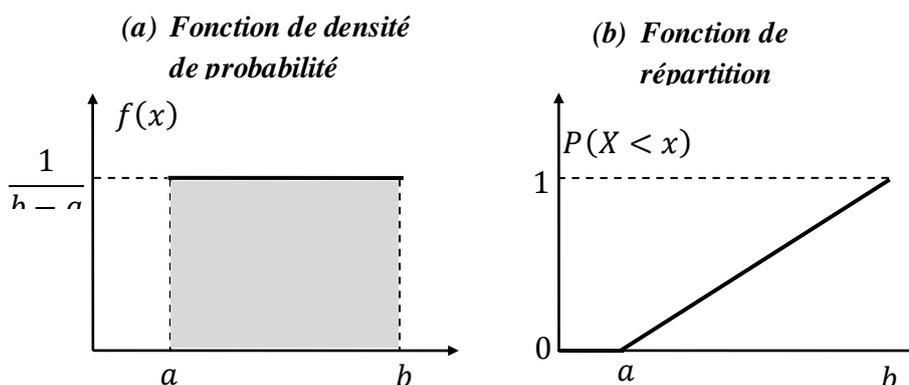


Figure 1 Distribution uniforme de probabilité

### La distribution Bêta

La *distribution bêta* est une distribution unimodale qui :

- A une *fonction de répartition* telle que  $P(X < a) = 0$  et  $P(X > b) = 1$ ,
- Une *fonction de densité de probabilité* donnée par :

$$f(x) = \frac{(x-a)^\alpha (b-x)^\gamma}{(b-a)^{\alpha+\gamma+1} \int_0^1 t^\alpha (1-t)^\gamma dt}$$

- A une *espérance mathématique*  $E(X)$  donnée par :

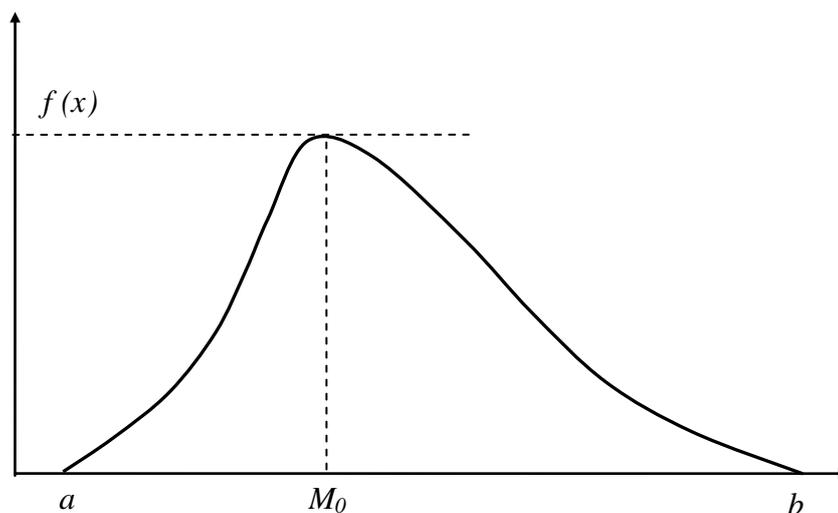
$$E(x) = a + (b-a) \frac{\alpha + 1}{\alpha + \gamma + 2}$$

- A une *variance*  $V(x)$  donnée par :

$$V(x) = \frac{(b-a)^2 (\alpha + 1)(\gamma + 1)}{(\alpha + \gamma + 3)(\alpha + \gamma + 2)^2}$$

- Et a un *mode*  $M_0$  donnée par :

$$M_0 = \frac{a\gamma + b\alpha}{\alpha + \gamma}$$



**Figure 2** Distribution Bêta de probabilité

La connaissance de  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$  et  $\gamma$  spécifie totalement la loi. S'il est facile d'identifier  $a$  et  $b$ , il est impossible de recueillir directement auprès des opérationnels les valeurs de  $\alpha$  et  $\gamma$ . On peut remarquer que la connaissance de  $a, b, E(x)$  et  $M_0$  spécifie également totalement la loi

<sup>(1)</sup>. En effet, les relations permettant de calculer  $E(x)$  et  $M_0$  définissant un système de deux équations en deux inconnues ( $\alpha$  et  $\gamma$ ).

