

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
PH. D.

PAR
ADEL FRANCIS

LA MODÉLISATION CHRONOGRAPHIQUE DE LA PLANIFICATION DES
PROJETS DE CONSTRUCTION

MONTRÉAL, LE LUNDI 12 JUILLET 2004

© droits réservés de Adel Francis

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Edmond T. Miresco, Directeur de thèse.

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure.

M. François Brissette, Président du jury.

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure.

M. Claude Bédard, Membre du jury.

Département à la recherche et au transfert technologique à
l'École de technologie supérieure.

M. Jean-Claude Mangin, Membre du jury.

École supérieure d'ingénieurs de Chambéry, Université de Savoie.

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET UN PUBLIC

LE 19 MAI 2004

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

LA MÉTHODE CHRONOGRAPHIQUE POUR LA PLANIFICATION DES PROJETS DE CONSTRUCTION

Adel Francis

RÉSUMÉ

Cette thèse, fait état du concept théorique, du modèle mathématique, de l'approche de modélisation *chronographique* de la planification des projets. La modélisation proposée se repose sur deux entités génériques : l'entité principale qui symbolise l'outil de production et l'entité dépendante qui détermine les contraintes relationnelles. Les autres contraintes sont présentées comme attributs ou mesures internes. La direction primaire utilise le temps. La direction secondaire, qui est optionnelle, peut montrer une autre contrainte.

Il s'agit d'une modélisation flexible et claire qui supporte le regroupement des sous-réseaux, les différentes tâches, unités, quantités, ressources ou surfaces de travail. L'information peut être représentée sur plusieurs niveaux de détail. Les analyses internes des activités en fonction des quantités comme unité de mesure du processus d'exécution sont acceptées. Les outils et les propriétés de cette modélisation s'intègrent formant une synergie. Cette synergie favorise une amélioration de la clarté visuelle, une flexibilité accrue et une adaptation facile aux changements.

LA MÉTHODE CHRONOGRAPHIQUE POUR LA PLANIFICATION DES PROJETS DE CONSTRUCTION

Adel Francis

SOMMAIRE

Un siècle déjà est presque écoulé depuis la première adoption d'une méthode scientifique pour la planification et le contrôle des projets de construction. Malgré cette longue durée d'application, de recherche et d'innovation, la tâche de planification reste considérée comme une activité complexe qui génère des coûts importants et parfois injustifiés. L'état de la situation actuelle montre aussi que les logiciels ne sont pas en meilleure position. Le manque de fidélité pour représenter le processus d'exécution diminue le niveau de confiance à l'échéancier produit. La clarté visuelle, du graphe créé, forme un obstacle vers une utilisation à une plus grande échelle. De plus, la représentation de la séquence du déroulement du projet à l'échelle du temps reste de nos jours une action sans solutions décisives. L'analyse entreprise, à cet effet, a démontré que les résultats obtenus semblent être rudimentaires. Ainsi, la modélisation de la planification de l'échelle du temps, proprement dite, reste sous-développée.

Cette thèse, fait état du concept théorique, du modèle mathématique, de l'approche de modélisation, du prototype informatique et d'une application pratique de la méthode *chronographique* de la planification des projets de construction. La modélisation proposée se repose sur deux entités génériques : l'entité principale qui symbolise l'outil de production et l'entité dépendante qui détermine les fonctions décisionnelles et les contraintes relationnelles. Les autres contraintes non identifiées par des entités sont présentées comme attributs ou mesures internes de l'entité principale. La direction primaire de flux d'information utilise, principalement, le temps comme unité de mesure externe. La direction secondaire, qui est optionnelle, peut montrer une autre contrainte. Cette contrainte secondaire choisie doit être différente de l'entité principale.

Les résultats de recherche sont compatibles avec les objectifs de développement. Il s'agit d'une modélisation flexible et claire qui présente les échéanciers sous plusieurs formes intéressantes. Une modélisation qui supporte le regroupement des sous-réseaux avec les échéanciers à une direction de flux de logique. Elle accepte aussi le regroupement des différentes tâches, unités, quantités, ressources ou surfaces de travail dans les ordonnancements à deux directions. L'information peut être représentée sur plusieurs niveaux de détail hiérarchique ou la combinaison de ces derniers. Les analyses internes des activités en fonction des quantités comme unité de mesure du processus d'exécution sont acceptées. Les outils et les propriétés de cette modélisation s'intègrent formant une synergie. Cette synergie favorise une amélioration de la clarté visuelle, une flexibilité accrue et une adaptation facile aux changements.

Mots-clés : Modélisation chronographique; Approche de modélisation; Échelle du temps; Graphe d'ordonnancement; Réseaux logiques; Diagrammes; CPM; PERT.

A CHRONOGRAPHIC APPROACH FOR CONSTRUCTION PROJECT PLANNING

Adel Francis

ABSTRACT

It has now been almost a hundred years since the first attempt at adopting a scientific method for the planning of a construction project. Despite methods application, research and innovation that has been done through the years, projects planning are still considered to be a complex function that entails some considerable, and sometimes unjustifiable, costs. The application of these methods through commercial computer programs in recent years has not resulted in much of an improvement to the process. The lack of fidelity in the representation of the execution process diminishes the degree of confidence in the project schedule developed. The degree of visual clarity of the graph created is in itself an obstacle to its use on a larger scale. In addition time scale scheduling representation is still today an action without definitive solution. Bibliographic researches, undertaken for this purpose, shows that the results obtained appear to be rudimentary only. As conclusion, project modeling based on time scale may be described as being underdeveloped.

This thesis, presents the theoretical concept, the graphical approach, the mathematical model, a prototype program, and a practical application for a new planning construction projects method called chronographic modeling. This proposed modeling is based on two generic entities: the principle entity that symbolizes the production tools and the dependant entity which determines the decisional functions and the relational constraints. Others constraints that have not been specifically identified by entities are represented as attributes or as external or internal measures of the principle entities. The primary direction of the logical flow primarily uses time as the external unit of measure. A secondary flow direction, which is optional, may show an additional constraint. The secondary constraint chosen may be different from the principle entity.

The results of the research are compatible with the original development objectives. It has resulted in a clear and flexible model that presents schedules in various interesting forms. A model which supports the grouping of sub-networks within schedules with unique logical flow. It also accepts the grouping of different tasks, units, quantities, resources or work areas in schedules represented on two direction of logical flow. Information may also be represented on numerous levels of hierarchical detail or a combination of these levels. The internal analysis of activities as a function of the quantities as a unit of measure of the execution process is accepted. The tools and the properties of the chronographic model are integrated to create a synergy. This synergy favors an improvement in the visual clarity, an increased flexibility, and more adaptability to changes.

Key-words : Chronographic modeling; Modeling approach; Time scale; Scheduling graph; Logical network; Diagram; CPM; PERT.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier vivement M. Edmond Miresco, directeur de la maîtrise et professeur à l'École de technologie supérieure de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire. Je suis honoré qu'un pionnier de la modélisation graphique à l'échelle du temps ait accepté de diriger cette thèse. Ce travail de recherche ne serait indiscutablement pas ce qu'il est aujourd'hui sans sa contribution. Je lui suis très reconnaissant du soutien actif qu'il m'a apporté, de l'énergie et de la rigueur avec lesquels il a dirigé ce travail. Je suis particulièrement honoré de son ouverture d'esprit et de la confiance qu'il m'a accordées durant cette longue période.

Je suis très reconnaissant à M. François Brissette, professeur à l'École de technologie supérieure pour avoir dirigé avec maturité et diligence la présidence du jury.

Je suis particulièrement honoré que M. Claude Bédard, Doyen à la recherche et au transfert technologique à l'École de technologie supérieure qui, malgré ses multiples occupations, ait accepté d'être membre du jury autant à l'examen de synthèse que durant cette soutenance.

Je suis honoré qu'un grand chercheur du domaine en France tel que M. Jean-Claude Mangin, professeur à l'École supérieure d'ingénieurs de Chambéry, Université de Savoie ait accepté d'être membre du présent jury. Ses remarques judicieuses et les

analyses qu'il a effectuées dans son rapport d'évaluation sont considérées comme un ajout au présent travail. Je tiens à lui présenter mes sincères remerciements.

Je tiens aussi à remercier le Service technique d'ingénierie à Kahnawake pour l'ambiance sympathique qui a régné durant les travaux de construction de la station d'épuration à Kahnawake. Je remercie particulièrement M. Frank Deere, responsable du projet au sein du Service technique, et M. Jacques Ste-Marie, directeur du département de la construction au Groupe Teknika, de leur complète confiance qu'ils m'ont accordée durant l'exécution de ce projet. Cette confiance m'a permis d'appliquer les nouveaux concepts de la méthode chronographique dans la gestion du projet.

Je remercie mes collègues au département de construction du Groupe Roche Itée et spécialement M. Réjean Gilbert le directeur du département pour l'expérience variée et pertinente dont j'ai pu profiter durant cette dernière période et pour l'aide que j'ai reçue dans la production de ce document.

Je tiens à exprimer un profond sentiment d'amour à mes deux enfants, Mary et Gabriel, qui ont dû supporter durant toute leur vie un père très occupé et peu présent.

Enfin, Mariam, je te remercie grandement du soutien moral que tu m'as prodigué et de l'immense patience dont tu as fait preuve durant toutes ces années.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 LA MODÉLISATION GRAPHIQUE DU PROCESSUS D'ORDONNANCEMENT	6
1.1 La modélisation graphique de la planification des projets.....	6
1.1.1 Introduction.....	6
1.1.2 La modélisation graphique.....	7
1.2 La modélisation de la planification des projets de construction.....	11
1.2.1 Introduction.....	11
1.2.2 État de la modélisation des projets de construction	11
1.2.3 Les types de modélisation compatibles aux projets de construction	13
1.3 La modélisation graphique à l'échelle du temps.....	14
1.3.1 Clarté visuelle	15
1.3.2 Les jours fériés.....	17
1.3.3 Rassemblement des ressources	18
1.3.4 Calendriers multiples	21
1.3.5 Relations de dépendance et réseaux maîtres.....	22
1.3.6 Les engagements.....	23
1.4 Le domaine de recherche de cette thèse.....	24
1.4.1 La problématique de recherche.....	24
1.4.2 L'approche de modélisation.....	25
1.4.3 L'approche de modélisation chronographique.....	28
1.4.4 Objectifs de développement et résultats obtenus	30
1.4.5 Les frontières de la recherche	34
1.4.6 Les limites de la solution proposée.....	35

CHAPITRE 2	ÉVOLUTION DE LA MODÉLISATION GRAPHIQUE D'ORDONNANCEMENT	37
2.1	Introduction.....	37
2.2	Les diagrammes	38
2.3	Théorie des graphes	39
2.3.1	Modèle mathématique de la théorie des graphes	39
2.3.2	Les Algorithmes basés sur la théorie des graphes	40
2.4	Les modèles d'ordonnancement déterministes	41
2.4.1	ADM «Arrow Diagram Method »	41
2.4.2	PDM « Precedence Diagram Method »	44
2.4.3	Avantage des réseaux d'ordonnancements	45
2.4.4	Construction des réseaux d'ordonnancement	47
2.4.5	Validation des réseaux d'ordonnancement	49
2.5	Les méthodes d'ordonnancement probabilistes et généralisées.....	52
2.5.1	Introduction.....	52
2.5.2	Les méthodes d'ordonnancement probabilistes	53
2.5.3	Les méthodes d'ordonnancement généralisées	54
2.6	La modélisation à base de simulation	59
CHAPITRE 3	LA MODÉLISATION DE L'ORDONNANCEMENT À L'ÉCHELLE DU TEMPS	64
3.1	Introduction.....	64
3.2	La représentation des projets à caractère non répétitifs	65
3.2.1	Le Diagramme de Gantt.....	65
3.2.2	État des autres recherches	66
3.2.3	Analyse des recherches présentées	78
3.3	La représentation des projets à caractère répétitifs	81
3.3.1	Introduction.....	81
3.3.2	Les méthodes de planification des projets à caractère répétitifs.....	81
3.3.3	Le CPM et les projets répétitifs	86
3.3.4	La combinaison de la LOB et du CPM.....	86
3.3.5	Conclusion	91
3.4	Les logiciels offrant l'échelle du temps	92
3.4.1	Les logiciels les plus utilisés.....	92
3.4.2	Analyse des logiciels les plus utilisés	92
3.4.3	La représentation des diagrammes selon les logiciels commerciaux.....	93
3.4.4	La représentation des réseaux à travers les logiciels commerciaux.....	96
3.4.5	Avis de certains utilisateurs des systèmes	97
CHAPITRE 4	PROBLÉMATIQUE ENGENDRÉE PAR LA MODÉLISATION	100
4.1	Les dépendances et les relations en fonction des quantités	100

4.1.1	Introduction.....	100
4.1.2	Anomalie dans les relations de dépendance.....	101
4.1.3	Analyse de l'anomalie présentée	102
4.1.4	Importance des relations multiples	106
4.1.5	Les relations à travers l'ADM.....	106
4.1.6	Contraintes potentielles avec les relations de dépendances	107
4.2	Chemin critique et Chaînes Critiques	109
4.2.1	Présentation de l'approche des Chaînes Critiques	109
4.2.2	Comparaison entre chemin critique et chaîne critique.....	111
4.3	L'allocation et le nivellement des ressources	113
4.3.1	Introduction.....	113
4.3.2	Hypothèses d'ordonnancement.....	113
4.4	Constats, analyses et conclusions	116
4.4.1	Les constats des déficiences des représentations graphiques actuelles	117
4.4.2	Conclusions, rappel des déficiences et les positions retenues.	118
CHAPITRE 5 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE CHRONOGRAPHIQUE		127
5.1	la modélisation chronographique	127
5.1.1	Approche de modélisation	127
5.1.2	Les principaux outils de modélisation	128
5.2	Les activités	129
5.2.1	Rôle et représentation graphique des activités.....	129
5.2.2	Décomposition interne des activités	132
5.3	Les Fonctions temporaires	133
5.3.1	Rôle des fonctions temporaires	133
5.3.2	Types des fonctions temporaires.....	141
5.3.3	Les fonctions temporaires multiples	143
5.3.4	Importance des différents types de fonctions temporaires.....	144
CHAPITRE 6 LES APPROCHES DE MODÉLISATION.....		148
6.1	Modélisation à direction unique de flux de logique.....	148
6.1.1	La planification d'un petit projet	148
6.1.2	Regroupement des sous-réseaux à l'échelle du temps.....	151
6.1.3	Les sous-réseaux à l'échelle des coûts.....	151
6.2	Modélisation à deux directions de flux de logique	154
6.2.1	Variantes du diagramme de Gantt.....	154
6.2.2	Utilisations des unités comme direction de mesure.....	156
6.2.3	Utilisations variables des quantités comme unités de mesure	166
6.2.4	Ressources ou surfaces en direction secondaire	169

CHAPITRE 7 LES CONTRAINTES D'EXÉCUTION..... 173

7.1	Les Relations entre les activités en fonction des Quantités	173
7.1.1	Problématique	173
7.1.2	Exemple d'une planification en fonction des quantités	175
7.2	Fonctions temporaires multiples et l'autoadaptation	178
7.2.1	Problématique	178
7.2.2	Analyse des relations utilisées par la précédence	179
7.2.3	Exemple d'autoadaptation avec la méthode chronographique	183
7.3	Les incertitudes d'exécution	189
7.3.1	Introduction.....	189
7.3.2	Alternative d'exécution et point de décision	190
7.3.3	Les résultats douteux.....	196

CHAPITRE 8 LA FORMULATION MATHÉMATIQUE DU CHRONOGRAPHE 199

8.1	Calcul des limites temporelles pour une activité	199
8.1.1	Codification.....	199
8.1.2	Limites temporelles pour une activité.....	200
8.1.3	Calcul du début au plus tôt (ES)	204
8.1.4	Calcul de la fin au plus tard (LF).....	205
8.2	Les différents types de marges connues.....	206
8.3	Les diverses marges utilisées par la méthode chronographique	208
8.3.1	La nécessité de la création de nouvelles marges.....	208
8.3.2	La marge complète.....	209
8.3.3	La marge début et la marge fin	211
8.3.4	Les marges partielles.....	213
8.3.5	Exemple : Réparation d'un pilier d'un pont	214
8.4	La combinaison entre les marges connues et celles proposées par la méthode chronographique.....	222
8.4.1	Les marges complètes	224
8.4.2	Les marges début	232
8.4.3	Les marges de fin	237

CHAPITRE 9 LA PLANIFICATION ET LE CONTRÔLE DES PROJETS..... 242

9.1	Les niveaux de détail	242
9.1.1	Importance de la planification sur plusieurs niveaux de détail.....	242
9.1.2	Exemple d'application	243
9.2	Processus de contrôle de l'avancement des projets	247
9.2.1	Évaluer l'état du projet.....	247
9.2.2	Mesure d'évaluation de l'avancement du projet.....	251
9.2.3	Illustration de l'avancement des activités avec la méthode chronographique	252

9.3	Les Ressources.....	255
9.3.1	Méthodologie d'application.....	255
9.3.2	Procédure d'allocation et de nivellement de ressources.....	255
9.3.3	Renivellement des ressources.....	258
9.3.4	Rassemblement des ressources.....	260
9.4	Plan de validation de la méthode chronographique.....	263
9.4.1	Applications réelles.....	264
9.4.2	Mesures de performance des modèles de planification.....	264
9.4.3	Les coefficients de comparaison.....	267
9.4.4	Protocole de validation externe.....	270
CHAPITRE 10 LA PLANIFICATION À TRAVERS LE PROTOTYPE INFORMATIQUE		273
10.1	Objectifs de développement.....	273
10.2	Caractéristique du prototype.....	274
10.3	Planification à travers le prototype.....	274
10.4	Différents exemples d'application.....	289
10.4.1	Un projet à trois niveaux.....	289
10.4.2	Organisation de l'information.....	292
10.4.3	Projets à caractère répétitifs.....	293
10.5	Système d'aide à la décision.....	294
10.5.1	Le SIAD « X- PERT ».....	294
10.5.2	La combinaison des deux prototypes.....	296
10.6	Vers une approche de planification intégrée.....	297
CONCLUSION GÉNÉRALE		300
ANNEXES		
1	Allocation et nivellement des ressources.....	304
2	Renivellement des ressources et compression.....	312
3	Projets d'applications (sur CD).....	320
BIBLIOGRAPHIE		322

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Séquence des tâches..... 105
Tableau II	Alternatives, durées et probabilités 193
Tableau III	La combinaison des marges connues avec celles proposées par la méthode chronographique 223
Tableau IV	Ressources associées aux activités 257

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Les techniques utilisées 13
Figure 2	La clarté visuelle et l'échelle du temps 16
Figure 3	La planification et les jours fériés..... 18
Figure 4	Rassemblement des ressources..... 20
Figure 5	Calendriers différents sur le même échancier..... 21
Figure 6	Allocation des ressources 22
Figure 7	Niveau maître avec ses sous-réseaux 23
Figure 8	Les diagrammes représentés sur trois dimensions..... 27
Figure 9	Modèle graphique..... 40
Figure 10	Méthode activités sur flèches 42
Figure 11	Identification des activités à travers l'adm..... 42
Figure 12	Utilisation des activités fictives pour identifier les activités 43
Figure 13	Utilisation des activités fictives pour montrer une relation..... 43
Figure 14	Méthode de la précédence 44
Figure 15	Détection des boucles..... 50
Figure 16	Séparer le projet en sous-projet 51
Figure 17	Relations inutiles 52
Figure 18	Le graphe de la méthode pert généralisée 55
Figure 19	Exemple de graphe gert 56
Figure 20	Exemple de graphe de dcpm..... 57
Figure 21	Exemple de graphe de vert..... 58
Figure 22	Exemple de cyclone..... 59
Figure 23	Microcyclone et les projets lourd de construction 60
Figure 24	Exemple de storoscope 61
Figure 25	Exemple de simcon..... 62

Figure 26	Diagramme gantt	65
Figure 27	Adm à l'échelle du temps	67
Figure 28	La méthode most	68
Figure 29	Pdm à l'échelle du temps.....	69
Figure 30	Réseaux à l'échelle du temps et des coûts.....	70
Figure 31	Fenced bar chart.....	71
Figure 32	Pictorial network analysis.....	72
Figure 33	Adm à l'échelle du temps	73
Figure 34	Pdm à l'échelle du temps.....	74
Figure 35	Adm à l'échelle du temps	75
Figure 36	Activités divisées selon le pourcentage d'avancement.....	76
Figure 37	Planification dynamique	77
Figure 38	Adm à l'échelle du temps	79
Figure 39	Méthode « line of balance »	83
Figure 40	Linear scheduling method	85
Figure 41	Time space sheduling method	85
Figure 42	La méthode proposée par suhail et neale.....	88
Figure 43	Repetitive scheduling method	90
Figure 44	La visualisation du diagramme gantt à travers ms-project.....	94
Figure 45	La visualisation du diagramme gantt avec open-plan	94
Figure 46	Le diagramme gantt présenté par primavera	95
Figure 47	Primavera et le fenced bar chart	95
Figure 48	La précédence à l'échelle du temps avec ms-project	96
Figure 49	La précédence à l'échelle du temps selon primavera	97
Figure 50	L'échelle du temps sur ordinateur (adapté de fisk, 2000)	99
Figure 51	Anomalie des relations	102
Figure 52	Aménagement d'un local.....	103
Figure 53	Le projet présenté à travers l'adm	107
Figure 54	Les relations à travers la précédence	108

figure 55	Arrière plan à deux dimensions.....	128
Figure 56	Représentation physique d'une activité.....	129
Figure 57	Activités en série et en parallèle.....	130
Figure 58	Exemples de représentation des attributs des activités.....	131
Figure 59	Décomposition interne des activités.....	132
Figure 60	Points de liaison.....	133
Figure 61	Fonction temporaire fictive.....	134
Figure 62	Délai minimal exigé.....	135
Figure 63	Délai maximal exigé.....	136
Figure 64	La marge libre.....	137
Figure 65	Combinaisons entre les exigences.....	138
Figure 66	Différentes représentations des branches directrices.....	139
Figure 67	Types début/début et fin/fin.....	141
Figure 68	Types interne/interne, interne/début et fin/interne.....	142
Figure 69	Fonctions temporaires multiples.....	143
Figure 70	Anomalie de la précédence.....	144
Figure 71	Le projet planifié avec la méthode chronographique (étape 1).....	145
Figure 72	Le projet planifié avec la méthode chronographique (étape 2).....	146
Figure 73	Le projet planifié avec la méthode chronographique (étape 3).....	147
Figure 74	La méthode chronographique à l'échelle du temps.....	150
Figure 75	Rassemblement des sous-réseaux à l'échelle du temps.....	152
Figure 76	Rassemblement des sous-réseaux à l'échelle des coûts.....	153
Figure 77	Les tâches sur l'activité.....	155
Figure 78	Échelle temps / unités.....	157
Figure 79	Projet répétitif à caractère horizontal.....	161
Figure 80	Projet répétitif à caractère horizontal - cédule allégée.....	162
Figure 81	Projet répétitif à caractère vertical.....	163
Figure 82	Les projets répétitifs à taux de progression variable.....	164
Figure 83	Projet répétitif à caractère horizontal.....	165

Figure 84	Échelle de quantités sur la direction tertiaire.....	167
Figure 85	Échelle des unités sur la direction principale	168
Figure 86	Échelle temps / ressource	170
Figure 87	Échelle temps / ressource pour les travaux de béton.....	171
Figure 88	Échelle temps / ressource pour diverses spécialités	172
Figure 89	Les relations en fonction des unités de temps	175
Figure 90	Des relations en fonction des quantités	176
Figure 91	Formulation mathématique des fonctions temporaires.....	177
Figure 92	Présentation du projet avec la cpm et la précédence	179
Figure 93	L'utilisation des quantités comme mesure interne	180
Figure 94	L'utilisation d'une productivité variable	181
Figure 95	La présentation utilisant la quantité comme mesure interne	181
Figure 96	L'effet de la variation de la productivité sur les relations	182
Figure 97	Autoadaptation avec deux fonctions temporaires.....	184
Figure 98	Autoadaptation et exigences d'exécution.....	184
Figure 99	Suivi interne d'avancement et autoadaptation.....	185
Figure 100	Suivi interne d'avancement et autoadaptation - 2	186
Figure 101	Suivi interne d'avancement et autoadaptation - 3	187
Figure 102	Les méthodes classiques et l'autoadaptation.....	188
Figure 103	Alternative d'exécution et point de décision	191
Figure 104	Influence du choix d'une alternative sur le projet	192
Figure 105	Ajustement de la durée d'exécution	195
Figure 106	Entité de probabilité négative.....	195
Figure 107	Les résultats douteux	196
Figure 108	Présentation graphique des résultats douteux.....	197
Figure 109	Formulation mathématique des activités	199
Figure 110	L'environnement d'une activité.....	201
Figure 111	Marges totale, libre, indépendante et d'interférence	206
Figure 112	La marge complète	210

Figure 113	Marge début et marge fin.....	212
Figure 114	La planification du projet à travers le chronographe.....	216
Figure 115	La planification du projet à travers la précédence.....	218
Figure 116	La planification du projet à travers l'adm.....	219
Figure 117	La planification non détaillée à travers gantt.....	220
Figure 118	La planification détaillée à travers le diagramme de gantt.....	221
Figure 119	La marge complète totale.....	225
Figure 120	La marge complète libre.....	226
Figure 121	La marge complète indépendante.....	228
Figure 122	La marge complète d'interférence.....	230
Figure 123	La marge début totale.....	232
Figure 124	La marge début libre.....	234
Figure 125	La marge début indépendante.....	235
Figure 126	La marge fin totale.....	237
Figure 127	La marge fin libre.....	239
Figure 128	La marge fin indépendante.....	240
Figure 129	Les niveaux de détail.....	244
Figure 130	Combinaison entre les niveaux de détail.....	245
Figure 131	Contrôle d'avancement avec le diagramme de gantt.....	248
Figure 132	Suivi des coûts des projets à travers la courbe s.....	249
Figure 133	L'état d'avancement des projets à travers la courbe s.....	250
Figure 134	Le contrôle à travers la méthode chronographique.....	254
Figure 135	Présentation des ressources.....	256
Figure 136	Utilisation des ressources.....	260
Figure 137	Le projet avant rassemblement des ressources.....	261
Figure 138	Le projet après rassemblement des ressources.....	262
Figure 139	Interface utilisateur.....	275
Figure 140	Dessiner une activité.....	276
Figure 141	Déplacement d'une activité.....	277

Figure 142	Changement de la durée d'une activité.....	277
Figure 143	Les jours fériés	278
Figure 144	Fonctions temporaires	279
Figure 145	Un sous réseau.....	280
Figure 146	Fonctions temporaires internes.....	281
Figure 147	Chronographe démontré sur tout l'écran	282
Figure 148	Chronographe planifié avec les jours du calendrier	283
Figure 149	Regroupement des sous-réseaux.....	284
Figure 150	Chronographe planifié avec les semaines	285
Figure 151	Informations sur les activités.....	286
Figure 152	Module d'allocation des ressources.....	288
Figure 153	Niveau 1 - supérieur	289
Figure 154	Niveau 2 – intermédiaire	290
Figure 155	Niveau 3 - détaillé.....	291
Figure 156	Organisation visuelle de l'information.....	292
Figure 157	Projet à caractère répétitif.....	293
Figure 158	Le siad X-PERT	294
Figure 159	Graphe de modélisation de connaissance selon X-PERT.....	295
Figure 160	Architecture d' X-PERT.....	296
Figure 161	Le processus à travers nos prototypes intégrés.....	297
Figure 162	Vers une approche de planification globale des projets	299

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Bien que le domaine de la planification et du contrôle des projets ait fait l'objet de nombreuses études et recherches pertinentes pendant plusieurs décennies et bien que plusieurs systèmes aient été réalisés depuis utilisant des investissements considérables, pour plusieurs, l'utilisation des méthodes et des outils actuels reste une tâche complexe qui génère des coûts importants. Cette source de complexité provient du fait que les informations concernant l'ingénierie, la procurement et les opérations de construction sont trop étendues pour qu'une simple modélisation traditionnelle des réseaux d'ordonnancement soit vouée à les présenter fidèlement et clairement.

Le présent travail de recherche vise une contribution au développement de la modélisation graphique de la planification. Toute évolution de la performance de modélisation qui la rende plus acceptable pour les utilisateurs est considérée comme un avancement de la science. Cette évolution doit être autant du point de vue visuel que fidélité de représentation. Une modélisation peut être très visuelle mais ne représenter qu'une quantité limitée d'information. Au contraire, une modélisation pourra être très fidèle au projet mais avec une mauvaise clarté visuelle. Avec une modélisation fidèle et visuelle, nous produisons ainsi un genre de système d'aide à la décision sans base de connaissance formelle.

Cette thèse, fait état du concept théorique, du modèle mathématique, de l'approche de modélisation d'une nouvelle modélisation, qui est estimée, capable de répondre aux attentes des gestionnaires. Cette méthode est intitulée *méthode chronographique*.

La thèse est constituée de dix chapitres regroupés sous trois thèmes.

LE PREMIER THÈME

Le premier thème traite de l'état actuel de la modélisation de la planification des projets et se divise en quatre chapitres. Le premier analyse les fondements d'ordonnancement et situe l'approche de modélisation *chronographique* parmi les autres techniques. Ce chapitre est classé en premier lieu dans la thèse afin d'orienter la ligne générale de recherche. Ainsi, les objectifs et les limites de recherches sont discutés. Pour mieux décrire les points de vue et être bref et concis dans les avis, les comparaisons furent introduites sans énumération ni explications des méthodes analysées.

Le deuxième et le troisième chapitres font la description et l'analyse des méthodes existantes dans le but de focaliser leurs avantages et de définir leurs limites. Le chapitre 2 montre l'ordonnancement présenté sans aucune mesure fixe pour les flux de logique et appelée aussi, dans ce document, *la logique pure*¹. Le chapitre trois présente ces flux mesurés à l'échelle du temps.

À ce stade, il faut citer deux remarques importantes : La première concerne le bilan des outils et des méthodes actuellement utilisées. La plupart de ces méthodes ont été développées entre la fin des années cinquante et la fin des années quatre-vingt du centenaire précédent. Par conséquent, la majorité des références bibliographiques sont relative à cette période. Il faut remarquer que peu de recherches concernant la modélisation graphique ont été effectuées durant les quinze dernières années. La deuxième remarque concerne les illustrations de certaines méthodes « historiques ». Malgré la clarté des propos, la qualité graphique de ces illustrations est considérée très moyenne. La qualité des figures présentées est celle des originaux publiés et utilise, malheureusement, la qualité de la reproduction de l'époque.

¹ Le terme *logique pure* trouve son origine du terme anglais *pure logic* utilisé pour ce type de modélisation.

Le quatrième chapitre analyse les contraintes d'ordonnement et aborde la problématique engendrée par le processus de modélisation. Cette analyse a prouvé l'importance du développement d'une nouvelle méthode de planification.

LE DEUXIÈME THÈME

Ce thème constitue le cœur de la thèse car il expose la solution proposée. Les cinq chapitres, du chapitre 5 au chapitre 9 qui le composent, s'intéressent au développement de la modélisation *chronographique* de la planification des projets.

Le cinquième chapitre décrit la méthode *chronographique*. Dans ce chapitre, les caractéristiques des entités de modélisation, leurs types, leurs rôles et leurs importances sont étudiés.

Le sixième chapitre précise les diverses approches de modélisation de la planification des projets et illustre les différentes facettes et directions des flux de logique.

Le septième chapitre approfondit les concepts des contraintes relationnelles d'exécution. Ainsi, sont démontrées les relations entre les activités en fonction des quantités, les fonctions temporaires multiples, les analyses internes aux activités et les incertitudes d'exécution. Ces propriétés favorisent une fidélité de représentation, une auto-adaptation aux changements et une flexibilité accrue.

Le huitième chapitre est consacré à la formulation mathématique des limites temporelles des activités. Dans ce chapitre, les différents types de marges connues sont analysés. Des concepts avancés, qui traitent des marges dynamiques utilisées par la méthode *chronographique*, sont développés. Enfin, la combinaison de ces marges avec celles connues et les hypothèses qui s'y rapportent sont énoncées.

Le neuvième chapitre s'intéresse aux analyses de gestion et aborde des sujets qui méritent d'être approfondis dans des recherches futures. Les niveaux de détail sont introduits. Les orientations des processus de contrôle de l'avancement des projets sont discutées. Une introduction pour la gestion des ressources est exposée et les mesures de performance des modèles de planification sont formulées.

Des exemples sont avancés au fur et à mesure de la présentation de la modélisation *chronographique*. Plusieurs de ces exemples sont des extraits réels de la méthode employée pour la planification et de la gestion du projet de construction de la *station d'épuration à Kahnawake*. Ce projet dont le coût de construction s'élevait à 4M\$ a été réalisé par le *Technical Engineering Services of the Mohawk Council of Kahnawake* durant la période de septembre 2002 à juin 2003. Les travaux d'ingénierie furent réalisés par le groupe Teknika. Le département de la construction auquel j'étais attaché avait le mandat de planifier des travaux et d'assister la gérance du projet. Les tâches mandatées au département m'ont été confiées.

Durant ce projet, plusieurs facettes des réseaux d'ordonnancement à deux directions de flux de logique ont pu être testées. Sachant que le prototype principal s'intéresse surtout aux modélisations à une direction de flux de logique, des applications informatiques spécifiques ont été développées. Les modélisations utilisées se sont avérées très efficaces et très utiles dans le processus de prise de décision.

LE TROISIÈME THÈME

Le troisième thème est constitué d'un seul chapitre qui décrit le prototype informatique développé. Ce chapitre explique le fonctionnement du prototype et le processus de planification proposé. Des différents exemples d'application à travers le système sont introduits afin d'illustrer l'aspect visuel de l'ordonnancement produit. Une discussion est exprimée afin d'étudier la possibilité d'association avec le SIAD X-PERT et d'énumérer les avantages qui peuvent découler d'une combinaison probable entre les

deux systèmes. À la fin de ce chapitre, un aperçu global de l'implantation d'une approche intégrée de la planification des projets est exposée.

CHAPITRE 1

LA MODÉLISATION GRAPHIQUE DU PROCESSUS D'ORDONNANCEMENT

1.1 La modélisation graphique de la planification des projets

1.1.1 Introduction

La gestion à l'aide des tableaux occupe actuellement une place importante dans le domaine de la planification et du contrôle des projets de construction. L'aspect graphique est considéré peu utile surtout dans le cas des gestionnaires expérimentés. Bien que la gestion sous forme tabulaire reste importante, nous sommes convaincus que rien n'équivaut à la modélisation graphique dans le processus de prise de décision. Pour cela, l'objectif principal de cette thèse est de fournir aux décideurs des outils graphiques, d'aide à la décision, convenables et efficaces pour planifier, gérer et contrôler leurs projets.

Aux États-Unis, l'utilisation des méthodes graphiques, dites *CPM* dans les projets de construction, ont mené à une diminution des temps d'exécution de 20 % en comparaison des projets similaires qui n'emploient pas ces outils de gestion (Antill et Woodhead, 1990). Ceci est dû au fait que les réseaux établissent le processus responsable de la durée du projet. Selon Balaguru et al. (1977), l'importance de l'aspect graphique, comme moyen efficace de communication, a incité le développement des systèmes automatisés. Ces systèmes transforment les résultats tabulaires d'analyses des réseaux en une représentation graphique.

Le recours à la planification sous forme de tableaux peut être attribué en partie à la complexité des représentations graphiques existantes. Cela devrait ouvrir, en premier lieu, la porte au perfectionnement de ces représentations. La quantité des travaux

entreprise dans ce domaine et les résultats des sondages effectués ont démontré la nécessité de recherches futures pour l'amélioration de la qualité des échéanciers produits.

Ce chapitre discute de la particularité de la modélisation graphique des projets de construction par rapport à la modélisation générale des processus de production. Il présente aussi les objectifs de développement et les limites de cette recherche.

1.1.2 La modélisation graphique

De l'avis de plusieurs, une image vaut mieux que mille mots parce qu'elle permet un plus grand débit d'information que le texte et car elle est comprise globalement et non séquentiellement par l'être humain. La quantité d'information contenue dans une image est aussi importante. De plus, il est possible de jouer sur de nombreux paramètres facilement identifiables (forme, intensité, couleur et texture). Ces paramètres peuvent prendre des valeurs différentes en tout point de la surface de l'image et aussi évoluer dans le temps.

La modélisation graphique est une opération pour construire, à travers une image, un plan ou un schéma, le modèle d'un système complexe, afin d'étudier le rôle de chacun de ses éléments. Selon Vernadet (1996) un modèle est une représentation abstraite² d'une situation réelle ou d'un comportement au moyen d'un langage ou d'une expression. En général, le modèle est moins complexe que la réalité, mais il doit être suffisamment complet pour simuler au mieux la réalité étudiée.

² Parce que le modèle n'est jamais parfait à cause de la complexité de la réalité.

Badiru et Pulat (1995) définissent les caractéristiques d'un modèle comme suit :

- Représentation simplifiée de la situation actuelle,
- Explication et prédiction,
- Validation,
- Applicable à des problèmes similaires.

La modélisation du processus de production est largement utilisée pour diverses applications, deux principaux types peuvent être distingués : la modélisation de la fabrication industrielle et la modélisation de la planification des projets.

La modélisation de la fabrication industrielle

La fabrication industrielle est le processus de production des produits manufacturés (fabrications des voitures, des produits électroniques, des électroménagers, du pétrole, des produits agroalimentaires etc.). Cette fabrication se distingue par le fait que le processus de production doit être bien défini avant son démarrage. En plus, dans plusieurs cas un prototype est aussi réalisé afin d'aider, entre autres, à une identification concrète de toutes les étapes de production. Dans la fabrication industrielle, l'unité produite circule à travers le système pour subir les transformations nécessaires prévues par son processus de fabrication.

La modélisation de la fabrication concerne la représentation graphique de ce processus de production. Elle s'intéresse normalement aux flux de matières, aux flux d'information, aux flux des coûts et aux flux de contrôle. Plusieurs méthodes ont été développées à ces fins, tel que : les réseaux *PETRI* qui sont des représentations dynamiques des graphes, les *Plans d'Agencement* qui représentent les flux de circulation entre diverse localisation, le concept du *désign axéomatie* pour aider à une meilleure réalisation du produit, les modélisations *SADT* (*structural analyses and*

design technique) et *IDEF0* (*Icam [Integrated Computer-Aided Manufacturing] DEFINITION*) pour la décomposition des systèmes complexes en fonction, en sous-fonction et en activité, les modèles *SSAD* (*structural system analysis and design*), *IDEF1* et *ERA* (*Entity-relationship approach*) pour démontrer les flux d'informations et les relations organisationnelles, et la méthode *IDEF3* pour la description des processus opérationnels.

La modélisation de la planification des projets

Selon Badiru et Pulat (1995), un projet est considéré comme un ensemble, relativement complexe, d'activités et de tâches toutes orientées vers un objectif précis et connu au départ. Cet objectif correspond à la réalisation d'un produit, faisant que son atteinte est objectivement vérifiable. Un projet se distingue par trois caractéristiques intrinsèques

1. Il constitue une nouveauté : ainsi, il n'a jamais été réalisé dans le passé, les procédures, les méthodes de travail et les moyens techniques ne sont pas connus en détail au moment où l'on décide d'entreprendre le projet.
2. Il est une entreprise unique : pour cela l'objectif est atteint lorsque le projet est complètement terminé.
3. Il est une activité importante : à cause de ses caractéristiques de complexité, de nouveauté et d'unicité, le projet constitue une activité d'importance pour l'organisation qui le réalise.

Vu ces caractéristiques, plusieurs incertitudes peuvent être liées à l'exécution d'un projet. Les degrés d'incertitude varient selon sa nature, l'exactitude des études entreprises et le contexte dans lequel ce projet sera réalisé. Ces incertitudes peuvent être présentées par des probabilités qui évaluent les degrés de respect des diverses contraintes. Ainsi, selon leurs capacités à représenter ces incertitudes, les méthodes de planification des projets sont classées en trois groupes :

- Les méthodes déterministes : des méthodes utilisées pour planifier des projets traditionnels pour lesquelles des études détaillées sont déjà menées. Ainsi, les degrés d'incertitude liés à l'exécution de ces projets sont relativement faibles. Pour cela, ces méthodes supposent des durées, des coûts et des séquences d'exécution fixes pour les diverses activités du projet.

Dans les méthodes déterministes, les probabilités d'incertitude associées aux coûts sont, normalement, prises en considération dans les contingences du projet. Celles associées aux durées sont prises en considération lors de l'estimation de ces dernières. En plus, aucune probabilité n'est associée à la séquence d'exécution. Cette dernière étant considérée bien connue d'avance parce que la qualité attendue ainsi que le produit final sont bien déterminés.

- Les méthodes probabilistes : des méthodes pareilles aux méthodes déterministes. Sauf que les probabilités associées aux durées sont estimées plus importantes. Un traitement indépendant de ces probabilités est donc nécessaire.
- Les méthodes généralisées : il s'agit des méthodes qui peuvent représenter des incertitudes relatives à la plupart des contraintes. Ainsi, les durées des activités, les coûts budgétaires, les séquences d'exécution et même parfois la qualité du produit final sont incertains. Ces méthodes sont convenables à des projets de grande complexité et où plusieurs décisions sont laissées à plus tard. Des projets réalisés selon les principes de l'ingénierie simultanée dans lesquelles la conception et la réalisation se font en parallèle.

Selon Miresco (1994), la modélisation de la planification des projets décrit l'ensemble des opérations du projet, autant du point de vue temporel que financier. Elle constitue la représentation symbolique du processus d'exécution, impliquant le traitement d'une vaste quantité de connaissances pour respecter les diverses contraintes internes et externes au projet.

1.2 La modélisation de la planification des projets de construction

1.2.1 Introduction

Les caractéristiques du secteur de la construction sont directement rapportées aux conditions de la production et à ses contraintes singulières; à savoir la variabilité³ (Campinos-Dubernet, 1984) et l'instabilité dans la constitution des équipes du projet⁴.

En plus, le recours important à la sous-traitance par l'entremise des entreprises spécialisées est une particularité spécifique du secteur de la construction. Ainsi, un grand pourcentage des activités des projets est réalisé par ces dernières.

Pour cela, la quantité de données historiques sauvegardée reste minimale. Ainsi, la réalisation des projets de construction est principalement fondée sur l'expertise personnelle de l'équipe de gestion. Dans ce contexte, une planification et un contrôle rigoureux des travaux sont évidents pour atténuer les effets négatifs de ces particularités.

1.2.2 État de la modélisation des projets de construction

L'augmentation des coûts de production, l'accroissement de la concurrence et la limitation des ressources ont entraîné une obligation d'amélioration. Les entreprises soucieuses de rester compétitives ont révisé leurs systèmes de planification et de contrôle des projets. Ces améliorations sont surtout survenues au niveau des procédures de contrôle qui sont devenues plus rigoureuses. L'utilisation des supports informatiques

³ Conditions climatiques imprévues et changeantes, l'instabilité du lieu de production (Kundig, 1984), qualité du sol différente d'un emplacement à l'autre, accessibilité au site plus ou moins facile, disponibilité variable des surfaces de stockage des matériaux, etc.

⁴ Affectation de l'équipe de gestion et du personnel lié à l'exécution en fonction de leurs disponibilités, engagement des sous-traitants en fonction de leurs offres, etc.

et des méthodes de planification traditionnelles supportées par les logiciels commerciaux sont devenus aussi plus fréquentes.

L'évolution des logiciels commerciaux de planification s'intéressait à l'amélioration de la gestion des multi-projets avec des Multi-Utilisateurs, dans la répartition des ressources et des budgets entre les divers projets, dans l'intégration informatique avec d'autres applications et dans la production des divers analyses et rapports. Par contre, l'amélioration de la modélisation graphique et l'application des méthodes généralisées ne sont affectées que marginalement par ces applications informatiques commerciales. Notons que l'utilisation des systèmes à base des simulations, des systèmes experts ou des systèmes interactifs d'aide à la décision restent très occasionnels dans la planification des projets de construction.

Un sondage a été réalisé par (Liberatore et al 2001) pour étudier l'importance des systèmes informatiques dans la planification des projets. Envoyé à 688 professionnels du *Project Management Institute*, ce sondage avait un taux de réponse de 34,9 %. Les résultats ont démontré que plus de 70 % des répondants utilisaient les logiciels commerciaux dans la planification de tous leurs projets. Ce chiffre était presque le double de celui obtenu cinq ans plus tôt. De plus, 40 % des répondants utilisaient les logiciels dans le suivi et le contrôle des ressources et des coûts.

Aouad et Price (1992) ont réalisé un sondage sur les techniques de planification. Ce sondage était effectué à l'aide d'un questionnaire envoyé aux ingénieurs planificateurs des 100 plus grandes entreprises de construction au Royaume-Uni et à 303 des 400 plus grandes entreprises de construction américaine. Le pourcentage de réponse était de 33 % au Royaume-Uni et de 14 % aux États-Unis.

Ce sondage désignait les méthodes du chemin critique et le *diagramme de Gantt* comme les techniques de planification les plus utilisées. L'emploi des autres méthodes restait marginal surtout aux États-Unis *Figure 1*.

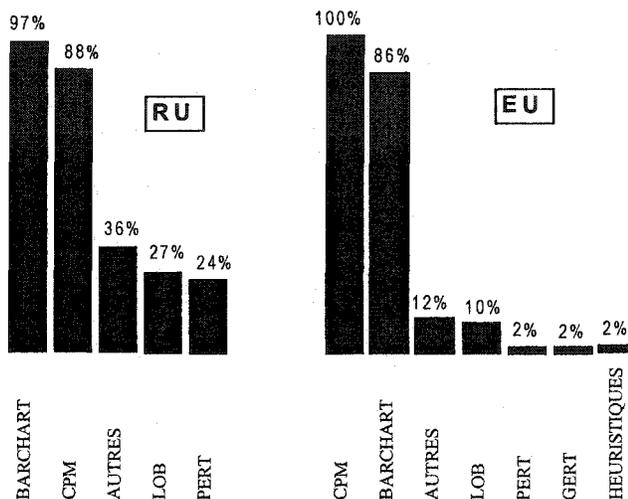


Figure 1 Les techniques utilisées
(Adapté de Aouad et Price, 1992)

Ce sondage a aussi indiqué l'importance des expériences personnelles et des données historiques. Ces sources de données avaient des taux qui dépassaient les 90 % pour planifier les futurs projets dans les deux pays. De plus, seulement 15 % connaissaient les systèmes experts et les méthodes de simulation au Royaume-Uni, ce taux s'élevait à 41 % aux États-Unis.

1.2.3 Les types de modélisation compatibles aux projets de construction

Malgré les caractéristiques de variabilité et d'instabilité singulière du secteur de la construction, plusieurs chercheurs (Malcom et al, 1959), (Fisk, 2003), (Hinze, 2004) voient que les projets de construction peuvent être estimés d'une manière assez précise. Pour cela, les méthodes de planification déterministes sont généralement suffisantes. Cet avis est dû à plusieurs facteurs :

- Plusieurs maîtres d'ouvrage exigent que des plans et devis détaillés des projets soient complétés avant de procéder aux appels d'offres. Cette exigence a pour

but de favoriser une concurrence parfaite et de pouvoir évaluer les soumissions sur un pied d'égalité;

- Un pourcentage important des projets de construction est réalisé par les sous-traitants. Ceux-ci possèdent, normalement, une bonne connaissance de leur domaine de spécialisation. La planification détaillée, des projets, consiste essentiellement à la coordination entre ces intervenants;
- La majorité des activités reliées aux projets, les matériaux utilisés et les méthodes de construction attribuées sont bien connus et déjà exécutés plusieurs fois au passé.

Bien que les méthodes déterministes soient les plus importantes dans la planification des projets de construction, l'utilisation des méthodes probabilistes et généralisées sont de plus en plus nécessaires. Le choix des contrats clés en main ou de gestion de la construction va généralement de pair avec les projets novateurs. La sélection entre les diverses alternatives d'exécution, fabrications et approvisionnements, est faite tout au long du processus d'exécution. Cette méthodologie assure l'optimisation de la valeur ajoutée de l'investissement et l'amélioration de la qualité du produit final tout en respectant les budgets alloués.

Ainsi, toute modélisation graphique des projets de construction doit principalement être orientée vers une planification déterministe tout en intégrant les éléments nécessaires à l'application des diverses probabilités.

1.3 La modélisation graphique à l'échelle du temps

L'utilisation des ordonnancements sans l'échelle du temps limite la communication visuelle des informations. Les graphes produits peuvent difficilement représenter toutes les situations rencontrées dans la pratique courante.

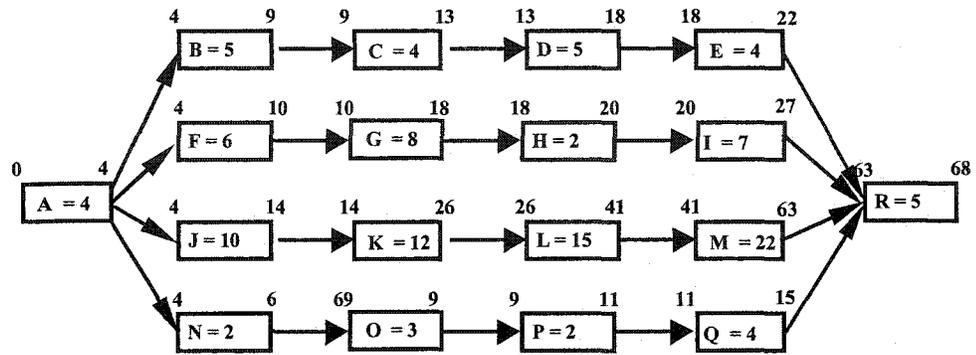
Les compromis encourus engendrent souvent des approximations qui dépassent les limites acceptables et qui aident à générer des retards et des dépassements des budgets. Les faiblesses liées aux ordonnancements qui présentent la logique pure sont résumées dans les points suivants :

1.3.1 Clarté visuelle

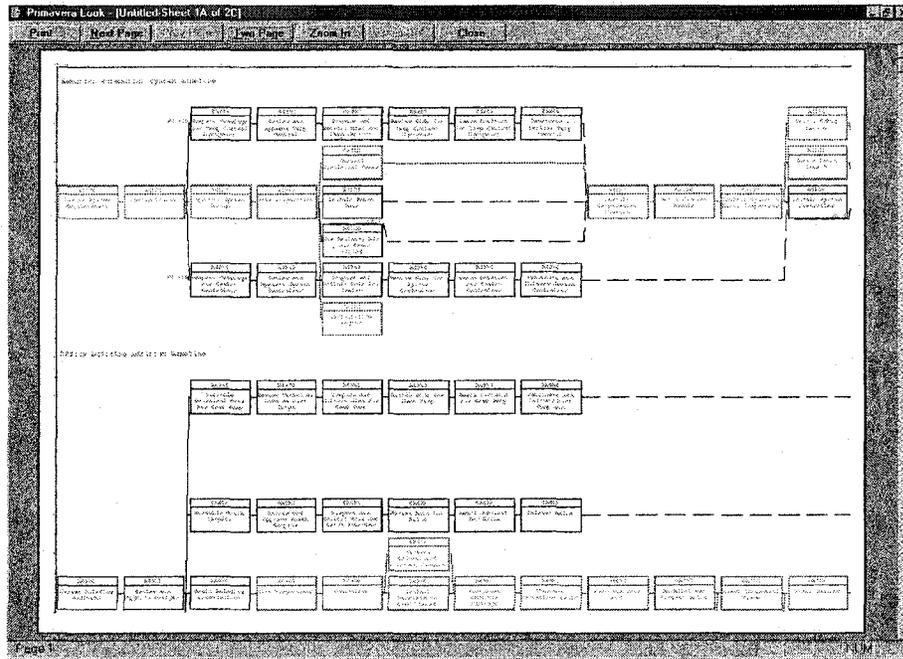
« Bien que toutes les informations puissent être montrées sur les réseaux qui ne sont pas à l'échelle du temps, ces informations demandent beaucoup d'efforts de compréhension » (McGough, 1982).

Dans la *Figure 2. a*, il est facile à croire que les deux activités E et M sont exécutées durant la même période. Également, les deux activités apparaissent comme possédant la même durée, car les dimensions de leurs boîtes sont identiques. En examinant l'échéancier plus en détail, cela n'est pas le cas. L'activité M sera exécutée du 41^{ème} jour ouvrable au 63^{ème} jour ouvrable avec une durée de 22 jours. Par contre, l'activité E sera exécutée en quatre jours et démarrera le 18^{ème} jour ouvrable pour se terminer le 22^{ème} jour.

Si le nombre d'activités augmente, la communication visuelle du planning devient encore plus complexe. La *Figure 2. b*, montre une partie d'un projet utilisant le logiciel commercial *Primavera*. Dans cette figure, une consultation détaillée des activités est indispensable avant de pouvoir affirmer que les deux groupes d'activités, qui apparaissent au-dessus et au-dessous, sont réalisés durant la même période.



(a)



(b)

Figure 2 La clarté visuelle et l'échelle du temps.

1.3.2 Les jours fériés

Sans la représentation de l'échelle du temps, les jours fériés ne peuvent pas être identifiés sur l'ordonnancement. Cela engendre plusieurs effets négatifs sur le résultat de la planification. Les points suivants discutent de ces effets :

- a. Pour les projets de réhabilitation ou d'aménagement divers, certaines activités peuvent être exécutées durant les heures normales de travail, tandis que d'autres doivent être faites hors de ces heures ou durant les jours fériés. Cette contrainte est requise afin de ne pas nuire au bon fonctionnement de l'ouvrage en question. La production d'un échancier réaliste est pratiquement impossible à moins que l'ordonnancement n'ait présenté à l'échelle du temps où les jours de congé sont clairement indiqués;
- b. Certains travaux imposent une durée d'attente avant le démarrage des activités subséquentes. Comme exemple, la prise du béton ou le séchage d'un enduit. Ces activités peuvent contribuer à retarder ou accélérer les projets en fonction de leurs emplacements vis-à-vis des jours de congé.

De plus, en utilisant des méthodes qui emploient seulement les jours ouvrables, ces délais peuvent produire des résultats erronés lors du calcul du chemin critique. Sachant que ces délais d'attentes peuvent être absorbés, en tout ou en partie, par les jours de congé.

Dans la *Figure 3*, la relation entre les deux activités A et B est Fin / Début avec un délai de 2 jours. En calculant le chemin critique avec les jours ouvrables, les délais d'attente sont toujours pris en considération et la durée du projet calculée est de 13 jours. Par contre, en utilisant les jours du calendrier, qui incluent les fins de semaines et les autres jours fériés, la durée du projet peut diminuer jusqu'à onze (11) jours ouvrables.

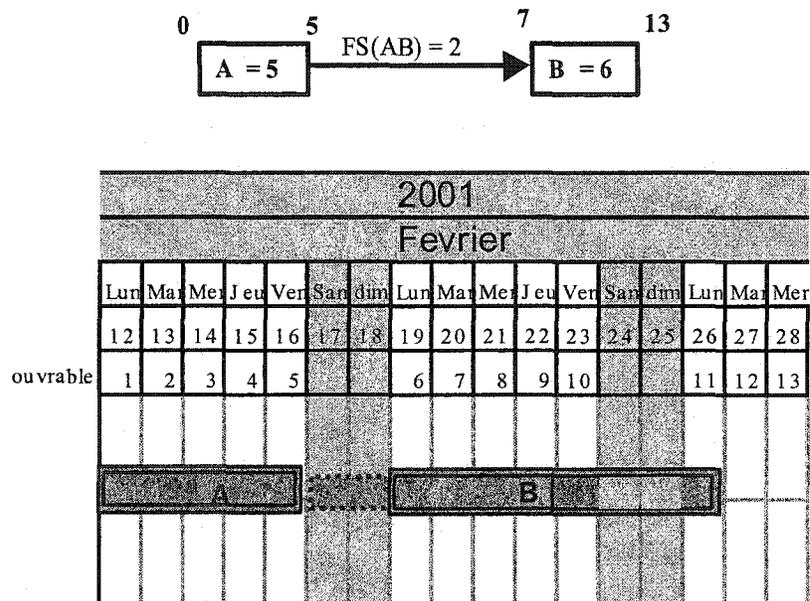


Figure 3 La planification et les jours fériés

1.3.3 Rassemblement des ressources

Le rassemblement, durant une même période, des activités qui utilisent les mêmes ressources coûteuses (la location d'un équipement ou l'intervention d'une ressource humaine spécialisée) est une des solutions d'optimisation des coûts. Ce rassemblement est une tâche très ardue si l'ordonnancement ne représente que la logique pure.

De plus, certaines priorités ou dépendances sont purement dues à des décisions de gestion ou de nivellement de ressources. Ces dépendances ne sont pas possibles à percevoir que si le processus de planification est à l'échelle du temps.

Prenons un exemple d'un petit projet constitué de 17 activités, *Figure 4*. Dans ce projet, les quatre activités E, I, K et M devront être réalisées en utilisant des échafaudages. Les échafaudages sont loués au jour, à la semaine ou au mois. Le coût de location d'une semaine est équivalent à trois jours et le coût pour un mois équivaut trois semaines.

Il faut prévoir, en plus, deux jours pour l'installation des échafaudages et une journée pour la désinstallation. Le coût de la main-d'œuvre nécessaire à l'installation et à la désinstallation équivaut à deux semaines de location. La dernière contrainte à considérer concerne la libération de l'emplacement de tout échafaudage durant l'exécution de l'activité J.

Considérant les coûts de location et d'installation des échafaudages, les contraintes d'exécution et le respect de la durée totale du projet, la solution optimale subsiste à démarrer par l'activité J. Ensuite, les échafaudages seront installés durant deux jours. Les quatre activités qui utilisent les échafaudages seront réalisés avec l'ordre suivant : E, M, I et K. Avec cette solution, les activités E, M et I seront retardées à l'intérieur de leurs propres marges sans aucun impact sur la durée totale du projet.

Bien que le projet soit de très petite taille, le problème est unique et la solution est simple, la recherche de cette solution, avec des techniques de logique pure, reste une tâche compliquée. Il faut conclure que, avec un projet de taille plus importante et dans lequel des problèmes multiples s'imposent, l'optimisation ne pourra se faire qu'à travers des modèles mathématiques.

Convaincu que l'ordinateur ne peut pas remplacer le décideur et conscient de l'importance de l'intervention humaine dans la recherche des solutions, cette thèse soutient que toute méthode destinée à la planification des projets doit avoir une visualisation adéquate et servir comme support d'aide à la décision.

La section, 3.3.4 : *Rassemblement des ressources*, montre que ce même problème reproduit à l'aide de la *méthode chronographique* est plus simple à résoudre.

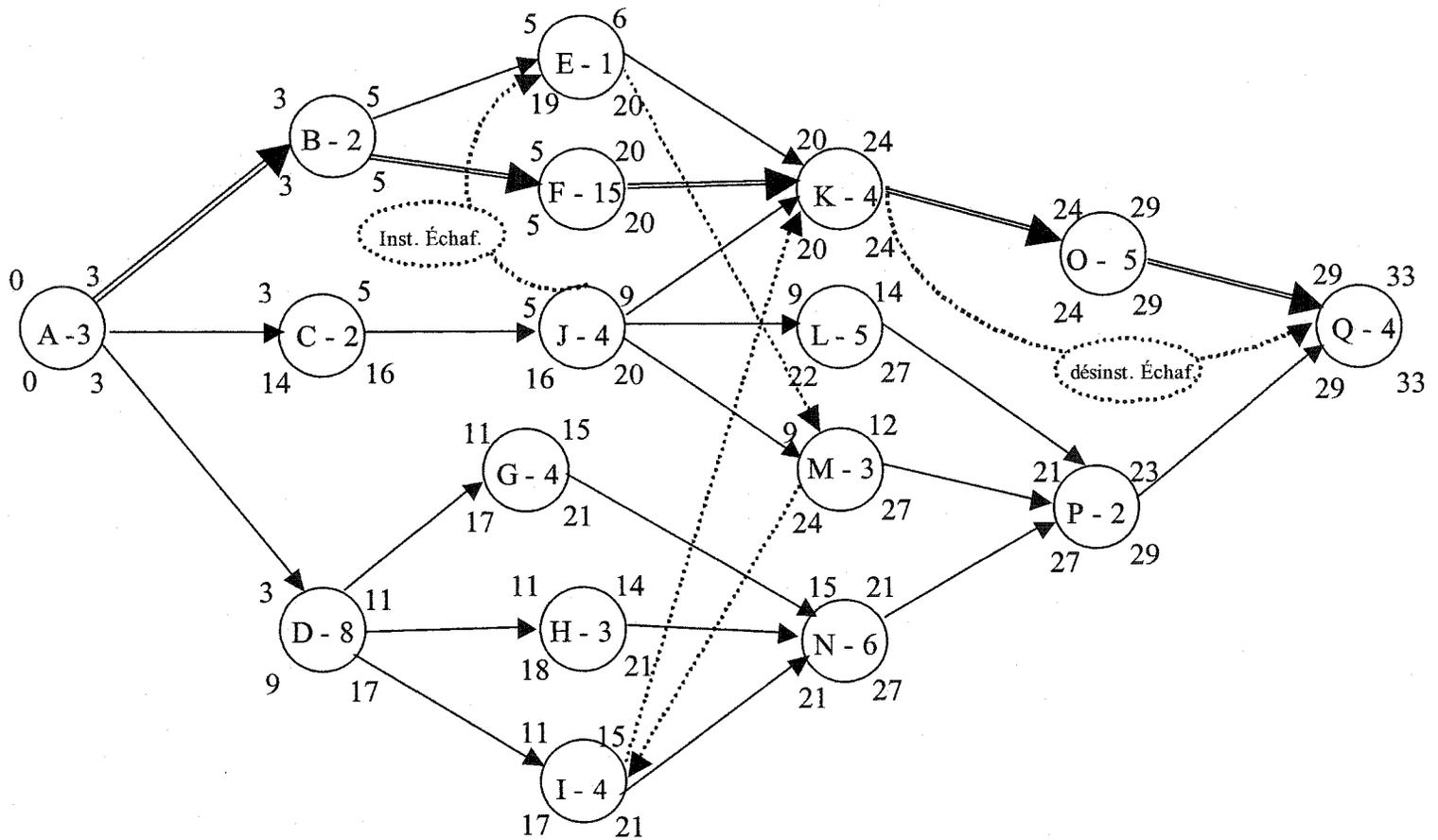


Figure 4 Rassemblement des ressources

1.3.4 Calendriers multiples

Parfois, les ressources utilisent des calendriers différents, chacune d'elles peut avoir des disponibilités différentes des autres ressources. Par exemple, chaque personne possède ses propres dates de congé. De plus, la répartition du temps de chaque personne sur plusieurs projets est indépendante des autres, à moins qu'elle ne soit disponible à temps plein pour ledit projet.

Ce même problème s'impose durant la gestion des projets multiples, qui contiennent, entre eux des contraintes. Normalement, la plupart de ces contraintes sont liées à la disponibilité des diverses ressources.

À l'échelle du temps, l'arrière plan doit représenter le calendrier général du projet. Les calendriers spécifiques à chaque ressource sont indiqués :

- sur la barre qui représente l'activité, *Figure 5*, à condition que cette dernière soit complètement dépendante de cette ressource, cette représentation peut être faite par un arrêt complet de l'activité (activité coffrage) ou par un signe démontant cet arrêt (activité démolition);

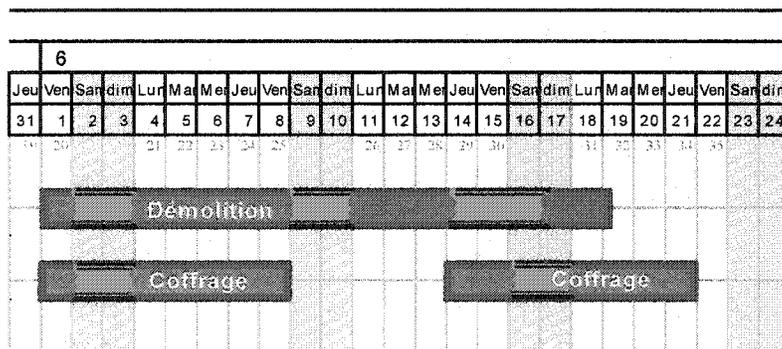


Figure 5 Calendriers différents sur le même échéancier

- dans le tableau des ressources *Figure 6*, si plusieurs ressources effectuent l'activité. Dans ce cas, l'activité n'est pas supposée être interrompue à cause de cette ressource.

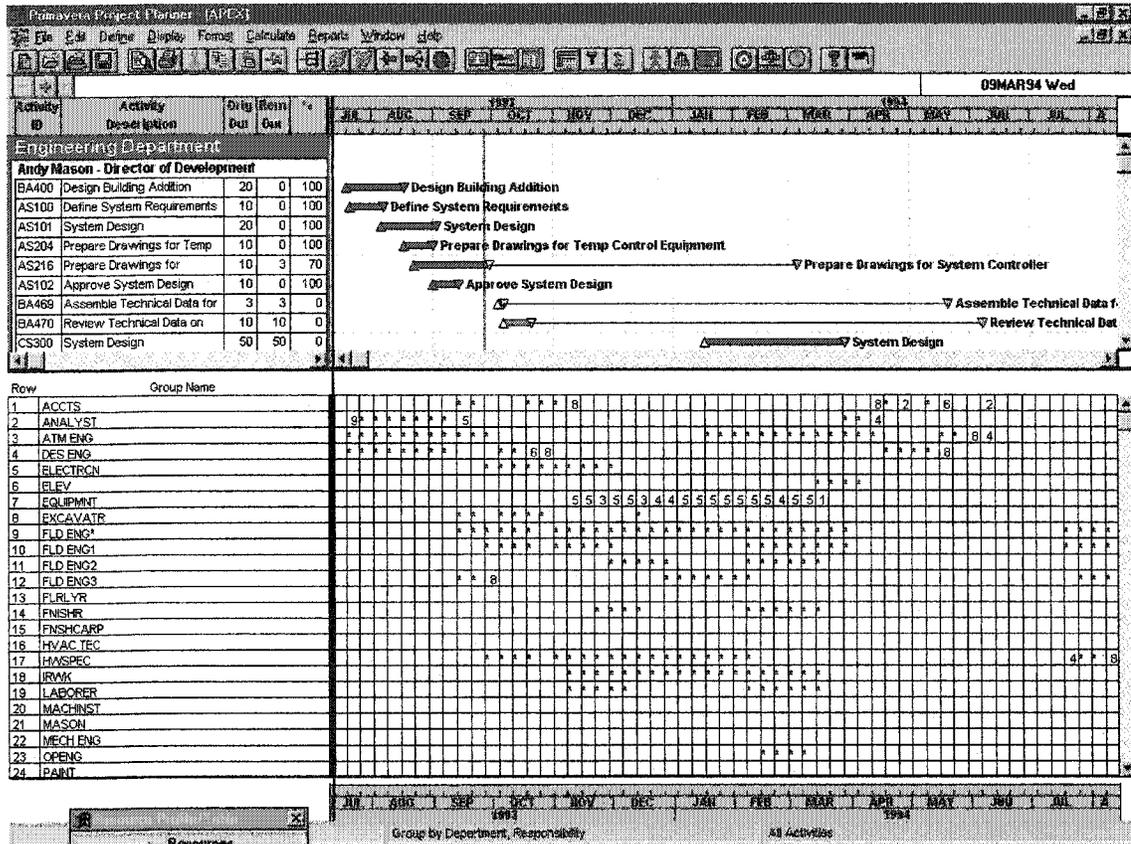


Figure 6 Allocation des ressources

1.3.5 Relations de dépendance et réseaux maîtres

La représentation des relations de dépendance entre les activités d'un réseau maître s'avère inconcevable à moins que des relations internes aux activités existent. Pour démontrer ces analyses internes, une planification à l'échelle du temps s'impose.

Prenons comme exemple, un réseau maître, *Figure 7*, qui est constitué de deux activités 1 et 2. Chacune de ces deux activités est subdivisée en un sous-réseau de quatre activités.

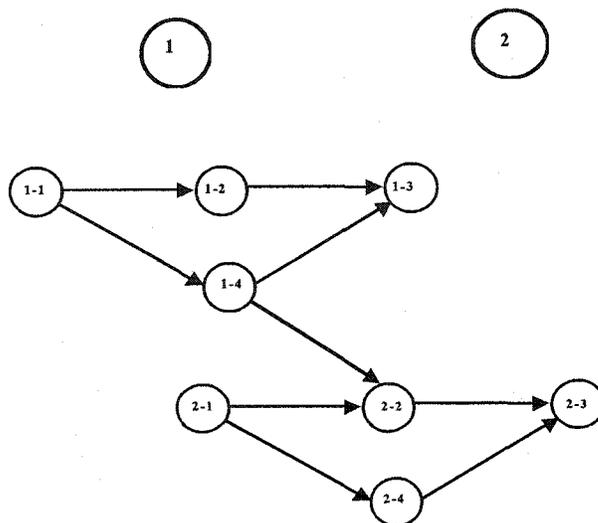


Figure 7 Niveau maître avec ses sous-réseaux

Les deux sous-réseaux sont liés ensemble à travers une relation qui relie la fin de l'activité 1-4 avec le début de l'activité 2-2. La représentation de cette relation au niveau maître n'est faisable que si l'ordonnement est à l'échelle du temps et que la méthode accepte des relations internes aux activités.

1.3.6 Les engagements

Un pourcentage important des projets de construction est réalisé par les sous-traitants. La planification générale des projets, comme déjà citée, est une opération qui consiste principalement à la coordination entre ces divers intervenants. Un ordonnancement orienté par le temps devrait faciliter le suivi de ces engagements.

1.4 Le domaine de recherche de cette thèse

1.4.1 La problématique de recherche

La qualité d'ordonnement de projets est une fonction de la qualité des intrants et des modèles employés. Si les données ou les méthodes utilisées sont pauvres, ainsi seront les résultats. Pour cela, durant les dernières années, les études réalisées dans ce domaine étaient liées à l'un de ces deux paramètres.

Les améliorations, concernant la qualité des intrants, visaient généralement deux objectifs : diminuer les efforts nécessaires aux travaux de préparation et éviter que les résultats ne soient liés à la simple expérience du planificateur. Pour cet effet, plusieurs systèmes experts et systèmes interactifs d'aide à la décision ont été développés. À titre d'exemple : CONSTRUCTION-PLANEX (Hendrickson et al 1987a), PROJECTOR (Morand, 1994) et X-PERT (Miresco, 1994).

Ceux traitant des méthodes d'ordonnement portaient sur deux axes principaux. Le premier concernait les méthodes elles-mêmes en proposant de nouvelles modélisations plus flexibles et plus fidèles à la réalité des projets ou en incluant des probabilités aux diverses contraintes. Le deuxième s'intéressait aux outils de gestion associés aux méthodes. Les recherches menées considéraient une utilisation efficace des différentes ressources et des surfaces de travail, l'optimisation des coûts et la compression des réseaux.

Bien que la modélisation graphique de la planification des projets soit considérée comme la face traditionnelle des méthodes d'ordonnement, ce point mérite d'être mieux développé. Giard (1991) dit que de nombreux problèmes méthodologiques surgissent à l'occasion de l'usage des méthodes d'ordonnement.

Cette recherche s'est attaquée aux méthodes de planification elles-mêmes et plus particulièrement à leurs modélisations graphiques. Ainsi, cette thèse de doctorat fait état du concept théorique, du modèle mathématique, de la représentation graphique et du prototype informatique de la modélisation *chronographique*⁵ de la planification des projets de construction.

1.4.2 L'approche de modélisation

Chaque modélisation est orientée par son approche de représentation. Cette approche définit la nature des entités génériques qui symbolisent les principaux outils de production ou qui déterminent les fonctions décisionnelles. Les entités sont représentées graphiquement à travers des symboles, des arcs ou des formes graphiques reliées entre elles pour définir leurs interdépendances logiques. Les autres outils de production, non identifiés par des entités, sont considérés comme des attributs de ces dernières. Ces attributs peuvent être représentés graphiquement dépendamment de la capacité de la modélisation.

Selon la direction des flux de logique, la modélisation graphique peut être basée sur un système d'axes indéterminé ou avec une, deux ou trois dimensions cartésiennes.

Dans les modèles de simulation, les flux de production circulent dans des boucles logiques. Ces boucles sont inter-reliées entre elles dans plusieurs directions qui dépendent complètement de la propre vision du concepteur du modèle. Ainsi, aucune direction prédéfinie ne peut être attribuée à ce type de modélisation. Pour cela, elles représentent le cas d'aucun axe directionnel prédéterminé.

⁵ Une nouvelle modélisation de l'ordonnancement à l'échelle du temps.

Dans les réseaux, le flux de la logique circule d'un nœud qui représente le début du projet vers un autre nœud qui détermine sa fin. Pour cela elles se fondent sur une logique à une seule direction.

Les diagrammes sont représentés sur au moins deux axes. L'un d'eux montre le temps et le deuxième peut spécifier les activités tel que le *diagramme de Gantt*, les unités produites telles que la *line of balance* ou les coûts tels que la *courbe S*. Ainsi, ces diagrammes appartiennent à la catégorie de deux dimensions cartésiennes.

Plusieurs alternatives de diagrammes à trois dimensions peuvent être suggérées. Dans les deux propositions suivantes le temps et les activités représentent les deux principaux axes. La troisième direction peut montrer les coûts cumulatifs *Figure 8.a*. Elle peut aussi servir à représenter les différents groupes de ressources utilisées par les activités ou la localisation des surfaces de travail occupée par chacune d'elles *Figure 8.b*. Dans cette deuxième figure, les largeurs des activités indiquent leurs coûts respectifs. Ces coûts sont considérés comme des attributs des activités représentés graphiquement.

L'utilisation des méthodes qui démontrent les flux de production à directions indéterminées ou avec trois axes directionnels apparaît très fertile pour la recherche et très efficace pour modéliser et analyser un problème unique. Par contre, cette efficacité diminue exponentiellement avec la multiplication des problèmes ou de l'état présenté. Cette complexité de représentation n'est pas aussi accentuée dans le cas des systèmes d'axes à une ou deux dimensions de représentation.

La modélisation de la planification de projet se caractérise par l'étendue des informations et la complexité des problèmes présentés. Ainsi, seules les systèmes d'axes avec une ou deux dimensions semblent convenables.

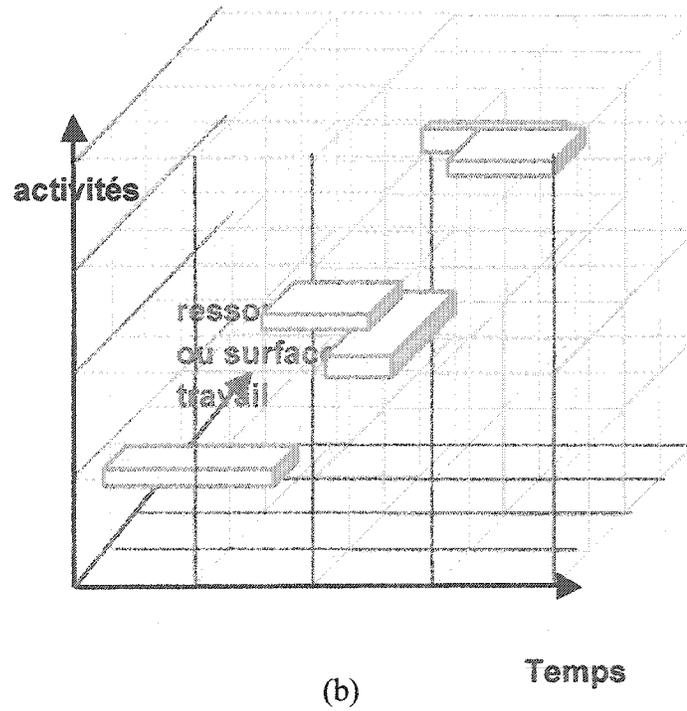
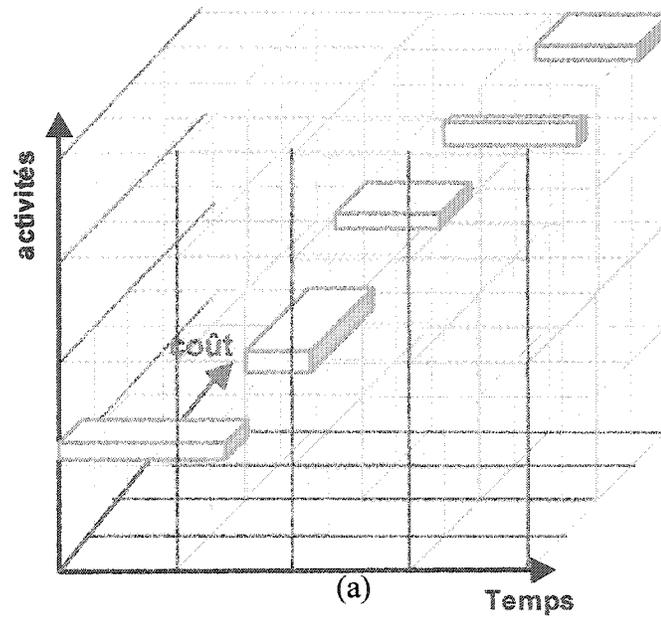


Figure 8 Les diagrammes représentés sur trois dimensions

De plus, la représentation des ordonnancements sur une seule direction logique s'avère le choix par excellence pour représenter les ordonnancements complexes. Cela explique la supériorité des réseaux d'ordonnement représentés à l'échelle du temps sur le *diagramme de Gantt*.

Les systèmes d'axes à une ou deux directions de logique peuvent être orientées par les activités, le temps, les quantités, les ressources humaines ou matérielles, les équipements, les coûts ou les surfaces de travail. Les deux autres systèmes d'axes, à directions indéterminées ou avec trois axes directionnels, peuvent servir comme niveaux de détail des entités principales de la modélisation générale.

1.4.3 L'approche de modélisation chronographique

Les entités génériques

La modélisation *chronographique* repose sur deux entités génériques. L'entité principale qui symbolise l'outil de production et l'entité dépendante qui détermine les fonctions décisionnelles et les contraintes relationnelles. L'identification de ces deux entités est guidée par un processus de sélection.

Premièrement, il fallait identifier si la modélisation repose sur une seule entité principale ou des entités multiples, tel que proposé par les modèles de simulations. Les essais effectués à cet égard, en utilisant les activités, les quantités, les ressources renouvelables et consommables et les surfaces de travail ont démontré la supériorité de l'utilisation d'une seule entité. Notons, que le modèle doit être plus simple que la réalité modélisée. De plus, il était pratiquement impossible de produire un ordonnancement d'un projet complexe à une ou deux directions de flux de logique en utilisant plus d'une entité principale.

Le choix est donc arrêté à identifier une seule entité principale pour démontrer le processus de production et d'une entité dépendante pour simuler les contraintes techniques de succession. Les autres contraintes sont présentées comme des attributs de l'entité principale choisie. Toutefois, des détails de l'entité principale peuvent montrer les autres contraintes comme entités de deuxième degré sur des analyses indépendantes du réseau global.

Deuxièmement, il fallait identifier la contrainte susceptible de présenter l'entité principale. Un choix qui se basait sur la capacité de chaque contrainte à représenter efficacement toutes les autres a guidé à la sélection de l'activité quantifiée. Les discussions et les analyses, menées dans cette thèse, ont appuyé cette approche et prouvé la supériorité d'une modélisation basée sur l'activité quantifiée (l'activité basée sur la quantité comme unité de mesure interne) mesurée à l'échelle du temps.

Cependant, la méthode *chronographique* reste ouverte, surtout dans le cas des représentations à deux directions, à l'utilisation de toutes autres contraintes comme entités principales de modélisation. Les tâches, les ressources, les unités exécutées, les quantités, les surfaces de travail, le temps ou le coût sont des exemples. Ces contraintes peuvent servir, pour répondre à une préférence du planificateur, à traiter des problèmes de nature distincts ou des différents types de projet. Ces contraintes peuvent aussi avoir des mesures internes de production. Ces différentes combinaisons seront traitées à la section 6.2 : *Modélisation à deux directions de flux de logique*.

Les directions des flux de logique

L'ordonnancement, vu sur plusieurs facettes, peut guider le gestionnaire à régler des problèmes de différente nature. Ainsi, une modélisation capable de répondre à ce besoin peut être considérée comme un outil efficace d'aide à la décision.

Pour pouvoir offrir des choix multiples de représentation visuelle, la modélisation *chronographique* est principalement orientée par le temps comme unité de mesure de la direction primaire. La direction secondaire, qui est optionnelle, peut montrer une autre contrainte. Cette contrainte secondaire choisie doit être différente de l'entité principale, c'est à dire l'activité. Notons ici que le *diagramme de Gantt* a perdu un avantage majeur en choisissant en même temps les activités comme entités principales et directions secondaires.

Le choix du temps comme mesure de direction principale de la logique est attribuée à sa capacité de mesurer de la même manière toutes les entités principales *activités*. Deux seules contraintes, le temps et le coût, peuvent répondre à ce critère. Par contre, le temps présentait plusieurs autres avantages sur le coût comme mesure principale. La *section 1.3* a déjà analysé ces avantages.

Les autres contraintes ne peuvent correspondre qu'à des cas très spécifiques : la quantité, à condition que l'unité soit unique, les ressources, en considérant un seul type et les surfaces de travail ou les unités, pour un projet de type linéaire.

1.4.4 Objectifs de développement et résultats obtenus

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution au développement de la modélisation graphique de la planification des projets. Il devient donc intéressant de combiner les nouveaux concepts avec les avantages des techniques existantes pour en tirer le maximum de chacune d'elles.

Toute amélioration dans le domaine de la modélisation de la planification des projets de construction doit viser la fidélité du modèle, sa flexibilité et sa capacité de communication visuelle de l'information traitée.

Au début des travaux de recherche, un (1) objectif principal et deux (2) objectifs complémentaires ont été définis. Ces objectifs se résument comme suit :

- L'objectif principal concernait la proposition d'une nouvelle méthode de planification compatible avec les attentes des utilisateurs et qui pourrait améliorer les lacunes des méthodes traditionnelles;
- Le premier objectif complémentaire envisageait le développement d'un système informatique qui applique les concepts de la méthode proposée par cette recherche. Cet outil devait, entre autres, être convivial, pouvoir éliminer ou diminuer au maximum les travaux de préparation manuelle et permettre la libre préparation de l'ordonnancement à l'écran et à l'échelle du temps;
- Le deuxième objectif complémentaire prévoyait l'association de l'outil informatique avec le *SIAD X-PERT* afin d'alléger les efforts nécessaires à la préparation et de produire des ordonnancements validés.

Une auto-évaluation des conclusions encourues de la recherche s'est avérée nécessaire pour comparer les résultats obtenus en fonction des objectifs initialement définis.

La modélisation chronographique

En ce qui concerne la modélisation *chronographique*, les résultats de recherche sont compatibles avec les objectifs de développement. Ainsi, les caractéristiques de la modélisation *chronographique* développée décrivent parfaitement les objectifs. Il s'agit d'une modélisation :

- Flexible et claire qui présente les échéanciers sous plusieurs formes intéressantes. Bien qu'elle emploie l'activité quantifiée comme entité principale de production, elle permette l'utilisation de toutes autres contraintes à cette fin. Elle adopte l'échelle du temps comme direction primaire mais accepte d'autres

contraintes pour modéliser les directions primaire, secondaire ou tertiaire de flux de logique.

Pour cela, elle est capable de planifier les différents types de projet avec une logique compatible à chaque cas et à visualiser plusieurs facettes du même projet pour résoudre les divers problèmes de gestion.

- Qui supporte le regroupement des sous-réseaux dans les modélisations à une direction de flux de logique et qui accepte aussi le regroupement des différentes tâches, quantités, unités, ressources ou surfaces de travail dans les modélisations à deux directions.

Pour cela, la modélisation *chronographique* peut être orientée par les exigences techniques des activités, dictées par une allocation optimale des ressources et/ou ajustée pour régler les conflits d'utilisation des surfaces d'exécution.

- Représentée sur plusieurs niveaux de détail hiérarchique ou la combinaison de ces derniers, afin de répondre aux différentes fonctions de gestion et produire des réseaux d'ordonnancement de taille facile à gérer.
- Qui accepte l'analyse interne des activités par la décomposition interne en fonction des quantités. Ainsi, elle est dotée par des outils qui favorisent une flexibilité accrue et une adaptation facile aux changements.

Bien qu'elle soit principalement orientée vers une représentation déterministe, la modélisation *chronographique* accepte et gère efficacement les probabilités liées aux différentes contraintes. Les outils et les propriétés de cette modélisation s'intègrent facilement. Cela contribue à une amélioration accrue de la visualisation de l'ordonnancement, favorise une représentation fidèle à la réalité des projets et assure un contrôle objectif durant l'exécution des projets.

Le prototype informatique

Cet objectif est considéré avoir rencontré ses propres buts initialement définis. Par contre, afin d'alléger les travaux de programmation, l'application informatique principale est orientée vers les modélisations à une seule direction de flux de logique.

L'application développée est un outil convivial qui permet la préparation des réseaux à l'échelle du temps à l'écran. Cette spécification a aidé à la diminution des efforts nécessaires aux travaux de préparation manuels.

Les différentes facettes des réseaux d'ordonnements qui utilisent deux directions de flux de logique comme approche ont été testées sur des applications indépendantes développées à cet effet. Les résultats obtenus ont été encourageants et ont contribué au développement théorique de la modélisation graphique.

L'intégration avec X-PERT

Le deuxième objectif complémentaire n'a été que partiellement atteint. Les recherches se sont limitées à quelques essais de base pour combiner l'application informatique principale avec le *SIAD X-PERT*. Ceci s'explique par le fait que notre recherche principale a été dirigée vers le développement de la modélisation chronographique. L'application informatique entamée se limitait seulement à un outil prototype. Une intégration complète avec le *SIAD X-PERT* existant nécessitait un temps considérable et un peu en porte-à-faux par rapport à notre recherche principale.

Une application réelle

Pour montrer l'utilité et l'applicabilité de la méthode chronographique, les concepts de la méthode *chronographique* ont été testés sur un projet réel, il s'agit de la construction de la station d'épuration à Kahnawake.

Des différentes facettes d'ordonnement à deux directions de flux de logique ont été testées. Ces facettes seront exposées dans les chapitres qui traitent la modélisation *chronographique*. Les résultats obtenus par l'utilisation de ces facettes confirment leur utilité et leur avantage par rapport aux méthodes traditionnelles.

1.4.5 Les frontières de la recherche

Les modélisations actuelles des processus de production sont nombreuses et variées, que ce soit pour la fabrication industrielle, l'ordonnement des projets ou la simulation de l'exécution. Pour cela, le domaine de la modélisation de la planification est considéré aussi vaste et complexe pour qu'une seule recherche puisse le couvrir entièrement.

De plus, la difficulté du sujet réside dans les interactions qui sont si complexes de façon qu'il devienne pratiquement impossible d'étudier une facette sans toucher aux autres. Ainsi, il est pratiquement inutile de proposer une modélisation qui n'accepte pas ou qui traite partiellement les outils de gestion.

Situer les états des écrits effectués dans tous les axes est une activité beaucoup plus importante qui dépasse le travail d'une seule étude. Une détermination claire des frontières de la recherche était donc nécessaire.

L'objectif principal consiste à proposer une nouvelle modélisation graphique d'ordonnement des projets de construction. Situer l'état des recherches et analyser les caractéristiques des modélisations de cette industrie a donc été nécessaire. Cette analyse a été approfondie en ce qui concerne la représentation à l'échelle du temps.

La situation actuelle des études et les expériences professionnelles confirment l'importance des méthodes déterministes dans le secteur de la construction. Pour cela,

l'analyse est principalement concentrée sur ce type de méthode pour établir leurs forces et leurs faiblesses.

En ce qui concerne le domaine stochastique, la simulation de l'exécution et les outils de gestion, la recherche a été limitée à la possibilité de leurs applications à la modélisation graphique proposée, sans essayer de faire états et analyses approfondis.

Des études futures pourraient s'intéresser à l'un ou l'autre aspect de modélisation ou de gestion, afin d'enrichir et d'approfondir les concepts de la modélisation *chronographique* proposée par cette thèse.

1.4.6 Les limites de la solution proposée

Chaque système ou méthode possède ses propres limites. Pour cela, cette section discute des limites connues à date de la modélisation *chronographique*, autant du point de vue concept que de l'application informatique. Ces limites et faiblesses identifiées sont résumées dans les points suivants :

- Bien que plusieurs étapes de préparation manuelle aient disparu, les travaux préparatoires ne sont pas totalement éliminés. L'association complète avec le SIAD X-PERT et l'ajout des bases de connaissances qui couvrent plusieurs domaines aidera à surmonter cette lacune.
- Comme tous les autres systèmes, la visualisation du projet sur un seul ordonnancement reste complexe si ce projet est de grande taille.
- Les notions de planification sont devenues plus complexes. Une formation plus avancée pour les planificateurs et les gestionnaires est suggérée.
- Comme toutes les autres applications informatiques, les limites technologiques liées à la taille des écrans sont considérées comme le plus grand obstacle. Surmonter cette difficulté pourrait aider considérablement à l'amélioration de la visualisation et la diminution des efforts de préparation.

L'application de la modélisation *chronographique*, à une plus grande échelle, aidera à identifier d'autres faiblesses et lacunes. Ainsi, des recherches futures pourront s'attaquer à ces limites pour avancer les concepts de cette modélisation.

CHAPITRE 2

ÉVOLUTION DE LA MODÉLISATION GRAPHIQUE D'ORDONNANCEMENT DE PROJETS

2.1 Introduction

C'est seulement à partir du 19^e siècle que commence à apparaître un véritable intérêt scientifique pour les méthodes de planification. L'apparition des nouvelles technologies imposant des tâches beaucoup plus complexes les unes après les autres, contraint les entreprises à plus de précision, et donc à une meilleure organisation.

La planification des projets est donc implantée pour bien définir les processus d'exécution et favoriser un contrôle rigoureux de l'état d'avancement et des coûts associés. Fox, (1998) cite que *la gestion de projet est l'application de connaissances, d'habilités, d'outils et de techniques aux activités de projet pour atteindre ou dépasser les besoins et attentes des parties prenantes.*

Les divers centres de recherche se sont chargés à fournir à l'industrie ses besoins et à régler ses problèmes. Les nombreuses études effectuées ont engendré la naissance d'une multitude de méthodes et modèles de planification.

Selon leurs concepts de base, trois principaux types peuvent être distingués :

- Le premier type consiste à une planification orientée par les activités. Dans ce type, l'allocation et le nivellement des ressources sont effectués sur l'ordonnancement préparé à l'avance;
- Le deuxième type est une planification orientée par les ressources. Ainsi, la disponibilité des ressources et le maintien d'un taux d'occupation constant sont les principales préoccupations de ce processus. Les contraintes liées aux

activités sont dressées pour établir la séquence des tâches exécutées par les ressources;

- Le troisième type s'intéresse à la production et interfère les liens cycliques entre les divers éléments et mécanismes du processus de construction.

Ces trois principaux types sont représentés à travers plusieurs modèles d'ordonnement tels que les diagrammes, les réseaux graphiques et les modèles à base de simulation.

2.2 Les diagrammes

Les diagrammes sont des plannings à bandes ou courbes qui montrent le déroulement des activités à l'échelle du temps. Les diagrammes sont largement utilisés pour modéliser la planification des projets de construction à caractère répétitifs ou non répétitifs.

Le *diagramme de Gantt*, est une méthode utilisée depuis le début du siècle pour la modélisation des projets à caractère non répétitifs. Cette méthode reste très usuelle de nos jours à cause de sa simplicité. Plusieurs améliorations, pour présenter les activités en séries et les relations entre les activités, sont proposées par des variations de ce diagramme.

Pour répondre aux projets à caractère répétitifs et favoriser une continuité d'utilisation de la main-d'œuvre, la méthode *Line of Balance* a été développé. Cette méthode est conçue pour maintenir l'enchaînement de chaque spécialité entre les différentes unités. Plusieurs alternatives de cette méthode ont apporté des améliorations telles que la variation des taux de progression, la représentation des interruptions de travail, etc.

Les modélisations qui utilisent les variantes des diagrammes seront représentées dans le chapitre 3. Les lacunes liées aux diagrammes ont amené les planificateurs à concevoir d'autres modèles d'ordonnancement, tels que ceux basés sur la théorie des graphes.

2.3 Théorie des graphes

Les modèles basés sur la théorie des graphes sont largement utilisés pour représenter et traiter des grandes variétés d'applications. Les réseaux routiers, les réseaux électriques et de communication, la planification et le contrôle des projets, la localisation et l'aménagement des usines, sont des exemples.

Plusieurs avantages ont justifié l'intérêt pour ces modèles :

- Ils se prêtent facilement à la modélisation de plusieurs types d'applications;
- Ils sont relativement simples à comprendre;
- Les algorithmes de réduction permettent de traiter des problèmes de grande taille.

2.3.1 Modèle mathématique de la théorie des graphes

On considère un ensemble dénombrable $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, voir *Figure 9*. À chaque élément de X on fait correspondre un point dans le plan, que l'on appelle « sommet » ou « nœud ». Deux sommets x_i et $x_j \in X$ seront reliés par une flèche allant de x_i vers x_j . Cette flèche matérialise un arc du graphe. Et x_j est dit successeur de x_i . Si U désigne l'ensemble des arcs du graphe, on convient de désigner le graphe par $G = (X, U)$.

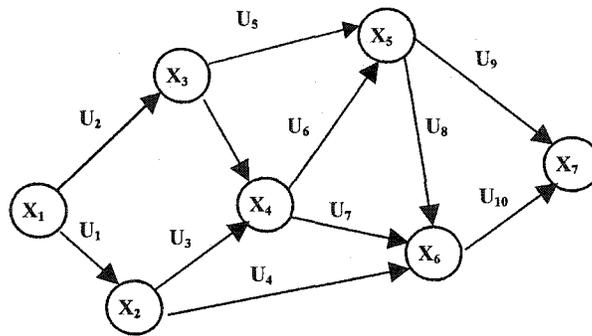


Figure 9 Modèle graphique

2.3.2 Les algorithmes basés sur la théorie des graphes

Pour résoudre les différents types de problème, plusieurs algorithmes généraux ont été développés. Les points suivants en mentionnent quelques-uns :

- Dans un graphe, un *circuit Elerien* est un circuit qui utilise tout arc une seule fois. Cet algorithme règle des problèmes de type « postier chinois ».
- Dans un graphe (X, U) on dit qu'un chemin $N(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n})$ est *Hamiltonien* lorsqu'il passe une fois, et une seule, par chaque sommet du graphe. Cet algorithme résout les problèmes du type « voyageur de commerce ».
- *L'algorithme de Dijkstra* calcule le plus court chemin entre deux nœuds sommets d'un graphe. À chaque sommet interne, on examine tous les arcs. Si le nœud est fermé, on passe au nœud suivant. Si le nœud est ouvert, on le remplace par le poids minimum. Quand tous les nœuds sont fermés, alors la quantité finale indique la longueur du plus court chemin reliant les deux sommets.
- Le *flot maximum* est un algorithme qui calcule la quantité de flot qui doit passer dans chaque arc de telle sorte que le flot global qui traverse le réseau soit maximal. L'algorithme est résolu par la programmation linéaire ou par le théorème de Ford-Fulkerson. Cette dernière repose sur l'hypothèse que la valeur

maximale d'un flot est égale à la capacité de la coupe minimale qui sépare les deux sommets.

Pour chaque problème distinct qui ne suit pas une règle générale, des algorithmes spécifiques doivent être conçus.

2.4 Les modèles d'ordonnement déterministes

Le développement des modèles d'ordonnement déterministes sous forme de graphe est lié à l'apparition de l'ordinateur. Les méthodes développées sont connues sous l'acronyme de *CPM* : *Critical Path Method* ou méthodes du chemin critique. Les deux variations les plus connues sont L'*ADM* : *Arrow Diagram Method* (Ford et Fulkerson, 1957), (Kelly et Walker, 1959), (Kelly 1960), (Fulkerson, 1962) et La *PDM* : *Precedence Diagram Method* (Fondahl, 1962), (Fondahl, 1964).

2.4.1 *ADM* «Arrow Diagram Method »

À partir de 1957, le centre *UNIVAC*, sous la direction de John Mauchly, se joint aux efforts de James Kelley, mathématicien à Remington Rand et de Morgan Walker de DuPont, et tente l'application de la théorie des graphes à la planification des projets. La méthode créée est appelée *méthode du chemin critique*. Cette méthode est actuellement désignée *ADM* pour la différencier du *PDM*.

L'*ADM* ou la méthode *Activités sur flèches* est constituée par des nœuds et des flèches *Figure 10*. Les nœuds représentent les événements tandis que les flèches illustrent les activités. Cette méthode était la présentation graphique la plus utilisée.

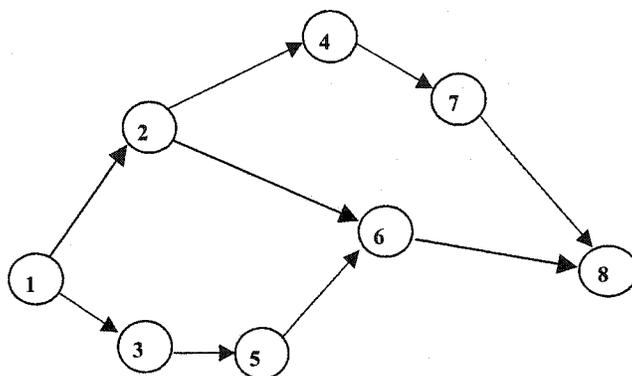


Figure 10 Méthode Activités sur flèches

Certains défauts, surtout ceux reliés à des fins de programmation informatique, ont causé la diminution de l'utilisation de cette méthode. Notons que :

- À chaque modification du planning, les activités changent d'identification. Si une nouvelle activité est insérée entre les deux activités « 2-6 » et « 6-8 », voir Figure 11, un nouveau nœud devra être ajouté. Ce nœud qui portera un numéro qui n'est pas utilisé sur le graphe. Par conséquent, il aura un ordre de grandeur complètement différent par exemple « 850 » et les activités 2-6, 5-6, 6-8 et la nouvelle activité seront identifiées « 2-850 », « 5-850 », « 850-6 » et « 6-8 ».

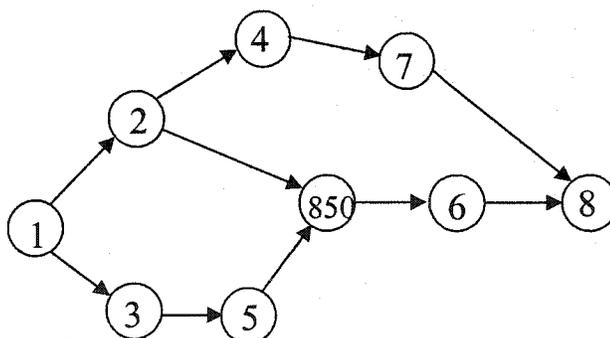


Figure 11 Identification des activités à travers l'ADM

- Une activité est reconnue par le numéro du nœud prédécesseur (i) et celui du nœud successeur (j). Si deux activités démarrent en parallèle du même nœud (i) et se terminent au même nœud (j) ils porteront le même nom et mèneront à une confusion d'identification voir *Figure 12-a*. Pour régler cette situation, un nouveau nœud (k) doit être créé afin de déterminer la fin de l'une des deux activités (activité i-k). L'ajout d'une activité fictive (k-j) sera donc nécessaire pour démontrer la liaison de fin des deux activités *Figure 12-b*.

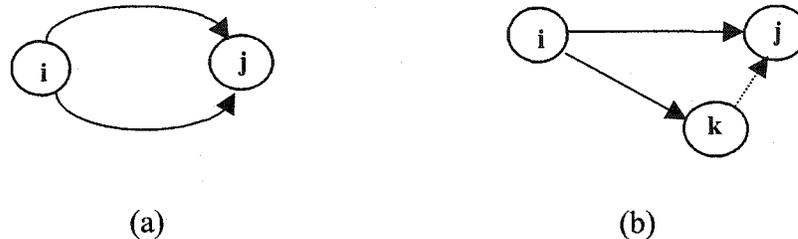


Figure 12 Utilisation des activités fictives pour identifier les activités

- Pour pouvoir représenter certaines relations de préséance entre les activités, l'ADM utilise aussi les activités fictives, ce qui alourdit le graphe. Dans la *Figure 13* une relation existe entre l'activité 1-2 et l'activité 4-3. Cette relation est représentée par l'activité fictive 2-4.

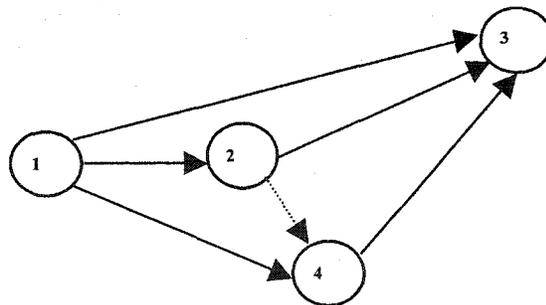


Figure 13 Utilisation des activités fictives pour montrer une relation

2.4.2 PDM « Precedence Diagram Method »

Parallèlement aux travaux américains et dans le cadre des travaux de la Société d'économique et de mathématique appliquée en France, Bernard Roy propose la méthode dite *Potentiels-Tâches* (Roy, B., 1959), (Roy, B., 1960), (Roy, B., 1962).

Durant cette période la méthode *Potentiels-Tâches* était vulgarisée aux États-Unis par John Fondahl de l'Université de Stanford sous l'acronyme *Méthode des précédences*. La *Précédence* ou PDM est introduite officiellement dans l'industrie en 1963 par la compagnie IBM lors du lancement du programme PCS : *Project Control System* sur les ordinateurs IBM-1130.

La *Précédence* est aussi appelée *Activités sur les nœuds*. Cette méthode propose plusieurs types de relations de préséances telles que : *Fin/Début*, *Début/Début*, *Fin/Fin* et *Début/Fin*, Figure 14. a, b, c et d. Ces relations désignent des contraintes potentielles entre les différentes tâches qui ne sont pas représentées par l'ADM.

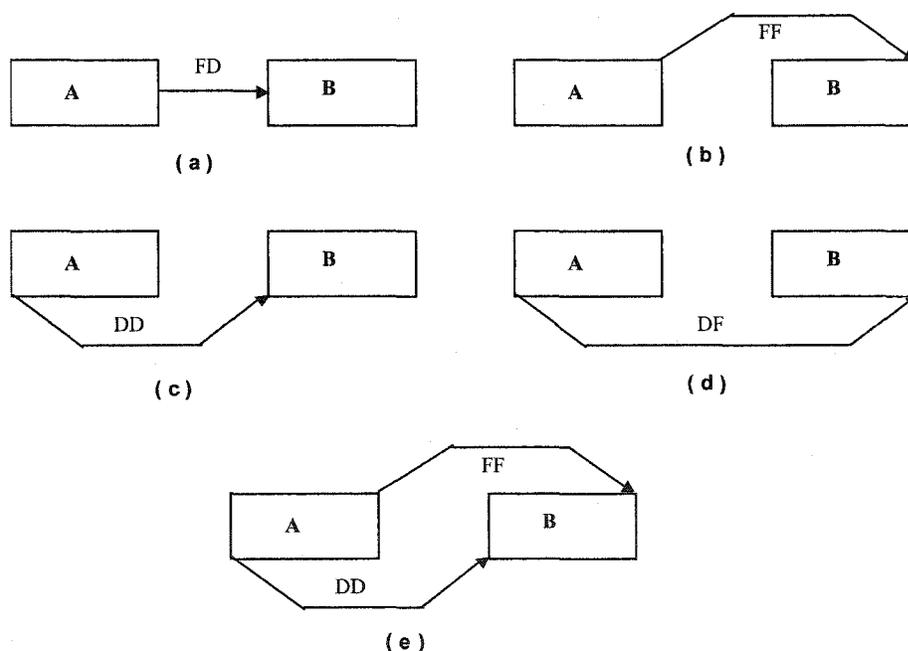


Figure 14 Méthode de la précédence

Un autre avantage de la méthode c'est qu'elle peut aussi représenter deux relations entre deux même tâches. La *Figure 14.e.* démontre deux relations *Début/Début* et *Fin/Fin* entre les deux activités *A* et *B*.

Si le nombre d'activités augmente, la représentation graphique des diverses relations de précedence apparaît complexe. Cela a amené la *PDM* à traduire toutes ses relations précédemment citées à des relations *Fin/Début*. Cette traduction a fait perdre à la méthode des précédences beaucoup de flexibilité.