### La distribution triangulaire

La *distribution triangulaire* constitue une alternative à la loi Bêta car elle ne nécessite que de connaître les trois paramètres  $a, b,$  et  $M_0$ , les *deux valeurs extrêmes et le mode* de la distribution. Cette distribution a :

- Une *fonction de densité de probabilité* donnée par :

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(M_0-a)(b-a)} & \text{si } a \leq x \leq M_0 \\ \frac{2(b-x)}{(b-M_0)(b-a)} & \text{si } M_0 \leq x \leq b \end{cases}$$

- Une *fonction de répartition* donnant  $P(X < x)$  donnée par :

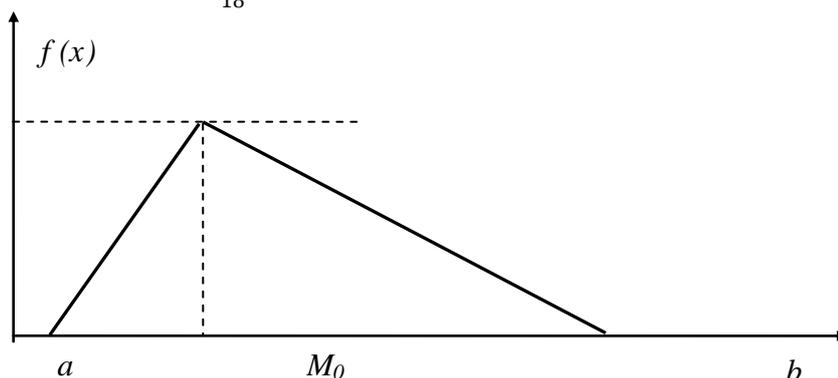
$$P(X < x) = \begin{cases} \frac{(x-a)^2}{(M_0-a)(b-a)} & \text{si } a \leq x \leq M_0 \\ 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-M_0)(b-a)} & \text{si } M_0 \leq x \leq b \end{cases}$$

- Une *espérance mathématique*  $E(X)$  donnée par :

$$E(X) = \frac{a + M_0 + b}{3}$$

- Une *variance*  $V(X)$  donnée par :

$$V(X) = \frac{a(a-M_0)+b(b-a)+M_0(M_0-b)}{18}$$



**Figure 3 Distribution triangulaire de probabilité**

<sup>1</sup>)- Cependant, il est difficile pour un praticien d'identifier la différence entre *le mode* (valeur la plus probable) et *la moyenne*.

### La distribution normale

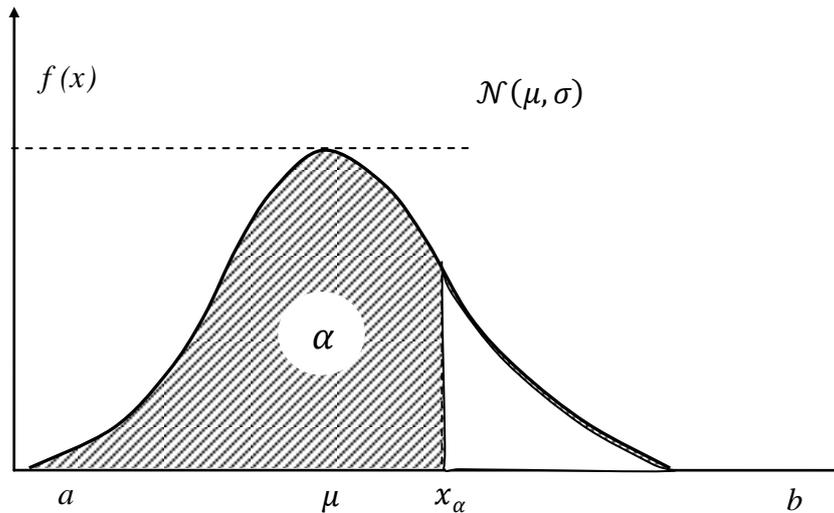
La *distribution normale* est une distribution unimodale qui :

- A une *fonction de densité* de probabilité donnée par :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2/2}$$

- A une *fonction de répartition* donnant  $P(X < x_\alpha)$  donnée par :

$$P(X < x_\alpha) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_\alpha} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2/2} dx = \alpha$$



**Figure 3** Distribution Normale de probabilité

Le problème de cette distribution est qu'elle porte sur une variable continue *pouvant aller de moins l'infini*. Si l'on restreint le domaine de  $X$  aux seules valeurs positives, on obtient une *distribution tronquée* de la loi normale ;

$$P(X < x_\alpha) = \frac{1}{\int_0^\infty e^{-\left(\frac{x'-\mu}{\sigma}\right)^2/2} dx'} \int_0^{x_\alpha} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2/2} dx = \alpha$$

La difficulté est ici *l'estimation des paramètres  $\mu$  et  $\sigma$*  de la distribution à partir d'un échantillon d'observations.