2.4.3 Avantage des réseaux d'ordonnements

Les réseaux d'ordonnement sont des représentations graphiques qui montrent l'arrangement séquentiel des tâches en vue d'obtenir des échéanciers d'exécution. Cet arrangement est représenté par des collections d'activités, reliées ensemble d'une manière logique, qui reflètent leur interdépendance. Leurs processus à fins ouvertes permettent des différents degrés d'implication des gestionnaires pour atteindre leurs besoins et objectifs variés. Burman (1980) cite :

« Comme la plupart des bonnes idées, l'analyse des réseaux est au fond simple, si simple, qu'il est difficile de comprendre pourquoi cette technique n'a jamais été développée auparavant, et maintenant quand elle est déjà créée, pourquoi elle n'est pas plus largement utilisée »

Trois avantages des réseaux d'ordonnement peuvent être identifiés : minimiser la durée du projet, minimiser les coûts et minimiser les fluctuations dans l'utilisation des ressources. En incluant les considérations des ressources et des coûts, les réseaux permettent une gestion organisationnelle appropriée, afin de compléter le projet dans un temps donné, tout en respectant les budgets alloués.

Dans l'avis de Burman, (1980), le seul désavantage des réseaux d'ordonnancement est que les réseaux demandent un travail onéreux et exigeant, s'il est préparé manuellement. Il cite plusieurs avantages liés à l'utilisation des réseaux :

1. Ils traitent indépendamment la séquence des activités et leurs durées;
2. Ils montrent les dépendances entre les activités et une vue globale de l'échéancier;
3. En élaborant un ordonnancement complet qui pourra être examiné par toutes les personnes impliquées dans le projet, on assure une évaluation solide et on empêche un planning non réaliste ou superficiel;
4. Ils permettent d'inclure les contraintes de temps et des ressources;
5. En divisant le projet en tâches élémentaires, ils facilitent l'estimation de leurs durées;
6. L'identification d'un chemin critique offre deux avantages :
 - Se concentrer sur les tâches critiques pour diminuer la durée du projet;
 - Éviter de compresser des tâches non critiques et d'augmenter leurs coûts inutilement.

McGough (1982) analyse les systèmes qui se basent sur les réseaux et démontre que les relations et les dépendances qui contrôlent le projet, offrent plusieurs avantages sur le *diagramme de Gantt* :

1. Les individus peuvent avoir une vue globale du planning et de la façon dont les activités dépendent ou ont une influence les unes sur les autres;
2. L'échéancier pourra être examiné par les personnes impliquées dans le projet. Ainsi, la tâche d'évaluation de l'ordonnancement est mieux assurée et la production des plannings irréalistes est peu probable;

3. Les ressources et les contraintes de temps peuvent être incluses dans l'ordonnancement avant son évaluation;
4. En divisant le projet en activités plus détaillées, des estimations plus exactes peuvent être faites, augmentant ainsi la précision dans les délais et les coûts;
5. Les modifications des procédures peuvent être effectuées facilement et leurs impacts peuvent être évalués rapidement.

2.4.4 Construction des réseaux d'ordonnancement

Pour construire les réseaux, plusieurs étapes sont réalisées :

1. Au début, un plan de gestion est développé avec le plus bas niveau de détail. Ce plan contient les bornes (milestones) représentant les dates majeures imposées et qui devraient être respectées durant tout le processus de construction. Comme exemple : les dates fixes, les contrats gelés, les dates d'approvisionnement des équipements avec de longs délais de livraison, etc.
2. De ce plan initial se développe un ordonnancement maître dans lequel les critères doivent être définis pour les principales étapes de l'ingénierie, de la logistique, de la construction, etc.
3. Le développement de l'ordonnancement continue à s'étendre en détail au fur et à mesure que les informations se profilent et que les possibilités sont étudiées. Les activités générales sont divisées en activités et en tâches montrant des niveaux de détail plus élevés. Ces listes d'activités peuvent être obtenues selon diverses sources :
 - En étudiant les spécifications du produit, du devis estimatif, et/ou des plans d'exécution;
 - En modifiant une application précédente similaire;

- À travers une rencontre de discussion entre les personnes qui connaissent suffisamment le projet tel que les fournisseurs ou autres départements engagés.
- En demandant les sous-traitants et les autres représentants de réviser la liste des activités.

Ces consultations ont comme but de confirmer que les activités qui couvrent leurs domaines d'intérêts sont réalistes et couvrent toutes les tâches demandées.

4. La taille de chaque activité est choisie en fonction de plusieurs éléments, par exemple l'équipe de travail. Pour cela, cette étape inclut aussi l'allocation préliminaire des ressources et l'estimation préliminaire des durées d'exécution. Cette taille demeure un processus de discussion et de négociation. On ne veut pas considérer un niveau de détail atomique, ni attribuer quelques activités à un projet.
5. Par la suite les activités sont liées pour établir leurs séquences de succession. Les relations entre les différentes activités sont fonction des exigences techniques ou des décisions de gestion.
6. Les durées d'exécution de chaque activité sont déterminées. La durée minimale est calculée en fonction d'une gestion optimale des aires de travail. La durée maximale est décidée en fonction des exigences minimales de constitution des équipes et de la durée totale prévue pour le projet. Ensuite, la relation temps/coût est tracée en calculant les coûts relatifs à chaque durée possible. Le temps choisi reflète les paramètres de décision du planificateur.

Lock (1996) décrit sept étapes pour la préparation de l'ordonnancement des projets :

1. Définir les objectifs;
2. Diviser le projet en sous projets aptes à être gérés;

3. Décrire en détail les activités à exécuter et leurs séquences;
4. Estimer la durée de chaque activité séparément;
5. Calculer l'échéancier du projet;
6. Affecter les ressources aux activités;
7. Attribuer les travaux aux différentes personnes pour fin de contrôle.

Genest et Nguyen (1995) classent les étapes de construction des réseaux en quatre étapes :

1. La planification structurelle;
2. La planification organisationnelle;
3. La planification opérationnelle;
4. La planification budgétaire.

2.4.5 Validation des réseaux d'ordonnement

Une fois le réseau construit, il doit être validé pour éviter les situations inutiles et impossibles et présenter un réseau contrôlable.

Détection des boucles

C'est une situation dans laquelle une activité peut se trouver précédente d'elle-même. Ces boucles représentent une erreur de logique dans le réseau. Dans la *Figure 15*, la relation (1-3)-(1-5) représente ce défaut. Notons que ce défaut n'existe pas dans les réseaux présentés à l'échelle du temps.

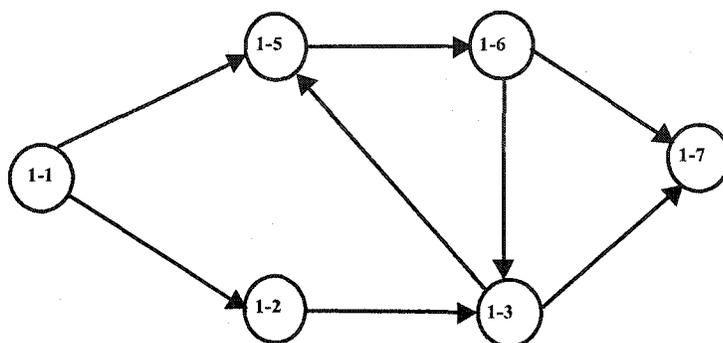


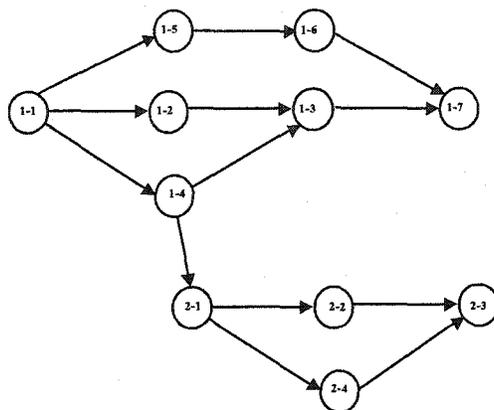
Figure 15 Détection des boucles

1. Séparer le réseau en sous-réseaux

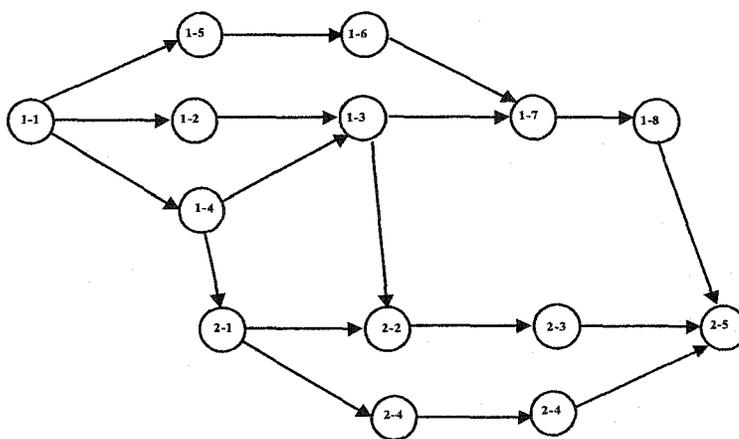
Un problème commun se présente quand un seul ordonnancement est destiné à remplir deux fonctions, par exemple, les travaux de contrôle globaux et le contrôle détaillé des travaux d'ordonnancement. Séparer ces deux fonctions en deux niveaux de détail hiérarchique et décrire clairement la fonction de chacun, aide à obtenir un système praticable.

Pinnell (1980) voit qu'il est préférable de travailler avec des ordonnancements faciles à gérer qui n'excèdent pas 300 activités. Les détails peuvent être montrés à l'aide des sous-réseaux. En utilisant une procédure analytique, le réseau est subdivisé en sous-réseaux qui peuvent être contrôlés séparément. Ces sous-réseaux peuvent avoir :

- Des interfaces simples : les sous-réseaux sont liés avec un ou deux joint(s)
Figure 16 – A;
- Des interfaces complexes : deux sous-réseaux sont liés avec plus de deux joints,
Figure 16 – B.



A) Interface simple



B) Interface complexe

Figure 16 Séparer le projet en sous-projet

2. Éliminer les relations inutiles

Des relations qui ne démontrent pas des contraintes additionnelles et qui alourdissent inutilement le graphe. Dans la *Figure 17* la relation (1-1)/(1-4) n'ajoute aucune contrainte additionnelle au réseau. En effet, l'activité 1-1 reste prédécesseur de l'activité 1-4 même après l'élimination de cette relation.

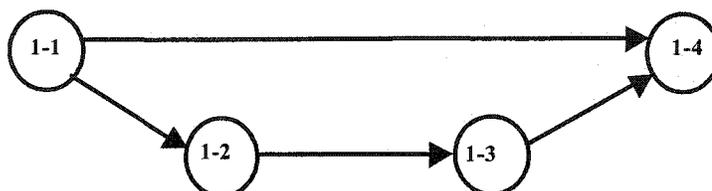


Figure 17 Relations inutiles

2.5 Les méthodes d'ordonnement probabilistes et généralisées

2.5.1 Introduction

Cette section traite des méthodes probabilistes et généralisées les plus connues. Les descriptions de ces méthodes sont faites pour étudier leurs logiques de fonctionnement et d'examiner la possibilité de leur application à la méthode *chronographique*. Ainsi, aucune analyse approfondie n'est entreprise. Puisque ces analyses dépassent les frontières de recherche définies par cette thèse.

L'approche *chronographique* proposée par cette thèse est basée sur une représentation de l'ordonnement à l'échelle du temps. Les outils de décision associés aux techniques probabilistes et généralisées doivent donc être adaptées pour ce type de représentation. Cette particularité est discutée dans la *section 7.3 Les incertitudes d'exécution*.

2.5.2 Les méthodes d'ordonnement probabilistes

En parallèle aux travaux de développement du *CPM*, le *Programme Polaris* de la Marine américaine développa sa propre méthode d'ordonnement nommé *PERT* : *Performance Evaluation and Review Technics* (Malcom et al. 1959). Vers la fin de l'année 1958, le système implanté est devenu opérationnel et a servi pour la planification de plusieurs programmes aérospatiaux.

La méthode *PERT* était le premier pas pour calculer une durée d'exécution incertaine. Pour modeler la durée des activités, les promoteurs originels de *PERT* ont choisi la courbe de probabilité *Bêta* comme distribution raisonnable. Avec cette distribution de probabilité on calcule un temps estimé et une variance. Pour fin de simplification, les planificateurs utilisent trois temps pour chaque activité, étant les paramètres minimaux nécessaires pour déterminer cette distribution de probabilité.

Martinez et Joannou, (1997) disent que malgré l'aspect probabiliste, la durée des activités proposée par *PERT* est tout aussi optimiste que celle déterminée selon un *CPM*. Ils ajoutent que la méthode *PERT* est aussi incapable de faire une corrélation entre les durées des diverses activités et de gérer des relations de préséances incertaines. En plus, certaines erreurs peuvent s'introduire dans les cas ayant plusieurs sommets ou lorsque la distribution des probabilités est discontinue.

Différents chercheurs, tels que Murray (1963), MacCrimmon et Ryavec (1962, 1964), et Grubbs (1962), ont suggéré des alternatives de *PERT*. Ainsi, différentes extensions de la méthode sont apparues prenant en compte le coût et la fiabilité.

Afin de surmonter les lacunes précitées, d'autres chercheurs, Halpin et Riggs (1992), Pritsker (1995) et Lu et AbouRizk (2000) ont suggéré l'application de la simulation au réseau *PERT*.

En 1993, Daji et Reiar ont développé la méthode *BFUE : Back-Foward Uncertainty Estimation*. Cette méthode permet d'introduire les degrés d'incertitude des durées des activités non critiques. Pour calculer la durée totale du projet, la méthode prend en compte la probabilité que tout chemin devienne critique. La méthode *BFUE* est basée sur le fait que des chemins non critiques peuvent, lors de l'exécution des travaux, devenir sous-critiques ou encore critiques selon la manière dont on utilise les marges des activités. D'après ses auteurs, cette méthode atteint les mêmes précisions des méthodes de simulation.

Malcom, et al. (1959) croient que les réseaux *PERT* sont utilisés d'une façon très marginale dans la planification des projets de construction. Hinze (2004) considère que pour les projets de construction, les méthodes du chemin critiques dites *CPM* sont de loin plus importantes que la méthode *PERT*.

Fisk (2003), voit que les systèmes *PERT* n'ont pas de place comme outil opérationnel pour l'ordonnancement des projets de construction. Il dit que « *PERT est une technique d'ordonnancement, de gestion de projet, conçue pour les situations où ni le temps ni le coût ne peuvent être estimés d'une manière précise. Dans la plupart des projets de construction, le coût et le temps peuvent être définis correctement. Ainsi, l'approche proposée par le CPM est plus pratique* ».

2.5.3 Les méthodes d'ordonnancement généralisées

Pendant que les *CPM* et *PERT* devenaient de plus en plus utilisés dans le domaine de la construction, différentes interrogations se sont manifestées sur la possibilité d'accroître les performances de tels systèmes. En 1961, Eisner développa la première technique dite *Pert généralisée, Figure 18*. Cette méthode qui se nomme la *boîte de décision* (decision box) a été conçue pour étendre les possibilités existantes en incorporant plus de flexibilité dans le domaine stochastique.

Par la suite, cette méthode était affinée par Elmaghraby (1964). Une autre méthode a été aussi proposée par Hespos et Strassmann (1965) afin de résoudre les problèmes stochastiques en introduisant des arbres de décisions.

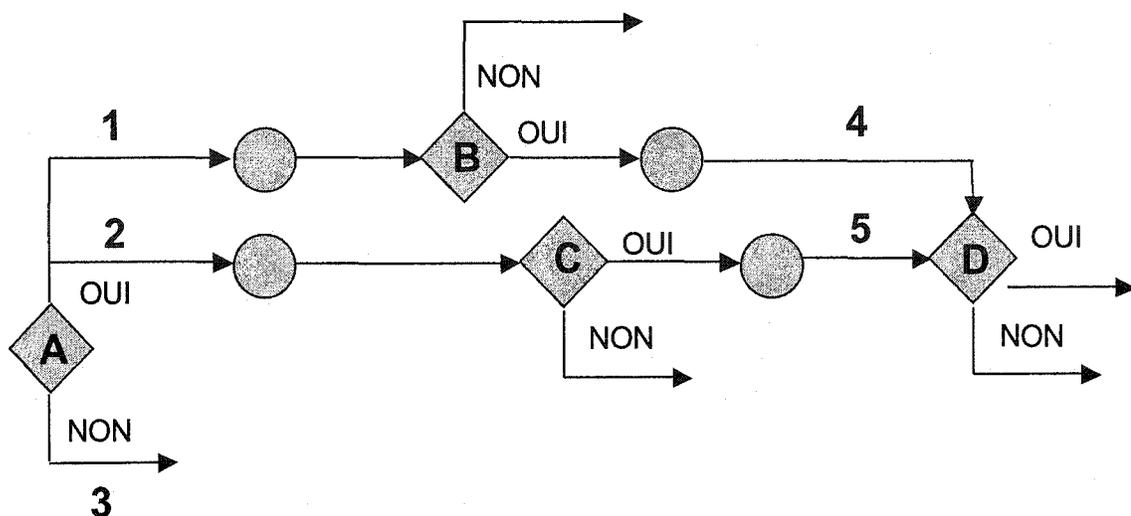


Figure 18 Le graphe de la méthode Pert généralisée
(Adapté de Miresco, 1994)

La modification majeure du système Eisner est apportée par Pritsker (1966) qui a proposé la méthode *GERT* : *Graphical Evaluation and Review technique*, Figure 19. La méthode *GERT* est une méthode qui comporte des réseaux stochastiques. Le réseau est composé de nœuds (événements) représentant les opérations et des branches directrices. Une branche directrice relie deux nœuds, l'un étant l'origine et l'autre étant la fin. Une branche directrice (activité) possède plusieurs paramètres dont deux obligatoires : la probabilité (P) qu'on choisisse cette branche et le temps (D) que cette branche dure. La réalisation du réseau est la suite de la réalisation d'un groupe particulier des branches et

des nœuds qui composent le projet. Par définition, il n'est donc pas nécessaire que toutes les activités du réseau soient complétées pour que le projet se termine.

Il existe cinq sortes de nœuds dans un projet représenté par la méthode *GERT* : le nœud d'origine (il n'a pas de branches incidentes et marque le début du réseau), le nœud final (il n'a pas de branches dissidentes et marque la fin du projet), le nœud statistique (il possède des données statistiques obtenues par le processus antérieur de calcul du réseau), le nœud marque (il établit une référence de temps). Il permet donc de déterminer le temps nécessaire entre un nœud marque et un nœud statistique et le nœud normal (tout autre nœud marquant le début et la fin d'une activité). Les nœuds sont aussi caractérisés par leur entrée (input) avec trois relations logiques (Exclusive-or, Inclusive-or et And) et leur sortie (output) avec deux relations logiques (Déterminé et Probable).

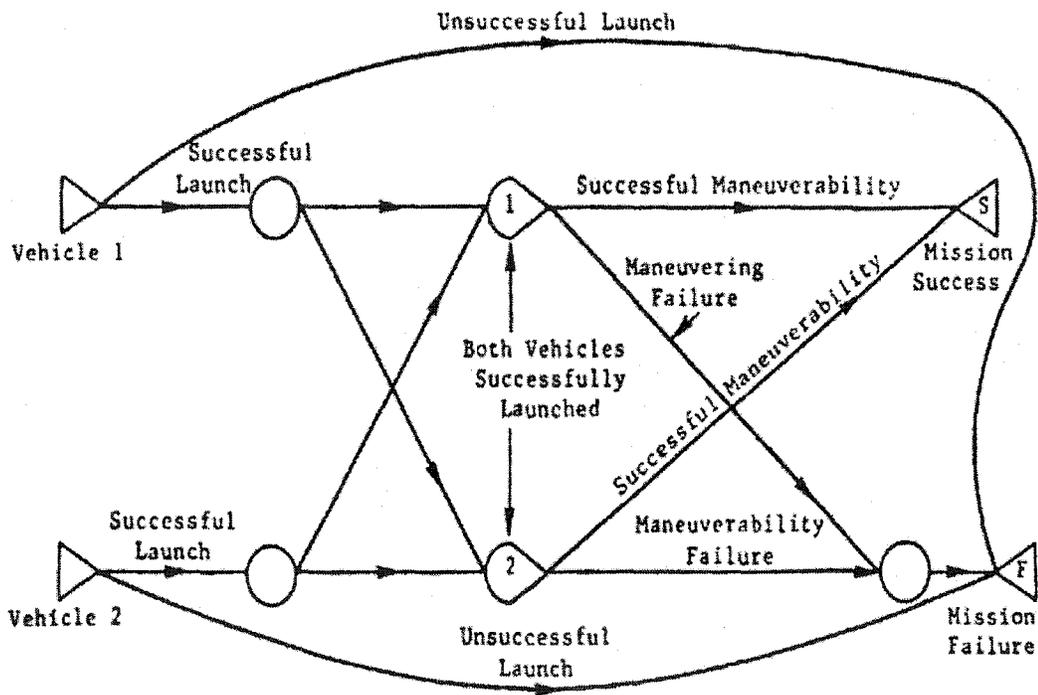


Figure 19 Exemple du réseau stochastique GERT
(Adapté de Pritsker, 1966)

Par la suite, Crowston et Thompson (1967) ont étendu les propositions de Eisner pour étudier plusieurs possibilités d'exécution à l'aide d'un seul graphe d'ordonnement. Cette méthode est connue sous le nom de *DCPM*. Dans cette méthode, les nœuds possèdent une durée et un coût et peuvent être de trois types à savoir : le type *AND* (indique que toutes les activités doivent être exécutées), le type *Or* (indique un nœud de décision) et le type *Exclusif OR* (indique que l'exécution d'une activité rend l'exécution d'une autre activité redondante).

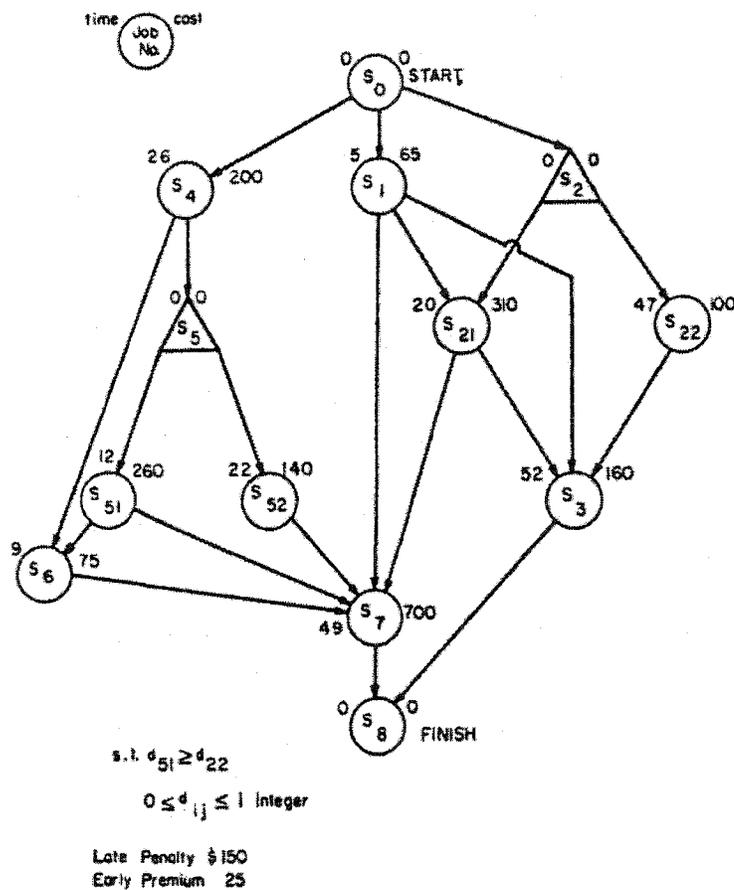


Figure 20 Exemple de graphe de DCPM
(Adapté de Crowston et Thompson, 1967)

La méthode *VERT* a été développée par Moeller et Digman (1981) pour des applications militaires afin d'évaluer les risques encourus dans un réseau. La méthode *VERT* utilise les deux symboles de bases qui composent un réseau de planification : les nœuds qui représentent les points de décision et les lignes qui représentent les activités. Les nœuds utilisent différentes sortes d'entrées (input) *INITIAL*, *AND*, *PARTIAL AND* et *OR* et sorties (output) : *TERMINAL*, *ALL*, *MONTE CARLO*, *FILTER1*, *FILTER2* et *FILTER3*. Ainsi, une activité est caractérisée par trois paramètres qui sont : le temps de réalisation, les coûts encourus, et la performance générée pour réaliser cette activité.

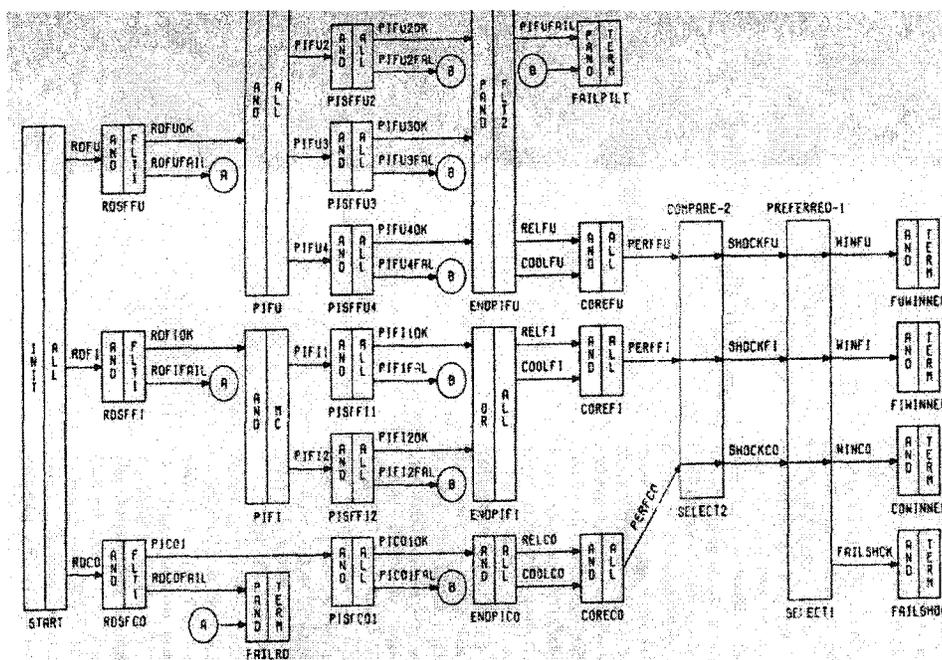


Figure 21 Exemple de graphe de VERT
(Adapté de Moeller et Digman, 1981)

Malgré leur importance pour la planification de construction complexe, les méthodes généralisées ont actuellement peu de place comme outil d'ordonnancement des projets de construction. Les causes les plus importantes sont que ces méthodes ne sont pas conçues pour une représentation à l'échelle du temps et qu'elles ne sont pas supportées par les applications informatiques utilisées par cette industrie.

2.6 La modélisation à base de simulation

Deux différences conceptuelles majeures identifient les simulations des réseaux d'ordonnancement. Premièrement, les liens sont à base de durée pour les réseaux d'ordonnancement contre à base de production pour les simulations. Deuxièmement, dans le cas des réseaux, la logique entre les activités peut changer dépendamment des quantités de ressources disponibles. Tandis que dans le cas des simulations la logique est construite d'une façon complètement indépendante de la quantité de ressources disponibles. Ainsi, les activités sont mises en attente si les ressources nécessaires ne sont pas libres.

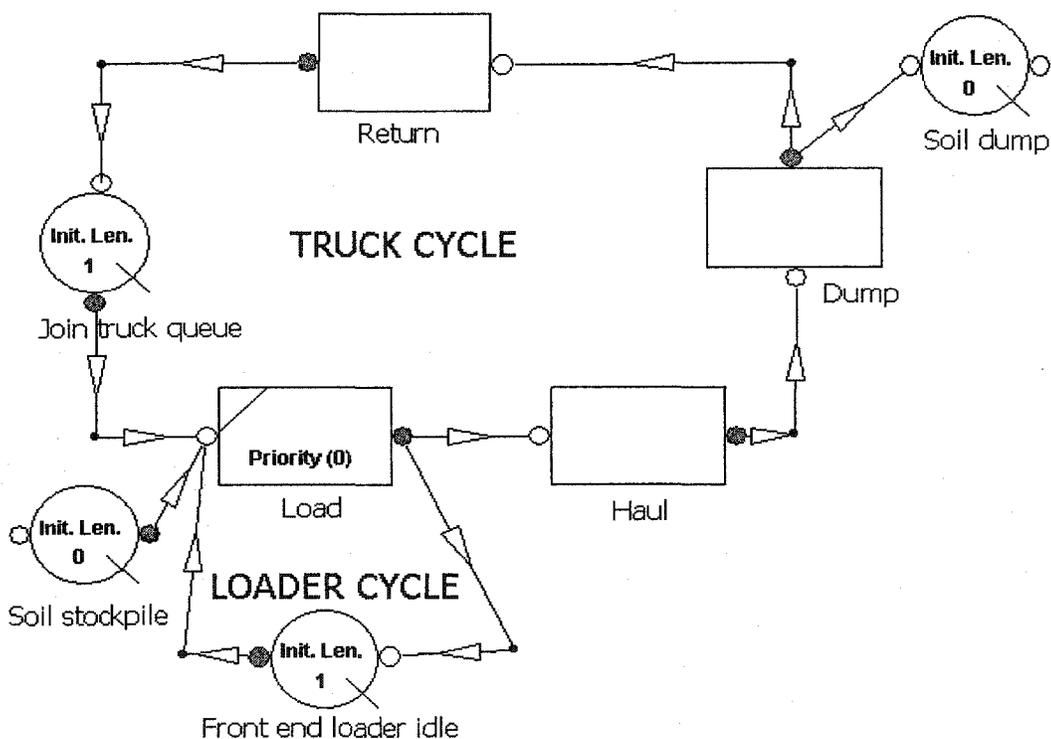


Figure 22 Exemple de la simulation Cyclone
(Adapté de Halpin, 1973)

Cyclone, *Figure 22*, développé par Halpin (1973) est le modèle de base qui a servi pour toutes les recherches du domaine de la simulation des opérations de construction. Ce modèle comprend trois groupes de formes qui représentent l'état actif et passif des activités et les flux logiques. Cyclone est conçu pour simuler le processus de production cyclique et répétitif (Halpin et Woodhead, 1998).

En 1992, Vanegas et al. ont appliqué MicroCyclone originalement développé par Halpin pour la simulation des projets lourd de construction tel que les barrages et les tunnels.

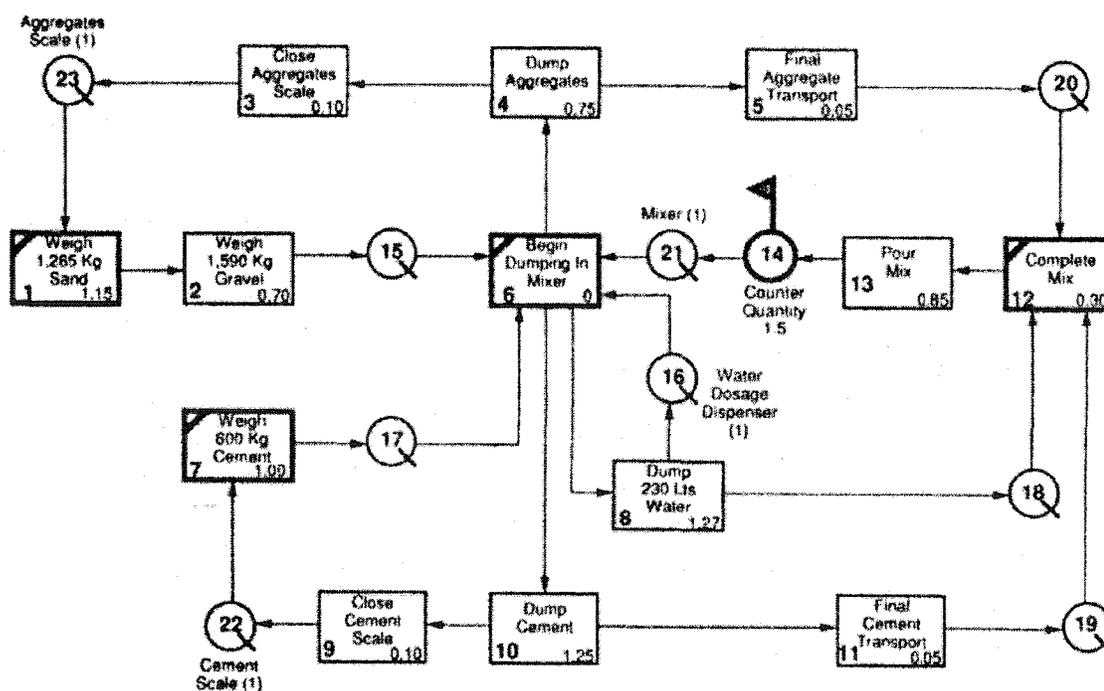


Figure 23 MicroCyclone et les projets lourd de construction (Adapté de Vanegas et al., 1993)

En 1997, Martinez et Ioannou ont développé Storoscope une simulation de type général. Ce modèle introduit cinq nouveaux types de nœuds et quatre types de lien et peut modéliser des opérations plus complexes que Cyclone. Malgré cela, Storoscope ne représente que le niveau conceptuel de modélisation. Les détails sont spécifiés par des mécanismes de programmation.

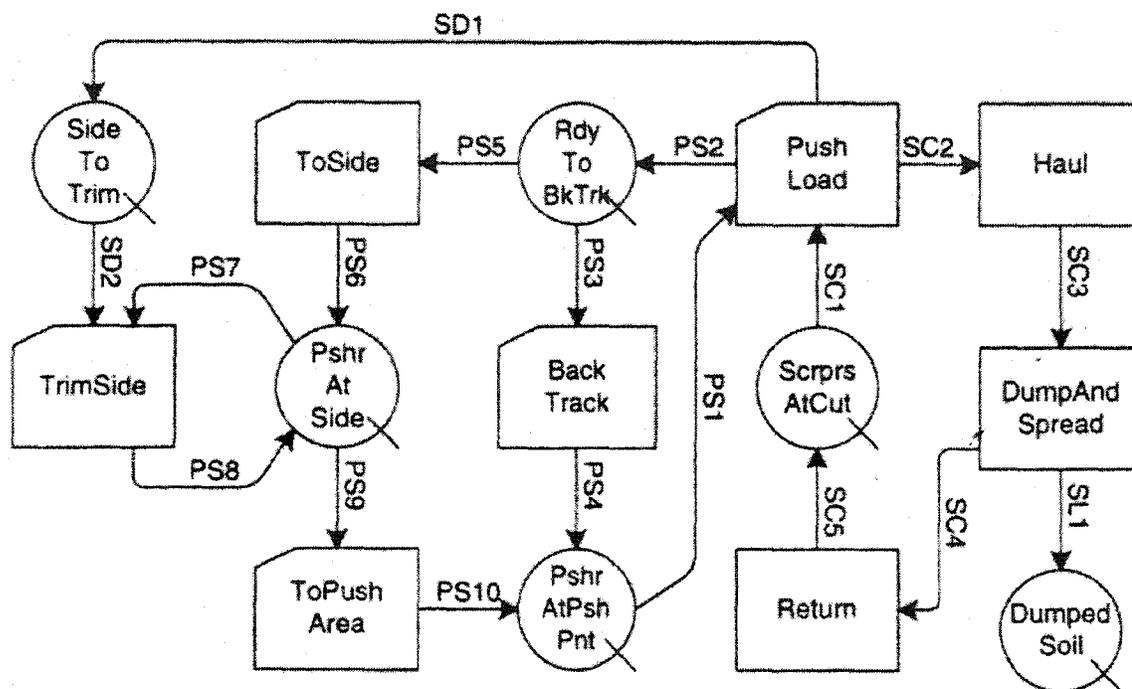


Figure 24 Exemple de la simulation Storoscope
(Adapté de Martinez et Ioannou 1999)

Ensuite, Chehayeb et AbouRisk (1998) ont développé *SimCon* une simulation basée sur *Cyclone*. Leur modèle combine les avantages de la simulation de la production et des réseaux. *Simcon* est ainsi capable de simuler la logique de production du processus d'exécution des activités du projet.

À cause de leurs caractères cycliques, les modèles de simulation sont appliqués à la simulation des projets à caractère répétitif (Ashley, 1980; Donncha, 1985; AbouRisk et Halpin, 1990; Bolivar et Halpin, 1998).

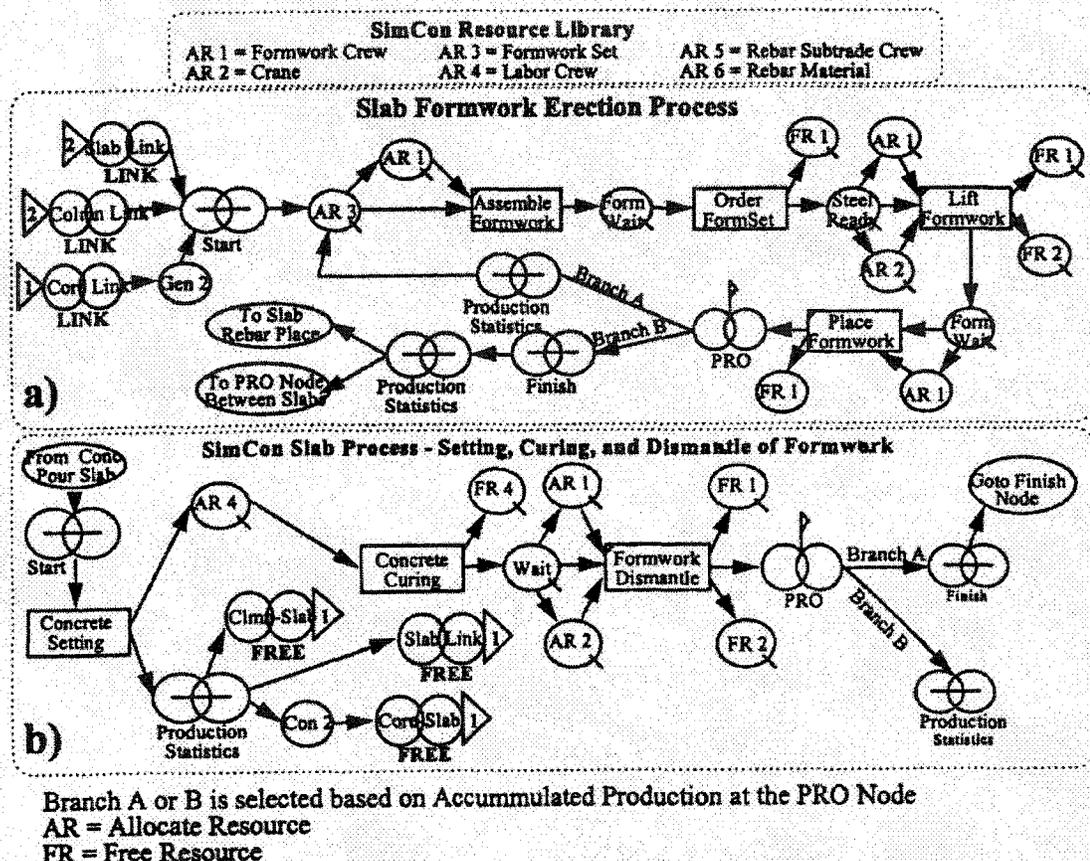


Figure 25 Exemple du graphe hybride SimCon
 (Adapté de Chehayeb et AbouRisk, 1998)

Bien que les modèles de simulation soient efficaces pour optimiser la production, ces modèles restent peu utilisés. Donncha (1985) cite que *la simulation est rarement utilisée pour modéliser le processus de construction*. Chehayeb et AbouRisk (1998) disent que bien que la planification des projets à base de simulation surmonte les limitations des autres systèmes d'ordonnancement, elles sont limitées pour plusieurs raisons :

- En général, elles doivent inclure plus de détails que les CPM. Ainsi, elles requièrent plus de temps pour modéliser les activités.
- Les liens cycliques peuvent être très complexes dans le cas des liens multiples et continus entre deux ou plusieurs processus.

Sachant que les projets de construction se caractérisent par la complexité des données et des contraintes, nous croyons que ces modèles ne sont pas adaptés pour modéliser la planification des projets. Par contre, ils sont très efficaces pour représenter des niveaux de détail des entités afin d'optimiser le processus de production.

CHAPITRE 3

LA MODÉLISATION DE L'ORDONNANCEMENT DES PROJETS À L'ÉCHELLE DU TEMPS

3.1 Introduction

La méthode *chronographique* proposée dans cette thèse est basée sur l'ordonnement des projets à l'échelle du temps. L'analyse de la situation actuelle des techniques qui utilisent l'échelle du temps constitue donc un élément principal pour ce travail de recherche. Pour cela, ce chapitre est consacré à cette fin.

À l'origine, les modèles graphiques n'étaient pas conçus pour montrer la planification des projets à l'échelle du temps. Cela, selon Rahbar (1984), limite leurs communications visuelles et impose des feuilles et des analyses additionnelles pour relier les coûts et les ressources aux réseaux. Les faiblesses analysées prouvent l'incapacité de ces réseaux de présenter fidèlement les projets et démontrent la complexité associée à leurs utilisations.

Afin d'améliorer la communication visuelle des modèles graphiques, plusieurs chercheurs, ont proposé des techniques basées sur l'ordonnement des projets à l'échelle du temps. Les techniques présentées traitent indépendamment les projets à caractère non répétitif et les projets à caractère répétitif.

L'analyse de ces techniques amène au constat que les représentations proposées restent très rudimentaires. Cette conclusion peut être aussi confirmée pour les logiciels commerciaux. Les résultats produits, à cet effet, laissent à désirer. L'analyse de la situation actuelle effectuée dans ce chapitre souligne les faiblesses existantes et introduit les parties suivantes qui constituent le fondement de la recherche.

3.2 La représentation des projets à caractère non répétitifs à l'échelle du temps

3.2.1 Le Diagramme de Gantt

La plus ancienne représentation graphique à l'échelle du temps est le *diagramme de Gantt*, Figure 26. Une méthode de planning développée par Henry Gantt et Frederick Taylor durant la première guerre mondiale.

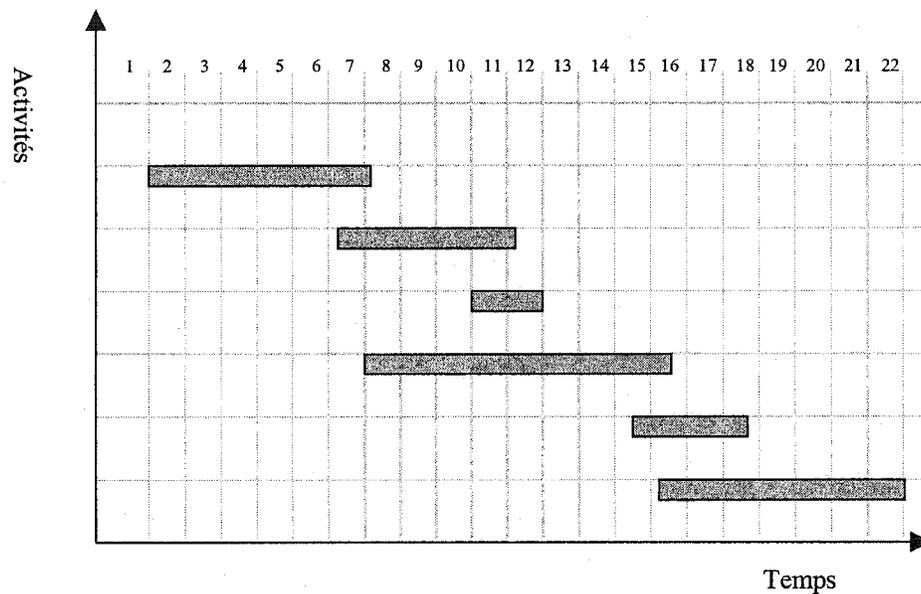


Figure 26 Diagramme Gantt

Ce modèle traditionnel est encore le plus utilisé de nos jours. Le *diagramme de Gantt* était et reste une bonne représentation graphique des activités, son interprétation étant très facile, car le début et la fin de chaque activité sont évidents.

De plus, cette méthode est facilement compréhensible par tout intervenant interne ou externe au chantier, car elle ne nécessite pas une interprétation complexe. Cependant, certaines faiblesses restent associées à ce type de diagramme, citons que :

- Il est souvent influencé par les délais attendus pour finir le projet et non par les contraintes d'exécution;
- Il est pratiquement impossible de modifier l'échéancier sans devoir refaire une bonne partie de l'ordonnancement;
- Le classement des activités est généralement défini en fonction des spécialités impliquées dans le projet ou à partir des sections du devis. Par conséquent, il est difficile de définir les sous-réseaux;
- L'incapacité de distinguer entre les activités critiques qui contrôlent réellement le projet et les activités avec peu de conséquence engendre une augmentation induite des coûts.

À causes de ces faiblesses et afin d'améliorer la communication visuelle de la modélisation des projets, plusieurs chercheurs ont proposé des techniques d'ordonnancement à l'échelle du temps. Ce chapitre fait état de ces recherches.

3.2.2 État des autres recherches

Pour remédier à cette situation plusieurs recherches ont été menées. Une des premières propositions de représentation des réseaux à l'échelle du temps était l'*ADM* de Fondahl (1962). Cette proposition, *Figure 27*, se distingue de l'*ADM* d'Univac par le fait que les longueurs des flèches sont proportionnelles aux durées des activités.

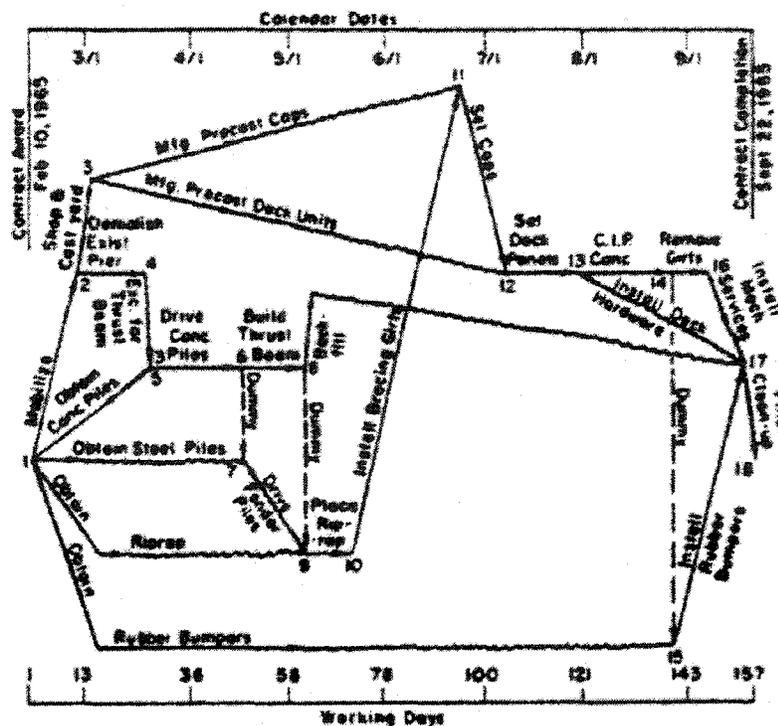


Figure 27 ADM à l'échelle du temps
(Adapté de Fondahl, 1962)

Toujours en 1962, Lannone a développé la méthode *MOST: Management Operating System Technique*, Lannone, et Civitello, (1985). Cette méthode, *Figure 28*, combine selon ses auteurs les avantages du *CPM* et du *diagramme de Gantt*.

Le processus de planification proposé démarre par l'ordonnancement du projet en utilisant l'*ADM*. Le planificateur dessine, par la suite, le chemin critique calculé en utilisant le *MOST*. Les autres activités non critiques sont par après modélisées en faisant une marche arrière depuis le dernier jour du projet. Avec cette démarche, la méthode proposée par Lannone comprend plusieurs défauts :

- Elle reste dépendante des *CPM*;
- Tous les chemins du réseau produit sont des chemins critiques;

- Toutes les dates d'exécution sont modifiées à chaque fois que la date finale du projet change, perturbant ainsi tous les engagements;
- Le MOST ne présente que des relations fin / début entre les activités;
- L'importance est axée sur la visualisation du chemin critique comme ligne centrale sans proposer d'autre technique d'arrangement pour les autres activités.

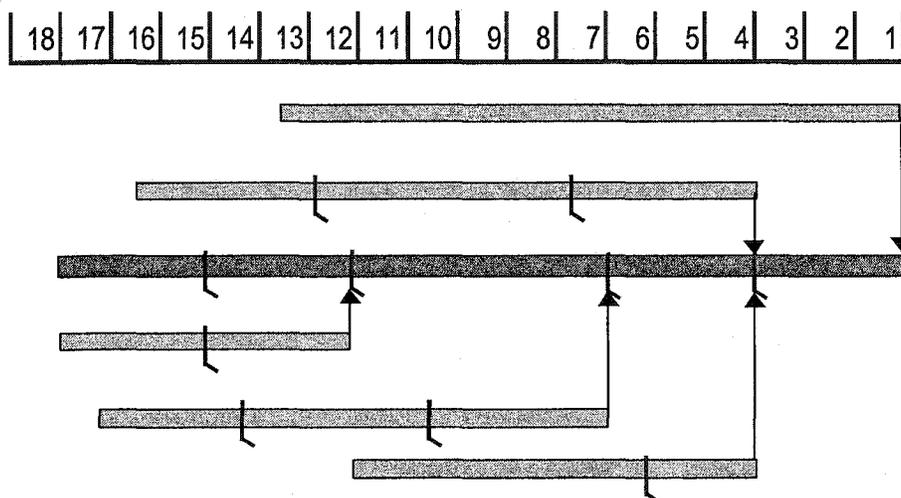


Figure 28 La méthode MOST

Cette méthode était conçue pour favoriser la planification manuelle en détriment des outils informatiques de gestion. Pour cela elle proposait une méthode de planification facile à modifier manuellement. Cela devait, à cette époque, inciter les petites entreprises qui n'avaient pas les moyens d'informatiser leurs systèmes. Sachant que toutes les activités non critiques sont planifiées en faisant une marche arrière du chemin critique, une fois que celui-ci est modifié le planificateur devait reprendre presque à zéro toute sa planification. Il a résulté, ainsi, peu d'intéressement à cette méthode.

Ensuite, Fondahl (1964) a présenté la PDM à l'échelle du temps Figure 29, une méthode semblable à l'ADM qu'il a lui-même proposée en 1962.

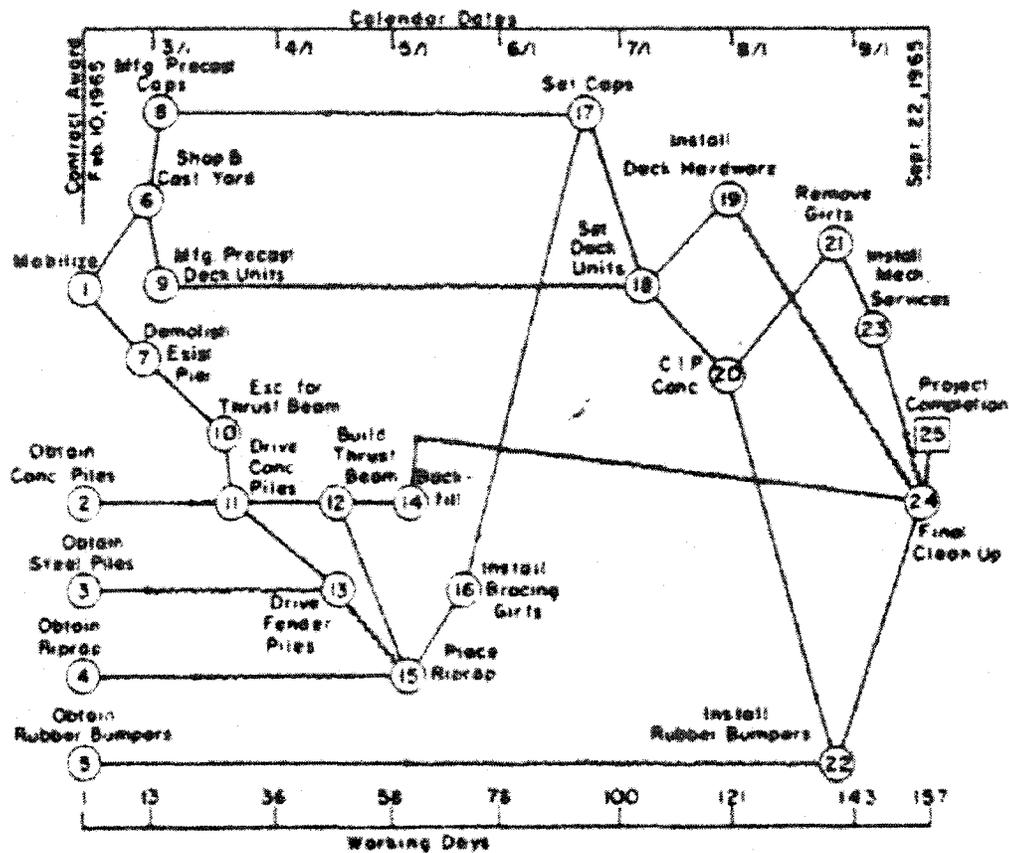


Figure 29 PDM à l'échelle du temps
(Adapté de Fondahl, 1964)

Les deux méthodes présentées par Fondahl en 1962 et en 1964 ne proposaient aucune technique d'arrangement des activités, les deux figures présentées démontrent clairement que même pour des petits projets la visualisation reste complexe.