## ANNEXE D : Table de la loi normale centrée réduite.

$P$	$z_j$									
$z_i$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,4960	0,4920	0,4880	0,4840	0,4801	0,4761	0,4721	0,4681	0,4641
0,1	0,4602	0,4562	0,4522	0,4483	0,4443	0,4404	0,4364	0,4325	0,4286	0,4247
0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4052	0,4013	0,3974	0,3936	0,3897	0,3859
0,3	0,3821	0,3783	0,3745	0,3707	0,3669	0,3632	0,3594	0,3557	0,3520	0,3483
0,4	0,3446	0,3409	0,3372	0,3336	0,3300	0,3264	0,3228	0,3192	0,3156	0,3121
0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2981	0,2946	0,2912	0,2877	0,2843	0,2810	0,2776
0,6	0,2743	0,2709	0,2676	0,2643	0,2611	0,2578	0,2546	0,2514	0,2483	0,2451
0,7	0,2420	0,2389	0,2358	0,2327	0,2296	0,2266	0,2236	0,2206	0,2177	0,2148
0,8	0,2119	0,2090	0,2061	0,2033	0,2005	0,1977	0,1949	0,1922	0,1894	0,1867
0,9	0,1841	0,1814	0,1788	0,1762	0,1736	0,1711	0,1685	0,1660	0,1635	0,1611
1,0	0,1587	0,1562	0,1539	0,1515	0,1492	0,1469	0,1446	0,1423	0,1401	0,1379
1,1	0,1357	0,1335	0,1314	0,1292	0,1271	0,1251	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
1,2	0,1151	0,1131	0,1112	0,1093	0,1075	0,1056	0,1038	0,1020	0,1003	0,0985
1,3	0,0968	0,0951	0,0934	0,0918	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0838	0,0823
1,4	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0749	0,0735	0,0721	0,0708	0,0694	0,0681
1,5	0,0668	0,0655	0,0643	0,0630	0,0618	0,0606	0,0594	0,0582	0,0571	0,0559
1,6	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455
1,7	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0367
1,8	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294
1,9	0,0287	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
2,0	0,0228	0,0222	0,0217	0,0212	0,0207	0,0202	0,0197	0,0192	0,0188	0,0183
2,1	0,0179	0,0174	0,0170	0,0166	0,0162	0,0158	0,0154	0,0150	0,0146	0,0143
2,2	0,0139	0,0136	0,0132	0,0129	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
2,3	0,0107	0,0104	0,0102	0,0099	0,0096	0,0094	0,0091	0,0089	0,0087	0,0084
2,4	0,0082	0,0080	0,0078	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0068	0,0066	0,0064
2,5	0,0062	0,0060	0,0059	0,0057	0,0055	0,0054	0,0052	0,0051	0,0049	0,0048
2,6	0,0047	0,0045	0,0044	0,0043	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036
2,7	0,0035	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026
2,8	0,0026	0,0025	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019
2,9	0,0019	0,0018	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014
3,0	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0011	0,0010	0,0010

Donne la probabilité  $P(Z > z_i + z_j)$

## ANNEXE E : Table de nombres au hasard.

43	64	58	92	32	00	38	41	08	58	21	78	91	40	93
06	26	84	64	60	97	66	02	34	90	61	61	81	92	75
40	74	42	24	82	12	42	49	86	01	19	08	95	31	66
41	83	62	82	05										
39	65	76	45	45	19	90	69	64	61	20	26	36	31	62
58	24	97	14	97	95	06	70	99	00	73	71	23	70	90
65	97	60	12	11	31	56	34	19	19	47	83	75	51	33
30	62	38	20	46	72	20	47	33	84	51	67	47	97	19
98	40	07	17	66	23	05	09	51	80	59	78	11	52	49
75	17	25	69	17	17	95	21	78	58	24	33	45	77	48
69	81	84	09	29	93	22	70	45	80	37	48	79	88	74
63	52	06	34	30	01	31	60	10	27	35	07	79	71	53
28	99	52	01	41	02	89	08	16	94	85	53	83	29	95
56	27	09	24	43	21	78	55	09	82	72	61	88	73	61
87	18	15	70	07	37	79	49	12	38	48	13	93	55	96
41	92	45	71	51	09	18	25	58	94	98	83	71	70	15
89	09	39	59	24	00	06	41	41	20	14	36	59	25	47
54	45	17	24	89	10	08	58	07	04	76	62	16	48	68
58	76	17	14	86	59	53	11	52	21	66	04	18	72	87

## ANNEXE F : Résumé du rapport du risque de projet (input &amp; output).

 Impossible d'afficher l'image liée. Le fichier a peut-être été déplacé, renommé ou supprimé. Vérifiez que la liaison pointe vers le fichier et l...

## Pertmaster Summary Risk Report

---

### Plan Summary

Title	Trançon prioritaire end		
File name	C:\Documents and Settings\Hicham\Bureau\Trançon prioritaire end.plan		
Plan finish date	05/01/2013	Tasks with no progress	49
Plan remaining duration	553	In progress tasks	0
Normal tasks	44	Completed tasks	0
Summary tasks	5	Total tasks	49
Milestone tasks	0	Resource assignments	0
Hammock tasks	0	Budget cost	0,00
Monitor tasks	0	Remaining cost	0,00
Calendars	3	Actual cost	0,00
Links	56	Total cost	0,00
Resources	6		

### Risk Inputs

### Gantt Chart

✘ Impossible d'afficher l'image liée.  
Le fichier a peut-être été déplacé,  
renommé ou supprimé. Vérifiez que  
la liaison pointe vers le fichier et l...

# Gantt Chart

ID	Description	Remaining Duration	Start	Finish	2012												2013				Minimum Duration	Most Likely	Maximum Duration	Mean Duration	Dur Std Dev	Duration Risk Distribution								
					Jun	Ju	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Ju	Aug	Sep							Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	
00001	LIGNE	553	03/07/2011	06/01/2013																												562,76	12,28	
00002	Topographie	63	03/07/2011	03/09/2011																									47	63	79	63,00	6,93	Triangle
00003	Ouverture piste	56	31/07/2011	24/09/2011																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle
00004	Construction piste	112	04/09/2011	24/12/2011																									84	112	140	112,00	11,83	Triangle
00005	Tranchées	140	04/09/2011	21/01/2012																									105	140	175	140,00	14,69	Triangle
00006	Bardage	140	25/09/2011	11/02/2012																									105	140	175	140,00	14,69	Triangle
00007	Orlage-Préalignement	126	23/10/2011	25/02/2012																									95	126	158	126,33	13,26	Triangle
00008	Soudage ligne	154	20/11/2011	21/04/2012																									116	154	193	154,33	16,12	Triangle
00009	Radiographie	147	16/12/2011	12/05/2012																									110	147	184	147,00	15,51	Triangle
00010	Enrobage	126	25/12/2011	28/04/2012																									95	126	158	126,33	13,26	Triangle
00011	lit de pose	147	22/01/2012	16/06/2012																									110	147	184	147,00	15,51	Triangle
00012	Mise en boucle	63	15/04/2012	16/06/2012																									47	63	79	63,00	6,93	Triangle
00013	Raccordements	70	29/04/2012	07/07/2012																									53	70	88	70,33	7,54	Triangle
00014	Protection Cathodique provisoire	56	13/05/2012	07/07/2012																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle
00015	Pré-Fermbai	84	15/04/2012	07/07/2012																									63	84	105	84,00	8,97	Triangle
00016	Essai Hydrostatique	56	29/04/2012	23/06/2012																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle
00017	Foureaux PEHD	84	13/05/2012	04/08/2012																									63	84	105	84,00	8,97	Triangle
00018	Pré-Fermbai foureaux PEHD	84	06/07/2012	29/09/2012																									63	84	105	84,00	8,97	Triangle
00019	Essais foureaux PEHD	56	05/08/2012	29/09/2012																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle
00020	Système SCADA	56	05/08/2012	29/09/2012																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle
00021	Bomage	84	06/07/2012	29/09/2012																									63	84	105	84,00	8,97	Triangle
00022	Fermbai	98	30/09/2012	05/01/2013																									74	98	123	98,33	10,40	Triangle
00023	Mise en service	56	11/11/2012	05/01/2013																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle
00024	Mise en état	98	30/09/2012	05/01/2013																									74	98	123	98,33	10,40	Triangle
00025	CONSTRUCTION POSTES	412	28/05/2011	13/19/2012																												416,92	15,79	
00026	Postes de sectionnement	222	28/05/2011	14/07/2012																												220,92	14,12	
00027	Oùve-civil	126	26/06/2011	31/12/2011																									95	126	158	126,33	13,26	Triangle
00028	Montage	84	23/10/2011	14/01/2012																									63	84	105	84,00	8,97	Triangle
00029	Instrumentation	84	01/01/2012	24/03/2012																									63	84	105	84,00	8,97	Triangle
00030	Système SCADA	63	15/01/2012	17/03/2012																									47	63	79	63,00	6,93	Triangle
00031	Raccordements	70	15/01/2012	24/03/2012																									53	70	88	70,33	7,54	Triangle
00032	Essai de performance	56	25/03/2012	19/05/2012																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle
00033	Mise en service	56	20/05/2012	14/07/2012																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle
00034	Départ PC 2	385	28/05/2011	16/09/2012																												386,75	17,08	
00035	Oùve-civil	63	26/06/2011	29/10/2011																									47	63	79	63,00	6,93	Triangle
00036	Montage	84	30/10/2011	21/01/2012																									63	84	105	84,00	8,97	Triangle
00037	Instrumentation	70	22/01/2012	31/03/2012																									53	70	88	70,33	7,54	Triangle
00038	Système SCADA	63	22/01/2012	24/03/2012																									47	63	79	63,00	6,93	Triangle
00039	Raccordements	56	01/04/2012	26/05/2012																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle
00040	Essais de performance	84	29/04/2012	21/07/2012																									63	84	105	84,00	8,97	Triangle
00041	Mise en service	56	22/07/2012	15/09/2012																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle
00042	Arrivée PC 3	385	28/05/2011	13/19/2012																												386,51	16,82	
00043	Oùve-civil	63	25/09/2011	26/11/2011																									47	63	79	63,00	6,93	Triangle
00044	Montage	84	27/11/2011	18/02/2012																									63	84	105	84,00	8,97	Triangle
00045	Instrumentation	70	19/02/2012	28/04/2012																									53	70	88	70,33	7,54	Triangle
00046	Système SCADA	63	19/02/2012	21/04/2012																									47	63	79	63,00	6,93	Triangle
00047	Raccordements	56	29/04/2012	23/06/2012																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle
00048	Essais de performance	84	27/05/2012	16/08/2012																									63	84	105	84,00	8,97	Triangle
00049	Mise en service	56	19/08/2012	13/10/2012																									42	56	70	56,00	6,11	Triangle