En 1977, Balaguru et al. ont proposé une modélisation à deux directions de flux de logique. Les deux flux étant le temps et le coût, *Figure 30*. Cette technique, adaptée aux réseaux de très petites tailles, permet une meilleure compression des activités des projets et définit la courbe temps/coût optimale du projet.

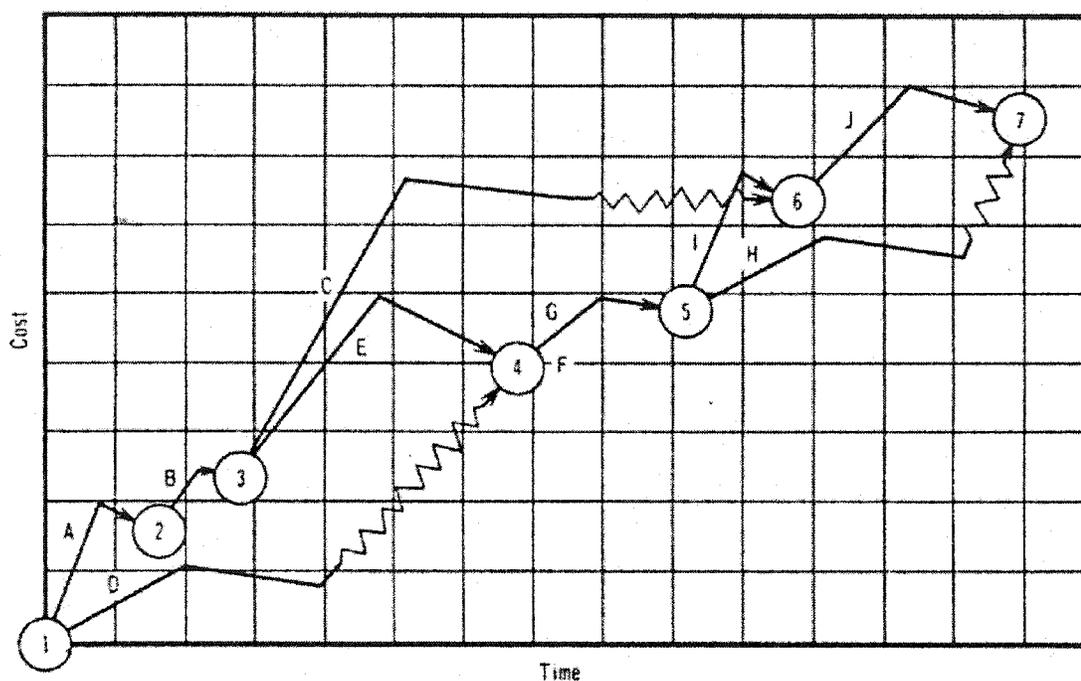


Figure 30 Réseaux à l'échelle du temps et des coûts
(Adapté de Balaguru, 1977)

En 1980, Pinnell propose une méthode manuelle pour l'ordonnancement de l'ADM à l'échelle du temps. Par la suite, en 1981, Melin & Whiteaker proposent une méthode appelée *Fenced Bar Chart*, Figure 31.

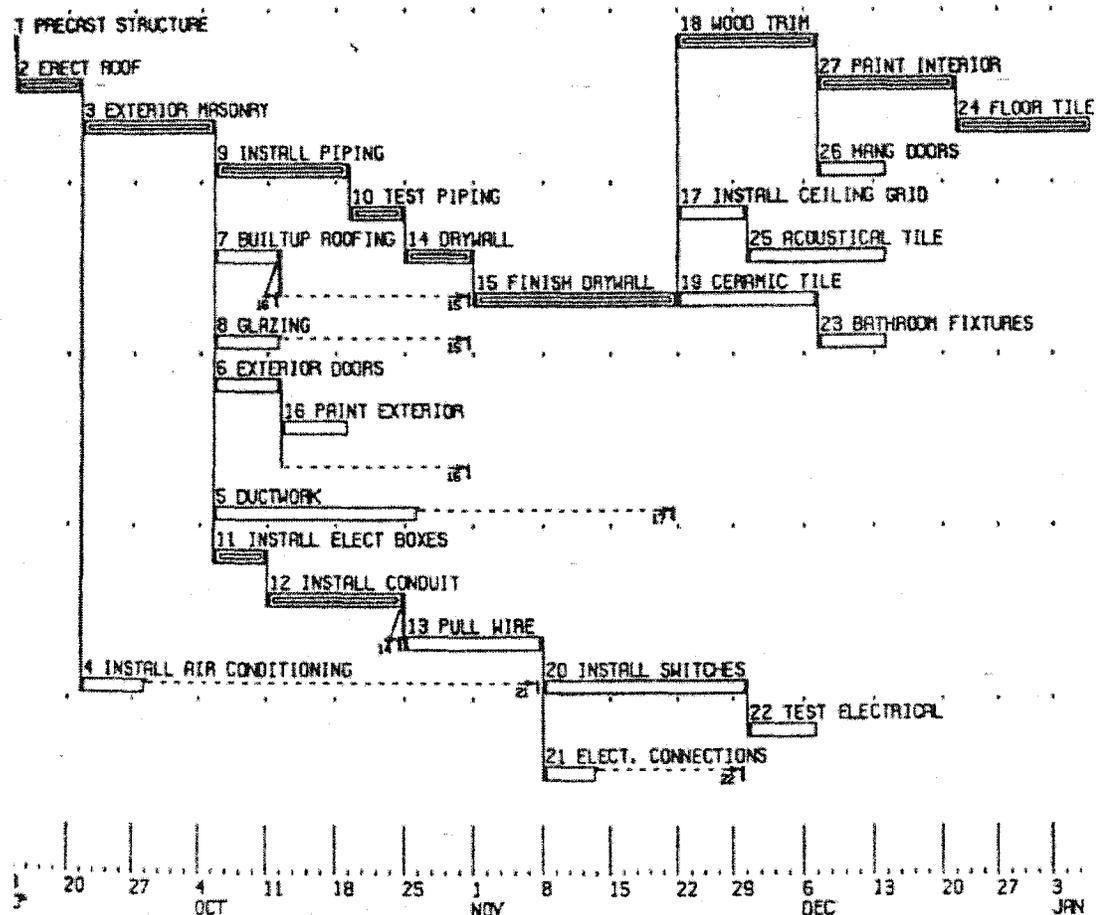


Figure 31 Le Fenced Bar Chart
(Adapté de Melin & Whiteaker, 1981)

Ce type de barre montre la logique d'exécution, en plus des informations habituelles d'un *diagramme Gantt*. Pour cela, le *Fenced Bar Chart* conserve la simplicité du *diagramme de Gantt* et les utilisateurs peuvent le comprendre rapidement.

Dans ce diagramme, chaque activité occupe une ligne. Pour optimiser la surface d'utilisation, des groupes d'activités inférieurs sont déplacés pour remplir les vides supérieurs. En plus, afin d'alléger sa visualisation et éliminer le plus grand nombre d'intersection possible, des barrières sont ajoutées pour remplacer certaines relations.

En 1982, McGough, a présenté l'ADM à l'échelle du temps. Selon lui, l'ADM à l'échelle du temps peut être facilement lu et compris comme un *diagramme de Gantt*. Par la suite Rahbar (1984) présente la PNA : *Pictorial Network analysis*. Cette méthode est destinée à planifier les petits projets et selon son auteur elle regroupe les avantages du *diagramme de Gantt*, de l'ADM et du PDM. Cette présentation prend en considération les jours perdus à cause des mauvaises conditions climatiques, des grèves, des autres contingences, etc.

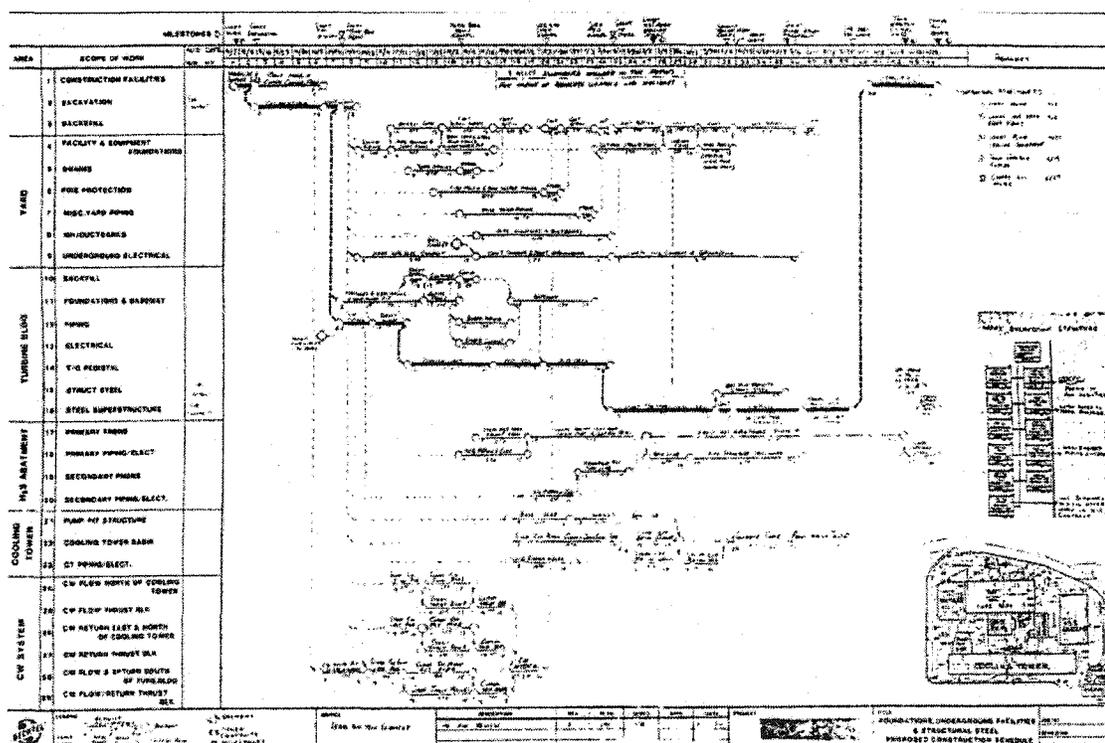


Figure 32 Pictorial Network Analysis
(Adapté de Rahbar, 1984)

La *Figure 32*, montre que le *PNA* est planifié avec deux directions de logique. Ainsi, elle représente un diagramme qui montre les différents types de relation à savoir Fin/Début, Début/Début et Fin/Fin. Les activités sont aussi regroupées en fonction des zones géographiques, ce qui diminue les intersections.

Mason (1984), montre l'*ADM* et la *PDM* à l'échelle du temps. Sa proposition qui représente l'*ADM*, *Figure 33*, était similaire à celle de Rahbar (1984) et celle de McGough (1982).

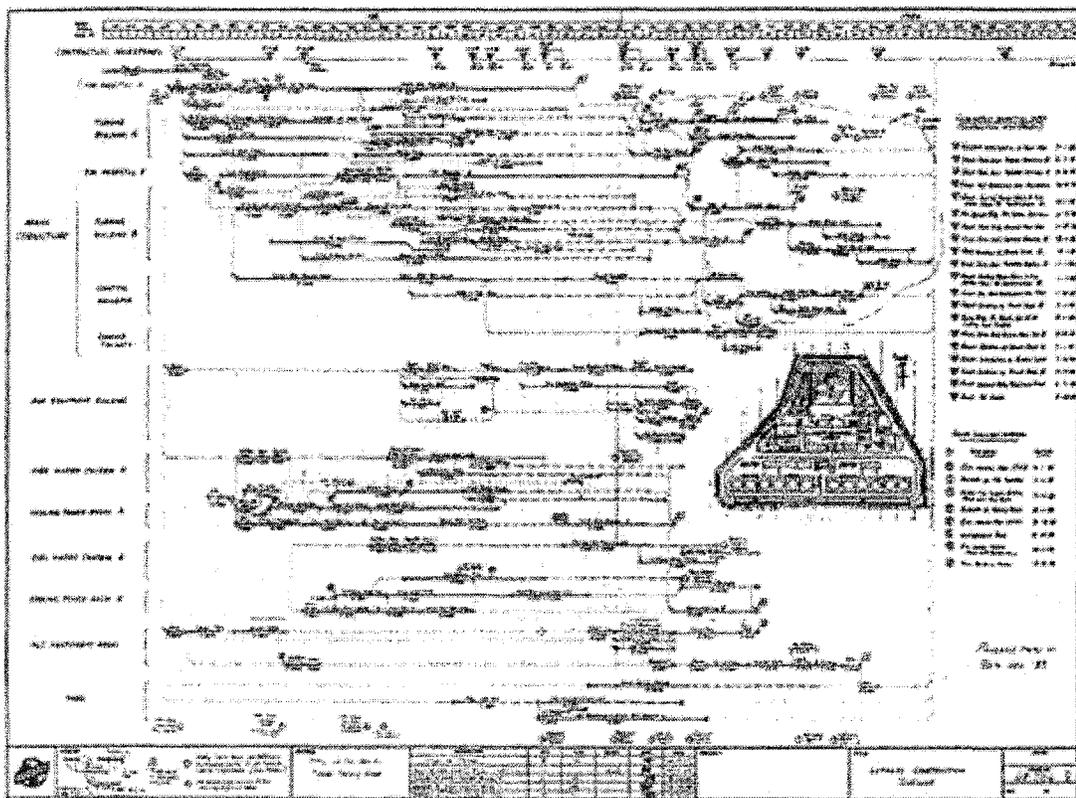


Figure 33 ADM à l'échelle du temps
(Adapté de Mason, 1984)

Celle qui illustre la *PDM* présentait des rectangles qui possèdent des longueurs fixes. Ces rectangles sont classés dans des emplacements qui montrent leurs positions sur le calendrier, *Figure 34*. Mason dit que l'*ADM* à l'échelle du temps, qui illustre les marges et les dates au plus tard favorise une connaissance meilleure du sujet étudié, que le format précédente.

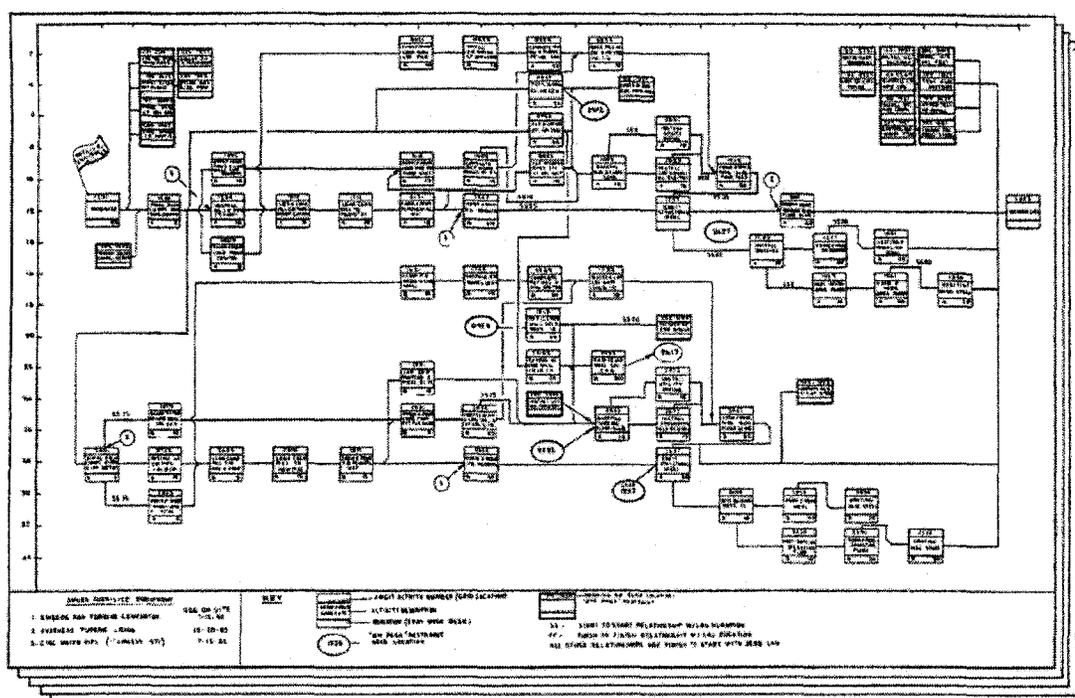


Figure 34 PDM à l'échelle du temps
(Adapté de Mason, 1984)

Par la suite, Miller a dirigé le projet *ICES : Integrated Civil Engineering Systems*. Ce projet était la première application informatique en génie civil destinée à des personnes qui n'ont pas de connaissances approfondies en science informatique. Le premier module de *ICES*, qui couvre le domaine de gestion de projet en génie civil, était le *ICES-Project/I*, Daniels (1969).

Ensuite, Miresco (1980) a présenté le réseau graphique *CPM* à l'échelle du temps en utilisant *ICES-Project/I* comme un processeur principal pour les calculs du réseau. En 1984, Miresco a développé *ICES-Project/I* sur micro-ordinateur un système de gestion de projet qui incorpore la gestion financière et les ressources.

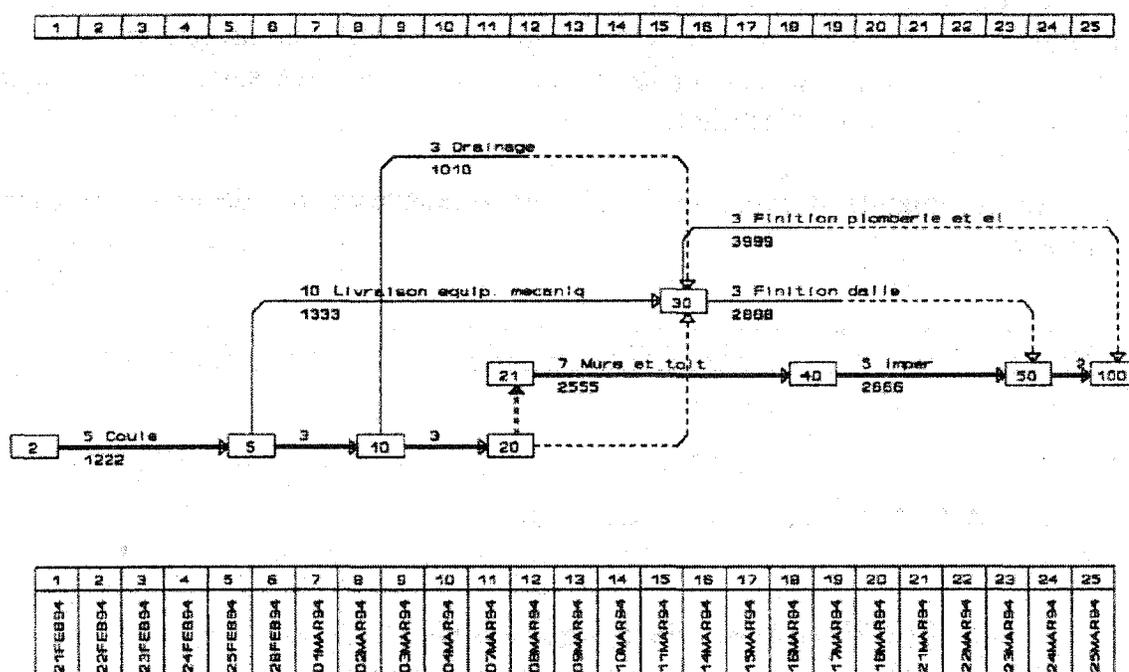


Figure 35 ADM à l'échelle du temps
(Adapté de Miresco, 1994)

Ce système a été affiné par la suite par Miresco et al. (1987). Dans leur présentation, la surface de dessin est composée de lignes verticales et horizontales pour représenter les chaînes d'activités en parallèle. Dans cette proposition, les activités sont triées selon leurs marges totales pour donner un ordre de priorité à leurs positionnements selon leur degré critique, *Figure 35*. L'accent est ainsi donné au chemin critique.

Francis et Miresco (2000) ont proposé la modélisation chronographique qui présente les réseaux à l'échelle du temps. Cette modélisation qui fait l'objet de cette présente thèse supporte la décomposition interne des activités en fonction des quantités. Ainsi sont créées des relations internes en fonction de ces divisions.

En 2001, Peña-Mora et Li basé sur le concept d'ingénierie simultanée, le design axiomatique, la méthode GERT et sur le travail de Eppinger (1997) ont proposé une planification dynamique qui décompose des activités en quatre tranches en fonction des pourcentages. Les relations sont ainsi en fonction de ces pourcentages voir *Figure 36*.

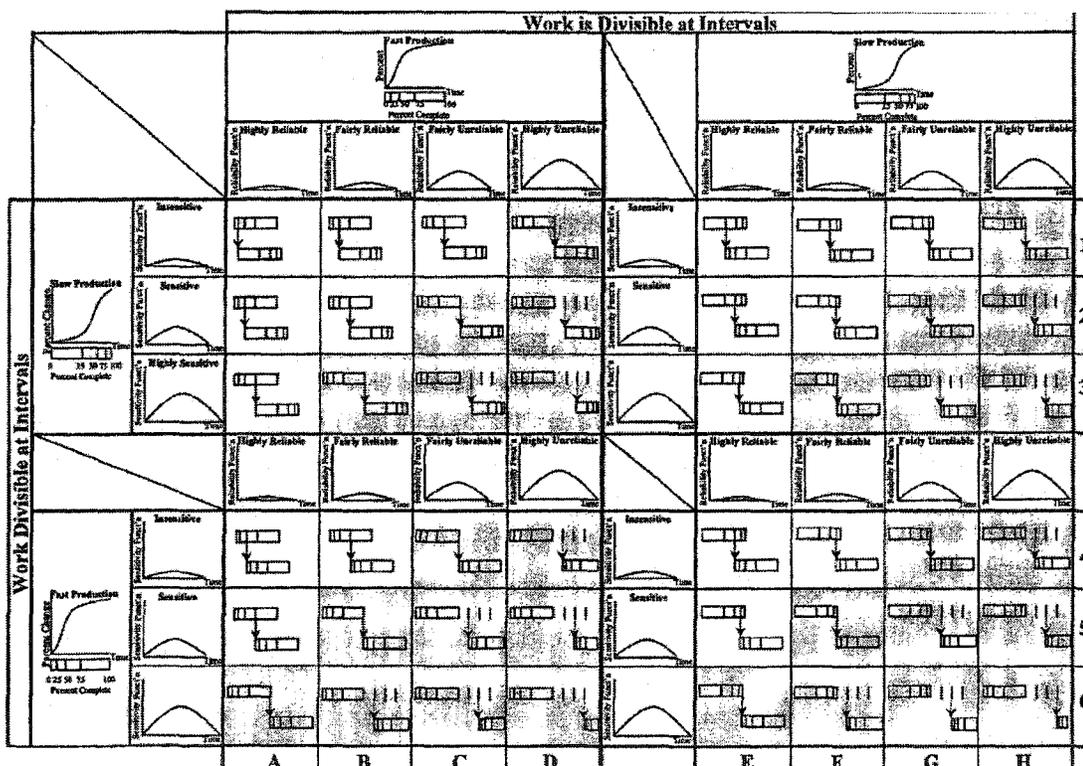


Figure 36 Activités divisées selon le pourcentage d'avancement
(Adapté de Peña-Mora et Li, 2001)

3.2.3 Analyse des recherches présentées

Les méthodes actuelles d'ordonnement des projets à caractère non répétitif à l'échelle du temps peuvent être divisées en deux principaux groupes :

1. Celles qui sont modélisées avec une approche à deux directions de flux de logique et qui présentent des diagrammes avec des relations. Dans ces propositions, chaque activité occupe une ligne.

2. Celles qui montrent une logique à une seule direction de flux et qui représentent les réseaux à l'échelle du temps. Dans ces propositions les activités peuvent être représentées en séries et en parallèles. Ce deuxième groupe est classé sous trois catégories :
 - Celles qui ne suggèrent aucune technique particulière d'arrangement des activités telles que les deux propositions de Fondahl. La représentation graphique de cette catégorie reste complexe même pour des projets de petites tailles.
 - Celles qui mettent l'accent sur la visualisation du chemin critique comme le *Most* de Lannone et l'*ADM* de Miresco. Ainsi, les activités sont classées selon leurs degrés critiques. Bien que ces propositions apparaissent intéressantes, la visualisation de l'ordonnement devienne complexe pour les projets de tailles moyennes ou grandes.
 - Celles qui représentent les activités de la *PDM* à travers avec des rectangles qui possèdent des longueurs fixes mais positionnées selon leurs dates de début. Dans cette catégorie on trouve la *PDM* de Mason. Ces méthodes, si regroupées en sous-réseaux, constituent des techniques adaptées à la représentation de l'échelle temps.

Lee (1982), *Figure 38*, croit que les réseaux présentés à l'échelle du temps sont supérieurs au *Fenced Bar Chart* de Melin et Whiteaker. À leur tour, Melin et Whiteaker

(1983) affirment que le chemin critique, les marges des activités non critiques et le calendrier sont plus faciles à suivre avec les diagrammes. Ils disent que les *CPM* sont plus complexes à produire que les diagrammes. Ainsi, typiquement les réseaux tendent à être un outil non adapté, à la représentation graphique des projets, avec plusieurs intersections qui peuvent amener à une confusion.

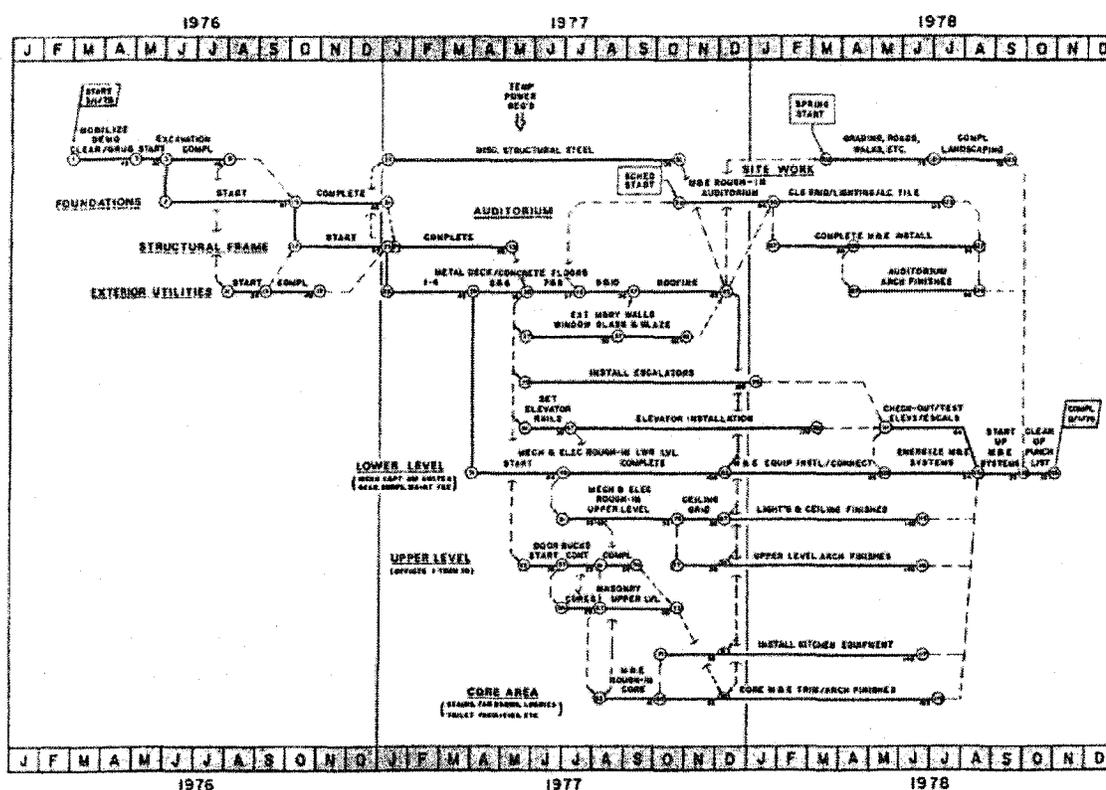


Figure 38 Le Arrow Diagram Method à l'échelle du temps
(Adapté de Lee, 1982)

Miresco, et al. (1987) voient que la présentation graphique des réseaux à l'échelle du temps offre un moyen simple pour comprendre la logique du projet. D'après Hinze (2004), le changement de la séquence des activités à travers le *diagramme de Gantt* ne peut pas être établi facilement, spécialement quand plusieurs activités sont impliquées.

Cette recherche appuie l'avis que les réseaux représentés à l'échelle du temps sont supérieurs aux variantes connues du *diagramme de Gantt*. Cela est dû à la capacité des réseaux de représenter les activités en séries et en parallèles. Pour cela, leurs utilisations des surfaces de présentation sont plus efficaces. De plus, le *diagramme de Gantt* présente à ce niveau plusieurs faiblesses :

- Il utilise les activités en même temps comme entité principale et direction secondaire de flux de logique. Ainsi il présente une contrainte supplémentaire sans montrer plus d'information. Cela rend sa visualisation plus complexe.
- Il est arrangé selon les sections du devis, les sous-projets ou selon les zones géographiques. Pour cela, il définit difficilement les sous-réseaux.

En général, les réseaux avec un seul flux de logique représentent moins de contraintes que les diagrammes. Ainsi, ils peuvent présenter des projets de plus grande taille. Par contre, les réseaux illustrés à l'échelle du temps, avec leurs formes actuelles, présentent plusieurs inconvénients. Une de ces faiblesses se situe au niveau de la visualisation de l'ordonnement. Les difficultés restent essentiellement dans la surface de lecture. Les lignes de dépendance sont souvent très rapprochées et coupent les autres activités en les rendant très difficiles à suivre.

Une deuxième lacune est relative à la présentation des relations de préséances d'une façon peu réaliste. Une troisième concerne le suivi d'avancement des projets. Une quatrième est relative à l'inexistence des analyses internes aux activités. Ces points seront expliqués davantage lors de la présentation de la méthode *chronographique*.

3.3 La représentation à l'échelle du temps des projets à caractère répétitifs

3.3.1 Introduction

Les projets à caractère répétitifs occupent une partie importante du nombre total des projets de construction. On peut, notamment, préciser les réseaux routiers, les réseaux électriques, les chemins de fer, l'adduction d'eau, l'évacuation des eaux usées, les projets d'habitation et les bâtiments à niveaux multiples.

Les méthodes citées précédemment sont conçues pour traiter principalement des projets standards. Le concept de ces méthodes repose sur le fait que les interventions des ressources sont spécifiques. Chacune de ces ressources contribue à l'exécution d'une activité unique ou d'un groupe d'activités. La tâche principale devient la coordination entre ces divers intervenants et la planification est orientée selon les exigences des préséances techniques entre les activités.

L'objectif principal des méthodes qui planifient les projets à caractère répétitifs est d'assurer une continuité d'utilisation des ressources. Trimble (1984) mentionne que les échéanciers orientés par les ressources sont plus réalistes que ceux dominés par les activités. Ainsi ces méthodes font apparaître graphiquement tout déséquilibre dû à une progression inégale des activités et permettent rapidement au gestionnaire de quantifier la déviation (Khisty 1970).

Pour cela, les méthodes qui traitent les projets standards éprouvent des difficultés pour s'appliquer aux projets à caractère répétitifs. Ainsi, plusieurs méthodes ont été développées pour planifier ces types de projet.

3.3.2 Les méthodes de planification des projets à caractère répétitifs

Pour répondre aux projets de caractère répétitifs, le *U.S. Navy Department* au début des années cinquante a développé la méthode *LOB : Line Of Balance*. Cette méthode

représente une relation entre le temps et les unités répétitives. La *LOB* est présentée sous deux versions distinctes :

1. *Material Requirements Planning (MRPII)* : une méthode destinée à produire des listes de matériaux et à établir le progrès d'un programme manufacturier répétitif. Le résultat obtenu est présenté sous forme d'un arbre qui indique sur les branches les pièces utilisées pour fabriquer les sous-ensembles et les pièces et les sous-ensembles utilisés pour fabriquer le produit.

Sur chaque branche le nombre de pièces utilisées pour fabriquer une unité et le temps de fabrication demandé sont indiqués. En faisant le calcul en passe – arrière, la date pour laquelle chaque pièce doit être en stock est connue.

Cette technique est utilisée pour augmenter la rentabilité, améliorer la liquidité et alléger l'actif à travers un objectif de stock zéro. Ainsi, tous les stocks sont tendus, et tous les chemins deviennent critiques.

2. *Line Of Balance, Figure 39* : une technique pour planifier les projets à caractère répétitifs. Cette technique est développée afin d'assurer une continuité d'utilisation de chaque type de ressource. C'est cette deuxième méthode qui est désignée chaque fois que le terme *LOB* est utilisé.

Cette méthode et ses variantes sont utilisées pour analyser l'occupation de la main d'œuvre. Pour chaque spécialité indépendamment il faut analyser la productivité de la main d'œuvre pour estimer le taux de progression de cette spécialité. Ensuite, le temps total d'achèvement, de chaque spécialité, est ajusté dans la mesure du possible, en variant le nombre de ressource à utiliser. Cela, est dans le but de respecter un taux général de production et d'optimiser le temps d'exécution.

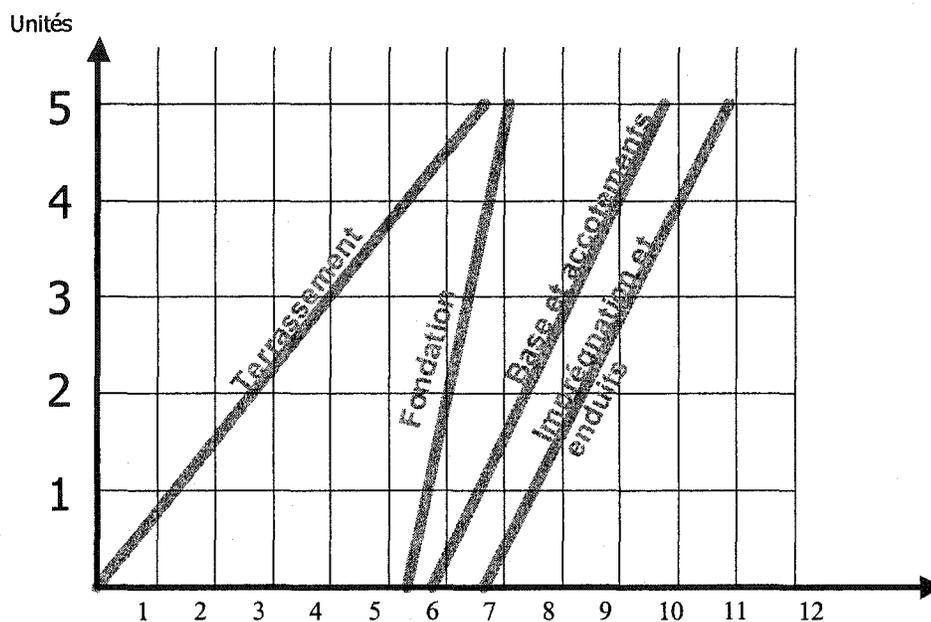


Figure 39 Méthode « Line of Balance »

Pour assurer une continuité d'utilisation de chaque type de ressource, ces méthodes proposent de retarder le début des spécialités qui ont un taux de progression plus rapide. Ce retard sert à ajuster les dates de finition de ces spécialités avec celles qui les précèdent.

La *LOB* a été modifiée par Lumsden (1968) qui a montré un exemple de progrès déséquilibré d'un projet de construction de logement. Il a montré une distinction entre le taux de progression d'une activité répétitive dans les différentes unités et l'avancement global du projet.

En 1970, Khisty a démontré l'application de la méthode pour un projet manufacturier pour produire des poutres en béton préfabriqué.

Carr & Meyer (1974) ont appliqué la technique sur des projets de construction d'unités d'habitation. La modélisation graphique proposée par cette technique représente la *LOB* dans sa forme la plus connue pour planifier les projets à caractère répétitifs horizontaux.

Dans ce type de projet, l'utilisation de plusieurs équipes pour exécuter la même spécialisation dans plus d'une unité en même temps est réalisable. L'emploi des équipes multiples contribue à une diminution considérable des durées totales des projets.

Par la suite O'Brien (1975) a proposé la *Vertical Production Method* (VPM). Dans sa proposition, il a utilisé le *CPM* pour représenter les activités à caractère non répétitives telles que les fondations du bâtiment. La *LOB* a servi pour les activités à caractère répétitives, représentées dans les niveaux identiques.

Pour modéliser la variation de progression d'exécution d'une activité répétitive d'une unité à l'autre, plusieurs recherches ont été effectuées (Selinger, 1980; Johnston, 1981; Russel et Wong, 1993). Le nom le plus connu de ces méthodes est le *Linear Scheduling Method* (LSM). La variation des taux de progression peut être due à l'apprentissage généralement associé au démarrage de chaque activité, aux conditions climatiques ou à la particularité d'une certaine unité.

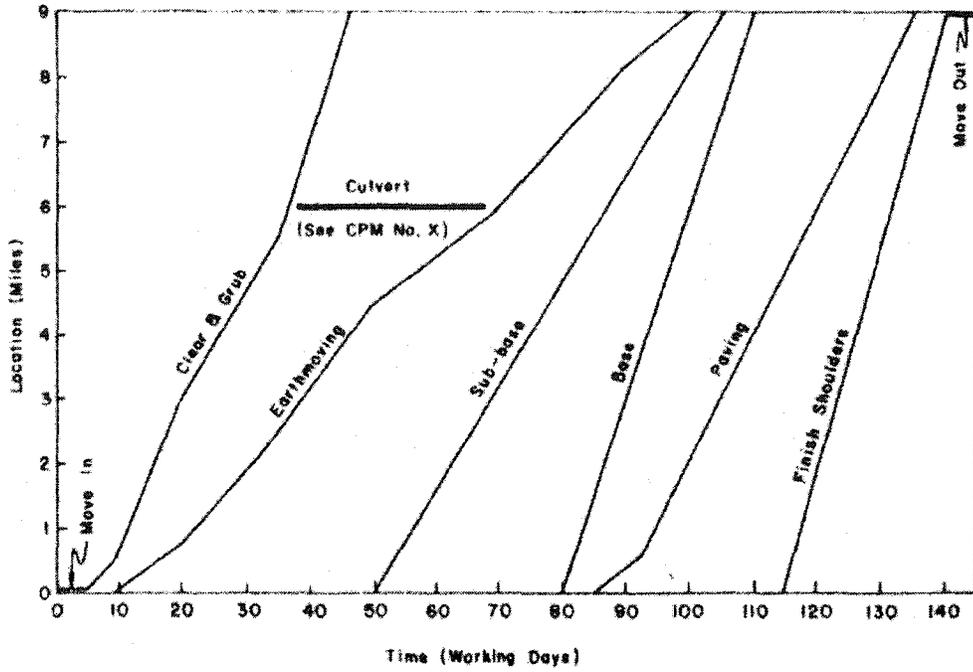


Figure 40 Linear Scheduling Method
(Adapté de Johnston, 1981)

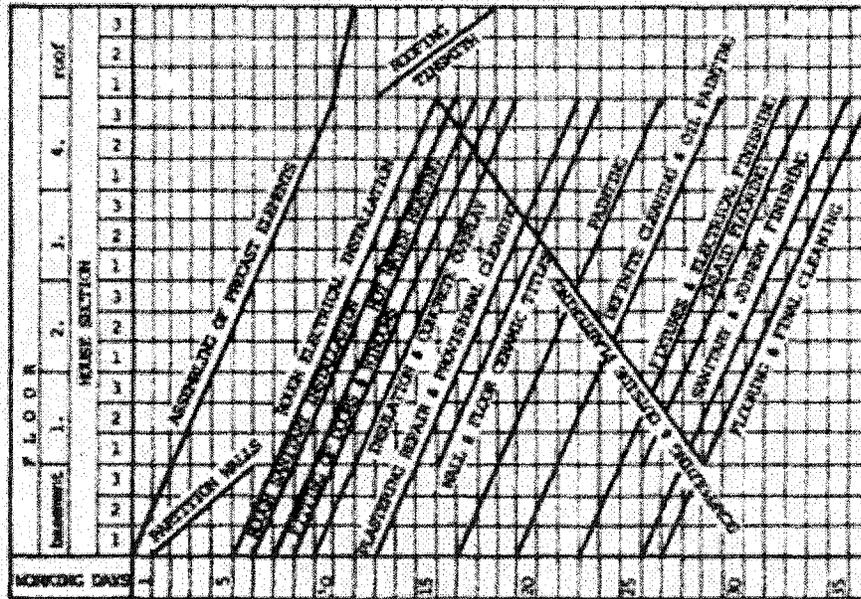


Figure 41 Time Space Sheduling Method
(Adapté de Stradal & Cacha, 1982)

Stradal et Cacha (1982) ont développé le *Time Space Scheduling Method*. Cette technique peut servir à ordonnancer graphiquement une quantité limitée d'activités en parallèle et d'établir les relations entre les activités de la même unité.

3.3.3 Le CPM et les projets répétitifs

Moder et al. (1983) ont proposé une méthodologie qui utilise les *CPM* pour planifier les projets qui contiennent des cycles répétitifs. La méthode consiste à :

- Produire un sous-réseau détaillé pour chaque groupe d'activité destiné à être répété;
- Comprimer chacun des sous-réseaux;
- Utiliser les sous-réseaux comprimés pour construire le réseau global du projet.

Les utilisateurs et les chercheurs partagent leurs désaccords pour l'application des *CPM* aux projets à caractères répétitifs. La raison essentielle est la faiblesse des *CPM* pour appliquer les changements aux différentes unités répétitives.

Rahbar & Rowing (1992) notent que les *CPM* sont incapables de distinguer entre le taux de progression des activités et le nombre d'unités complétées. Une autre raison est que les *CPM* ne favorisent pas une continuité d'utilisation de chaque type de ressource.

3.3.4 La combinaison de la LOB et du CPM

Plusieurs travaux ont été développés pour combiner les avantages du *CPM* et de la *LOB*. Au début, Schoderbek and Digman (1967) ont intégré les outils de planification de la méthode PERT avec les éléments de contrôle de la *LOB*.

Perera (1982) a proposé une technique pour la compression des réseaux. Cette technique utilise un *CPM* pour analyser le projet. Celui-ci est traduit à un diagramme. Ensuite, en

utilisant la programmation linéaire, le réseau est compressé et le coût supplémentaire résultant est calculé.

Reda (1990) a développé une approche appelée *Repetitive Project Model* (RPM). Cette approche incorpore trois techniques : une technique de réseau, une technique graphique et une technique analytique. La technique des réseaux utilise la présentation de l'*ADM* pour définir les activités et leurs dépendances pour une unité répétitive typique. La technique graphique établit la courbe temps/coût de chaque activité et la courbe des flux. Cette dernière représente le mouvement d'une équipe de travail pour une activité de l'état initial jusqu'à la fin du projet. La pente de chaque ligne démontre le taux de production pour chaque activité. La technique analytique utilise la programmation linéaire pour sa formulation mathématique.

En 1991, Al Sarraj a développé une méthode mathématique qui calcule la durée du projet, le début et la fin de chaque activité pour chaque unité répétitive.

Rahbar & Rowing (1992) ont développé une méthode qui combine le *CPM* et la *LOB*. La méthode utilise le *CPM* pour les activités non répétitives pour éviter d'alourdir le réseau et la *LOB* pour les activités répétitives.

Thabet et Beliveau (1994) ont développé une méthode qui tient compte des surfaces de travail nécessaires pour le stockage du matériel et pour la circulation de la main d'œuvre sur le chantier. Cette méthode diminue les conflits qui peuvent exister sur les chantiers et améliore la productivité des équipes.

Suhail & Neale (1994) ont utilisé une méthode qui combine le *CPM* et la *LOB*. À travers les *CPM*, ils produisent une unité type. Pour cette unité, le chemin critique est calculé et les branches parallèles sont définies.

Par la suite, les unités répétitives sont présentées par la *LOB* et le taux de progression de chaque activité répétitive est calculé. Le taux de progression global du projet est défini afin de respecter une date de fin du projet. Ce taux de progression global sert à calculer le nombre d'équipes pour chaque activité critique afin d'ajuster sa progression avec celle du projet. Les activités non critiques peuvent profiter de leurs marges totales pour réduire la demande des équipes.

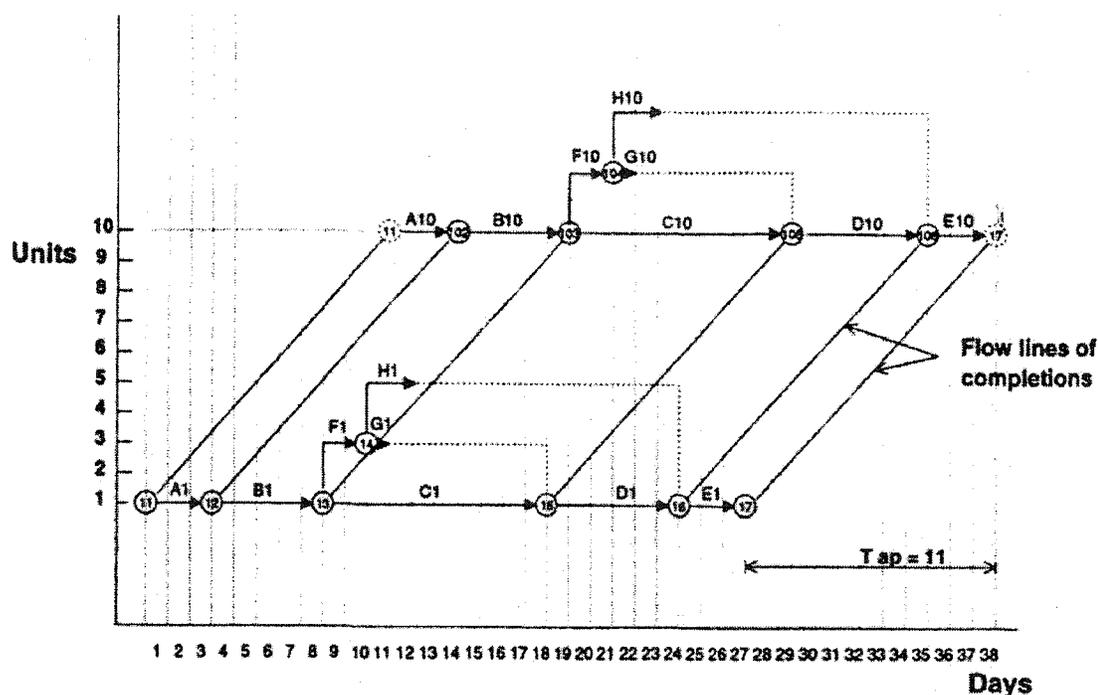


Figure 42 La Méthode proposée par Suhail et Neale
(Adapté de Suhail & Neale, 1994)

Bien que cette méthode apparaisse comme optimale pour l'utilisation des ressources et pour sa capacité de respecter facilement une date imposée par le client pour l'achèvement du projet, elle comprend plusieurs défauts. Ainsi cette méthode :

- Ne prend pas en compte la disponibilité des équipes;

- Prend comme hypothèse que la durée de chaque activité reste fixe pour toutes les unités répétitives;
- Fonctionne avec les jours ouvrables et ne prennent pas en compte les contraintes imposées par les jours de congés du calendrier, ni ne profite de leurs avantages.
- Est incapable de montrer graphiquement la succession des équipes des activités en parallèle.
- Optimise difficilement les projets si le nombre d'équipes diffère d'une activité répétitive à l'autre. Cela est dû aux contraintes de succession des équipes;

El Rayes & Moselhi (1998) proposent un algorithme qui s'applique sur deux étapes : la première prend en compte la relation de dépendance entre les activités et la disponibilité des équipes de travail, et la deuxième s'intéresse aux contraintes de continuité d'utilisation des équipes.

Bien que la méthode prenne en considération :

- 1) les types d'activités (durée identique ou peu identique);
- 2) le nombre variable d'équipes;
- 3) l'interruption de la continuité du travail;
- 4) la disponibilité des équipes;
- 5) et l'ordre d'exécution.

Elle se base sur un aspect mathématique. Ainsi, les problèmes liés à la modélisation graphique des réseaux restent non réglés.

Bolivar et Halpin (1998) proposent PICASSO un diagramme hybride qui combine les CPM avec *Cyclone*. Ce diagramme contient trois composantes : les ressources, les activités et leurs connections. Le réseau général est découpé en sous-réseaux. Chaque sous-réseau contient les trois composantes et son nombre de répétitions. Bien que la simulation s'adapte parfaitement aux activités à caractère répétitifs, la représentation

graphique, indépendamment des activités et des ressources, pour des réseaux importants devienne trop complexe.

Harris et Iannou (1998) ont développé le *Repetitive Scheduling Method RSM*. Cette méthode combine les avantages du :

1. *LSM*, ainsi, elle favorise la continuité de l'utilisation des ressources et accepte des taux de progression variables
2. Et du *CPM*, ainsi elle démontre les relations entre les activités et elle peut présenter graphiquement les activités en parallèle.

Par contre cette méthode ne peut montrer graphiquement que des projets de très petite taille.

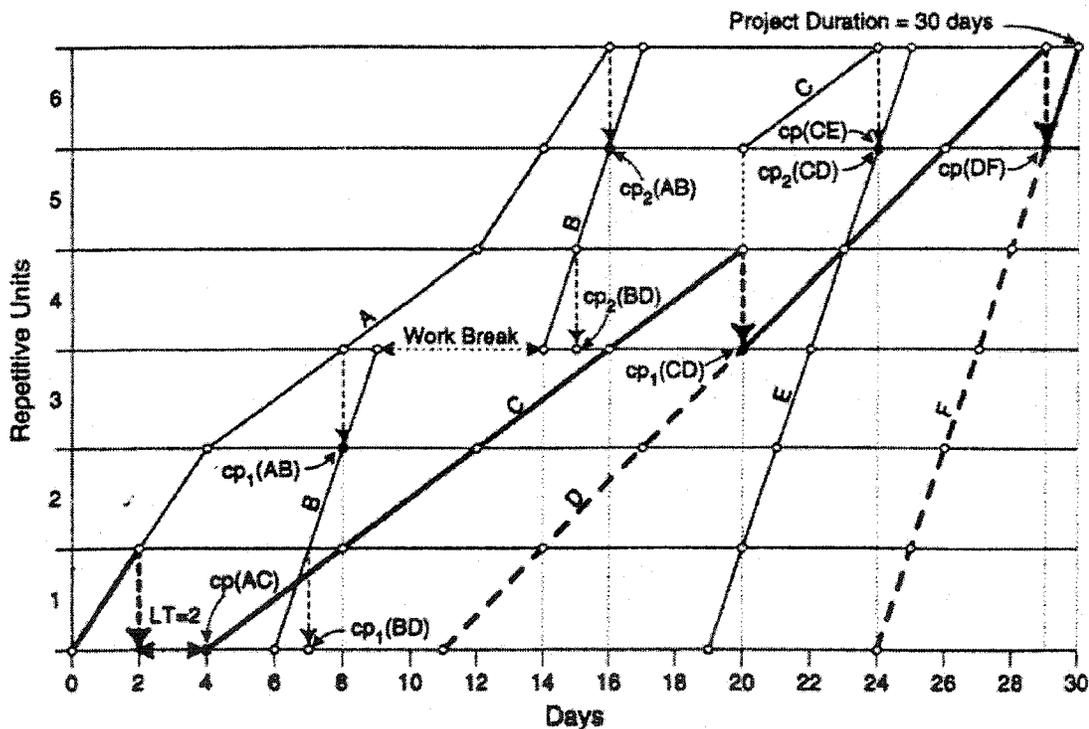


Figure 43 Repetitive Scheduling Method
(Adapté de Harris et Iannou 1998)

3.3.5 Conclusion

Soulignons que la plus grande différence entre l'ordonnancement des projets à caractère répétitifs et les autres types, est que l'ordonnancement produit est orienté par les ressources et non par les activités. Il faut toujours mentionner que la dépendance entre les activités reste toujours essentielle même avec une méthode orientée par les ressources puisque c'est cette dépendance qui détermine les exigences d'exécution.

Bien que plusieurs recherches se soient intéressées aux projets à caractères répétitifs, l'utilisation des méthodes suggérées reste réduite. Selon Neale & Neale (1989), la *LOB* ne montre clairement qu'une quantité limitée d'informations. Pour cela et à notre connaissance, les logiciels commerciaux les plus utilisés traitent seulement des techniques de planification des projets à caractère non répétitifs. Cela est lié à trois principaux défauts :

- Le premier défaut est lié à l'incapacité de ces méthodes de représenter graphiquement, à l'exception d'une quantité limitée d'information, les activités en parallèle. Sachant que la majorité des projets sont constitués de plusieurs branches d'activités en parallèle, ce problème est considéré comme la cause majeure de cette limitation d'utilisation.
- Le deuxième est relatif à la complexité de la visualisation des relations techniques entre les activités. La difficulté de cette représentation devrait, par ailleurs, s'accroître si les activités en parallèle pouvaient être représentées.
- Le troisième concerne l'utilisation des jours ouvrables dans les représentations précédentes. Cela prive ces méthodes des avantages liés à la représentation des échéanciers à travers les jours de calendrier.

3.4 Les logiciels offrant l'échelle du temps

3.4.1 Les logiciels les plus utilisés

L'étude réalisée par Aouad et Price (1992) démontre que, en ce qui concerne les travaux de grandes envergures, *Primavera Project Planner (P3)* domine largement le marché Nord américain suivi de *Open Plan* et *PMS*. Hinze (2004) cite aussi que *Primavera* est un des logiciels de planification les plus populaires dans l'industrie de construction.

Selon *Microsoft PressPass* : (Comdex/Fall 15 novembre 99), Steve Ballmer, le Président de Microsoft a annoncé que Microsoft Project 2000 est le logiciel de gestion le plus vendu dans le monde.

Le sondage de Liberatore et al. (2001) montre que 51,4% des répondants du domaine de la construction utilisent *Primavera* pour planifier leurs projets, 24,3 % utilisent *MS-Project* et 24,3 % pour tous les autres logiciels de planification.

Ainsi, *Primavera* et *MS-Project* suivi de *Open-Plan*, sont considérés les trois logiciels les plus utilisés en Amérique du Nord dans le domaine de la planification des projets de construction en ce moment.

3.4.2 Analyse des logiciels les plus utilisés

Cette section analyse les ordonnancements présentés à l'échelle du temps selon les trois logiciels les plus utilisés dans le domaine de la planification des projets. Les figures choisies sont des extraits des publications faites par ces compagnies ou des exemples fournis avec ces applications. Ainsi, elles sont considérées comme les plus représentatives selon leurs concepteurs.

Cette analyse se fera sur deux sections; la première concerne la représentation des diagrammes et la deuxième montre les réseaux à l'échelle du temps.

3.4.3 La représentation des diagrammes selon les logiciels commerciaux

Les logiciels commerciaux représentent les diagrammes sur des formes multiples telles que les bandes destinées à représenter les activités, les histogrammes et les courbes pour montrer les ressources et les coûts.

Les figures suivantes s'intéressent à l'analyse des diagrammes à bandes qui utilisent les activités comme entités de représentation. Les noms utilisés pour ces représentations sont ceux employés par ces applications informatiques.

Les trois premières *Figure 44*, *Figure 45*, *Figure 46* présentent *Le diagramme Gantt* selon *MS-Project*, *Open-Plan* et *Primavera* respectivement. La *Figure 47* représente le *Fenced Bar Chart* selon *Primavera Project Planner*.

Dans ces figures, il est facile à constater que le nombre d'activités n'est pas proportionnel avec la surface utilisée, d'où une utilisation non optimale du plan de travail. La *Figure 46* démontre aussi la difficulté de lecture des lignes de dépendance entre les activités. Par conséquent, on constate la complexité du suivi des projets à l'écran.

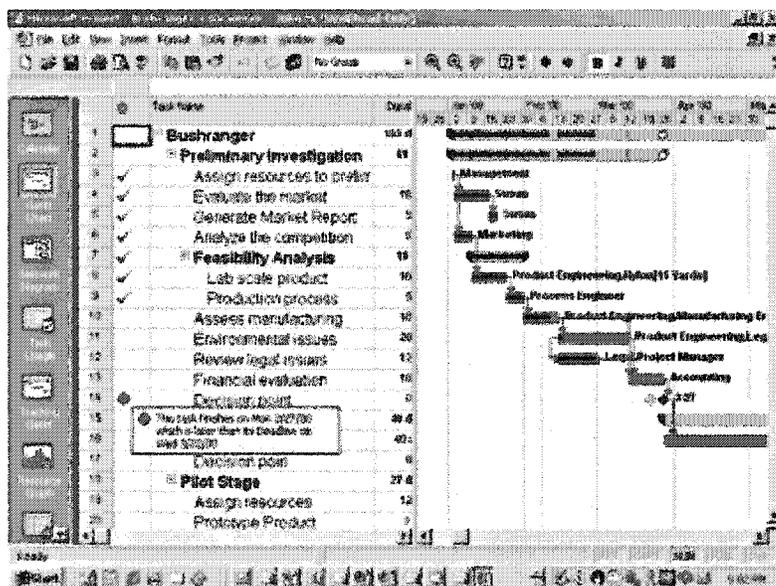


Figure 44 La visualisation du Diagramme Gantt à travers MS-Project

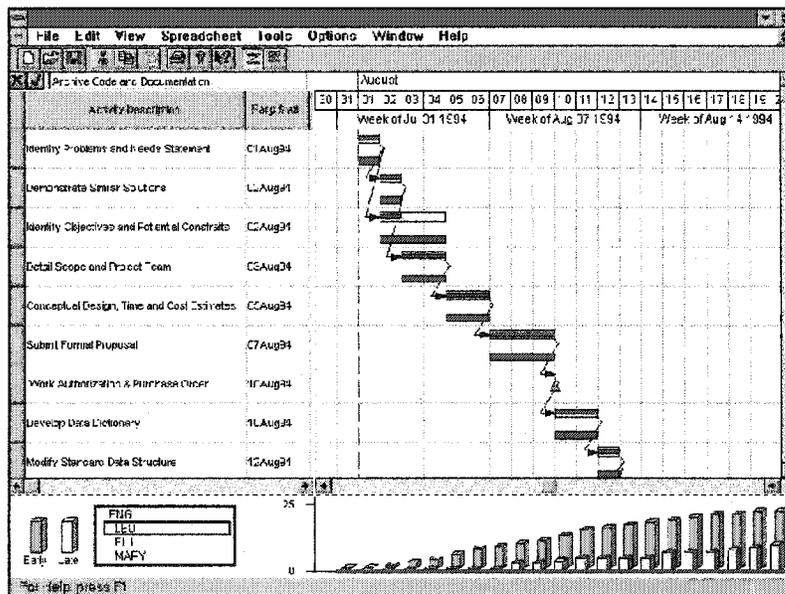


Figure 45 La visualisation du Diagramme Gantt avec Open-Plan

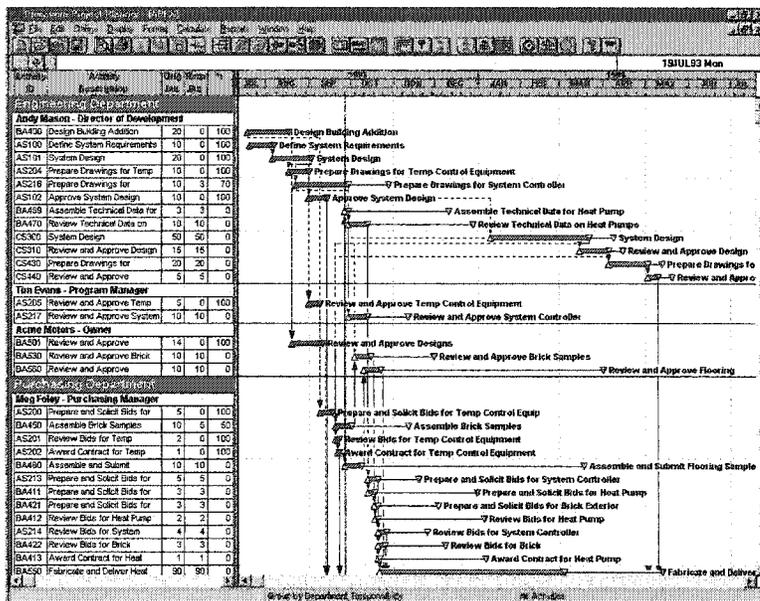


Figure 46 Le Diagramme Gantt présenté par Primavera

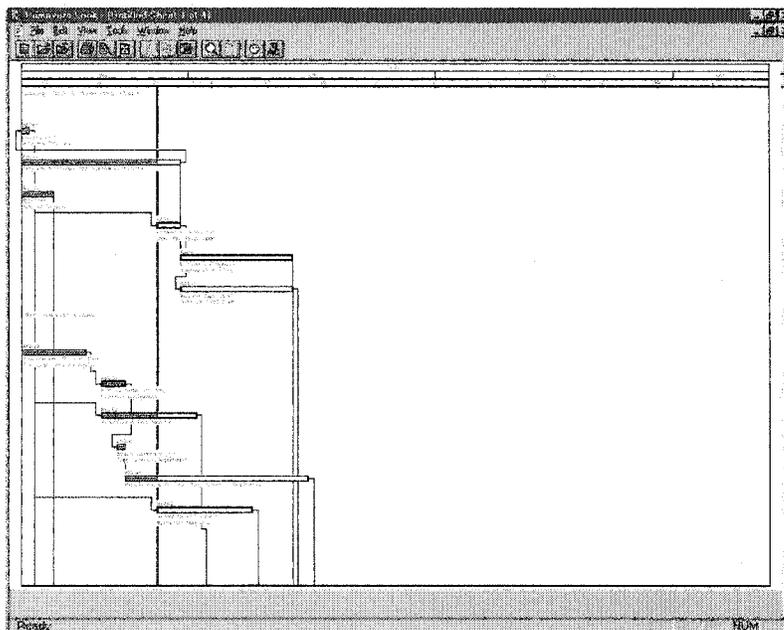


Figure 47 Primavera et le Fenced Bar Chart

3.4.4 La représentation des réseaux à travers les logiciels commerciaux

Le premier exemple, *Figure 48*, montre *La précedence* à l'échelle du temps avec *MS-Project*. Le logiciel utilise la technique proposée par Mason (1984). La *Figure 49* montre toujours *la précedence* représentée par *Primavera* pour un projet de taille moyenne. Une présentation qui ne mérite pas de commentaire, et où l'on constate clairement la difficulté de lecture des lignes de dépendance qui sont souvent très rapprochées et qui se coupent et coupent les autres activités.

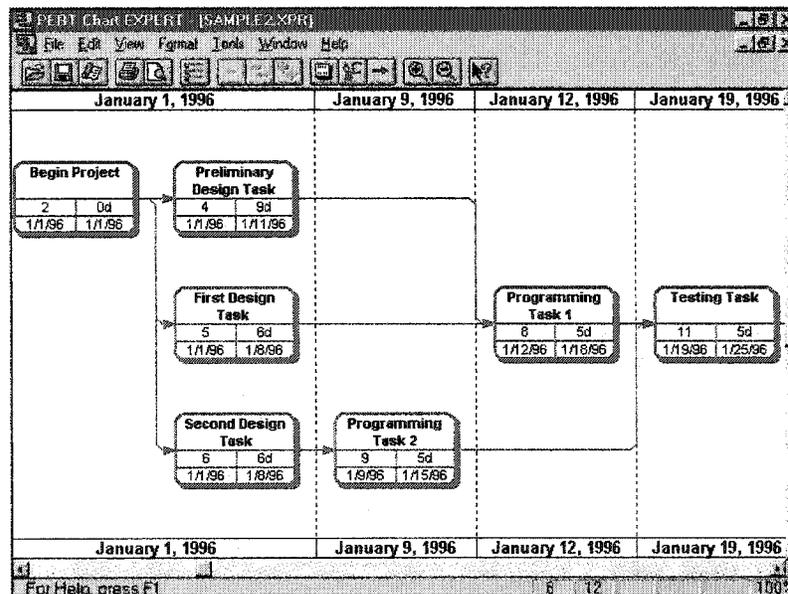


Figure 48 La Précedence à l'échelle du temps avec MS-Project

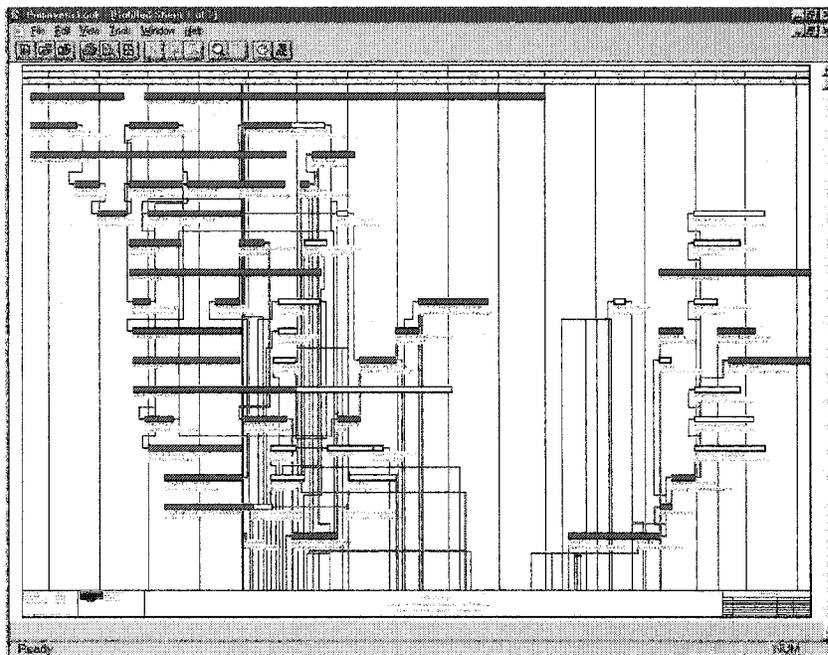


Figure 49 La précedence à l'échelle du temps selon Primavera.

3.4.5 Avis de certains utilisateurs des systèmes

Il y a vingt ans, Pinnell (1980) disait que : « l'échec de l'informatisation des réseaux, selon l'opinion des utilisateurs, résulte souvent du fait que l'ordonnancement ne peut pas être suivi ». À son avis, les réseaux générés par ordinateur, au moins ceux vus par *Pinnell Engineering*, ne sont pas satisfaisants. Cela est dû à la mauvaise qualité graphique. Il ajoute que :

« bien que la précedence soit récemment assez populaire, elle n'est pas encore la solution. Si l'ordinateur est utilisé, la précedence est de loin supérieure aux nœuds i-j. En plus, la précedence possède quelques avantages sur l'ADM, spécialement quand on ébauche un réseau complexe à cause de la simplicité dans la modification des relations. Cependant, elle

ne se prête pas à la présentation à l'échelle du temps, et doit éventuellement être convertie à une présentation ADM ».

Mason (1984) croyait aussi que l'utilisation des ordinateurs peut rendre la planification et les ordonnancements en cauchemar, même pour des réseaux simples.

Aujourd'hui, les utilisateurs partagent la même opinion. Fisk (2003) dit que :

« bien qu'il y ait un large mouvement pour la production des réseaux graphiques par ordinateur, principalement pour garder les coûts bas, plusieurs grandes compagnies dont leurs travaux dépendent entièrement de la préparation des ordonnancements pour les entrepreneurs, utilisent encore les réseaux faits manuellement. Il y a de bonnes raisons pour préserver les réseaux manuels : ils sont plus faciles à suivre. La personne qui les produit possède la capacité de les étendre quand c'est nécessaire pour présenter l'information clairement. L'ordinateur, pour les projets complexes, crée un document qui demande un effort considérable de compréhension et des habilités visuelles pour le suivre. Les difficultés restent essentiellement dans la surface de lecture des lignes de dépendances qui sont souvent très rapprochées et qui coupent les autres activités, en les rendant très difficiles à suivre sans loupe et crayons à couleurs pour tracer les lignes ».

La *Figure 50* montre l'exemple présenté par Fisk pour appuyer son point de vue.

Les présentations précédentes démontrent clairement que la visualisation de la planification à l'échelle du temps avec les logiciels existants, laisse à désirer. Cela constitue, entre autres, une des causes principales pour le développement de la méthodes *chronographique* et l'outil informatiques de planification.

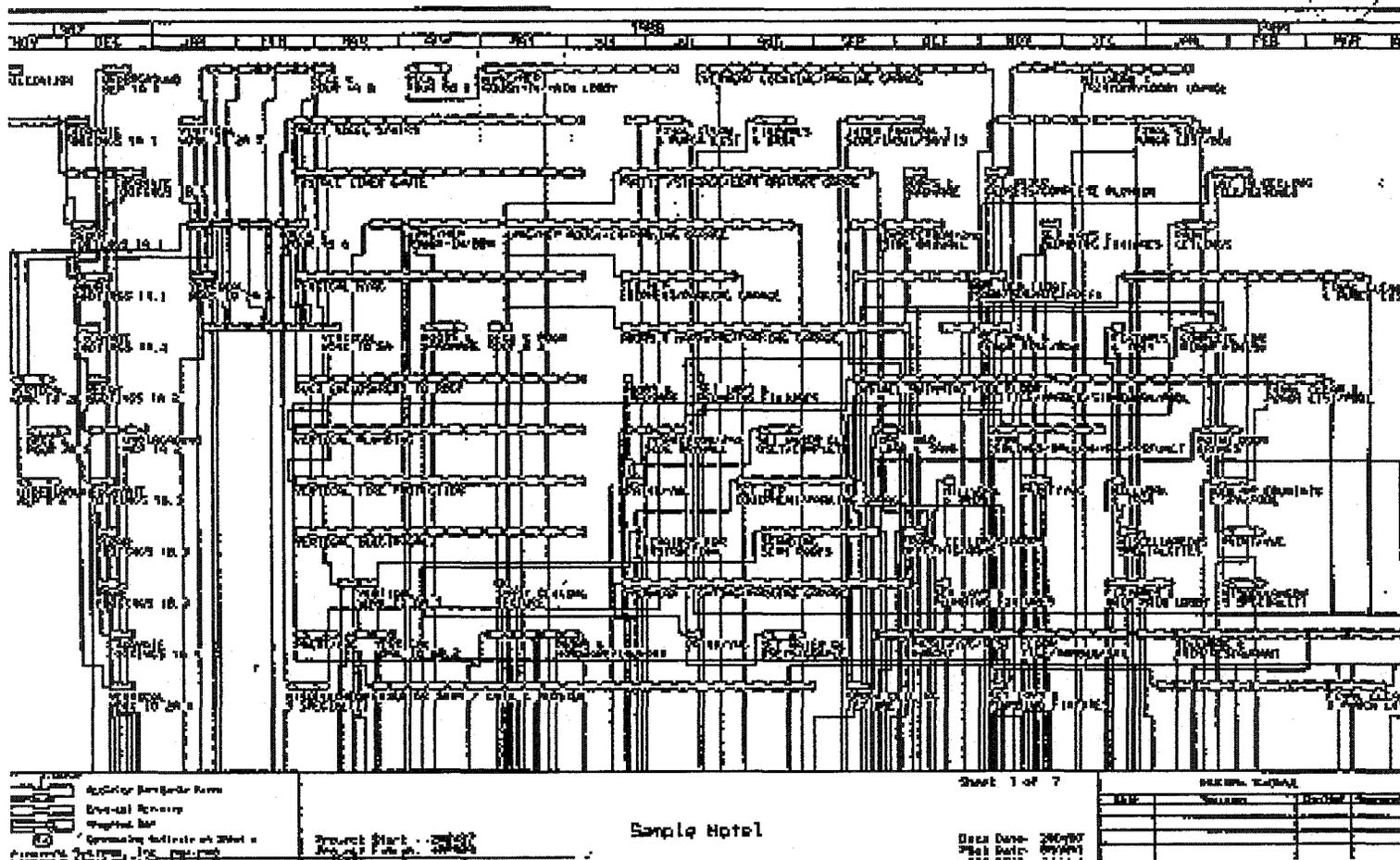


Figure 50 L'échelle du temps sur ordinateur (Adapté de Fisk, 2003)

CHAPITRE 4

PROBLÉMATIQUE ENGENDRÉE PAR LA MODÉLISATION DE L'ORDONNANCEMENT DES PROJETS

4.1 Les dépendances entre les activités et les relations en fonction des quantités

4.1.1 Introduction

Dans les réseaux d'ordonnancement les activités sont reliées ensemble d'une manière logique qui reflète leurs interdépendances. La séquence de succession des activités est établie afin de définir celles susceptibles d'être réalisées simultanément et celles qui doivent être achevées avant le démarrage des autres pour respecter les différentes contraintes. Les dépendances peuvent être techniques, décisionnelles, dictées par les limitations des ressources ou par les exigences de gestion des surfaces.

Moder et al. (1983) groupent les dépendances en deux catégories : des dépendances naturelles déterminées par les exigences techniques et les dépendances sollicitées par la limitation des ressources. Burman (1980) les classe en dépendances dures, dictées par les exigences logiques et dépendances molles, qui découlent de la politique de l'entreprise et qui peuvent être changées selon les circonstances.

Miresco (1994) définit les relations entre les tâches élémentaires en trois catégories :

1. Contraintes de type *potentiel* : imposées par les exigences techniques d'exécution ou les contraintes de localisation temporelle;
2. Contraintes de type *cumulatif* : reliées à l'association des moyens en main-d'œuvre ou en matériel, généralement limités, à l'accomplissement d'une tâche

élémentaire. Cette limitation exprime qu'à un moment donné les moyens nécessaires ne doivent pas dépasser les moyens disponibles;

3. Contraintes de type *disjonctif*: contraintes liées à la limitation d'une ressource partagée entre plusieurs tâches sur le chantier. Cette limitation implique que deux tâches faisant appel à cette ressource ne peuvent pas se dérouler en même temps.

4.1.2 Anomalie dans les relations de dépendance

Pour présenter les exigences de dépendance, la *PDM* propose plusieurs types de relation de préséance. Ainsi, selon (Rahbar 1984), le premier avantage du *PDM* sur l'*ADM* est qu'il permet le chevauchement des activités qui dépendent seulement d'un début ou d'un achèvement partiel, sans avoir à découper les activités.

McGough (1982) affirme le contraire, il dit que les activités avec l'*ADM* sont définies d'une façon plus précise. La première activité est divisée en deux activités indépendantes. Ainsi, l'activité successeur ne pourra démarrer qu'après une quantité prédéfinie et suffisante de la première soit exécutée.

En plus, certains planificateurs (Wiest 1981; Badiru et Pulat 1995), conseillent la prudence dans l'utilisation des types de relations proposées par la *Précédence*. D'après eux, elles peuvent, dans certaines situations, entraîner des calculs erronés.

La *Figure 51* représente un projet qui appuie cette logique. Ce projet contient 3 activités A, B et C considérées comme des tâches sur le chemin critique. Leurs durées respectives sont de douze (12) jours pour A et B et de dix (10) jours pour C. Une relation de préséance Fin/Fin existe entre les deux activités A et B avec un délai de 12 jours et une autre relation, Début/Début, est démontrée entre les deux activités B et C avec un délai de 6 jours. La durée totale du projet s'élève donc à 28 jours.

L'exemple propose de réduire la durée de la tâche B de 6 jours afin de diminuer la durée totale du projet. Mais à cause de l'anomalie considérée par les planificateurs, le résultat est renversé et le projet prend un retard de 6 jours pour se terminer le 34ème jour.

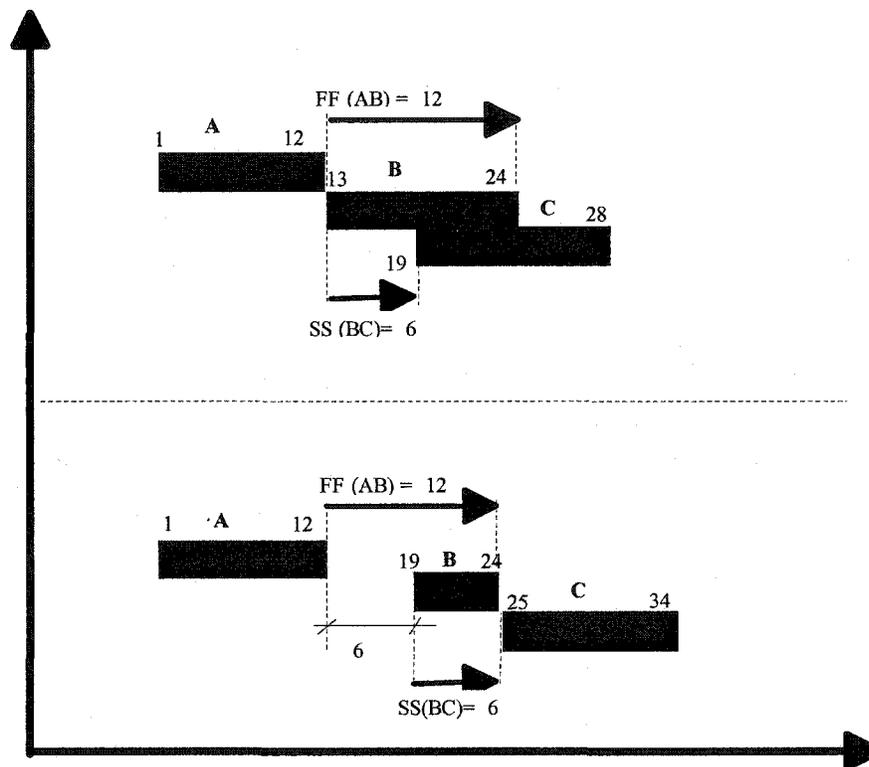


Figure 51 Anomalie des relations

4.1.3 Analyse de l'anomalie présentée

Malgré ce résultat renversé, l'effet démontré ci-dessus n'est pas considéré comme une anomalie (Francis et Miresco 2002). L'explication suivante justifiera ce raisonnement.

Prenons un projet d'aménagement d'un local où les activités A, B et C sont respectivement "l'enduit mural", "la peinture murale" et "les travaux de finition d'électricité", les productivités respectives des équipes de travail sont comme suit :

1. L'équipe d'enduit exécute une seule couche sur un seul mur chaque jour. Chaque mur sera terminé dans 3 jours pour les trois couches de préparation, de crépissage et de finition. Soit un total de 12 jours pour les quatre murs.
2. L'équipe de peinture réalise deux murs tous les six jours en appliquant les six couches suivantes : une couche de base, deux couches de mastic et trois couches de finition. Soit un total de 12 jours pour les quatre murs.
3. L'équipe d'électricité accomplit les travaux de finition en 10 jours. Soit 5 jours pour les deux premiers murs et 5 jours pour les deux autres.

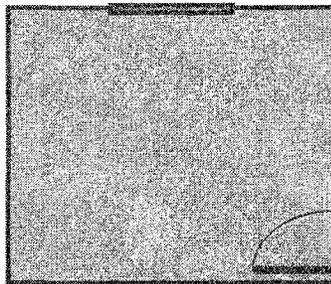


Figure 52 Aménagement d'un local

Ces trois tâches contiennent entre elles des contraintes potentielles de succession. Chacune d'elles ne peut démarrer avant l'écoulement d'une certaine période de la tâche précédente. Par exemple, on ne peut pas peindre un mur avant que l'enduit de celui-ci ne soit complètement sec, et les travaux de finition d'électricité ne peuvent pas démarrer sur un mur non peint. Sachant que l'enduit sèche dans 6 jours et le temps requis pour peindre un mur est aussi de 6 jours, la peinture du dernier mur ne pourra donc pas être

terminée avant que 12 jours ne soient écoulés depuis le dernier jour de la finition des travaux d'enduit. Le même raisonnement pourra être appliqué pour les travaux de finition d'électricité puisque ceux-ci ne pourront démarrer qu'après au moins un mur ne soit peint, soit après 6 jours du démarrage de la peinture. Le *Tableau 1* résume cette séquence.

Durant le projet, le gestionnaire affecte plus de ressources pour l'activité peinture afin de diminuer la durée de cette tâche de 12 à 6 jours. Vu que cette tâche est sur le chemin critique, le gestionnaire, avec cette décision, visait la réduction de la durée totale du projet de 6 jours. Bien entendu, même si on augmente l'équipe de peinture, la nouvelle équipe, par les contraintes de couches, ne pourra pas peindre deux murs tous les trois jours. La nouvelle équipe peindra donc une couche par jour pour tous les quatre murs.

Pour respecter les contraintes d'exécution, la peinture ne pourra toujours démarrer que 6 jours après la fin de l'enduit, c'est-à-dire le dix-neuvième jour suivant le début du projet comme le montre le plan modifié du *Tableau I*.

Si la peinture démarre juste après le treizième jour du début du projet, elle subira une ou plusieurs interruptions afin de respecter le délai de séchage de l'enduit pour chaque mur. Cette décision aura le même effet sur l'activité "travaux de finition d'électricité" qui ne pourra démarrer qu'après 6 jours du début de la peinture pour qu'au moins un mur soit terminé. Ces deux combinaisons se traduiront à un retard total du projet de six jours.

Tableau I

Séquence des tâches

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34			
Premier plan																																					
Enduit	En1P	En1C	En1F	En2P	En2C	En2F	En3P	En3C	En3F	En4P	En4C	En4F																									
peinture													P12B	P12M1	P12M2	P12P1	P12P2	P12P3																			
électricité																			E12M	P34B	E12M	P34M1	E12M	P34M2	E12M	P34P1	E12M	P34P2	E34M	P34P3	E34M						
Plan modifier																																					
Enduit	En1P	En1C	En1F	En2P	En2C	En2F	En3P	En3C	En3F	En4P	En4C	En4F																									
peinture																			P1234B	P1234M1	P1234M2	P1234P1	P1234P2	P1234P3													
électricité																									E12M	E12M	E12M	E12M	E12M	E12M	E34M						

Enduit

préparation 1 ^{er} mur	En1P
crépissage 1 ^{er} mur	En1C
finition 1 ^{er} mur	En1F

Peinture

couche de base 1er et 2eme mur	P12B
1 ^{re} couche mastique 1er et 2eme mur	P12M1
2 ^{eme} couche mastique 1er et 2eme mur	P12M2
1 ^{re} couche peinture 1er et 2eme mur	P12P1
2 ^{eme} couche peinture 1er et 2eme mur	P12P2
3 ^{eme} couche peinture 1er et 2eme mur	P12P3

Électricité

1 ^{er} mur	E1M
2 ^{eme} mur	E2M
3 ^{eme} mur	E3M
4 ^{eme} mur	E4M

En utilisant la précédence, le gestionnaire constatera l'effet de sa mauvaise décision sur le projet. Ainsi, s'il veut diminuer la durée totale du projet, il doit agir sur une des deux autres activités à savoir : l'activité "enduit mural" et/ou l'activité "travaux de finition d'électricité".

4.1.4 Importance des relations multiples

Dans l'exemple précédent, les tâches A et B étant simplement reliées avec une relation Fin/Fin, plusieurs autres contraintes réelles entre ces deux même activités ne sont pas démontrées. Une de ces contraintes est une relation Début/Début avec un délai de 12 jours. Le gestionnaire ne voyant pas cette contrainte pourra facilement décider de diviser l'équipe de peinture en deux sous-équipes pour accomplir d'autres tâches dans le projet. Cette décision augmentera la durée de l'activité B à 24 jours. Sachant que les deux activités A et B possèdent seulement une relation Fin/Fin, la date de fin de l'activité peinture restera le vingt-quatrième jour du projet, tandis que sa date de début sera anticipée de 12 jours. Durant l'exécution avec les contraintes de séchage de l'enduit, ce plan ne sera pas réalisable et le projet se trouvera toujours avec un surcoût et un retard.

4.1.5 Les relations à travers l'ADM

Avec un *ADM* non détaillé, le projet sera planifié pour être réalisé dans 34 jours. C'est en décomposant les deux activités, peinture et électricité, que la durée du projet deviendra 29 jours.

En utilisant l'*ADM*, le gestionnaire diminuera facilement la durée de *peinture1* sans constater son effet sur le projet. Cette activité sera terminée le quinzième jour. L'activité *peinture2* - dans tous les cas - ne pourra pas démarrer avant le dix-huitième jour du projet, car l'enduit doit être complètement sec. L'activité sera donc interrompue ce qui aura un effet négatif sur l'équipe de peinture et sur le coût de cette activité.

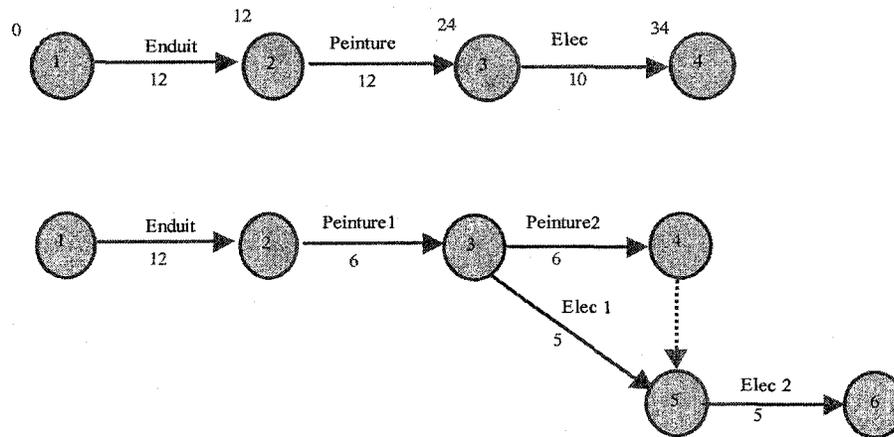


Figure 53 Le projet présenté à travers l'ADM

Uniquement avec un *ADM* très détaillé en découpant l'activité *enduit*, que l'effet de la mauvaise décision pourra être constaté. Notons ici que l'augmentation du nombre d'activités alourdira l'ordonnancement et le rendra difficile à utiliser, surtout pour les projets de tailles moyennes ou grandes.

4.1.6 Contraintes potentielles avec les relations de dépendances

Bien que cette recherche ne partage pas l'avis sur l'anomalie présentée, elle considère que les différents types de relations ne s'avèrent intéressants que s'ils sont destinés à démontrer des contraintes potentielles réelles entre les différentes tâches et non pour le remplacement des relations internes aux activités. Genest et Nguyen (1995) disent : « *il existe une relation de dépendance entre deux activités si le moment où se déroule l'une des deux (dite l'activité dépendante) est conditionnée en tout ou en partie par le moment où se déroulera l'autre (dite l'activité indépendante)* ».

Plusieurs chercheurs (Hendrickson et al.1987b; Pultar, 1990; Chehayeb et AbouRisk, 1998) ont reproché l'utilisation du temps comme la seule contrainte pour démontrer les relations entre les activités. Ces chercheurs, à travers les méthodes de simulation, favorisent l'utilisation des relations à base de production ou en fonction du progrès des activités.

L'exemple suivant expliquera les avis cités dans les deux paragraphes précédents. Il montrera sans équivoque que les méthodes actuelles d'ordonnancement ne peuvent pas s'appliquer dans toutes les situations. Il renforcera ainsi l'idée défendue par cette thèse relative à la nécessité du développement de la modélisation *chronographique* de planification.

Exemple

Considérons deux activités *A* et *B*. L'activité *A* avec 500 m² est exécutée en 10 jours avec une productivité de 50 m²/jour. La quantité des travaux de l'activité *B* est évaluée à 100 m³. Avant le démarrage de l'activité *B*, 100 m² de l'activité *A* doivent être complétés.

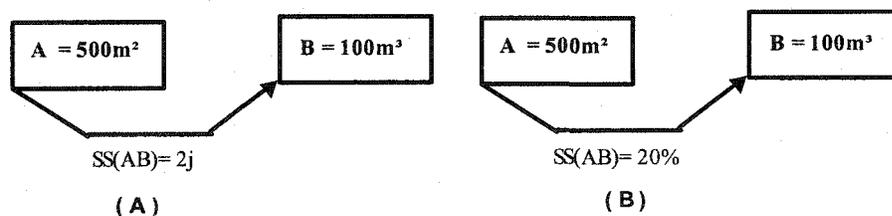


Figure 54 Les relations à travers la Précédence

Pour représenter cette relation entre A et B conditionnée par une exécution partielle de l'activité A, la PDM utilise une relation *Début/Début* avec un délai. Ce délai peut être fixé par un nombre de jours ou en pourcentage des quantités de travaux exécutés.

Les situations suivantes montrent que l'utilisation, de ces délais ou pourcentages, s'avère insuffisante pour représenter fidèlement les contraintes réelles du projet et peuvent ainsi fausser le résultat de la planification.

Dans le cas d'un délai fixe *Figure 54.A* : la relation entre les deux activités sera *Début/Début* avec un *délai* de deux (2) jours. Dans un premier scénario, 100 m² de l'activité A sont exécutés dans une seule journée, l'activité B, selon l'échéancier planifié, ne démarrera qu'après deux jours retardant ainsi inutilement le projet. Par contre, dans un deuxième scénario si la quantité exécutée de l'activité A dans 2 jours est de 70 m², l'activité B démarrera toujours le troisième jour, ce qui causera des retards et des conflits sur le chantier.

Dans le cas d'un pourcentage *Figure 54.B* : la relation entre les deux activités sera toujours *Début/Début* et le *délai* présenté en pourcentage serait de 20 % de A ce qui représente 100 m². Si la quantité, de 500 m², change à 600 m² ou à 400 m², ce qui est fréquent dans les projets, le pourcentage restera toujours fixe. La quantité exigée par erreur, pour le démarrage de l'activité B, deviendra 120 m² ou 80 m² respectivement.

4.2 Chemin critique et Chaînes Critiques

4.2.1 Présentation de l'approche des Chaînes Critiques

En 1997, Goldratt présente une approche de planification de projet appelée *Chaînes Critiques*. Cette approche s'intéresse dans une discipline unifiée à l'aspect humain en plus de la méthodologie algorithmique. L'idée générale de cette approche repose, selon Goldratt, sur le fait que les gens surestiment le temps nécessaire pour exécuter leurs

activités. Pour y faire, ils quantifient, en premier lieu, l'effort nécessaire requis. Ensuite, ils ajoutent des jours cachés additionnels comme marge de sécurité. Cette marge comprend des réserves pour couvrir les inconnus, les imprévus et les effets d'interruption de travail. Cette attitude est entreprise afin d'éviter les attentions négatives plus tard s'ils dépassent leurs propres estimations.

L'hypothèse de Goldratt repose sur le constat que les tâches prennent du retard. Parfois, elles finissent dans leurs estimations, mais rarement elles sont exécutées plus tôt que leurs estimées. Ainsi, selon lui, cela s'explique par les faits suivants :

- Les ressources ont tendance à migrer entre les projets en réponse à la demande des clients les plus bruyants dans une tentative de garder, autant que possible, des clients satisfaits. Avec cet environnement multi-projets, ils remettent le démarrage des tâches jusqu'à la dernière minute pour favoriser d'autres tâches plus critiques.
- Selon la loi de Parkinson, la quantité de travail augmente afin de combler tout le temps disponible à l'exécuter.
- Les gens se sentent en sécurité et commencent plus tard à entreprendre les efforts nécessaires pour accomplir ces tâches.

Avec cet environnement, la fin au plus tôt de chaque activité est punie. L'estimation sécuritaire est ainsi dépassée avec le premier imprévu rencontré, quel que soit l'effort mené. Le cumul de retards des tâches qui composent les projets fait en sorte que le retard global devient significatif.

La méthode des Chaînes Critiques planifie les projets en passe-arrière depuis la date cible pour terminer le projet. La date préméditée du début du projet indique la dernière date possible pour commencer le projet afin de rencontrer la date de la fin cible. Ainsi, toutes les tâches sont planifiées le plus tard possible.

L'avantage de cette planification est que, dans les projets complexes, la connaissance augmente au fur et à mesure que le projet avance. En planifiant les tâches le plus tard possible, elles seront exécutées dans un environnement de connaissance croissante. Cela minimisera significativement le besoin de refaire le travail pour corriger les erreurs.

Estimer des tâches critiques exige un changement dans le comportement des individus. Pour que la méthode devienne efficace, il faut convaincre les gens à dévoiler la sûreté cachée dans les durées des tâches. Tout le monde doit comprendre que la méthode n'enlève pas l'incertitude. Au contraire, elle accepte le fait que la durée proposée ait une bonne probabilité de dépasser l'estimation (soit 50 %) et que ce dépassement est normal.

Pour éviter l'augmentation de la durée totale d'un projet constitué des tâches critiques qui ont une probabilité importante de dépasser leurs estimations, la méthode propose d'insérer des tampons aux points clés du projet. Ces tampons serviront à absorber les retards et à protéger la date de fin de projet contre les augmentations des durées des tâches.

4.2.2 Comparaison entre chemin critique et chaîne critique

L'approche Chaîne Critique est basée sur deux aspects complètement indépendants. Le premier s'intéresse à l'aspect humain et le deuxième à une méthodologie algorithmique.

L'aspect humain

L'aspect humain, bien qu'il soit fort intéressant, dépasse les limites du sujet traité par cette thèse. Pour cela, cette analyse sera limitée sur quelques remarques générales :

- À l'inverse de ce qui est connu dans le domaine de la construction cette approche suppose que les personnes surestiment les durées des tâches.
- Cette méthode suppose que le gestionnaire devrait convaincre les gens afin de divulguer leurs marges cachées. Sans discuter la faisabilité de cette hypothèse,

cette démarche pourrait se faire à pied d'égalité autant pour la méthode du chemin critique que pour la méthode des Chaînes Critiques.

- L'hypothèse de Goldratt repose sur le fait que les gens remettent le démarrage des tâches jusqu'à la dernière minute pour favoriser d'autres tâches plus critiques. Conscients que des tampons existent et que leurs superviseurs savent qu'il y a une bonne probabilité de dépasser leurs estimations (soit 50 %), le comportement des gens restera inchangé.

La méthodologie algorithmique

La méthodologie algorithmique propose une planification par marche-arrière. Cette méthodologie, proposée par Lannone depuis 1962, était déjà rejetée par les utilisateurs qui n'ont pas favorisé une méthode qui veut que toutes les activités soient critiques. De plus, dans les projets de construction, la plupart des activités sont exécutées par des sous-traitants. Remettre au plus tard tous les engagements s'avère une action risquée.

L'aspect algorithmique concernant les marges des activités est déjà discuté par de nombreuses recherches. Ces recherches utilisent ces marges pour des fins de nivellement des ressources, de gestion de surface ou d'optimisation des coûts. Éliminer toutes ces marges avant le démarrage du projet réduit à zéro la marge de manœuvre du gestionnaire.

Par contre, ces concepts qui s'adaptent à la fabrication industrielle sont bien connus et implantés depuis longtemps dans ce secteur. Citons à cette fin l'approche du *juste à temps JAT* qui suppose des flux tendus afin de réduire les stocks à zéro.

4.3 L'allocation et le nivellement des ressources

4.3.1 Introduction

L'utilisation des ressources constitue une condition indispensable pour la réalisation d'un projet. Ahuja, Dozzi, et AbouRizk (1994) disent que :

« La gestion des projets est définie comme un art et une science pour diriger et coordonner les ressources humaines et matérielles pour atteindre les objectifs tout en tenant compte des contraintes du temps, des coûts, de qualité et de la satisfaction de toutes les parties. »

Cette section expose les techniques les plus connues dans les travaux de gestion des ressources. L'objectif de cette exposition est d'analyser les possibilités d'application de ces outils de gestion des ressources à la nouvelle modélisation proposée.

4.3.2 Hypothèses d'ordonnement

Une grande partie des efforts fournis par les dirigeants du projet est orientée vers l'analyse des besoins internes et la conciliation de ceux-ci avec les contraintes extérieures. C'est l'interaction des cinq variables principales : les durées, les coûts, la disponibilité de la main-d'œuvre et du matériel nécessaire, la gestion des surfaces et la qualité du travail exécuté, qui rend aussi complexe les problèmes ayant trait aux ressources.

Il existe des ressources critiques, c'est-à-dire, des ressources qui dictent la limite des rendements et qui empêchent les activités critiques de démarrer (Miresco, 1994). On peut souvent réduire la durée d'un projet en augmentant l'allure du travail de la main d'œuvre – jusqu'à la limite de la charge de travail maximale - en acceptant des coûts plus élevés.

Selon (Hinze 2004), la gestion des ressources est effectuée par deux grands scénarios. Le premier est dit *l'allocation des ressources* et concerne l'affectation des ressources limitées aux différentes tâches, et le deuxième s'intéresse au *nivellement des ressources* pour maintenir une utilisation efficiente quand la durée du projet ne peut pas être modifiée.

L'allocation des ressources

L'allocation des ressources concerne l'affectation des ressources limitées aux différentes activités. Un modèle d'affectation des ressources doit satisfaire trois critères de base :

- Il faut que toutes les ressources nécessaires à la réalisation de l'activité soient disponibles au moment du démarrage de cette activité.
- Il faut aussi, une fois que l'activité démarre, que ces ressources soient affectées exclusivement à celle-ci.
- Et enfin, on suppose que les ressources sont réutilisables. Pour cela, chaque ressource est réaffectée à une nouvelle activité dès que l'allocation précédente prend fin.

De plus, les activités peuvent être classées en deux groupes : continues ou intermittentes. Quand une activité à opération continue démarre, elle doit fonctionner sans aucune interruption jusqu'à sa fin, tandis qu'une activité à opération intermittente peut procéder en petites sections isolées à des périodes irrégulières. Ces divisions sont avantageuses quand une partie d'une activité doit être faite dans une période particulière et la balance plus tard (Antill et Woodhead 1990).

Selon Lock (1996) les réseaux ne peuvent pas être utilisés pour l'ordonnancement des ressources sans être combinées aux *Diagrammes*. Mais, parce qu'elles donnent une

priorité basée sur le temps et déterminent les activités critiques, elles apportent une contribution vitale au processus d'ordonnement des ressources.

Pour satisfaire les différentes contraintes d'allocation des règles de primatisation sont utilisées pour classer les activités (Badiru et Pulat 1995). Selon ces règles, les activités non critiques peuvent être retardées à l'intérieur de leurs propres marges.

- L'ACTIM « *Activity-Time* », développée par Brooks et White (1965) est un modèle basé sur le temps plutôt que sur une activité;
- l'ACTRES, Bedworth (1973) un modèle heuristique qui combine entre la durée d'une activité et ses besoins en ressources;
- le TIMRES, Bethworth (1973) attribue des coefficients de pondération fixe à ACTIM et ACTRES;
- le GENRES, Whitehouse et Brown (1979) affectent des coefficients de pondération variables au TIMRES;
- le ROT Elsayed (1982) fait la relation entre les ressources requises et le temps de l'activité;
- le CAF Badiru (1988) calcule la somme de deux facteurs pondérés : RAF (le facteur d'allocation de ressource) et SAF (le facteur stochastique de la durée de l'activité).

En utilisant l'une des méthodes ci-dessus citées, l'allocation de ressources peut être effectuée à travers des méthodes graphiques. Ce sont des méthodes qui calculent le début au plus tôt et la fin au plus tard de chaque activité en utilisant les réseaux graphiques. Ensuite à travers une méthode tabulaire, l'allocation des ressources est effectuée en respectant les règles de priorité.

L'algorithme de Brooks est une méthode tabulaire qui utilise l'ACTIM pour le calcul de la priorité des ressources. L'algorithme considère un projet unique et un cas de ressources unique (Whitehouse et Brown 1979).

Nivellement des ressources

Les modèles d'ordonnancement graphiques à base du *CPM*, considèrent une disponibilité illimitée des ressources dans l'analyse des réseaux de projets. La main-d'œuvre affectée à un projet quelconque n'est pas limitée d'une façon absolue, mais leurs coûts d'emploi peut augmenter si des variations significantes sont liées à leurs utilisations. Recruter et former du personnel prend du temps, ainsi entretenir un effectif constant s'avère avantageux (Woodgate, 1970).

Stevens (1990) accorde l'importance des travaux de nivellement des ressources :

- Aux problèmes causés par le manque comme le surplus des ressources,
- Aux effets positifs des courbes d'expérience; et
- Aux difficultés liées au démarrage et aux encombrements de fin de projet.

Burman (1980) subdivise les méthodes de nivellement des ressources en nivellement conditionné par l'échéancier et nivellement sous contraintes de ressources.

Plusieurs techniques de nivellement de ressource existent. Tel que le nivellement par tâtonnement, il s'agit d'une méthode tabulaire qui favorise la recherche d'une meilleure combinaison d'utilisation des ressources et l'algorithme du moment minimum qui suppose un échéancier fixe et qui affecte simplement les activités non critiques.

4.4 Constats, analyses et conclusions

4.4.1 Les constats des déficiences des représentations graphiques actuelles

L'utilisation des méthodes de planification existantes est considérée comme une tâche complexe qui génère des coûts importants. Vu cette complexité, un volume considérable de travaux fût réalisé pendant plusieurs décennies. Malgré cela, plusieurs études réalisées (Lee et al, 1986), (Shash et Al-Abdullatif, 1993), (Choo et al., 1999) démontrent que les professionnels de la construction continuent à avoir un grand intérêt dans le développement des meilleures méthodes pour la planification et le contrôle des projets. Ainsi, Giard (1988) dit que de nombreux problèmes méthodologiques surgissent à l'occasion de l'usage des méthodes d'ordonnement.

L'état de la situation actuelle montre que la gestion à l'aide des tableaux occupe actuellement une place importante dans le domaine de la planification et du contrôle des projets de construction. L'aspect graphique est considéré peu utile surtout dans le cas des gestionnaires aguerris. Le recours à la planification sous forme de tableaux peut être attribué en partie à la complexité des représentations graphiques existantes. Bien que plusieurs études et recherches pertinentes fussent réalisées, peu de travaux ont touché à l'aspect de modélisation graphique, constat démontré par l'absence des publications scientifiques.

Les chapitres précédents ont effectué la description et l'analyse des méthodes existantes dans le but de focaliser leurs avantages et de définir leurs limites. Cette analyse montre que les défauts existants dans ces modélisations sont liés aux aspects visuels des représentations graphiques et à la fidélité de représentation des projets. La manque de fidélité pour représenter le processus d'exécution diminue le niveau de confiance à l'échéancier produit. La clarté visuelle, du graphe créé, forme un obstacle vers une utilisation à une plus grande échelle.

Ainsi, les états des recherches, les avis des chercheurs, les souhaits d'améliorations manifestés à cet égard par les professionnels, l'analyse de la situation actuelle et les expériences personnelles de l'auteur de ces lignes sont les principaux constats des déficiences qui ont motivé ce travail de recherche. Bien qu'évident, le fait que ce travail soit réalisé sous la direction d'un pionnier de la modélisation graphique à l'échelle du temps appui sans équivoque sa validité.

4.4.2 Conclusions, rappel des déficiences et les positions retenues par cette thèse

En conclusion, les positions retenues par cette thèse sont résumées dans les cinq points, de discussion, suivants :

- Le premier point compare deux approches. La première approche, qui situe l'état actuel de la planification de projet, avec plusieurs méthodes pour répondre aux différents besoins de gestion et la deuxième approche, qui défend notre proposition de la nouvelle méthode *chronographique*, qui démontre l'avantage des diverses facettes d'une seule modélisation;
- Le deuxième point évalue la capacité des diagrammes versus celle des réseaux graphiques et situe leur importance relative dans le processus de planification;
- Le troisième point s'intéresse aux techniques graphiques, *Activités sur Flèches* ou *Activités sur Nœuds*, afin de déterminer celle qui s'adapte mieux à la modélisation *chronographique*;
- Le quatrième point discute de l'utilisation des modélisations graphiques à échelle du temps tant pour la planification manuelle que pour la planification informatisée.
- Et le cinquième point définit les assises sur lesquelles sont basés les constats des déficiences des méthodes actuelles et fait ressortir par le fait même la nature de ces

déficiences qui sont principalement liées à la représentation graphique des méthodes actuelles.

Plusieurs méthodes ou diverses facettes d'une seule modélisation

Le domaine de planification et de gestion de projet n'est pas standardisée comme le sont beaucoup d'autres domaines. Mason (1984) dit : « *que tout élément de l'ordonnancement appelle à la standardisation. La difficulté réside dans le fait qu'à chaque fois que deux planificateurs ou plus se réunissent, il en résulte deux manières de présentations ou plus pour toutes les étapes du planning à réaliser* ».

L'analyse de la situation actuelle de la gestion des projets démontre que les méthodes traditionnelles semblent être incapables, individuellement, de répondre à tous les besoins d'un gestionnaire et à tous les types de projets. Chacune d'elles possède ces avantages et ces inconvénients.