**Risk Outputs**

**Project Finish Distribution Graph**

 Impossible d'afficher l'image liée. Le fichier a peut-être été déplacé, renommé ou supprimé. Vérifiez que la liaison pointe vers le fichier et l'emplacement corrects.

Title	Value
Minimum	25/11/2012
Maximum	01/04/2013
Mean	14/01/2013
Bar Width:	week

### Project Duration Sensitivity Tornado Graph

The duration sensitivity of a task is a measure of the correlation between its duration and the duration (or dates) of the project (or a key task or summary).

 Impossible d'afficher l'image liée. Le fichier a peut-être été déplacé, renommé ou supprimé. Vérifiez que la liaison pointe vers le fichier et l'emplacement corrects.

Document téléchargé depuis www.pnst.cerist.dz CERIST

## Project SSI Tornado Graph

The schedule sensitivity index of a task is calculated by multiplying its criticality index by the ratio of its variance against the variance of the project (or key task).

 Impossible d'afficher l'image liée. Le fichier a peut-être été déplacé, renommé ou supprimé. Vérifiez que la liaison pointe vers le fichier et l'emplacement corrects.

## Project Criticality Tornado Graph

The criticality index of a task is the proportion of the iterations in which it was critical.

 Impossible d'afficher l'image liée. Le fichier a peut-être été déplacé, renommé ou supprimé. Vérifiez que la liaison pointe vers le fichier et l'emplacement corrects.

## Project Cruciality Tornado Graph

The cruciality of a task is calculated by multiplying its duration sensitivity by its criticality index.

 Impossible d'afficher l'image liée. Le fichier a peut-être été déplacé, renommé ou supprimé. Vérifiez que la liaison pointe vers le fichier et l'emplacement corrects.