Pour des fins de gestion et de contrôle des travaux et d'allocation et de nivellement des ressources, il est important d'avoir une vue de l'échéancier dans le temps. Ainsi, l'utilisation d'un *diagramme de Gantt* devient presque indispensable. Pour présenter la logique de dépendance entre les activités, l'utilisation d'un réseau graphique de type *CPM* devient évidente. Si le projet est répétitif, l'emploi de la méthode *Line of Balance* ou une de ses variantes s'adapte mieux. D'autres méthodes peuvent aussi être utilisées telles que la méthode *PERT* pour gérer des délais d'exécution incertains, la méthode *GERT* pour gérer des séquences variables et les modèles de simulation pour optimiser la production.

Pour répondre à ces différents besoins, le gestionnaire se voit donc dans l'obligation de gérer et manipuler les informations dans plusieurs méthodes, incomplètes et incompatibles les unes avec les autres. Une première faiblesse est ainsi soulevée.

Par contre, les gestionnaires doivent gérer des projets variés et ils sont confrontés à des problèmes de différentes natures. La structuration de l'information sous plusieurs formes et la visualisation de l'ordonnancement sous plusieurs angles apparaît donc appropriée comme outil d'aide à la décision.

Bien que l'existence de plusieurs méthodes de planification soit critiquée à cause du manque de compatibilité, l'existence d'une méthode complète, qui peut présenter l'information avec des points de vue différents et compatibles les uns avec les autres est une solution optimale appuyée par cette thèse. Cette stratégie se trouve cohérente avec un objectif de standardisation du domaine de la planification des projets.

Pour présenter l'information sur plusieurs facettes, la modélisation *chronographique*, exposée par cette thèse, propose l'ordonnancement sur une ou deux directions de flux de logique. Celle qui représente la logique à une direction utilise l'échelle du temps pour cette direction. Sa logique d'arrangement des activités focalise le chemin critique pour les petits projets et se repose sur le rassemblement des sous-réseaux pour les projets de moyennes et grandes tailles. Celle qui se base sur une logique à deux directions représente, principalement, l'échelle du temps sur la direction principale. La direction secondaire peut utiliser une autre contrainte non identifiée par l'entité principale.

Diagrammes ou réseaux graphiques

Les utilisateurs préfèrent l'usage du *diagramme de Gantt* à cause de sa clarté visuelle. Par contre, si le projet est complexe, ce diagramme, avec sa forme actuelle, fournit difficilement les informations qui sont souvent précieuses pour la planification. Pour cela, certains planificateurs ont recours aux méthodes dites du chemin critique *CPM*.

Les *CPM* sont des méthodes particulièrement intéressantes pour coordonner le travail de plusieurs personnes ou équipes qui doivent réaliser un certain nombre de tâches

simultanément. Ces méthodes indiquent la séquence et la dépendance des activités et permettent de voir comment une activité s'intègre au reste du projet. Ainsi, un groupe de personne peut développer un réseau relativement complexe en quelques heures.

Par contre, les *CPM* à l'origine n'étaient pas conçus pour représenter les projets à l'échelle du temps. Cela limite leurs communications visuelles et impose des feuilles et des analyses additionnelles pour relier les coûts et les ressources au réseau. Pour cette raison, les *CPM* ne sont pas des techniques adaptées au contrôle des projets. En effet, le gérant du projet gère des engagements avec les professionnels, les fournisseurs, les ateliers de fabrication et les sous-traitants qui exécutent les travaux aux chantiers. Tous ces engagements sont liés à une date sur le calendrier. Ainsi une méthode qui ne démontre pas ces engagements à l'échelle du temps n'est pas adaptée aux travaux de contrôle.

La représentation de la logique de déroulement du projet à l'échelle du temps reste de nos jours une action sans solutions décisives. Il importe de préciser que durant les dix dernières années, les recherches concernant la représentation des projets à l'échelle du temps se sont limitées aux projets à caractère répétitifs. Dans les solutions proposées, la représentation des activités parallèles et le regroupement des sous-réseaux laisse à désirer.

Les Chapitres 2 et 3 ont montré clairement que les recherches durant la décennie précédente ont été consacrées principalement aux projets à caractère non répétitifs. Les méthodes développées durant cette décennie visaient ou la représentation du *diagramme de Gantt* avec des relations ou le *CPM* à l'échelle du temps. Notre analyse a démontré que la majorité de ces méthodes n'étaient que des représentations différentes des diagrammes. L'existence de deux flux de logique est la caractéristique dominante de ces méthodes. Les autres méthodes modélisées sur une seule direction de flux de logique ne semblent pas proposer une logique bien définie pour arranger graphiquement les

activités. Ainsi, la logique à l'échelle du temps proprement dite reste sous-développé, soulevant une deuxième faiblesse qui justifie le travail de cette thèse.

Activités sur flèches ou activités sur nœuds

Les deux variations les plus connues des méthodes qui calculent le chemin critique sont : l'*ADM* : *Arrow Diagram Method* et la *PDM* : *Precedence Diagram Method*. Il faut préciser que les planificateurs ont des préférences divergentes pour l'utilisation de l'*ADM* dite activités sur flèches et de la *PDM* appelée aussi *Précédence*.

Certains chercheurs sont d'avis que la *Précédence*, avec quatre types de relation de préséance, porte plusieurs avantages sur l'*ADM* et qu'elle permet le chevauchement des activités qui dépendent seulement d'un début ou d'un achèvement partiel, sans avoir à découper les activités.

D'autres affirment le contraire, ils disent que les activités avec l'*ADM* sont définies d'une façon plus précise. La première activité étant divisée en deux activités indépendantes, l'activité successeur ne pourra démarrer qu'après une quantité prédéfinie et suffisante de la première soit exécutée.

Quelques chercheurs conseillent la prudence dans l'utilisation des types de relation outre que Fin/Début. L'exemple déjà montré propose de réduire la durée d'une activité, mais à cause de l'anomalie présumée, la durée totale du projet se trouve augmentée.

Cette thèse considère que les modélisations des projets à l'échelle du temps qui se reposent sur les *PDM* sont plus appropriées que les celles qui utilisent les *ADM*. Les affirmations admises reposent sur les analyses et les opinions déjà présentées. De plus, la présentation de la méthode *chronographique* dans les parties suivantes, confirmera notre position.

Par contre, certaines anomalies peuvent être soulevées dans les types de relation proposés par la précédence. Ainsi, pour répondre à certaines contraintes de succession, la méthode de précédence utilise des délais fixes ou des pourcentages des quantités avec ses relations. Ces délais ou pourcentages s'avèrent insuffisants pour garantir un bon fonctionnement de l'échéancier produit.

Les types de relation ne s'avèrent intéressants que s'ils sont destinés à définir des contraintes potentielles entre les différentes tâches et non pour le remplacement des relations internes aux activités. Une troisième faiblesse est ainsi soulevée justifiant ce travail de recherche.

En plus, dans les divers projets, les activités dépendent les unes des autres tout au long de leurs processus d'exécution. Une relation, qui limite seulement le début de l'activité successeur, s'avère donc insuffisante pour garantir un bon fonctionnement de l'ordonnancement. Si un changement se produit dans l'activité prédécesseur à une date ultérieure à la relation, l'activité successeur étant simplement liée à son début ne sera pas affectée. Le gestionnaire se verra dans l'obligation de faire le raisonnement et entreprendre manuellement les modifications nécessaires. Cela amène à soulever une quatrième faiblesse.

Également, la quantité de détail demandée sur un ordonnancement diffère selon le besoin de gestion. La représentation de plusieurs niveaux de détail s'avère une solution acceptable. La représentation des relations de dépendance entre les activités d'un ordonnancement maître est pratiquement impossible que si des relations internes aux activités existent. Ces analyses internes aux activités ne peuvent être démontrées qu'à travers une méthode qui établit les activités sur les nœuds et à condition que ces nœuds soient présentés à l'échelle du temps. Cette analyse identifie une cinquième faiblesse qui doit être surmontée.

Informatisation de la planification et échelle du temps

Après tout, l'utilisation des méthodes d'ordonnement graphique à l'échelle du temps reste marginale. Cela est dû entre autres, à l'importance de la planification manuelle dans le processus de la construction des réseaux.

Actuellement, les projets deviennent de plus en plus complexes et de nombreuses spécialités interviennent. Dans plusieurs situations, une remue-méninges (brain storming) devient nécessaire comme séance de créativité pour la stimulation des idées. Durant ces réunions de planification, les modifications apportées à l'échéancier sont nombreuses et plusieurs scénarios, concernant la séquence d'exécution où la durée des activités sont proposées. Le critère de choix de modélisation devient par nature la facilité de modification. Cette caractéristique n'est sûrement pas une des qualités des méthodes manuelles de planification à l'échelle du temps.

La production d'un graphe par ordinateur reste toujours importante. Durant l'exécution du projet, les nombreux changements font que l'échéancier initial est rapidement dépassé. Ainsi, l'ordinateur permet au même planificateur de passer d'une gestion de projet rigide à une gestion dynamique.

En utilisant un outil informatique de planification, la préparation manuelle reste toujours nécessaire. Les données préparées sont imputées au logiciel pour préparer un *diagramme de Gantt*. Le logiciel se charge par la suite de produire un réseau graphique avec ou sans échelle du temps. Ainsi, et à notre connaissance, aucune préparation libre des réseaux avec une logique pure ou à l'échelle du temps n'est disponible pour les utilisateurs des logiciels afin de répondre à leurs besoins spécifiques. En plus, le résultat proposé par ces logiciels demande des habilités visuelles particulières pour pouvoir le déchiffrer.

Une remarque étonnante pourra être soulevée concernant ce processus. Cette remarque concerne l'utilisation du *diagramme de Gantt* pour la planification à travers les logiciels tandis que les réseaux graphiques sont considérés comme des résultats. Sachant que les réseaux graphiques sont les outils actuels les plus adaptés à la planification des projets et que les diagrammes à l'échelle du temps sont les meilleurs outils pour procéder aux travaux de contrôle, nous pouvons soulever ici une logique inversée et peu pertinente.

À chaque modification du planning, on doit réutiliser la planification manuelle du fait que les réseaux d'ordonnement résultant du logiciel informatique reste, dans la majorité des cas, difficiles à utiliser. Si les changements sont majeurs, on doit recommencer de nouveau le processus de planification précité. Pour cela, le processus actuel est considéré rigide.

Sachant que les changements sont très fréquents, la gestion devient une tâche compliquée. Ainsi, elle génère des coûts discutables et injustifiés pour plusieurs entrepreneurs. S'ajoute à tout cela la limitation de la surface de l'écran qui n'a commencé à évoluer que récemment.

Notre analyse a démontré que les méthodes existantes, présentées à l'échelle du temps, tendent à présenter des *diagrammes de Gantt* avec des relations. Les logiciels ne font qu'essayer de remplir la surface de dessin. Ainsi, la représentation de l'ordonnement de planification à l'échelle du temps proprement dite reste peu développée.

La réussite de toute méthode d'ordonnement dépend de l'opinion des utilisateurs. À présent, plusieurs planificateurs croient que s'ils ne produisent pas un ordonnancement représentant strictement le format graphique classique et les dates au plus tôt et au plus tard imprimées au-dessus, ils ont manqué leurs buts.

En réalité, toutes évolutions des réseaux ordonnancement qui les rend plus acceptables pour les utilisateurs est un avancement de la technique et ne doit pas être considéré

comme une étape rétrograde. Si rien ne se fait, ces réseaux resteront des outils marginaux peu orientés vers une utilisation de masse.

Avec l'avancement technologique rapide, la surface des écrans disponibles devient de plus en plus importante. Dans les quelques prochaines années, les surfaces des écrans pourront être équivalentes aux feuilles de papier grand format. Pour suivre cet avancement technologique, pourquoi ne pas développer un outil qui permet de préparer, à l'écran et à l'échelle du temps, la planification durant une réunion de travail ?

Un outil qui, en plus de posséder ses propres algorithmes d'arrangement graphique, reste à toute fin pratique et permet l'ajustement du graphe d'ordonnancement au goût de l'utilisateur comme le propose déjà la plupart des autres types d'applications.

CHAPITRE 5

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE CHRONOGRAPHIQUE

5.1 La modélisation chronographique

5.1.1 Approche de modélisation

Cette partie, fait état du concept théorique, du modèle mathématique et de l'approche d'ordonnement de la modélisation *chronographique* de la planification des projets (Francis et Miresco 2000, 2002a, 2002b).

Le terme *chronographique* prend son origine de : chrono ou khronos : (du grec) temps; Graphe : (en mathématique) ensemble des couples d'éléments vérifiant une relation donnée. Ainsi, la modélisation *chronographique* est la représentation fidèle et claire du processus d'exécution des projets à une échelle fixe, principalement, le temps. L'approche de modélisation *chronographique* se résume dans ce qui suit :

1. Identifier une entité principale, en général les activités, pour représenter la production;
2. Déterminer une entité secondaire, dont sa représentation graphique est optionnelle, pour désigner les contraintes d'exécution;
3. Définir une mesure externe des entités principales, normalement le temps, comme direction primaire de flux de logique;
4. Établir d'autres échelles externes, si nécessaire, pour les directions secondaires ou tertiaires de flux de logique;
5. Spécifier les autres éléments de production, comme attributs ou mesures internes de l'entité principale;

6. Éviter d'utiliser tout élément de production plus d'une seule fois pour déterminer une entité ou une mesure interne ou externe.

5.1.2 Les principaux outils de modélisation

L'arrière plan principal du chronographe est constitué d'un système d'axes à deux dimensions *Figure 55*. L'axe des abscisses représente la direction principale de flux de logique illustrée par le paramètre temps (heures travaillées, jours du calendrier, semaines, mois, trimestres ou années). L'axe des ordonnées est utilisé pour montrer les entités principales qui s'exécutent en parallèle ou partiellement en parallèle. Cet axe peut aussi montrer une autre contrainte dans le cas des ordonnancements à deux directions de flux de logique.

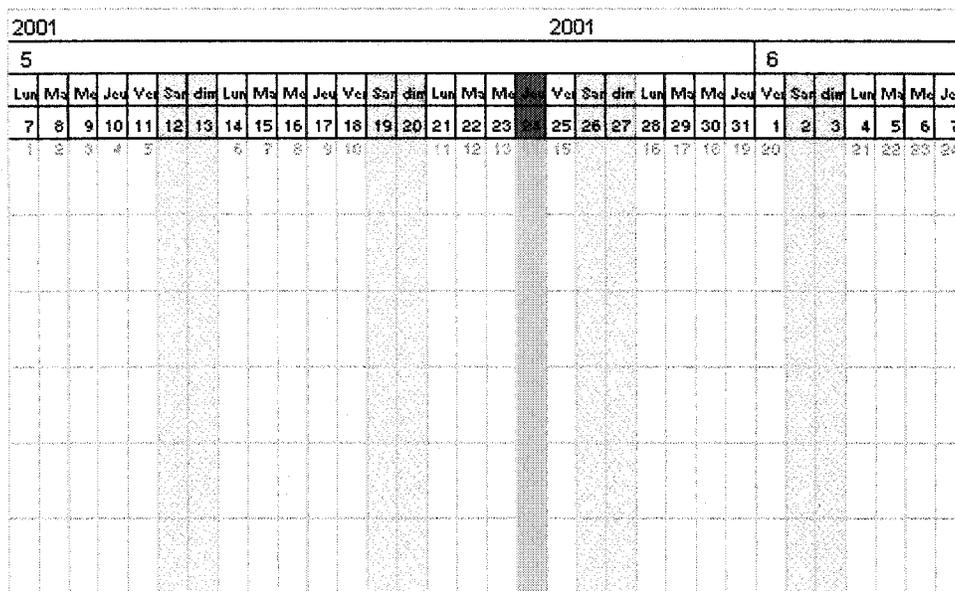


Figure 55 Arrière plan à deux dimensions

Les deux entités principalement utilisées par la modélisation *chronographique* sont les *activités* et les *fonctions temporaires*. L'ordonnancement des projets est représenté graphiquement avec ces entités sur l'arrière plan.

5.2 Les activités

5.2.1 Rôle et représentation graphique des activités

Une entité activité est constituée d'une ou plusieurs tâche(s) destinée(s) à exécuter une opération particulière dans le processus d'accomplissement d'un projet. Chacune de ces tâches doit utiliser au minimum une ressource¹ qui génère un coût direct.

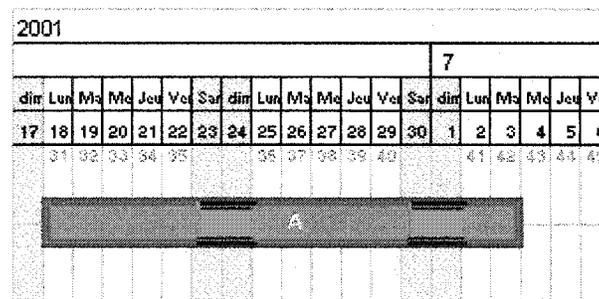


Figure 56 Représentation physique et emplacement horizontal d'une activité

Les activités sont représentées physiquement par des *barres flottantes*. La longueur de chaque barre représente la durée de l'activité correspondante *Figure 56*. Chaque activité possède une date de début au plus tôt, qui est déterminée selon les exigences du

¹ Humaine ou matérielle

processus. Sa durée et sa date de fin au plus tôt sont calculées en fonction de la *quantité de travail à exécuter* et de la *charge du travail alloué*.

La durée d'une activité est déterminée par le planificateur. Dans le processus de décision, il tient compte du respect d'une date finale du projet, d'une relation temps/coût optimal, d'une quantité de ressource disponible et d'une charge de travail maximale.

Les barres sont placées sur l'arrière plan. L'emplacement horizontal de chaque barre est ajusté pour indiquer une position début équivalente à la date du début prévu de l'activité et une position de fin équivalente à sa date de fin prévue.

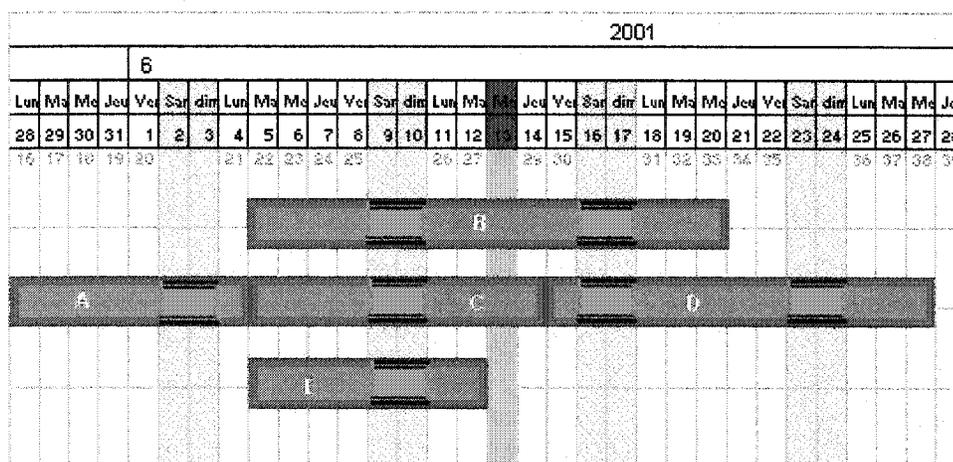


Figure 57 Activités en série et en parallèle.

L'emplacement vertical des barres flottantes est ajusté, afin de regrouper côte à côte les activités du même sous-réseau. Ce regroupement aide à diminuer le nombre d'intersections entre les lignes de dépendances elles-mêmes et avec les autres activités. Les barres flottantes peuvent être positionnées en parallèle et en série. Dans la *Figure 57*, les activités B, C et E sont en parallèle, et les activités A, C et D sont en série.

De plus, les barres flottantes peuvent être représentées sous plusieurs formes, avec des couleurs différentes ou en motifs ou textures particulières. Ces attributs, *Figure 58*, donnent lieu à la représentation graphique des différentes contraintes de l'entité principale. Ces formes reflètent :

1. La position temporaire de l'activité : son existence sur le chemin critique, son statut d'exécution², sa mobilité³, etc.
2. La catégorie : groupe, sous-groupe, niveau de détail, type d'activité, type de ressource, fourchette du coût, emplacement, etc.

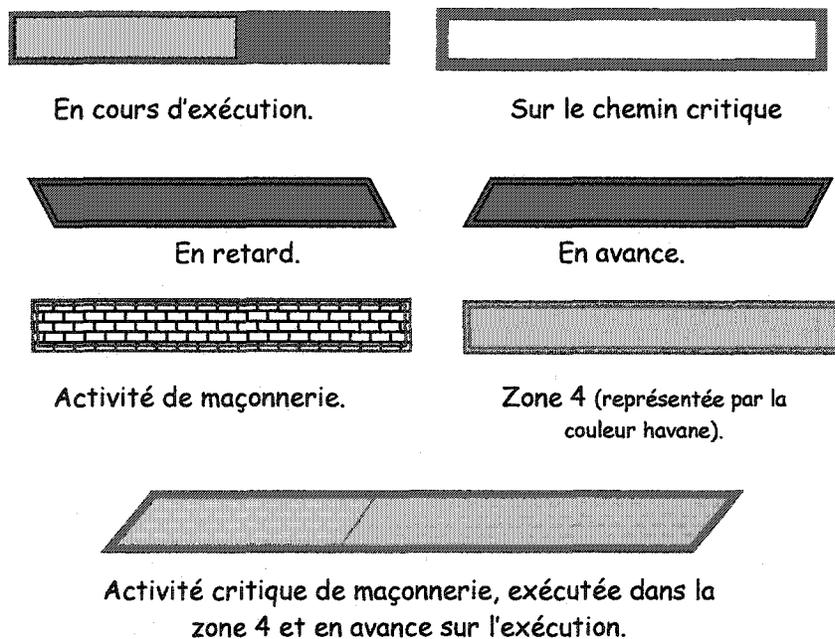


Figure 58 Exemples de représentation des attributs des activités

² En retard, En avance ou à temps.

³ Activité mobile ou fixée à une date donnée.

5.2.2 Décomposition interne des activités

Les activités peuvent avoir une ou plusieurs divisions internes dans le but :

1. De répondre à certaines contraintes d'une façon plus réaliste;
2. D'ajuster les interdépendances en fonction des quantités;
3. De favoriser un suivi interne d'avancement;
4. De permettre les relations multiples;
5. De contribuer à la réduction du nombre total des activités.

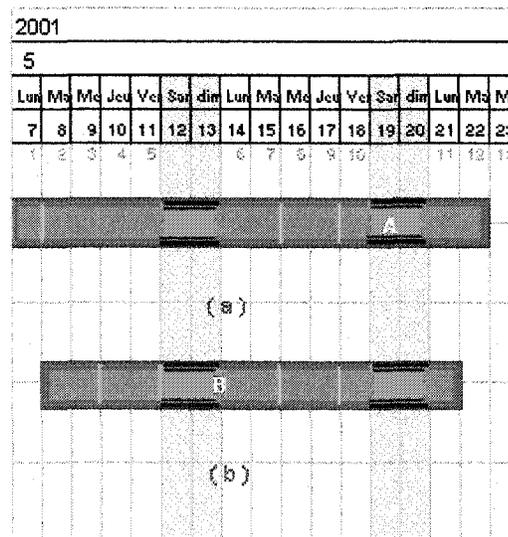


Figure 59 Décomposition interne des activités

Les divisions peuvent être placées en fonction des dates (quantités) définies *Figure 59(a)*, ou à des intervalles fixes tous les x unités de temps (quantités) *Figure 59(b)*.

5.3 Les Fonctions temporaires

5.3.1 Rôle des fonctions temporaires

Les fonctions temporaires représentent les entités dépendantes qui déterminent les contraintes relationnelles. Elles amplifient la notion des relations entre les activités trouvées dans les méthodes traditionnelles. Les fonctions temporaires n'utilisent aucune ressource produisant un coût direct. Elles sont représentées avec des *branches directrices* et peuvent signifier :

1. Les relations entre les activités

Chaque fonction temporaire montre la liaison entre deux activités. Chacune de ces deux activités est liée à un seul point appelé *point de liaison*. Chaque point de liaison peut se trouver à l'une des deux extrémités de l'activité *Figure 60(a)* ou à une de ses divisions internes, le cas échéant *Figure 60(b)*.

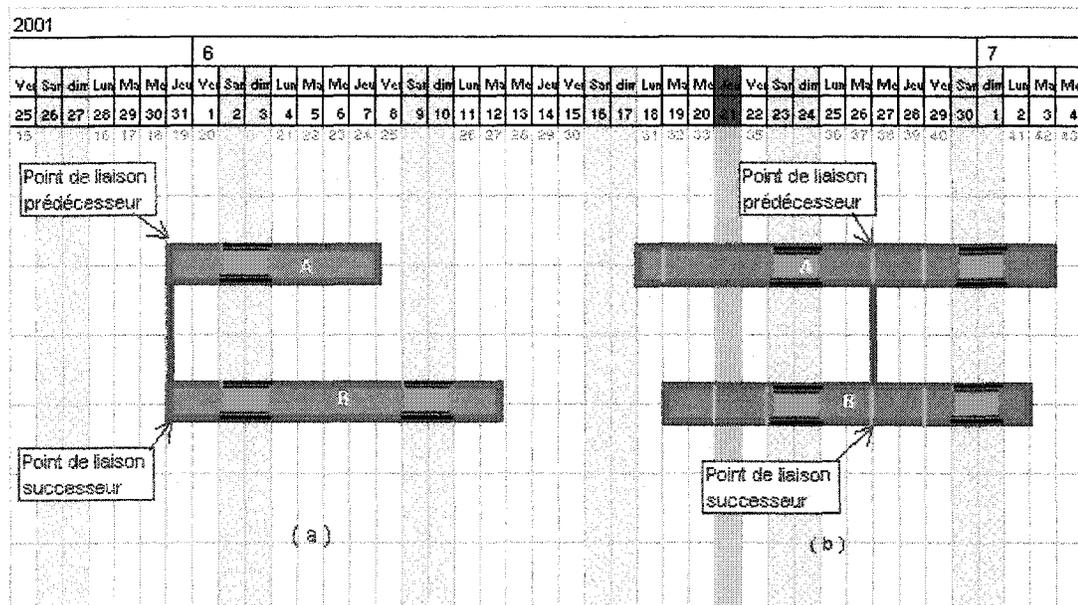


Figure 60 Points de liaison

Les fonctions temporaires représentent les exigences techniques de succession. Elles déterminent les dates de début au plus tôt des points de liaison successeurs afin de respecter les exigences relationnelles. Elles peuvent limiter aussi les dates de fin des points de liaison prédécesseurs, à l'intérieur de leurs marges respectives, pour ne pas retarder la date finale du projet.

Pour déterminer les dépendances des activités en fonction de la limitation des ressources, des contraintes financières ou des décisions de gestion, des fonctions temporaires fictives peuvent être ajoutées *Figure 61*. Ces fonctions temporaires fictives sont présentées par des lignes en pointillé pour aviser le gestionnaire qu'elles ne représentent que des contraintes décisionnelles.

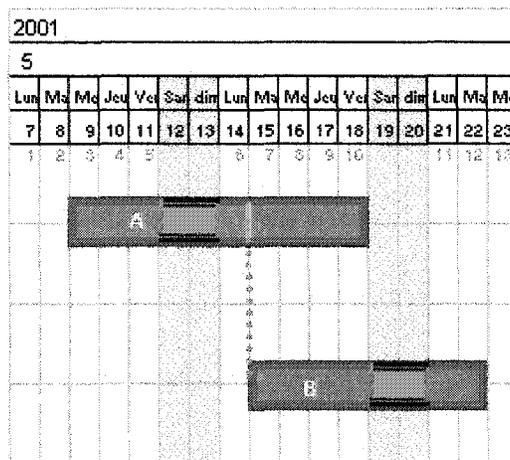


Figure 61 Fonction temporaire fictive

2. Les contraintes techniques d'exécution

Une fonction temporaire peut aussi représenter l'une des situations suivantes :

- a. *Un délai minimal exigé entre deux points de liaison* : c'est le délai minimal requis par une exigence technique (exemple : le temps de séchage de l'enduit mural avant de démarrer les travaux de peinture). Ce délai est lié au point de liaison prédécesseur. Le début au plus tôt du point de liaison successeur est égal à la somme de la date au plus tôt du point de liaison prédécesseur et le délai d'exigence minimal.

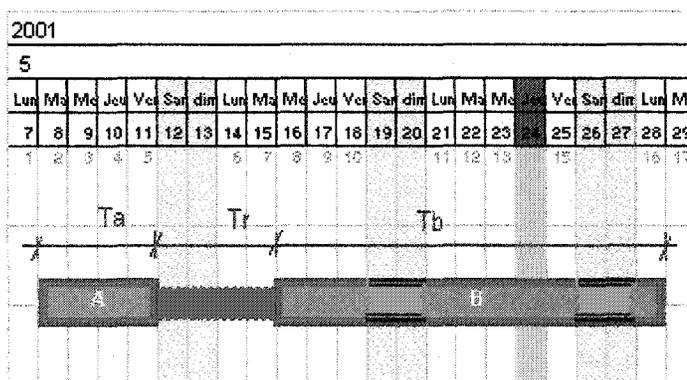


Figure 62 Délai minimal exigé

Dans la *Figure 62*, le début de l'activité B est retardé par un délai minimal exigé d'une durée T_r entre la fin de l'activité A et le début de l'activité B. Ce délai est représenté graphiquement par un bloc.

- b. *Un délai maximal exigé, Figure 63, entre les deux points de liaison* : c'est la durée maximale acceptée pour répondre à une exigence technique. Comme exemple, le démarrage au plus tard de l'activité *bétonnage des semelles de fondations*, après la pose du ferrailage, est déterminé afin de conserver, entre autres, la propriété de ces semelles. À défaut, une tâche

supplémentaire pour le nettoyage des semelles devrait être ajoutée. Cette tâche générerait des coûts supplémentaires. En plus, elle peut retarder le projet si le bétonnage des semelles est une tâche critique.

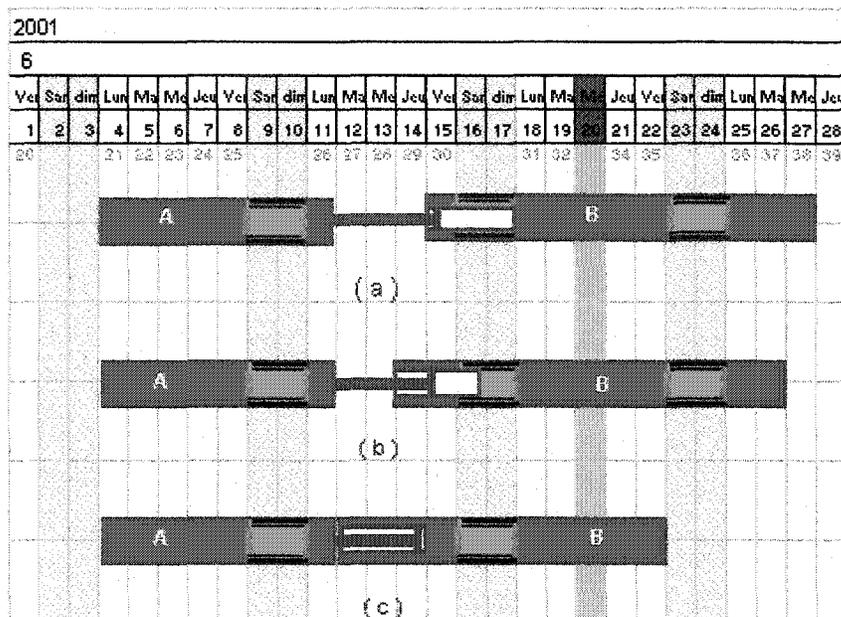


Figure 63 Délai maximal exigé

Le délai maximal exigé lie le point de liaison prédécesseur au point de liaison successeur. Il détermine une fin au plus tard du point de liaison successeur égale à la date du point de liaison prédécesseur augmentée de la durée du délai. Avec cette notion, la date au plus tard d'un point de liaison n'est pas seulement déterminée à travers les relations successeurs mais aussi par des relations prédécesseurs liées suite aux exigences maximales.

Les trois *Figure 63(a), (b) et (c)*, représentent des délais maximaux exigés entre la fin de l'activité A et le début de l'activité B. L'activité B est à son début au plus tard dans (a) et à son début au plus tôt dans (c). Le délai

d'exigence maximal est représenté par le piston, tandis que le cylindre représente la marge totale.

- c. *Une marge libre pour un point de liaison prédécesseur* : c'est le délai de retard permis pour le point de liaison prédécesseur, afin de ne pas retarder toute autre activité. Dans la *Figure 64(a)*, la date de début de l'activité B correspond au jour suivant la fin de l'activité A. Les deux activités sont dessinées côte à côte. Une ligne de liaison est dessinée pour confirmer la relation entre elles.

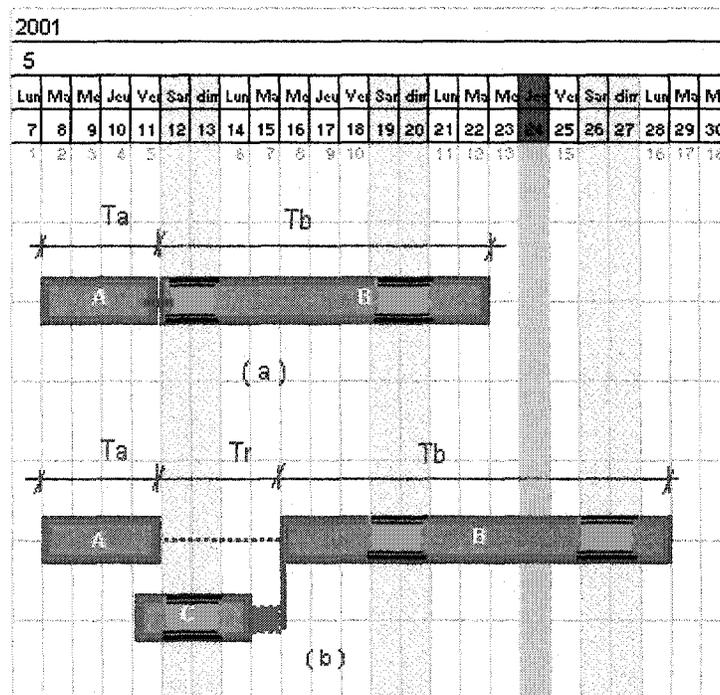


Figure 64 La marge libre

Si le début de l'activité B est retardé par une autre fonction temporaire provenant de l'activité C, *Figure 64 (b)*, son début au plus tôt sera déterminé par cette nouvelle fonction temporaire. Dans cette situation, une droite

horizontale en pointillé, qui désigne la marge libre "Tr" de l'activité A, est dessinée entre la fin de l'activité A et le début de l'activité B.

d. Des combinaisons entre les trois cas précédents à savoir :

- Entre un délai d'exigence minimal et une marge libre *Figure 65(a)*;
- Entre un délai d'exigence maximal et un délai d'exigence minimal *Figure 65(b)*. Le délai d'exigence maximal contient la marge totale du point de liaison successeur.

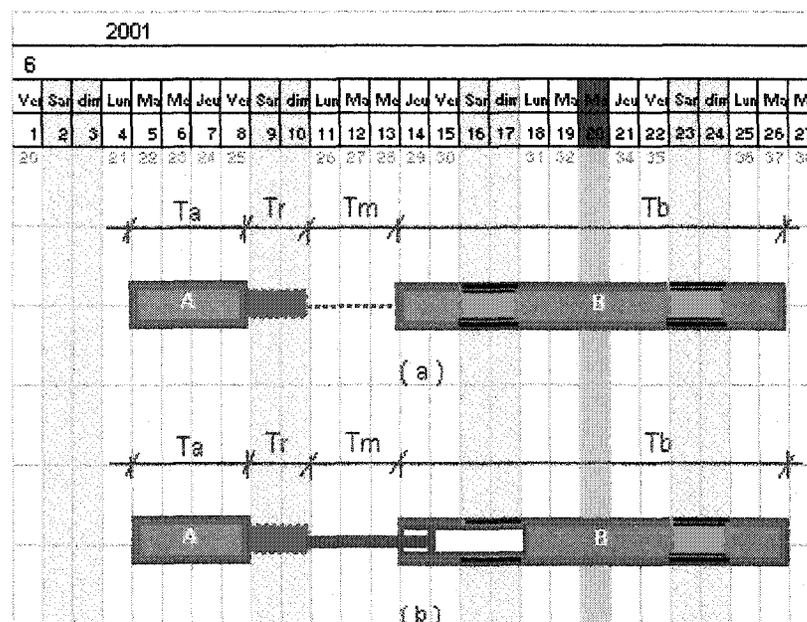


Figure 65 Combinaisons entre les exigences

Ainsi, les fonctions temporaires *Figure 66* sont représentées graphiquement par :

1. Des droites verticales solides qui servent comme liaison entre deux activités parallèles, dans le cas où une activité posséderait plusieurs successeurs ou prédécesseurs;

2. Des droites horizontales en pointillé qui représentent les marges libres des points de liaison prédécesseurs;
3. Des blocs qui symbolisent les délais minimaux exigés;
4. Des pistons et des cylindres. Le piston schématise le délai maximal exigé et le cylindre, lié au piston, identifie la marge totale du point de liaison successeur.

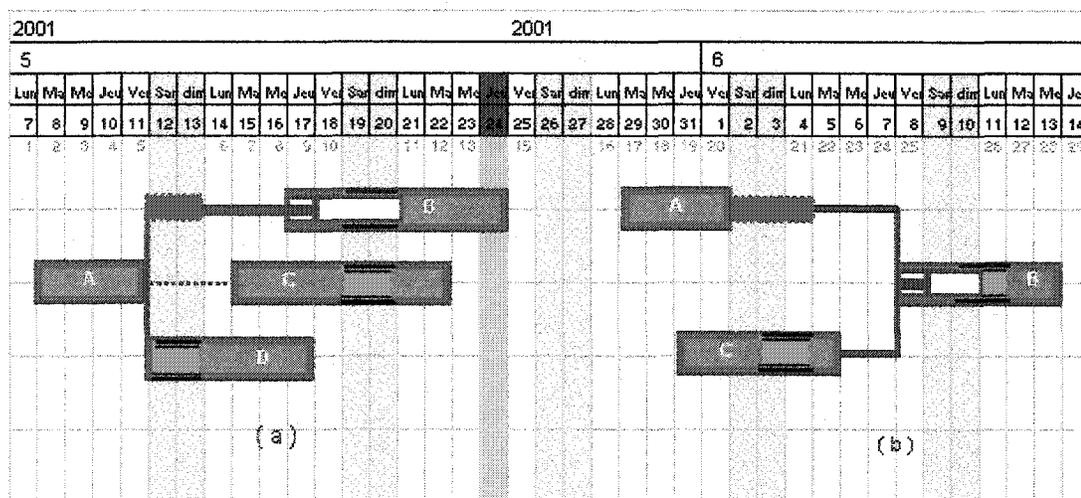


Figure 66 Différentes représentations des branches directrices

3. Certains types d'activités

Il s'agit d'activités qui emploient un temps sans utiliser des ressources ou produire des coûts directs. Ces activités sont représentées dans la modélisation *chronographique* par les fonctions temporaires. Comme exemple *la prise du béton d'une dalle sur sol*.

Notons que si le béton est coulé avec du coffrage, la prise de béton devient une activité qui utilise une ressource et un coût direct. Le coût est lié à la location ou à l'amortissement de ce coffrage. Ce coût est vrai autant que les exigences techniques nécessitent le maintien de ce coffrage. Une fois le délai exigé est dépassé, le coût lié au

coffrage est libéré de l'activité prise de béton et se transforme en un coût indirect pour le projet. L'activité prise de béton devient donc une fonction temporaire qui peut, à son tour, supporter ce coût indirect.

Ce principe est important pour les travaux d'allocation et de nivellement des ressources. Sachant que les ressources incorporées avec des fonctions temporaires sont considérées comme des ressources libres qui sont mises en attente pour une utilisation probable.

Cette notion de ressources libres, incorporées avec les fonctions temporaires, est très utile pour une gestion intégrée de la logistique du chantier. Massicard (1999) cite que la dimension temporelle est ainsi déterminante puisque l'objet de l'étude (la logistique) évolue à mesure que l'on tente de le traiter. Ainsi, une fois les matériaux sont arrivés aux chantiers, peuvent directement être associés aux fonctions temporaires qui précèdent les activités qui l'utiliseront. Cette allocation des ressources aux fonctions temporaires remplacera les activités qui démontrent la livraison des matériaux ou des entités fabriquées. Ainsi, en plus de s'avérer plus efficace, cette méthode aidera à l'allègement du réseau en éliminant un nombre important d'activités.

L'application informatique, avant d'autoriser le démarrage d'une activité, vérifiera l'existence de toutes les ressources nécessaires à son démarrage et avisera le cas contraire de tout manquement. L'activité, par exemple, pourra changer d'attribut si toutes les ressources nécessaires sont imputées à la fonction temporaire précédente. En plus, des rapports sous forme de liste, des tableaux ou autres pourront être produits. Ces rapports devront identifier tous les items que le gestionnaire doit commander ou pour lesquels il doit vérifier la livraison.

5.3.2 Types des fonctions temporaires

Les points de liaison des fonctions temporaires peuvent être externes ou internes. Ainsi, les fonctions temporaires sont de plusieurs types à savoir : *Début/Début*; *Fin/Fin*; *Fin/Début*; *Interne/Début*; *Fin/Interne*; *Interne/Interne*.

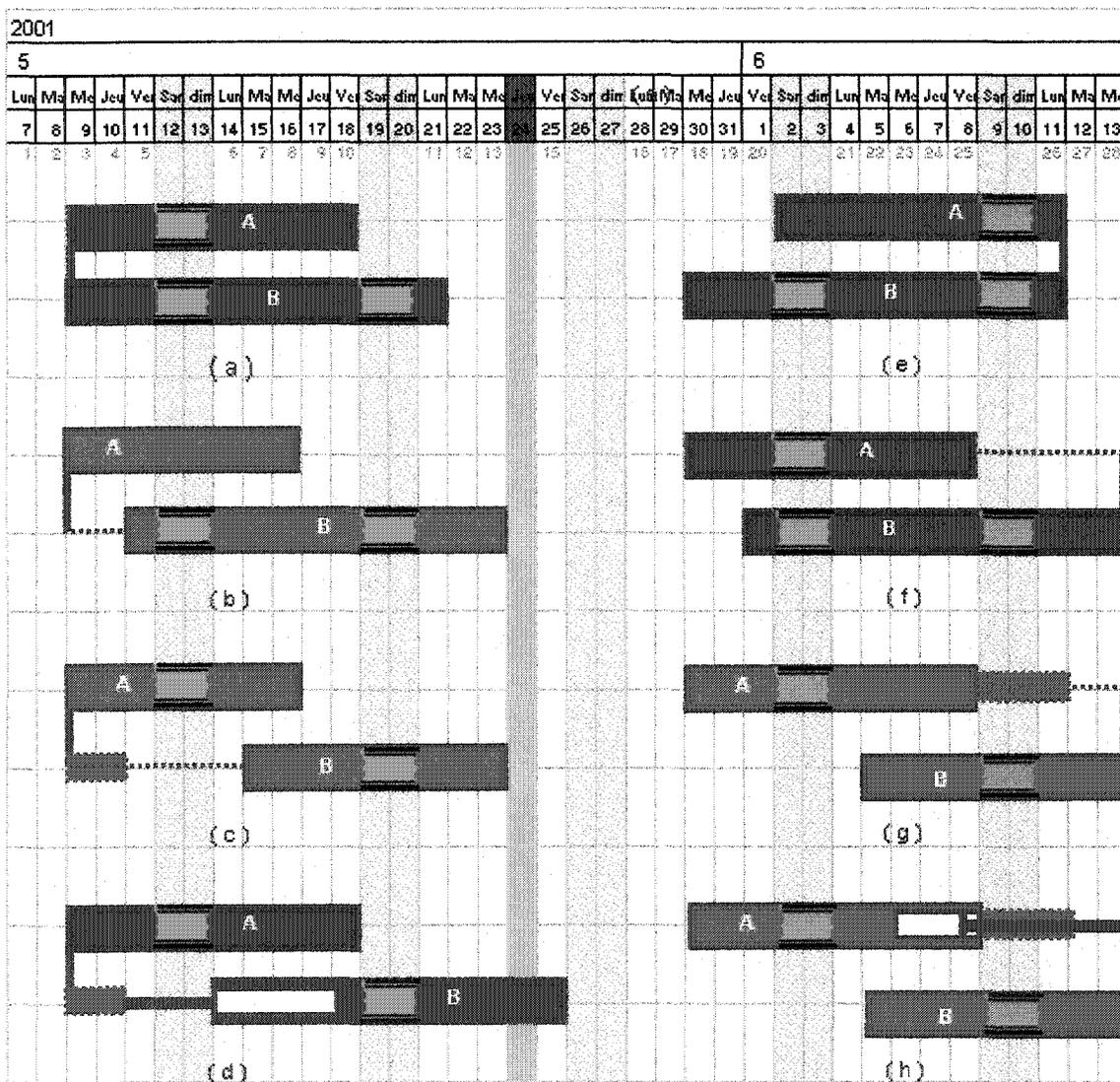


Figure 67 Types Début/Début et Fin/Fin

Dans les cinq figures précédentes, toutes les fonctions temporaires entre les activités sont de type *Fin/Début*. Les mêmes exigences peuvent être présentées avec le type *Début/Début*, Figure 67 (a), (b), (c) et (d) et le type *Fin/Fin*, Figure 67 (e), (f), (g) et (h).

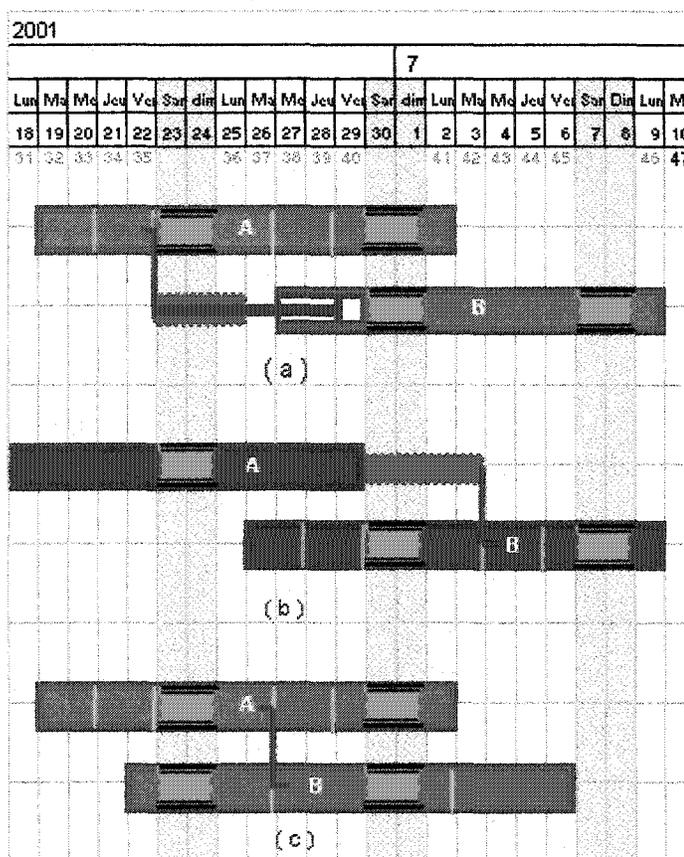


Figure 68 Types Interne/Interne, Interne/Début et Fin/Interne

De plus, deux activités peuvent avoir une fonction temporaire entre un certain point sur la première activité et un autre point sur la deuxième activité. La Figure 68 (a) représente le type *Interne/Début*. La Figure 68 (b) représente le type *Fin/Interne*, tandis que la Figure 68 (c) représente le type *Interne/Interne*. Dans cette dernière figure, une

Les deux activités de la *Figure 69 (b)* possèdent trois fonctions temporaires : *Début/Début* avec un délai minimal exigé et une marge libre; *Fin/Fin* avec une marge libre; *Interne/Interne* avec un délai maximal exigé. Durant l'exécution le gestionnaire s'aperçoit clairement de ces exigences et peut effectuer un suivi rigoureux.

5.3.4 Importance des différents types de fonctions temporaires

La section 4.1.2 : *Anomalie dans les relations de dépendance* a exposé l'avis de certains planificateurs sur une anomalie liée à l'utilisation des divers types de relation. L'exemple présenté voulait réduire la durée totale d'un projet en réduisant la durée d'une activité. L'anomalie présumée a renversé le résultat. La durée totale du projet se trouve donc augmentée. Le non-fondement de cet avis était prouvé à travers un exemple qui démontre les travaux de finition d'un local. La *Figure 70* rappelle cet exemple.

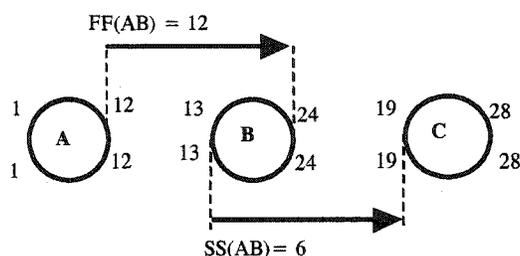


Figure 70 Anomalie de la précédence

Reprenons le même exemple avec la méthode *chronographique*, *Figure 71*. Avec cette modélisation, la décomposition des activités, les relations internes et les fonctions temporaires multiples sont possibles.

Les tâches A, B et C sont respectivement *enduit mural*, *peinture murale* et *travaux de finition d'électricité*. L'activité *enduit* est divisée en quatre parties, chacune d'elles

représente un mur exécuté en trois jours pour les couches de préparation, de crépissage et de finition. L'activité *peinture* est subdivisée en deux parties la première pour les murs un (1) et deux (2) et la deuxième pour les murs trois (3) et quatre (4). Chacune des deux parties possède une durée de 6 jours pour les six couches requises. Les *travaux de finition d'électricité* sont d'une durée de dix (10) jours. Cinq jours pour les deux murs une (1) et deux (2) et les cinq autres pour les murs trois (3) et quatre (4).

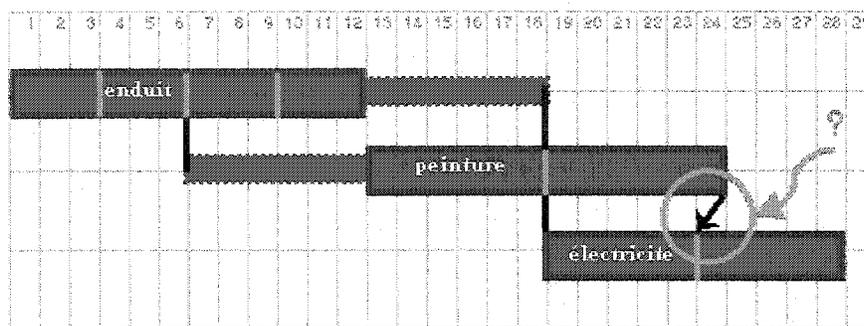


Figure 71 Le projet planifié avec la méthode *chronographique* (étape 1)

Avec la modélisation *chronographique*, les manquements de la planification, difficiles à percevoir avec les méthodes classiques, peuvent être facilement repérés. L'activité de *peinture* des troisième et quatrième murs se termine le vingt-quatrième jour du projet. Dans ce cas, il ne restera que quatre (4) jours pour compléter les *travaux de finition d'électricité* de ces deux derniers murs. Puisque cinq (5) jours étaient prévus, le projet aura donc un retard d'un (1) jour.

La *Figure 71* montre clairement que la réduction de la durée de l'activité *peinture* n'est pas la solution. Pour cela, et afin de diminuer le temps total du projet, le gestionnaire pourra en premier lieu compresser l'activité *enduit* pour exécuter une couche sur deux

murs à chaque jour, *Figure 72*. L'activité *enduit* sera exécutée en deux tâches au lieu de quatre et se terminera le sixième jour.

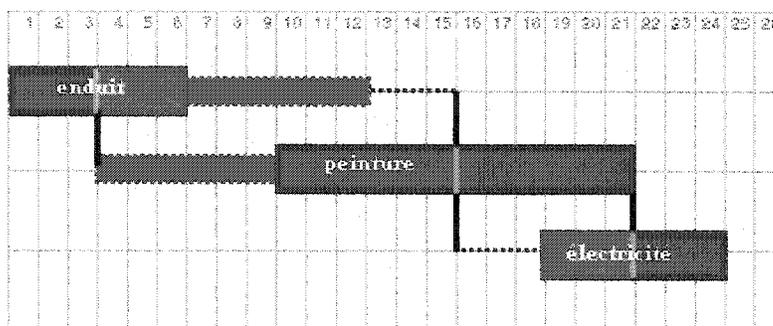


Figure 72 Le projet planifié avec la méthode *chronographique* (étape 2)

En deuxième temps, le gestionnaire pourra aussi diminuer le temps d'exécution de l'activité *travaux de finition d'électricité* à six jours. Si l'on décide que l'activité devra être exécutée en continuité, son début aura lieu le dix-neuvième jour. Le projet dans ce cas, peut se terminer le vingt-quatrième jour.

Le gestionnaire constatera par la suite qu'il pourra diminuer le temps d'exécution de l'activité *peinture* sans aucune incidence négative sur le projet. La *Figure 73* montre cette dernière solution.

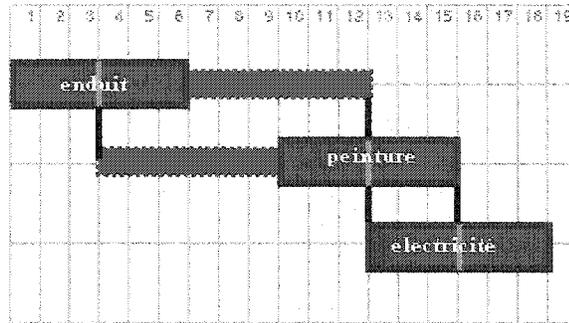


Figure 73 Le projet planifié avec la méthode *chronographique* (étape 3)

Les avantages de la méthode *chronographique* ont permis une vue éclairée du projet et ont guidé à un choix d'une solution rationnelle. Ceci montre l'importance de la méthode *chronographique* comme outil d'aide à la décision.

CHAPITRE 6

LES APPROCHES DE MODÉLISATION

6.1 Modélisation à direction unique de flux de logique

6.1.1 La planification d'un petit projet

La *Figure 74* montre une représentation graphique de la planification d'un projet de petite taille selon la modélisation *chronographique*. L'arrangement du réseau, dans cette proposition, est similaire à la proposition de Miresco et al. (1987). Dans cette stratégie l'importance est accordée à la visualisation du chemin critique qui occupe le centre de la surface de représentation. De plus, aucune technique d'arrangement des activités non-critiques n'est proposée. Cet arrangement, vu sa simplicité, est laissé complètement à la volonté du planificateur.

Afin de mieux exposer les caractéristiques de la méthode *chronographique*, plusieurs points d'explication sont désignés sur la figure ci-dessous.

1. Le point «A» indique une fonction temporaire entre les deux activités *excavation* et *fondation*. Cette fonction temporaire comporte une relation *Fin/Début* avec un délai maximal exigé. Cette exigence maximale de 1 jour détermine un début au plus tard de l'activité *fondation* pour éviter une tâche supplémentaire de nettoyage des fouilles. Le piston désigne cette exigence, tandis que le cylindre indique la marge totale.
2. Le point «B» symbolise une fonction temporaire entre les deux activités *fondation* et *mur de fondation*. Cette fonction temporaire comporte une relation *Fin/Début* avec un délai minimal exigé. La date du début au plus tôt de l'activité *mur de fondation* est le 20 mai 2001. Sachant que ce jour est un jour

férié, cette date de début est retardée d'un jour. Ce retard a créé une marge libre pour l'activité *fondation*. Ainsi, on peut constater que les deux premières activités ne sont pas sur le chemin critique qui démarre avec l'activité *mur de fondation*.

3. Au point «A», le cylindre qui représentait la marge totale de l'activité *fondation* avait une longueur d'un jour. Si l'activité *fondation* était sur le chemin critique « marge totale = zéro » le cylindre aurait dû être dessiné avec une longueur de zéro jour. Cette situation est représentée par le point C.
4. Le point D dessine une fonction temporaire entre les deux activités *mur de maçonnerie* et *placage de pierre*. Cette fonction temporaire comporte une relation *Interne/Début* avec une marge libre pour le point de liaison prédécesseur. Cette marge libre ne signale aucune exigence d'exécution. Elle peut être due à une décision du planificateur en vue du nivellement de ressources ou de gestion de surface.
5. Le point E définit une fonction temporaire *Fin/Début* entre les deux activités *placage de pierre* et *trottoir extérieur*. La date du début de la deuxième activité correspond au jour suivant de la fin de la première activité. Les deux activités sont donc dessinées côte à côte, une ligne de liaison est tracée pour confirmer cette relation.

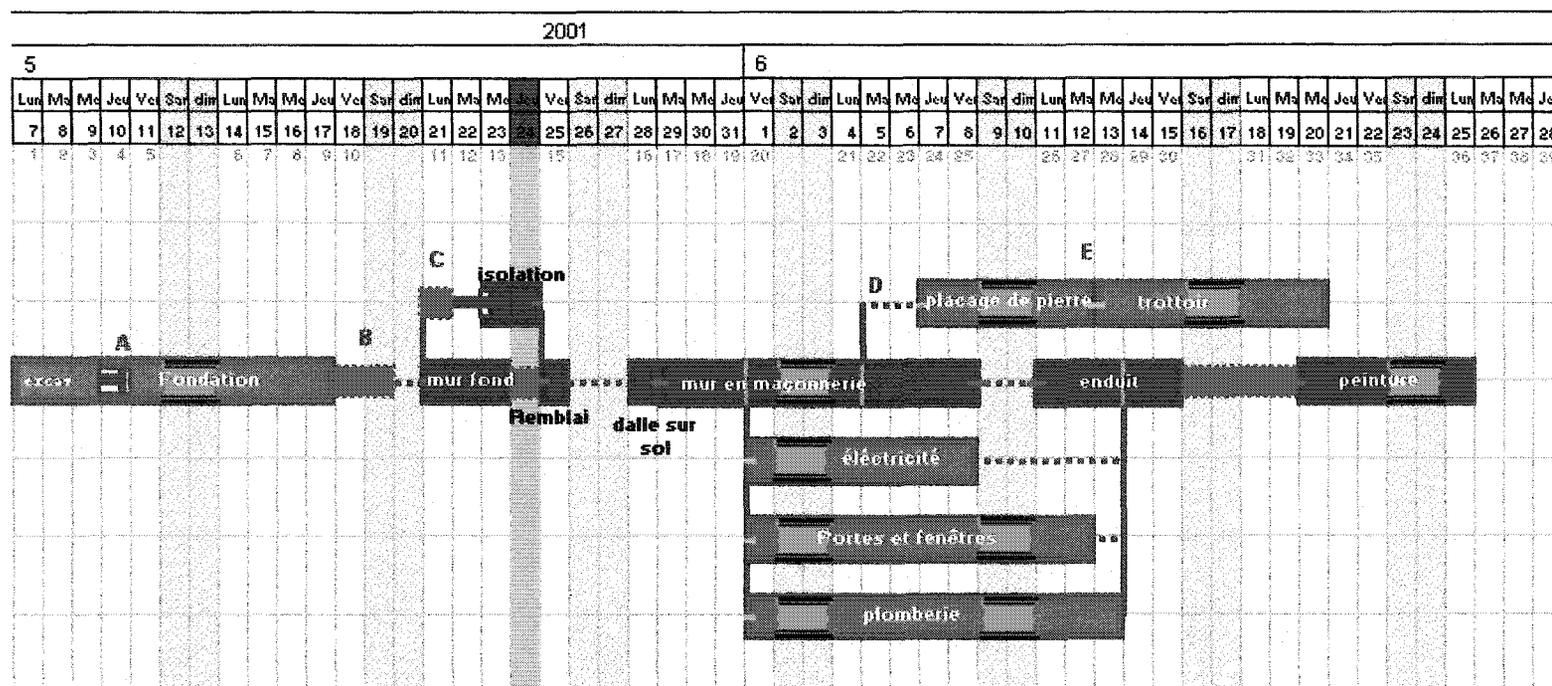


Figure 74 La méthode *chronographique* à l'échelle du temps

6.1.2 Regroupement des sous-réseaux à l'échelle du temps

Afin d'arborer des projets de plus grande taille, la méthode *chronographique* utilise le regroupement des activités en sous-réseau. Avec cette technique, l'information est organisée d'une manière à diminuer les intersections. Cette technique semble plus adaptée comme solution de représentation. En conséquence, dans la *Figure 75*, 96 activités peuvent être visualisées d'une façon claire.

Le regroupement des sous-réseaux à l'échelle du temps, fait par l'outil informatique proposé par cette thèse, est une opération simple. Le processus de planification démarre par l'établissement des activités du réseau maître. Chaque activité de ce niveau est décomposée en un sous-réseau constitué d'activités et de tâches. Le niveau de détail s'étend selon le besoin de précision voulu. L'avantage majeur de cette technique réside dans l'élimination, en grande partie, des travaux manuels de préparation.

6.1.3 Les sous-réseaux à l'échelle des coûts

La *Figure 76* utilise l'échelle du coût comme unité de mesure principale d'ordonnement. Cette figure démontre que l'échelle des coûts est une mesure peu valide dans les modélisations à une seule direction de flux de logique. Ainsi, il est difficile de démontrer l'avancement d'un projet ou son flux monétaire.

Par contre, à deux ou trois directions de logiques, l'échelle des coûts combinés à celle du temps présente des modélisations intéressantes. Ces dernières sont déjà présentées au *chapitre 3*.

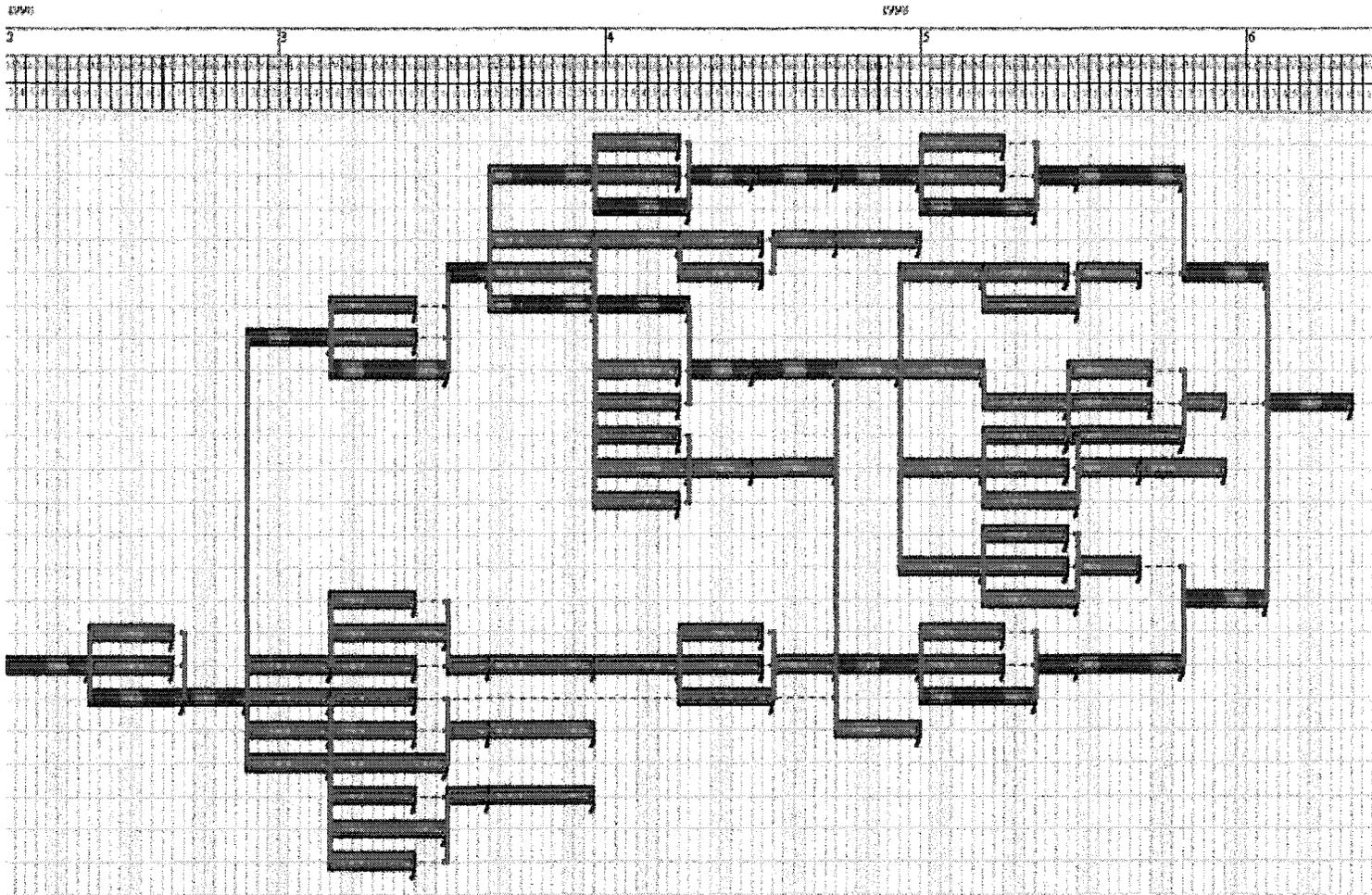


Figure 75

Rassemblement des sous-réseaux à l'échelle du temps

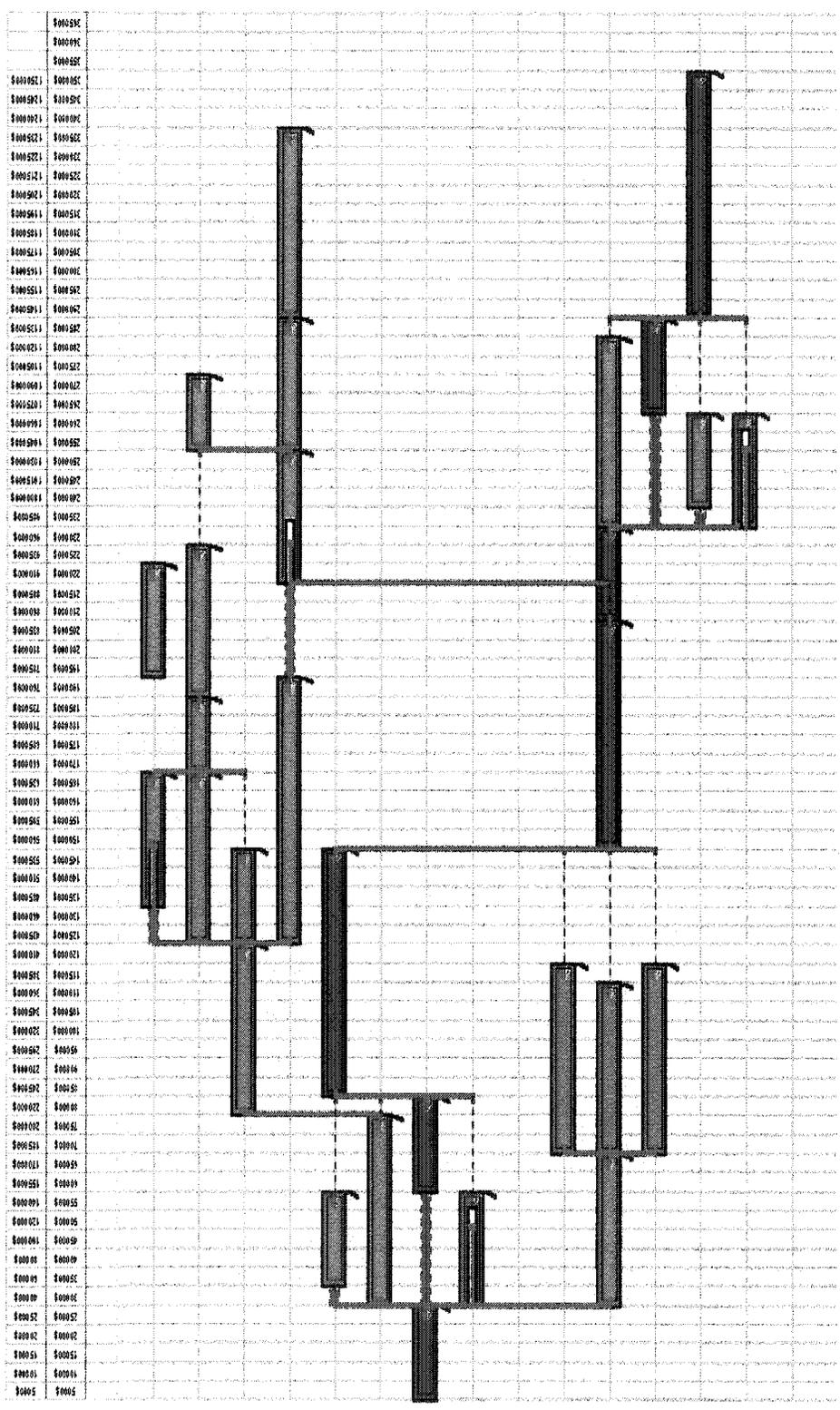


Figure 76 Rassemblement des sous-réseaux à l'échelle des coûts

6.2 Modélisation à deux directions de flux de logique

6.2.1 Variantes du diagramme de Gantt

Malgré sa simplicité, le *Diagramme de Gantt* ne peut présenter efficacement que des projets de très petites tailles. La raison principale réside dans l'utilisation des activités, en même temps, comme entités principales et direction secondaire.

Avec cette double utilisation de l'activité, ce diagramme impose une contrainte supplémentaire de représentation sans illustrer plus d'information. En conséquence, l'ordonnement produit se caractérise par l'inefficacité d'utilisation des surfaces de représentation.

La *Figure 77* expose une variante de ce diagramme. Dans cette proposition, l'activité présente toujours la direction secondaire de flux de logique. Les entités principales symbolisent les tâches qui décrivent les différentes étapes de réalisation des activités.

Cet exemple représente la planification des travaux de ventilation du projet de station d'épuration à Kahnawake. Les tâches sélectionnées indiquent, respectivement, les dessins d'atelier, l'approbation de ces dessins, la fabrication, l'installation des équipements et les travaux d'instrumentation et de contrôle. Ces tâches sont présentées sur la même ligne des activités respectives.

Avec cette stratégie, l'efficacité d'utilisation de la surface est nettement améliorée. Ainsi, l'exemple de la figure suivante illustré à travers la méthode chronographique représente 38 % de l'aire nécessaire au diagramme de Gantt pour démontrer la même quantité d'information.

6.2.2 Utilisations des unités comme direction de mesure

Approche de modélisation

L'utilisation des unités exécutées comme direction de mesure représente un avantage majeur pour la modélisation des projets à caractère répétitifs. Les unités utilisées peuvent désigner le nombre de kilomètres exécutés d'une route, le nombre d'unités construites d'un projet résidentiel ou le nombre d'étage d'un bâtiment.

L'objectif principal des projets à caractère répétitifs réside dans une utilisation constante des ressources. Cette caractéristique la distingue des autres types d'ordonnancement principalement orientés en fonction des contraintes entre les activités. Il faut toujours mentionner que les dépendances entre les activités restent toujours essentielles même avec une méthode orientée par les ressources car ce sont ces dépendances qui déterminent les exigences d'exécution.

Les méthodes actuelles destinées à planifier les projets à caractère répétitifs utilisent le nombre d'unités exécutées comme direction secondaire de flux de logique. Malgré l'efficacité de cette technique de modélisation, certaines faiblesses restent associées à ces méthodes. À notre avis, les plus importantes sont liées à la représentation graphique des contraintes entre les activités et la modélisation des réseaux qui possèdent des activités en parallèle.

L'approche employée avec la méthode *chronographique*, reste toujours une modélisation à deux directions de flux de logique. Ces directions représentent le temps et les unités à construire. Par contre, ce qui la distingue est que chaque activité est représentée par une entité indépendante qui utilise la quantité comme mesure interne. Cette stratégie favorise à la fois une planification orientée par les activités et par les ressources.

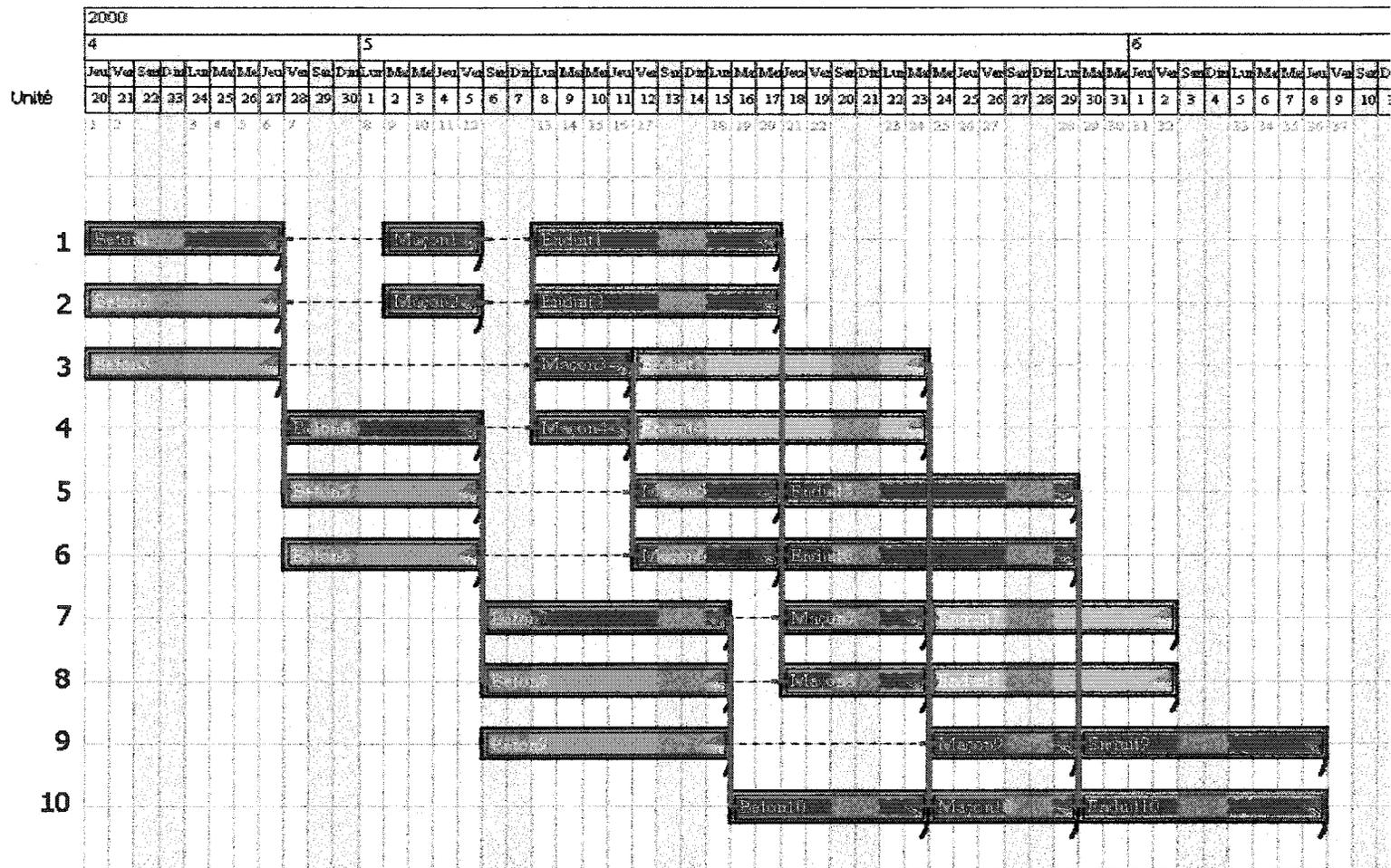


Figure 78 Échelle Temps / Unités

L'exemple présenté dans la Figure 78 montre un projet à caractère répétitif à travers la méthode *chronographique*. Ce projet est composé de dix (10) unités constituées de trois (3) activités chacune. Cette approche de modélisation *chronographique* est une combinaison entre les techniques des réseaux et du LOB. Ainsi, les activités, leurs relations et les unités exécutées peuvent être démontrées en même temps.

Méthodologie de calcul

La méthodologie de calcul est résumée dans les points suivants :

- Au début, une unité standard est planifiée, les relations de dépendance entre les activités sont déterminées et la durée d'exécution de cette unité est calculée;
- À travers la durée totale supposée pour terminer le projet et la durée de l'unité planifiée, on calcule un taux de progression général du projet par la formule suivante :

$$\text{Le taux de progression} = \frac{(N - 1)}{(D_p - D_r)}$$

Dont :

N = nombre d'unités

D_p = durée prévue pour le projet

D_r = la durée d'exécution d'une unité

- Pour chaque activité, on analyse indépendamment la productivité de la main d'œuvre pour estimer son taux de progression spécifique;
- Le nombre d'équipes nécessaires aux activités critiques est calculé à travers le taux de progression général du projet et le taux de progression spécifique.
- Pour les projets répétitifs à caractère horizontal, chaque équipe exécute une unité distincte afin de produire plusieurs unités à la fois. Par contre, pour les projets

répétitifs à caractère vertical, toutes les équipes exécutent une seule unité⁴ afin de diminuer la durée totale de celle-ci;

- Les activités non critiques peuvent profiter, dans la mesure du possible, de leurs propres marges afin d'alléger la demande des équipes correspondantes.

Modélisation des projets à caractère répétitifs comprenant des activités parallèles

Les *Figure 79 à Figure 83* représentent un projet à caractère répétitif constitué de dix (10) unités. Chacune d'elles possède neuf (9) activités. Ces figures illustrent les techniques de modélisation des projets qui comportent des activités exécutées en parallèle. La durée d'exécution d'une unité est de 28 jours tandis que la durée totale attendue pour terminer le projet est de 48 jours. Le taux de progression du projet serait égal à : $(10 - 1) / (48 - 28) = 0.45 \simeq 0.5$.

Ce taux de progression est utilisé pour calculer le nombre d'équipes nécessaires pour les activités critiques. Ainsi, il faut considérer une équipe pour chaque activité qui possède une durée de deux jours. Le nombre d'équipes pour chaque activité est déterminé comme suit :

1. Une seule équipe pour les activités A et C qui ont chacune une durée de deux jours;
2. Deux équipes pour les activités D et I qui ont une durée de 4 jours chacune;
3. Trois équipes pour l'activité B qui possède une durée de 6 jours;
4. L'activité E possède une durée de 6 jours, si on veut suivre le taux de progression on doit utiliser trois (3) équipes pour exécuter trois (3) unités en

⁴ Elles peuvent aussi exécuter plus d'une unité si les conditions d'exécution le permettent.

même temps. L'activité E a comme prédécesseur l'activité D qui fonctionne avec deux équipes, cela veut dire que deux unités seulement seront prêtes à la fois.

Si l'on utilise trois équipes pour l'activité E, on doit retarder sa date de début pour trouver des unités suffisantes pour les trois équipes. Cela a comme effet de retarder la date finale du projet.

La solution proposée consiste à utiliser quatre équipes qui démarrent à deux dates différentes et qui se chevauchent. Cette stratégie est dans le but de profiter des unités prêtes. Le taux de progression peu élevé, utilisé par les deux premières équipes, sera rattrapé avec les deux autres équipes;

5. Les autres activités non critiques profiteront de leurs marges totales. Ainsi, chacune d'elles peut être exécutée par une seule équipe sans retarder le projet.

Avec cette technique, plusieurs faiblesses semblent être réglées. Les activités en parallèle peuvent être modélisées clairement. Le suivi d'avancement des travaux et les analyses des contraintes de succession externes et internes des unités et des équipes peuvent être faites simultanément.

De plus, les méthodes actuelles destinées à planifier les projets à caractère répétitifs basent leurs calculs selon les jours ouvrables. Cela ne semble pas être réaliste pour assurer la continuité d'utilisation des équipes. En ayant à l'arrière plan les jours du calendrier, certains délais minimaux sont absorbés en tout ou en partie par les jours fériés. La date du début au plus tard pour d'autres activités sera contrainte par les jours fériés si les délais maximaux tombent à l'intérieur de ces jours.

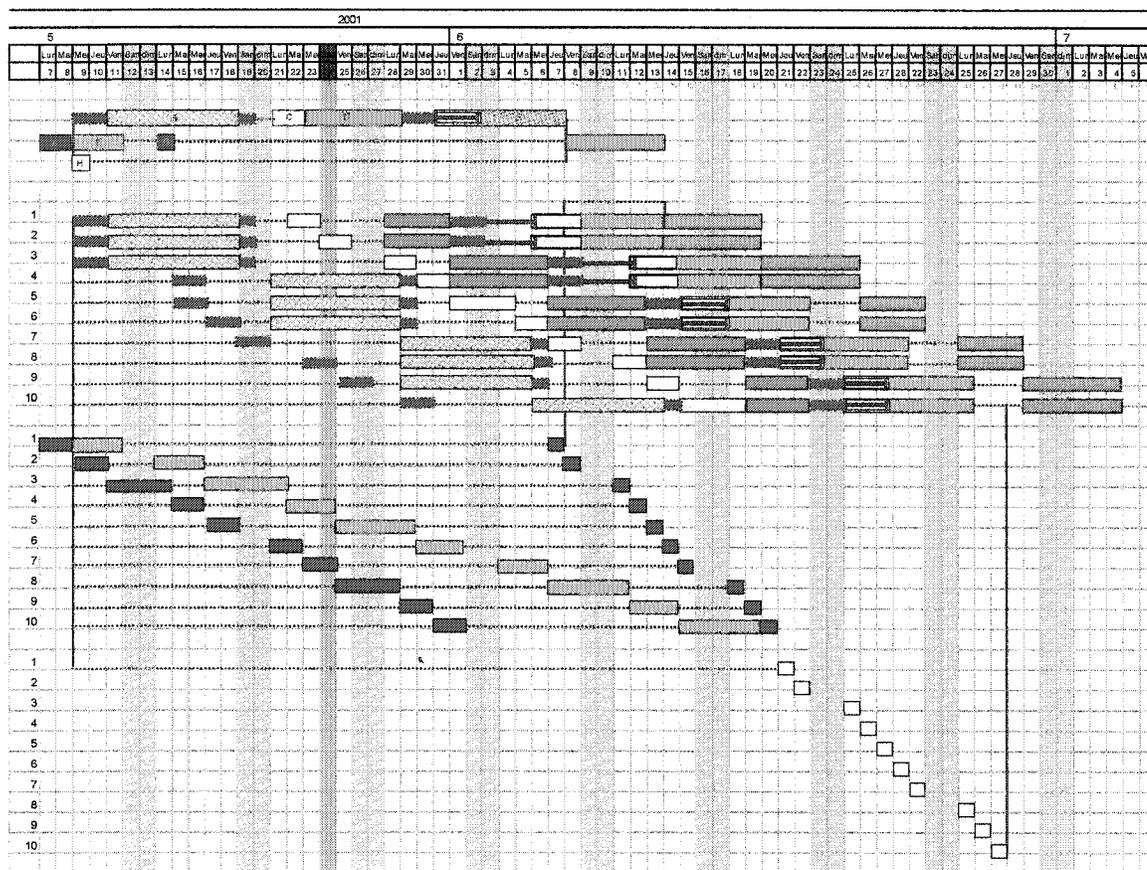


Figure 79 Projet répétitif à caractère horizontal

La *Figure 79*, représente un projet répétitif à caractère horizontal. Dans cette modélisation chaque équipe est représentée par une barre flottante. L'activité B, par exemple, est exécutée par trois équipes pour les neuf (9) premières unités. Ainsi, les trois premières unités sont exécutées en même temps par trois différentes équipes et sont représentées par trois barres flottantes en parallèle. Les unités 4, 5 et 6 et les unités 7, 8 et 9 suivent la même logique des trois premières unités. La dixième unité est exécutée par une seule équipe, ainsi, elle est représentée par une seule barre flottante.

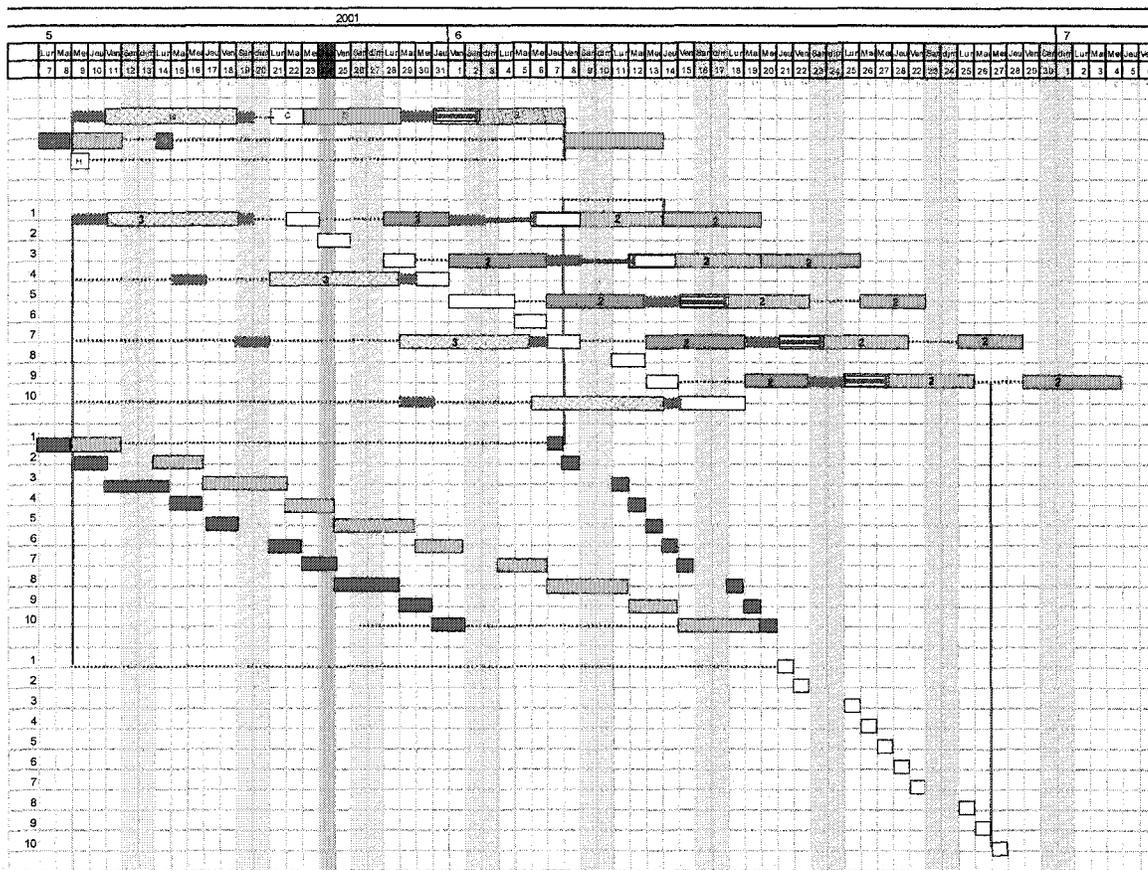


Figure 80 Projet répétitif à caractère horizontal - cédula allégée

La *Figure 80* présente une cédula allégée. Ce type de présentation convient aux projets répétitifs à caractère horizontal. Dans cette représentation les barres flottantes qui représentent les équipes des activités du même type et qui s'exécutent dans la même durée sont regroupées. Le nombre d'équipes est indiqué sur chaque barre flottante.

Pour pouvoir représenter des projets ayant un nombre plus important d'unités, seulement les relations entre le début et la fin de chaque groupe apparaissent. Les autres relations non représentées étant évidentes. Avec cette présentation allégée, un nombre plus important d'activités est représenté sans devoir augmenter le nombre de barres flottantes à condition que ces activités soient exécutées durant la même période.



Figure 81 Projet répétitif à caractère vertical

La *Figure 81* représente un projet répétitif à caractère vertical. Dans cette modélisation, les trois équipes qui exécutent l'activité B terminent une unité à la fois, tandis que pour l'activité E les deux équipes travaillent sur deux unités différentes qui se chevauchent.

Les *Figure 82* et *Figure 83* analysent un projet avec un taux de progression variable. Ces taux peuvent changer :

1. Horizontalement, en fonction de la variation du niveau de difficulté d'une unité à l'autre. Comme exemple, l'épaisseur des sous-fondations d'une route dépend de la nature du sol.

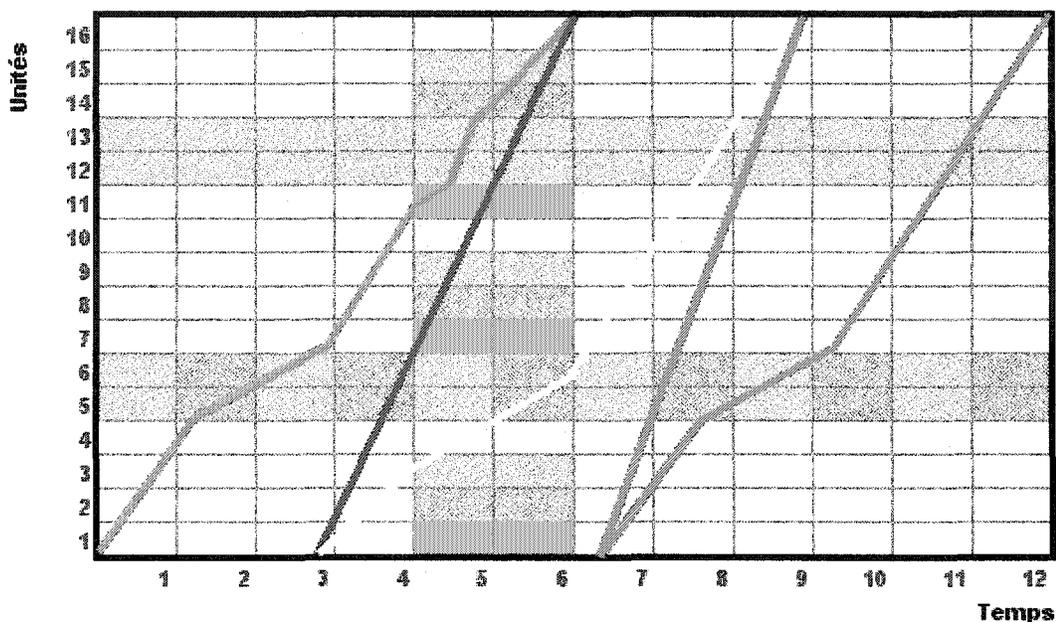


Figure 82 Les projets répétitifs à taux de progression variable

2. Verticalement, en fonction de la date d'exécution. Comme exemple, les travaux extérieurs peuvent être affectés par le climat où une certaine activité peut subir des retards en fonction de la disponibilité de la main-d'œuvre durant une certaine période.

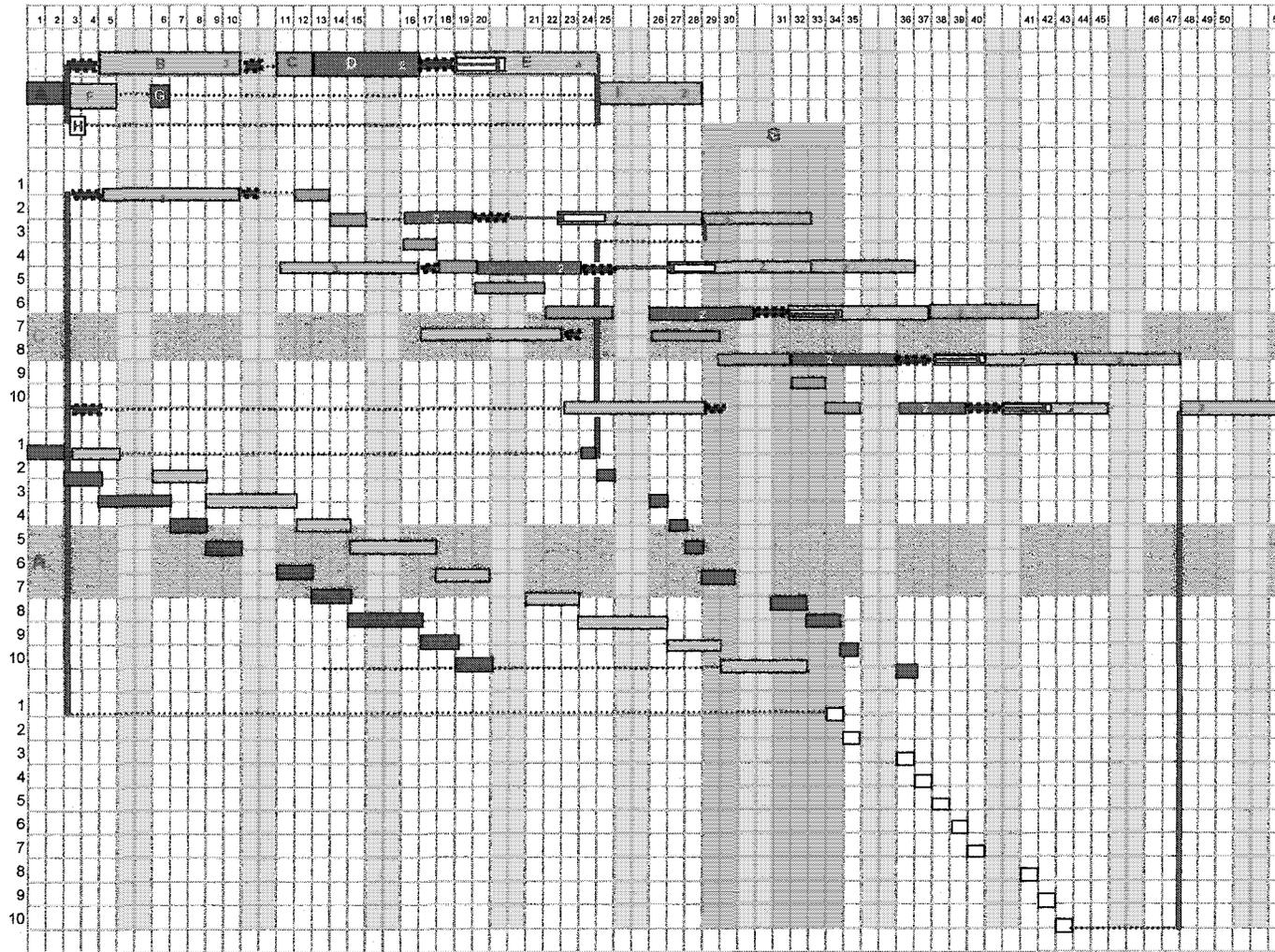


Figure 83 Projet répétitif à caractère horizontal – à taux de progression variable

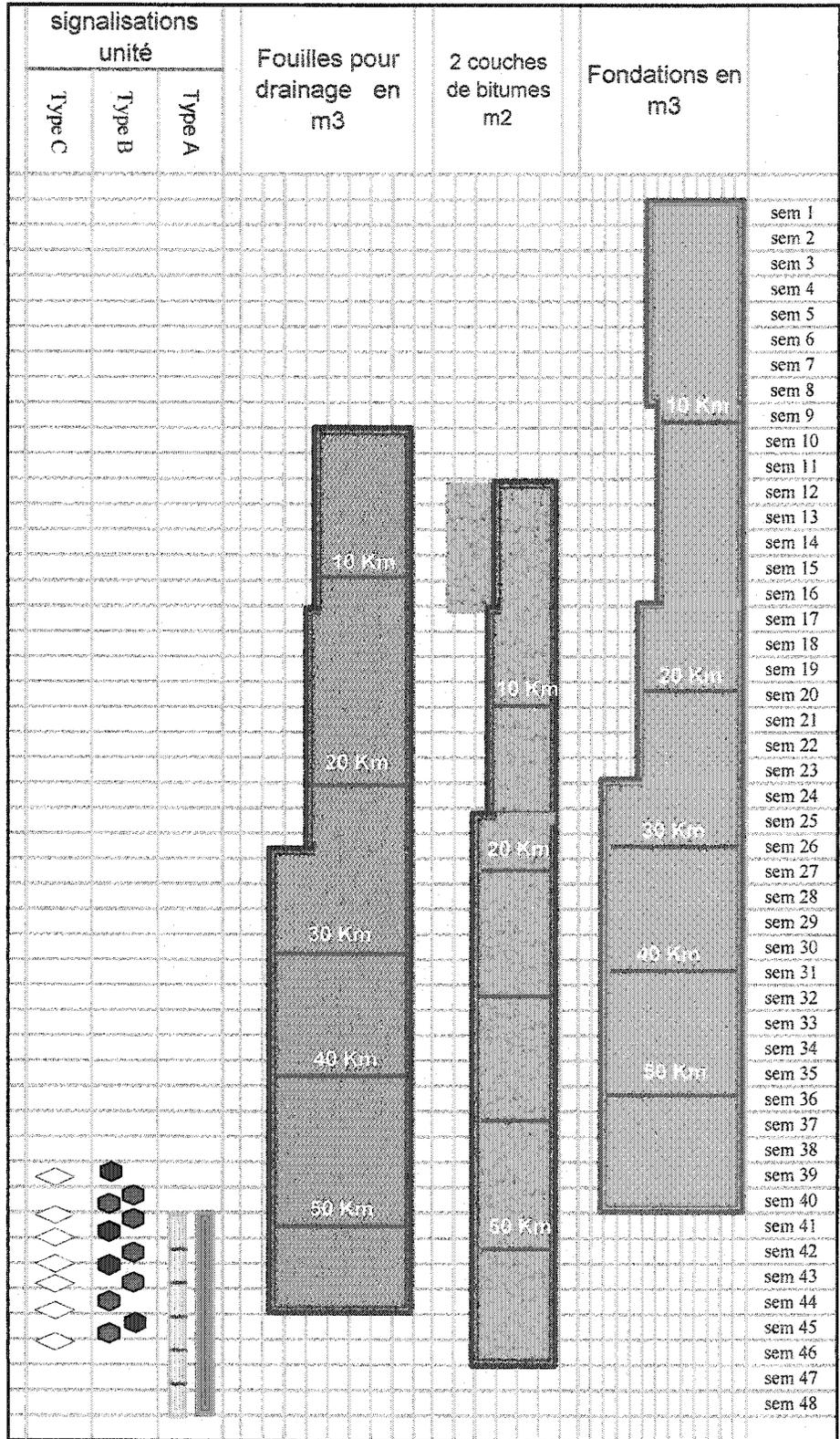
6.2.3 Utilisations variables des quantités comme unités de mesure

Les quantités peuvent être utilisées comme direction de mesures principale, secondaire ou tertiaire. Si elles sont utilisées comme direction principale ou secondaire, elles doivent être capables de mesurer toutes les entités principales d'une manière constante.

Les deux figures, *Figure 84* et *Figure 85*, traitent d'un projet de construction d'une route, composée de quatre activités principales, selon deux points de vue distincts. La visualisation des différentes facettes d'un même projet s'avère très utile pour répondre aux différentes situations ou résoudre des problèmes variés.

La *Figure 84* utilise les quantités exécutées en troisième direction. Les deux directions principales sont en fonction du temps et des activités. Les unités (km) exécutées illustrent les entités principales. Les quantités présentées en troisième direction sont aussi considérées comme des attributs des entités. Cette représentation établit la planification quotidienne des travaux. Pour cela elle s'avère idéale pour la gestion des dates d'engagement et des flux monétaires.

La *Figure 85* montre les unités (km) en première direction et les quantités en troisième direction. Les activités établissent la deuxième direction. Le temps qui mesure la dimension interne d'avancement représente l'entité principale. L'avantage de cette représentation consiste dans la visualisation des quantités et de leurs emplacements. Pour cela, elle s'avère idéale pour la gestion des stocks et des approvisionnements.



échelle - temps / activités / quantités

Figure 84 Échelle de quantités sur la direction tertiaire

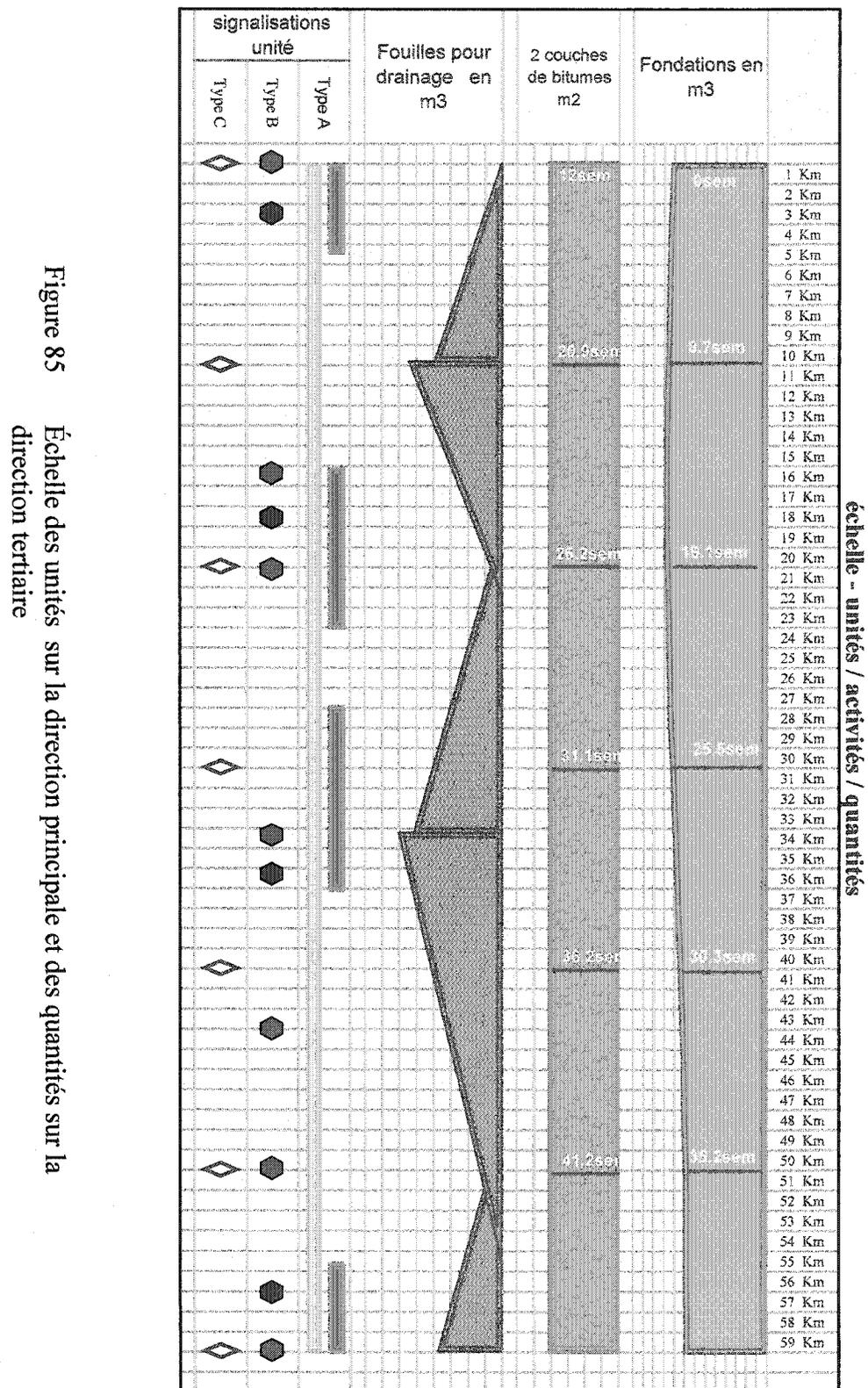


Figure 85

Échelle des unités sur la direction principale et des quantités sur la direction tertiaire

6.2.4 Ressources ou surfaces en direction secondaire

L'utilisation des ressources ou des surfaces en deuxième direction est une solution très efficace pour les opérations d'allocation et de nivellement des ressources. L'occupation de la main-d'œuvre est optimisée et les encombrements sont souvent évités.

Les *Figure 86, 87 et 88* illustrent des facettes de la planification des travaux de mécanique de procédé, du béton et des travaux divers du projet de station d'épuration à Kahnawake. Ces modélisations utilisent le temps et les ressources comme directions principale et secondaire de flux de logique. Dans ces approches, les activités constituent l'entité principale de production. Ainsi, l'occupation de chaque ressource est exposée clairement.

L'emplacement de chaque activité exécutée est un attribut de l'entité activité. La couleur des activités est utilisée pour identifier la localisation. De cette manière, la gestion des surfaces de travail devient une tâche facile à gouverner.

Une deuxième facette peut être modélisée en interchangeant le rôle des ressources et des surfaces de travail. Les ressources deviendront des attributs tandis que les surfaces de travail représenteront la direction secondaire. L'avantage de cette approche est de faciliter le nivellement des ressources par emplacement de travail. Le planificateur pourra identifier les limites d'occupation de chaque surface. Ces limites pourront être situées entre une restriction de charge à une ressource unique, passant par une utilisation inclusive à une seule activité, à un usage par un nombre important de ressources pour exécuter des activités et des tâches variées.

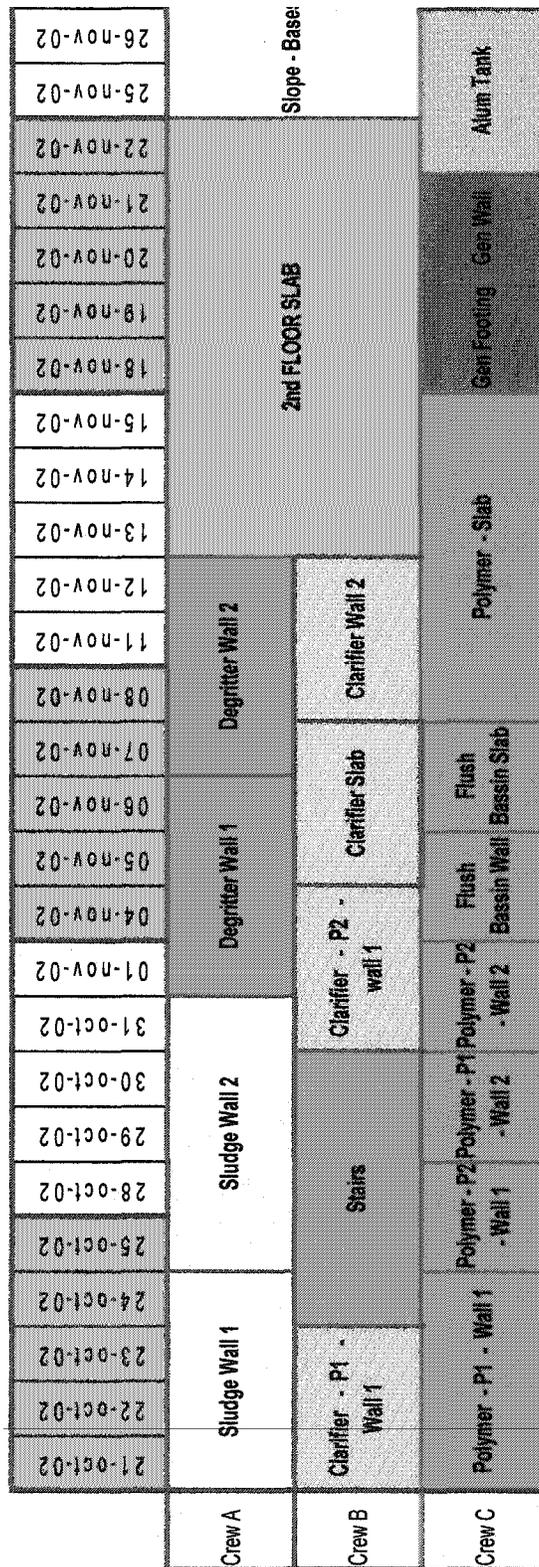


Figure 87 Échelle Temps / Ressource pour les travaux de béton

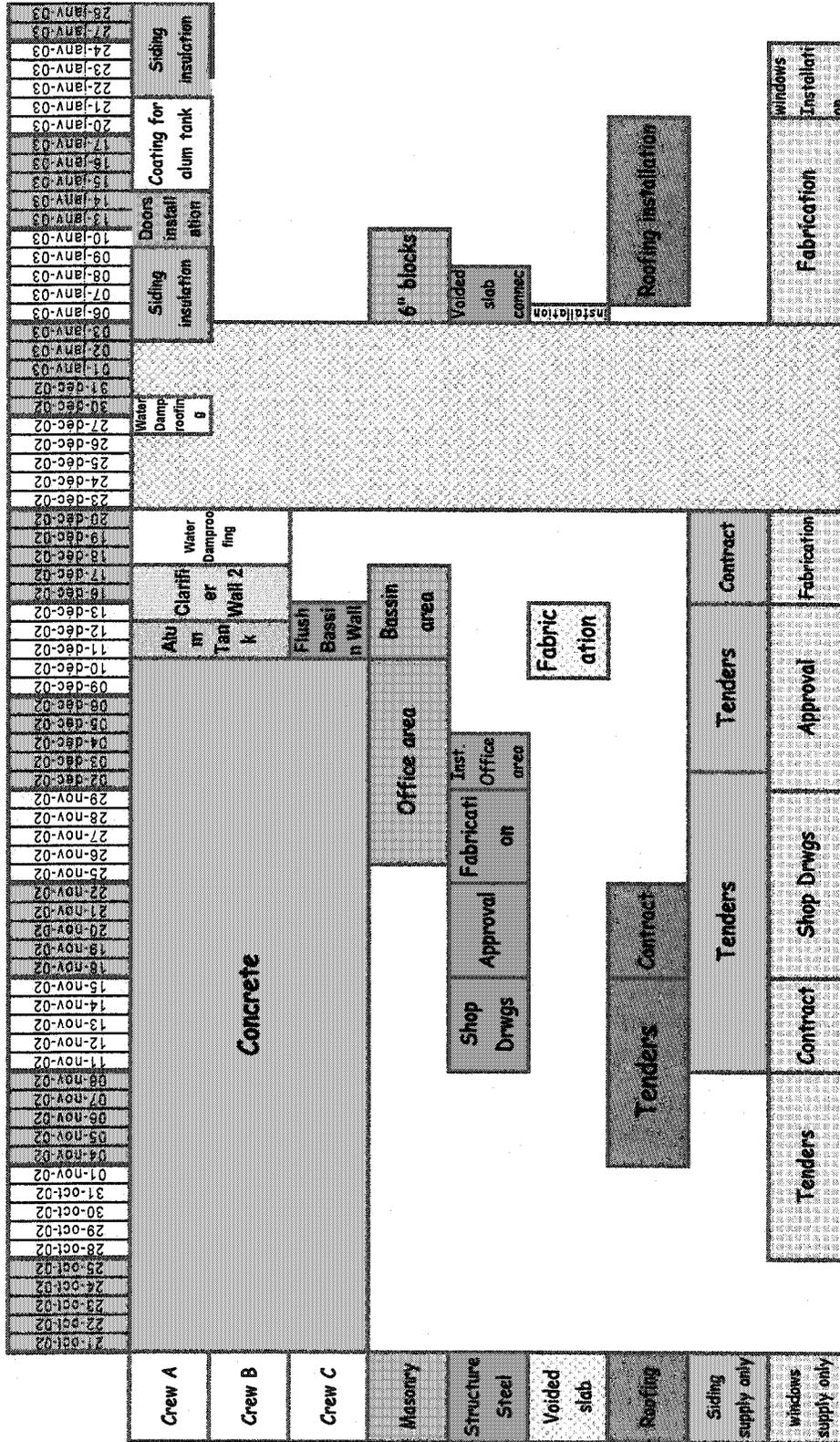


Figure 88 Échelle Temps / Ressource pour diverses spécialités.

CHAPITRE 7

LES CONTRAINTES D'EXÉCUTION

7.1 Les Relations entre les activités en fonction des Quantités

7.1.1 Problématique

La section 2.4.2 : *PDM « Precedence Diagram Method »*, a stipulé des types de relations à travers la *méthode des Précédences*. Cette méthode utilise des délais fixes ou des pourcentages pour répondre à certaines contraintes. L'analyse entreprise a prouvé que ces délais ou pourcentages s'avèrent insuffisants pour garantir un bon fonctionnement de l'échéancier produit. La solution proposée consistait à décomposer, si nécessaire, les activités en plusieurs divisions internes en fonction des quantités.

Bien que l'utilisation des quantités comme unité de mesure interne semble une opération complexe, cette utilisation est très efficace et beaucoup plus simple qu'on peut le croire. Analysons cette situation.

L'exactitude dans l'estimation des durées des activités peut varier d'une estimation complètement globale à une méthode d'estimation très rigoureuse. Cela est dû dans la majorité des cas à plusieurs facteurs dont :

- La taille du projet et sa complexité;
- La connaissance du domaine;
- Le budget et la durée alloués à la tâche de planification;
- La compétence et la volonté du gestionnaire ou du décideur.

Selon le niveau d'exactitude demandé, l'estimation de la durée d'une activité peut être :

- Basée sur la simple expérience du planificateur ou de l'équipe du projet en tenant compte de la quantité de travail à exécuter;
- Évaluée comparativement avec d'autres projets similaires. Cette évaluation se fait en ajustant la durée en fonction des coefficients qui reflètent les variations (quantités, emplacement du projet, du taux d'inflation ou autres);
- Extraite des bases de données propres à l'entreprise ou des manuels de référence;
- Calculée en divisant la quantité demandée par la charge de travail évaluée (cadence).

Même s'il n'est pas toujours apparent parce que le calcul se fait parfois à travers des calculs mentaux, l'estimation de la quantité et de la charge de travail s'avère nécessaire dans toutes les situations précédemment citées. Une opération supplémentaire pour traduire ces données en durée d'exécution est indispensable. Le temps de l'activité devient donc l'unité de travail pour la planification du projet.

Au cours du projet, si les quantités ou les charges de travail changent, les modifications des durées se font généralement d'une façon approximative. En plus, dans la majorité des cas, il semble que peu d'attention est donnée à la modification des délais associés aux relations qui démontrent les exigences d'exécution.

Dans la situation où une activité est planifiée en fonction des quantités exécutées, le gestionnaire transforme l'estimé en échéancier. Ensuite, il doit déterminer soit la productivité allouée à l'équipe de travail ou la durée de l'activité. L'application informatique utilisée devrait être capable de calculer l'autre variable selon le cas.

Durant l'exécution, si la quantité ou la charge de travail pour une certaine section change, cette application informatique modifiera la durée correspondante. Les relations

entre les activités, qu'elles soient externes ou internes, se trouvent toujours liées aux quantités de travail. Ce qui reflète la réalité des projets et règle un problème majeur rencontré par les gestionnaires.

7.1.2 Exemple d'une planification en fonction des quantités

L'exemple traite la planification des fondations en béton pour un projet de construction d'une clôture en brique. Les quantités des deux activités *fouilles de fondation* et *semelles de fondation* sont 24 000 m³ et 3200 m³ respectivement. L'activité *semelles de fondations* est constituée du béton de propreté, du coffrage, du ferrailage et du bétonnage.

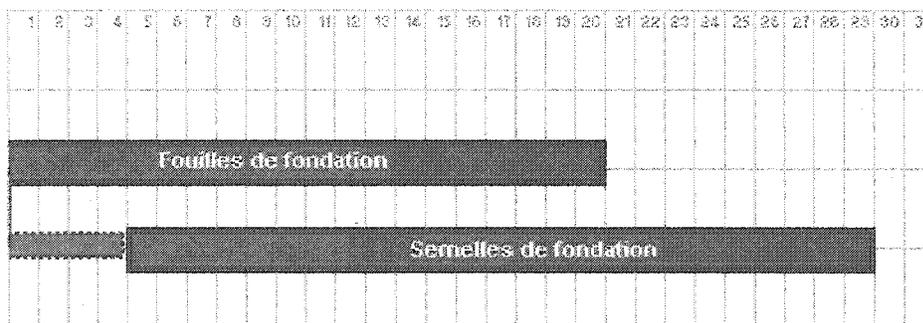


Figure 89 Les relations en fonction des unités de temps

Si la charge du travail est de 1200 m³/jour pour l'activité *fouilles de fondation* et de 160 m³/jour pour celle des *semelles de fondation*. Les durées d'exécution seront de 20 et 25 jours respectivement. Pour démarrer la deuxième activité, 4800 m³ de la première activité, doivent être excavés, soit 4 jours de travail.

Avec la *méthode des Précédences*, la deuxième activité démarrera 4 jours après le début de la première, voir *Figure 89*. Si un retard se produit dans l'exécution des fouilles durant les quatre premières journées, le gestionnaire ajustera la durée de l'activité

fouilles de fondation pour refléter ce retard. Mais à cause de la complexité des projets, il ne pourra pas constater l'effet de ce retard sur l'activité *semelles de fondation*. Ainsi, ce retard ne sera pas traduit par un prolongement du délai d'exigence minimal existant et l'activité *semelles de fondation* ne verra pas son début retardé. L'utilisation d'un pourcentage d'avancement n'est toujours pas la solution. Cela a déjà été stipulé dans la section 4.1.6 : *Représentation des contraintes potentielles avec les relations de dépendances*.

En réalité, la quantité de fouilles disponibles pour le bétonnage sera insuffisante. Les tâches reliées à l'activité *semelles de fondation* seront toujours préparées afin d'être exécutées à leurs dates prévues. Le béton sera commandé du fournisseur et la main-d'œuvre sera immobilisée. Le résultat sera traduit par une quantité de béton supplémentaire inutilisée, une main-d'œuvre sans tâche à exécuter, une augmentation du coût de l'activité et plusieurs conflits sur le chantier. Pour régler cette situation, on a recours à l'improvisation possiblement dû au manque de confiance envers l'échéancier produit.

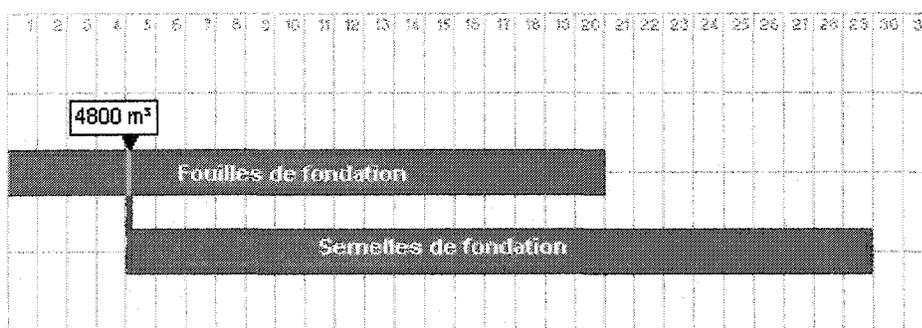


Figure 90 Des relations en fonction des quantités

Avec les divisions internes en fonction des quantités, ce problème semble être réglé. Le planificateur utilisera les quantités pour définir les relations. Une division interne dans la première activité sera faite et la deuxième activité sera reliée avec cette division *Figure 90*. La relation existante exigera que la deuxième activité ne démarre que lorsque 4800 m³ de la première activité auront été exécutés.

À chaque jour, le planificateur, pour le suivi de son projet, entrera la quantité de fouilles exécutée. L'application informatique calculera la nouvelle productivité et, si nécessaire, elle ajustera la division interne et par conséquent la relation reliée à cette division. Avec cette approche, la méthode s'adaptera à tout retard ou devance d'exécution.

La codification mathématique est démontrée dans la *Figure 91*. L'activité *fouilles de fondation* est désignée par $X1(\text{Foui.02.012}, 1, 20)$ dont *Foui.02.012* est le code de cette activité, *1* est la date de début (premier jour ouvrable) et *20* représente la durée. L'activité *semelles de fondation* est désignée par $X2(\text{Bet.03.008}, 5, 25)$ dont *Bet.03.008* est le code de cette activité, *5* est la date de début et *25* représente la durée de cette activité.

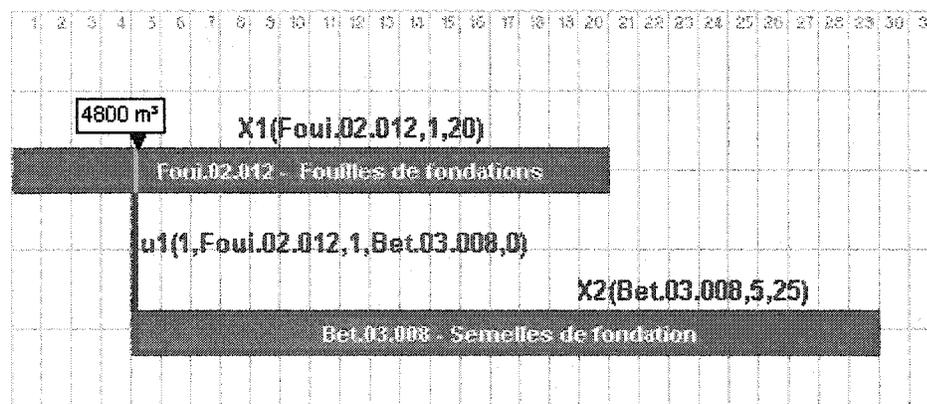


Figure 91 Formulation mathématique des fonctions temporaires reliées en fonction des quantités

Une branche directrice $u1(1, Foui.02.012, 1, Bet.03.008, 0)$ relie ces deux activités. L'explication du code est comme suit :

- 1 : représente le numéro de cette branche;
- $Foui.02.012$: représente le code de la première activité;
- 1 : désigne que la *fonction temporaire* est reliée à la première décomposition de la première activité;
- $Bet.03.008$: représente le code de la deuxième activité;
- 0 : désigne que la *fonction temporaire* est reliée au début de la deuxième activité.

7.2 Fonctions temporaires multiples et l'autoadaptation aux changements

7.2.1 Problématique

Les méthodes classiques apparaissent relativement rigides. Elles peuvent difficilement s'adapter aux changements fréquents existant dans un projet de construction à moins que l'ordonnancement soit très détaillé. Cela présente des inconvénients dans les deux situations :

1. Alourdir l'ordonnancement et compliquer la planification, dans le cas d'un graphe très détaillé;
2. Ne pas favoriser une autoadaptation aux changements le cas contraire.

À l'aide des fonctions temporaires multiples, la méthode *chronographique* possède un mécanisme efficace d'autoadaptation aux changements. Pour mieux expliquer le terme *autoadaptation*, la partie suivante reprend l'exemple cité à la section 7.1.2. La *Figure 92* représente cet exemple à travers les deux méthodes classiques *ADM* et *Précédence*.

La méthode *ADM*, n'utilise que des relations *Fin/Début* entre les activités. Pour cela, la première activité doit être découpée en deux sous-activités. La première sous-activité aura une durée de quatre (4) jours tandis que la deuxième sera exécutée en seize (16) jours. Sans ce découpage, la durée du projet doit passer de 29 à 45 jours.

La *Précédence* règle cette situation en utilisant une relation *Début/Début* avec un délai de 4 jours. Avec cette solution, la division de la première activité *A* ne s'avère plus nécessaire. Par contre, si un changement se produit dans cette activité *A* à une date ultérieure à la relation, la deuxième activité, étant simplement liée à son début, ne sera pas affectée. Le gestionnaire se verra dans l'obligation de faire le raisonnement et d'entreprendre les modifications nécessaires manuellement.

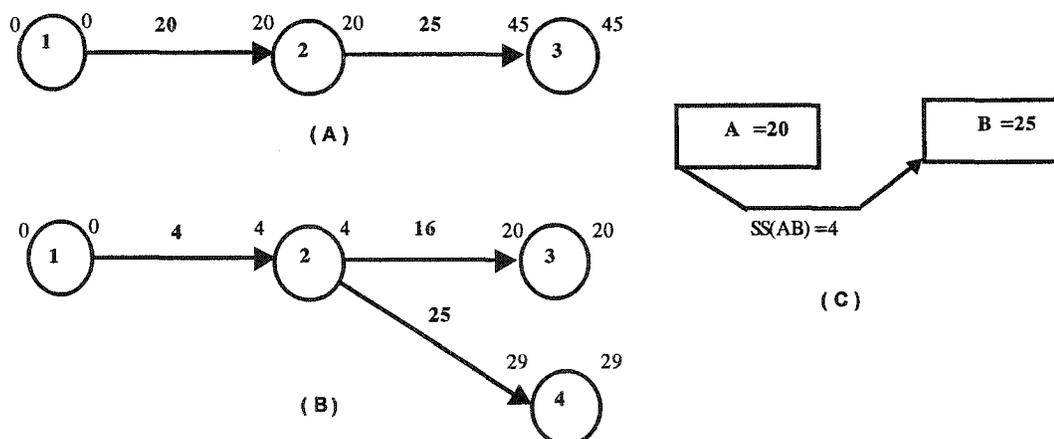


Figure 92 Présentation du projet avec la CPM et la Précédence

7.2.2 Analyse des relations utilisées par la précédence

La problématique concernant les relations utilisées par la précédence est mieux présentée en utilisant les quantités comme mesures internes aux activités. Les figures

suivantes expliquent cette notion. Les *Figure 93 et 94* éclaircissent la notion des mesures internes en fonction des quantités. L'activité dessinée possède deux divisions internes en fonction des quantités et une mesure externe représentée par l'échelle du temps. Avec ces caractéristiques, la méthode favorise une flexibilité et un suivi rigoureux d'avancement. Les divisions internes facilitent aussi le changement de la productivité d'une période à l'autre.

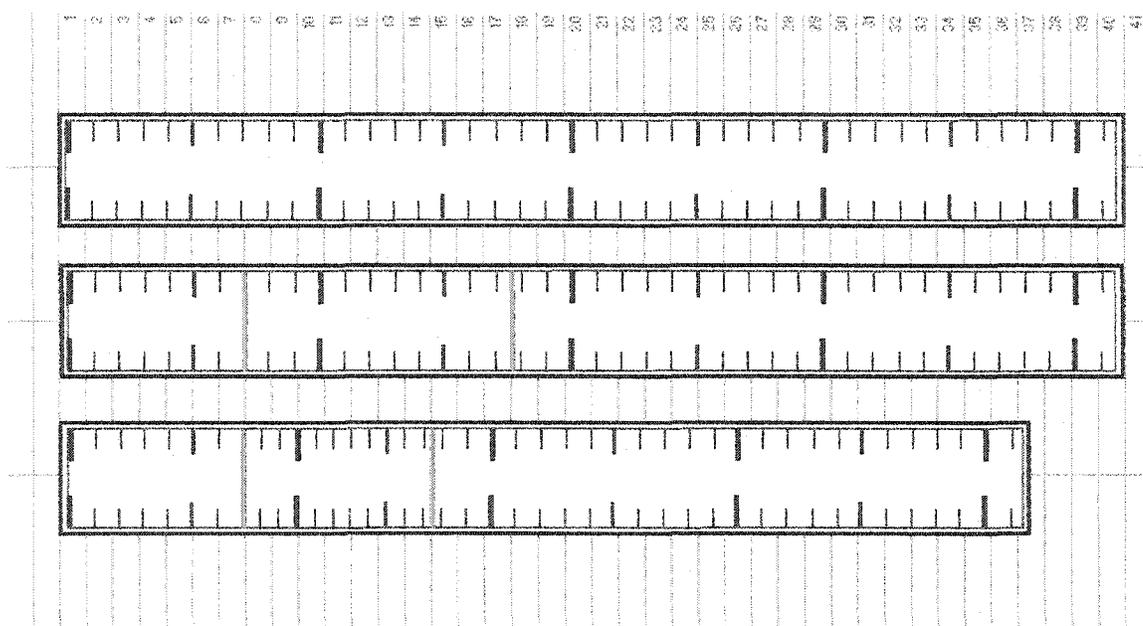


Figure 93 L'utilisation des quantités comme mesure interne aux activités

Dans la deuxième figure chaque section est illustrée par une couleur distincte. L'utilisation de ces attributs aide à mieux démontrer l'effet dû aux changements de la productivité de chaque section. Malgré ces variations, la durée de l'activité est restée inchangée. Notons que les méthodes classiques sont incapables de démontrer l'influence de ces changements sur les projets.

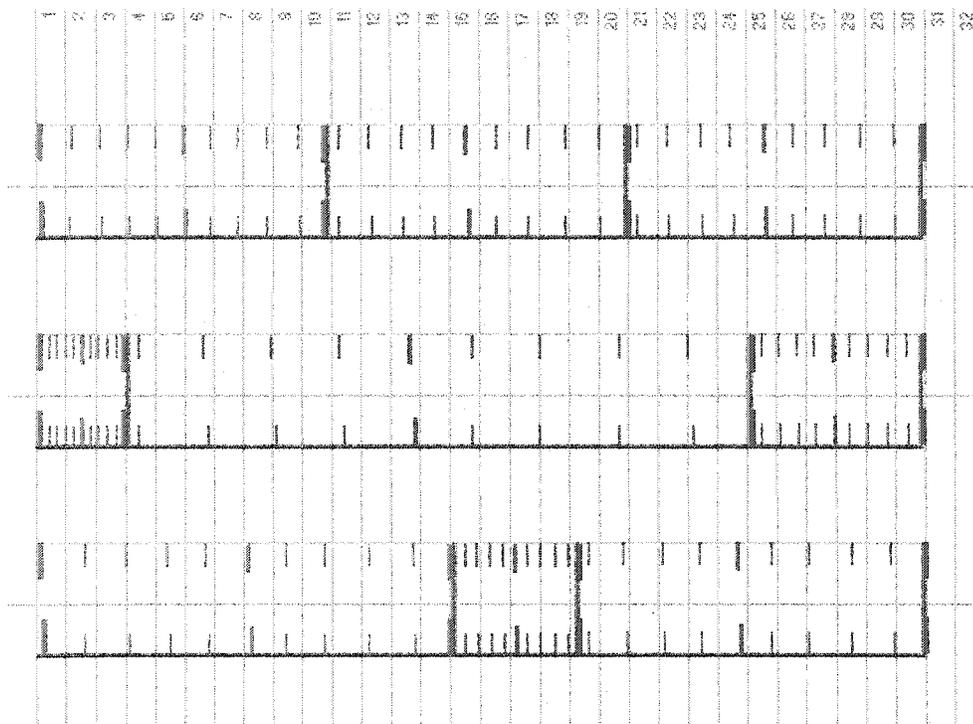


Figure 94 L'utilisation d'une productivité variable

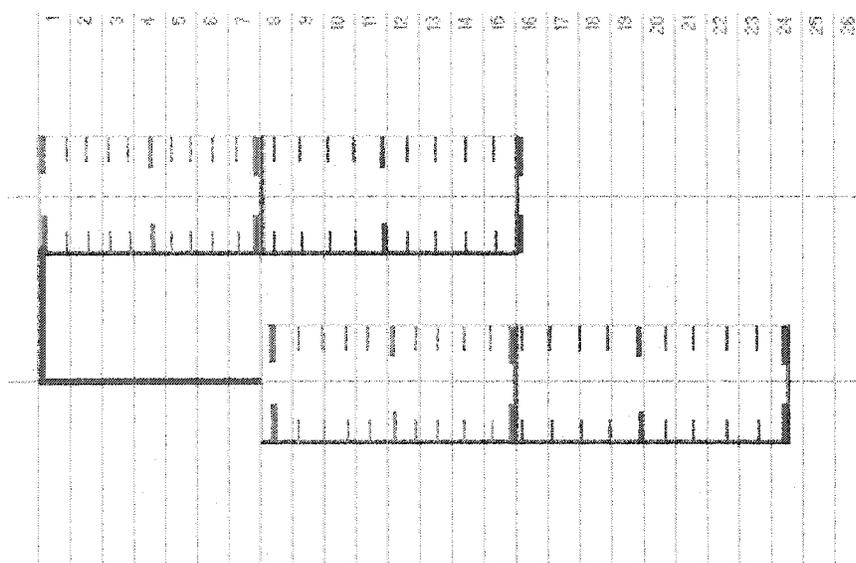


Figure 95 La présentation de l'exemple en utilisant la quantité comme mesure interne

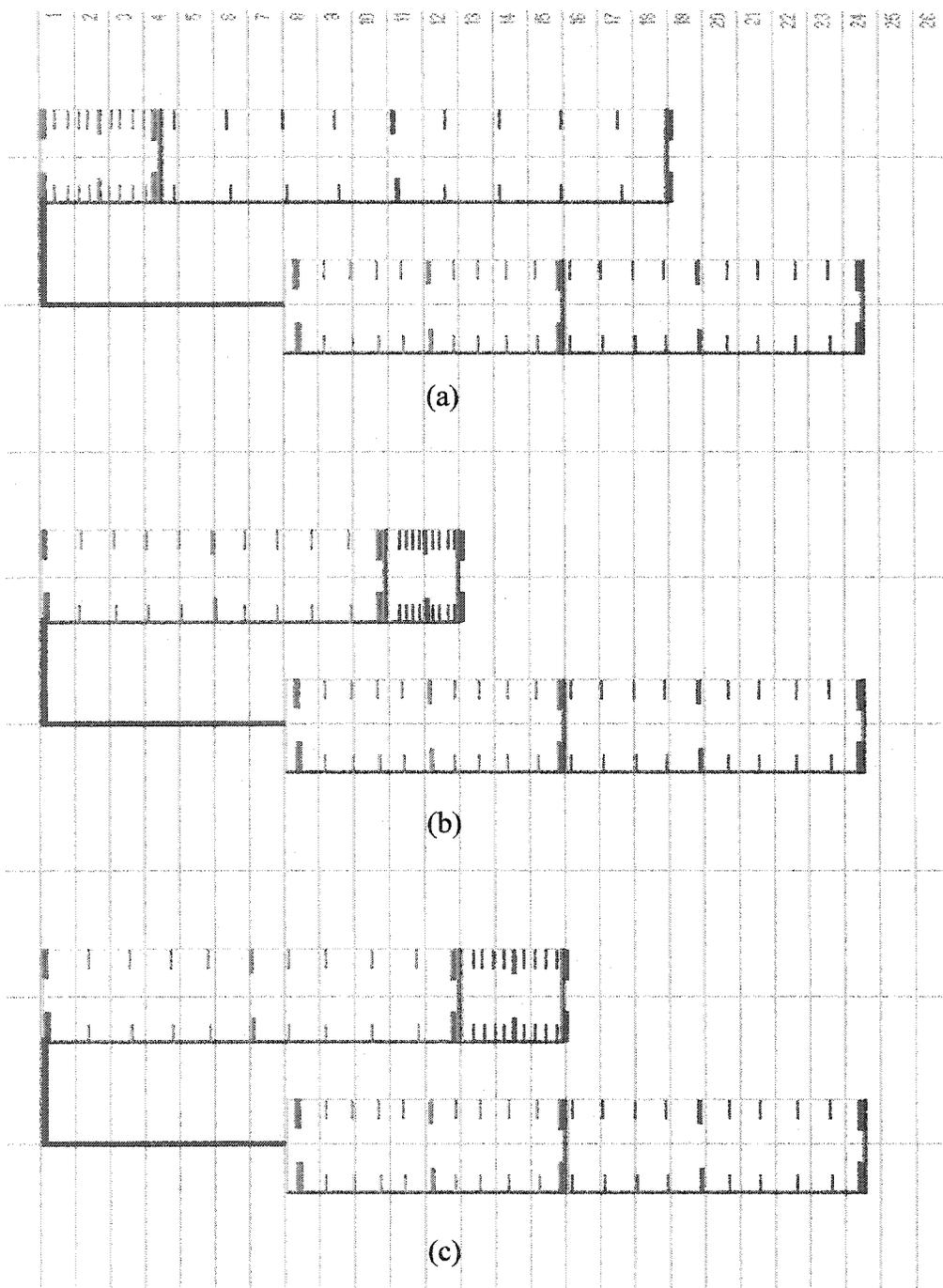


Figure 96 L'effet de la variation de la productivité sur les relations

La *Figure 95* représente l'exemple de la relation *Début/Début* qui utilise un délai pour retarder le début de l'activité successeur. En illustrant les divisions et les mesures internes en fonction des quantités, l'avis défendu par la modélisation *chronographique* devient évident. Pour mieux éclaircir ce point de vue, la figure utilise une couleur distincte pour chaque section. Ces couleurs désignent clairement les dépendances entre les parties de l'activité prédécesseur et les parties correspondantes de l'activité successeur. Les trois exemples de la *Figure 96* démontrent l'effet de la variation de la productivité des différentes divisions de l'activité prédécesseur sur l'activité successeur.

7.2.3 Exemple d'autoadaptation avec la méthode chronographique

La méthode *chronographique* est adaptée à l'utilisation des *fonctions temporaires multiples*. Ainsi, les deux activités de la *Figure 92*, peuvent être liées ensemble avec plus d'une fonction temporaire. Ces liens multiples favorisent une autoadaptation de l'échéancier produit. Les paragraphes suivants introduisent trois exemples de ces relations multiples :

1. La *Figure 97* utilise deux *fonctions temporaires* entre ces deux activités. La première représente une relation *Interne/Début* qui lie la division interne de l'activité *fouilles de fondation* avec le début de l'activité *semelles de fondation*. La deuxième est une fonction temporaire *Fin/Interne* entre la fin de la première activité et la décomposition interne de la deuxième activité.

Si l'activité *fouilles de fondation* prend du retard après le démarrage de l'activité *semelles de fondation*, cette dernière, à cause de la *fonction temporaire Fin/Interne*, verra sa fin retardée. Le gestionnaire aura le choix d'interrompre l'exécution de l'activité *semelles de fondation* ou d'augmenter sa durée en changeant la charge de travail.

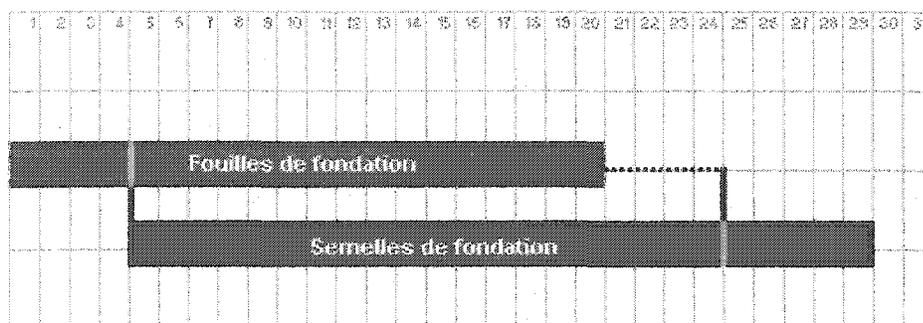


Figure 97 Autoadaptation avec deux fonctions temporaires

2. La Figure 98 présente des *délais maximaux exigés* qui sont ajoutés aux *fonctions temporaires* pour limiter les dates au plus tard de l'activité *semelles de fondation*. Ces exigences maximales ont pour but de limiter tout retard du bétonnage après le nettoyage des fouilles;

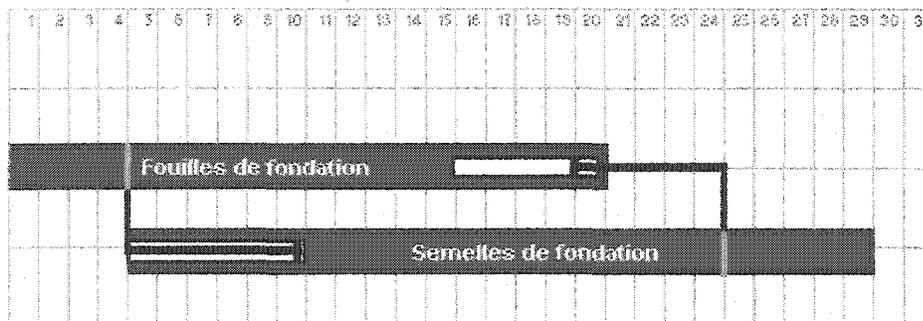


Figure 98 Autoadaptation et exigences d'exécution

3. La Figure 99 représente le cas d'un suivi interne d'avancement. Ainsi, chaque tranche de l'activité *béton de propreté* sera reliée à la tranche correspondante de l'activité *fouilles de fondation* favorisant, ainsi, un suivi rigoureux et une autoadaptation aux changements.

Dans ce cas, le gestionnaire n'aura pas à vérifier la quantité de fouilles prêtes à chaque étape. L'application informatique s'occupera de ces vérifications et obligera une interruption du travail dans l'activité *semelles de fondation* si nécessaire.

Cet exemple de suivi d'avancement interne est bien éclairci avec les *Figure 100 et 101*. Ces deux figures démontrent les mesures internes en fonction des quantités. Elles indiquent aussi l'effet de tout changement de productivité de chaque tranche de la première activité sur les divisions internes de la deuxième activité.

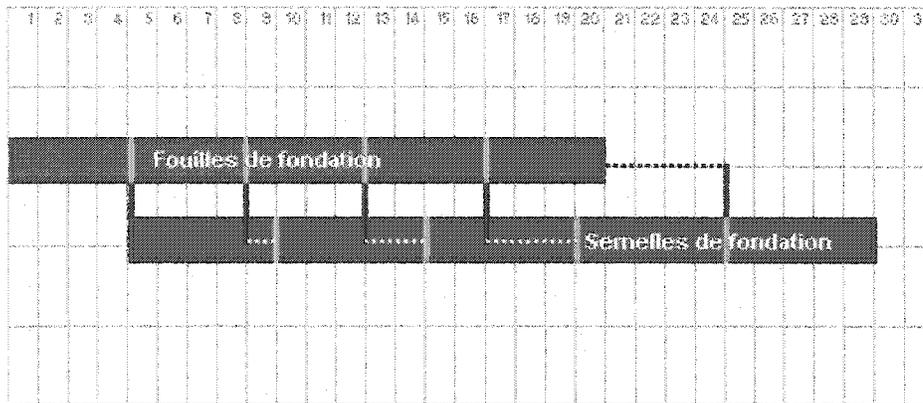


Figure 99 Suivi interne d'avancement et autoadaptation

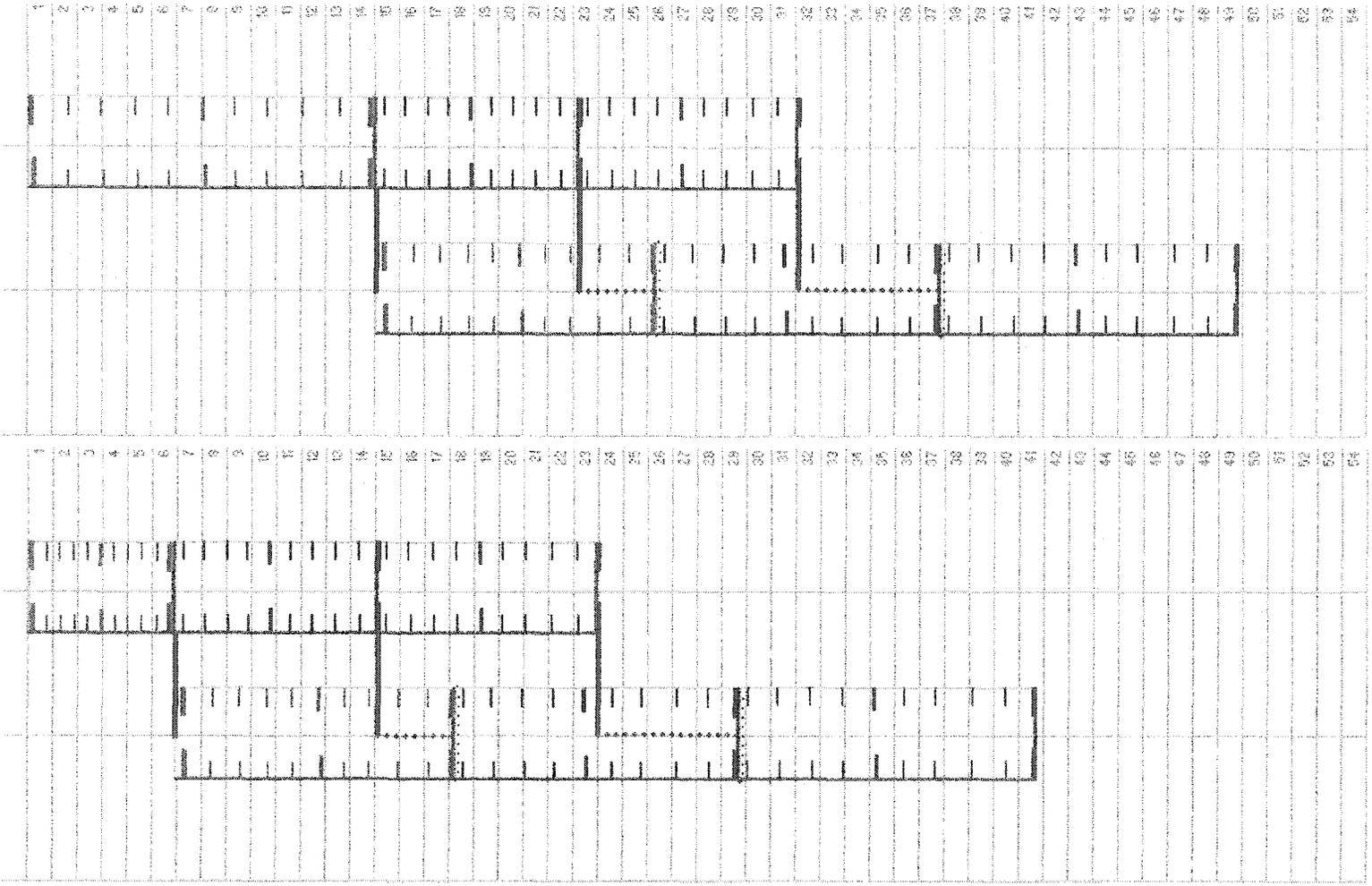


Figure 100 Suivi interne d'avancement et autoadaptation - 2

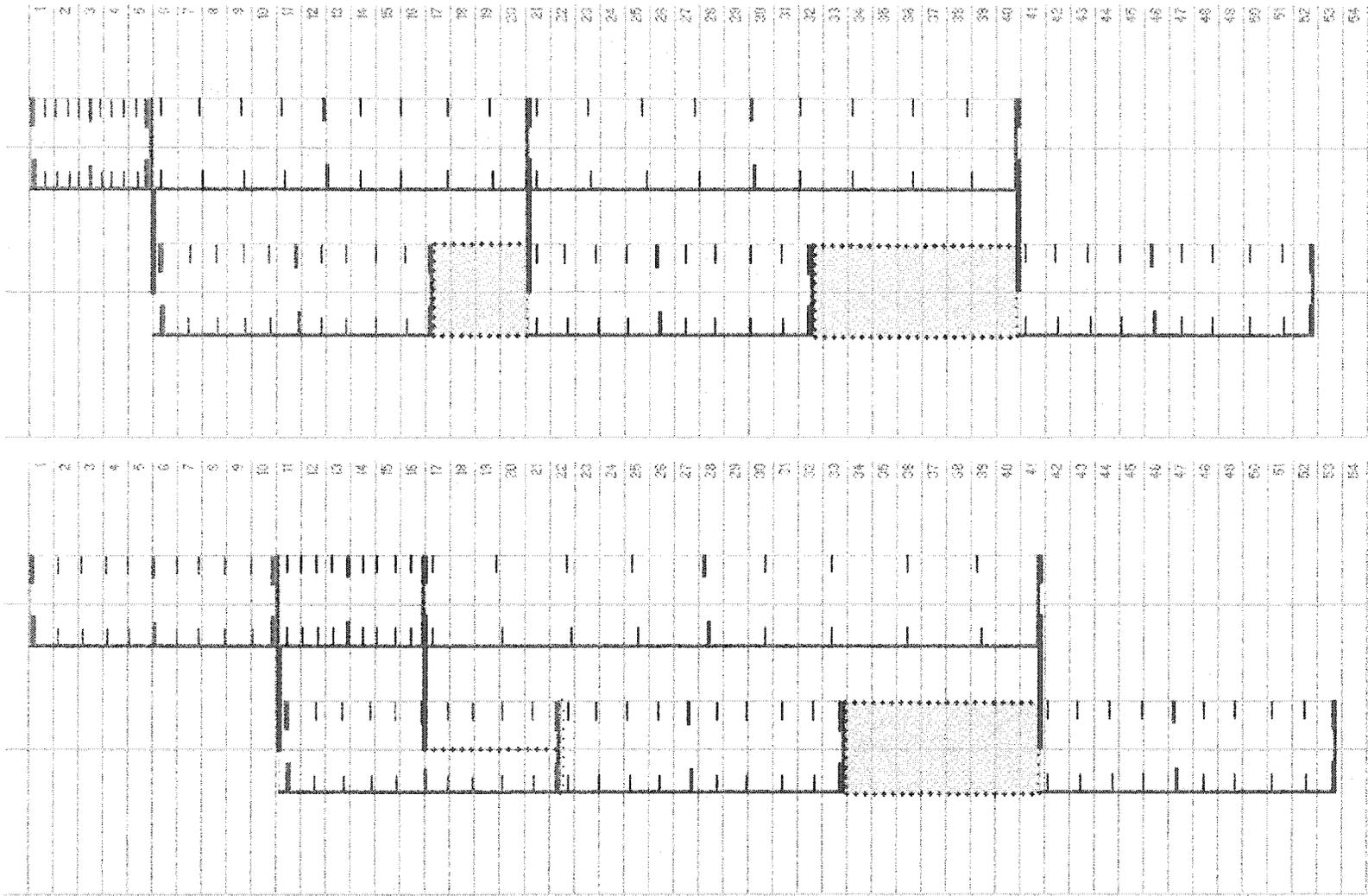


Figure 101 Suivi interne d'avancement et autoadaptation - 3

L'application informatique pourra toujours augmenter la durée de la deuxième activité en changeant la productivité de la main-d'œuvre si toutes les conditions suivantes sont réalisées :

- La constitution des équipes permet le changement de la productivité;
- La quantité de fouilles exécutées reste suffisante pour ne pas retarder le travail des équipes de l'activité *semelles de fondation*;
- Les options choisies par le gestionnaire permettent au système de changer la productivité.

Pour pouvoir s'autoadapter aux changements, les méthodes classiques doivent être très détaillées voir *Figure 102 (a) et (b)*. Dans ces deux figures, chacune des deux activités est découpée en plusieurs activités pour pouvoir montrer des relations entre les différentes partitions. Avec un tel niveau de détail, ces représentations sont complexes. Pour cela, les méthodes qui ne sont pas démontrées à l'échelle du temps et qui n'acceptent pas les divisions et les relations internes, représentent difficilement la planification des projets même pour des projets de taille moyenne.

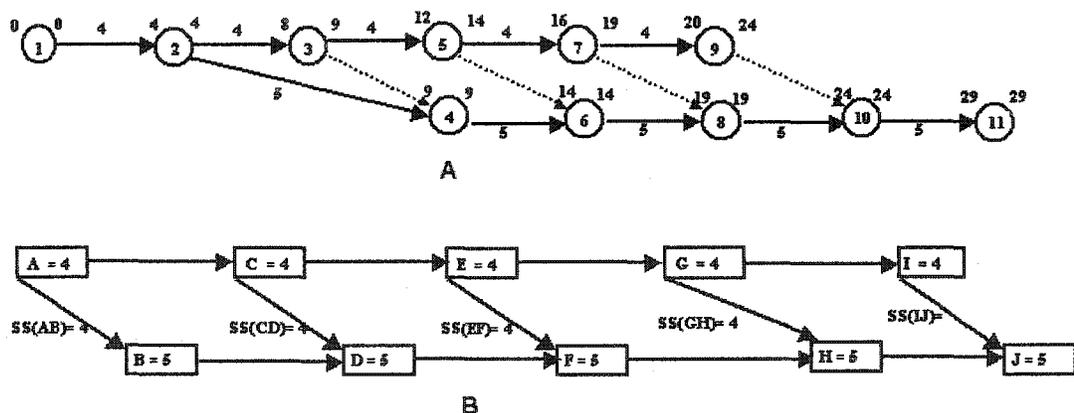


Figure 102 Les méthodes classiques et l'autoadaptation

7.3 Les incertitudes d'exécution

7.3.1 Introduction

Conformément aux concepts de la modélisation *chronographique*, l'ordonnancement produit devrait être principalement orienté vers une approche déterministe, tout en favorisant tous les éléments nécessaires à l'application des diverses probabilités.

Les sections précédentes ont analysé la méthode *chronographique* comme une modélisation déterministe. Ainsi, tous les aspects développés, ont été analysés dans un monde certain dans lequel aucune probabilité n'est prise en considération.

Bien que les méthodes déterministes soient importantes dans la planification des projets de construction, l'utilisation des méthodes probabilistes et généralisées sont de plus en plus nécessaires. Pour cela, cette section est consacrée à cette fin.

La littérature revue, dans la *section 2.5.3 : Les méthodes d'ordonnancement généralisées*, fait état de plusieurs méthodes capables de traiter des probabilités liées à l'ordonnancement des tâches. Malheureusement, et à notre connaissance, toutes les solutions revues étaient incompatibles avec une représentation à l'échelle du temps.

La méthode *chronographique* étant basée sur ce type de modélisation, un développement était donc nécessaire. Ce chapitre traite deux types d'incertitudes liées aux projets, notamment :

1. La sélection entre les diverses alternatives d'exécution, de fabrication ou d'approvisionnement;
2. L'analyse des résultats douteux ou incertains.

7.3.2 Alternative d'exécution et point de décision

7.3.2.1 Objectif de développement

Dans les constructions complexes, les projets dits flous ou les projets réalisés en ingénierie simultanée, plusieurs informations nécessaires au dimensionnement de l'ouvrage peuvent être incomplètes ou incertaines durant la phase d'étude préliminaire.

Pour remédier à cette situation, les concepteurs, proposent plusieurs alternatives d'exécution. On pourra retarder le choix entre ces alternatives afin qu'il soit pris en fonction des exigences de la situation. Les méthodes graphiques dites généralisées représentent ces alternatives dans un seul graphe. Le choix entre elles se fait par des points de décision séparés des activités.

Avec la méthode *chronographique*, représentée à l'échelle du temps, l'utilisation d'un point de décision dessiné séparément peut nuire à la modélisation. Représenter ces points de décision par des fonctions temporaires intégrées aux activités s'avère une solution acceptable.

7.3.2.2 La modélisation chronographique et le choix entre les alternatives

L'exemple de la *Figure 103* démontre le processus de modélisation des incertitudes d'exécution avec la méthode *chronographique*. Cet exemple analyse une situation où trois alternatives d'exécution existent, à savoir :

- Alternative 1 : sera exécutée via les *activités 2 et 3*;
- Alternative 2 : utilisera les *activités 2/1 et 2/2*;
- Alternative 3 : emploiera les *activités 3/1 et 3/2*.

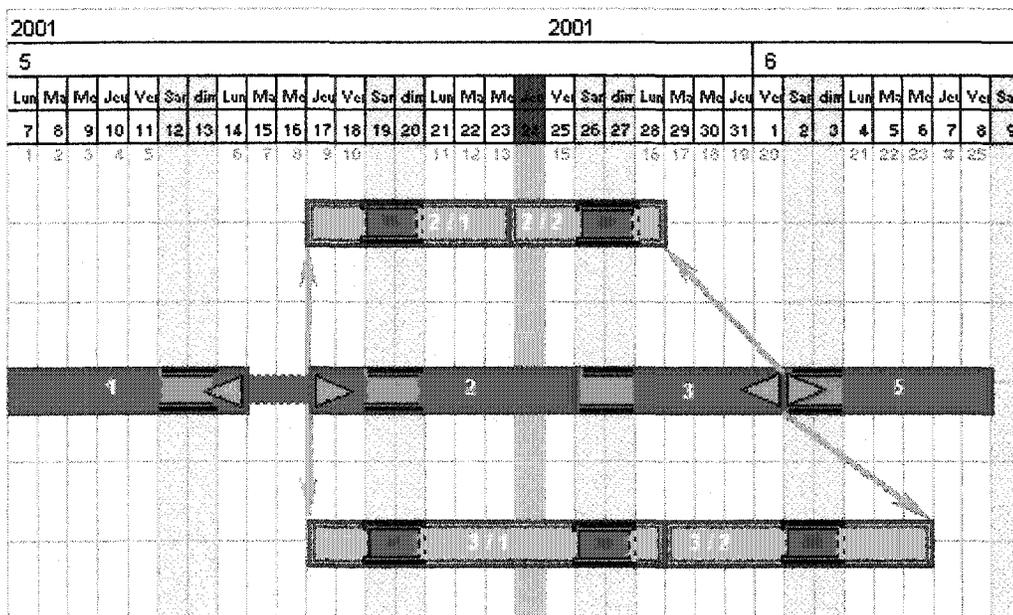


Figure 103 Alternative d'exécution et point de décision

L'*alternative 1*, étant la plus probable, selon l'avis des concepteurs, elle est intégrée dans le réseau. Les deux autres alternatives sont mises en attente. Ainsi, elles sont représentées graphiquement avec des attributs différents.

Les points de décision sont représentés graphiquement par des têtes de flèches. Ces têtes de flèches sont intégrées avec les activités 1, 2, 3 et 5. Celles dessinées à la fin de l'activité 1 et au début de l'activité 5 déterminent l'existence de plusieurs alternatives d'exécution. Ainsi, une décision doit être prise lors de l'exécution. Celles existantes dans le début de l'activité 2 et à la fin de l'activité 3 déterminent l'alternative choisie temporairement lors de la planification. La durée de cette alternative est prise en considération lors du calcul du chemin critique.

7.3.2.3 Influence du choix d'une alternative sur le projet

Dans l'exemple précédent, la durée du projet a été calculée en fonction de l'alternative retenue lors de la conception. Ainsi, si durant l'exécution une des deux autres alternatives est choisie, la durée du projet devrait probablement changer. Avec un tel processus, la confiance au résultat produit diminue étant donné que la méthode a complètement négligé l'effet des deux autres alternatives sur la durée et le coût du projet.

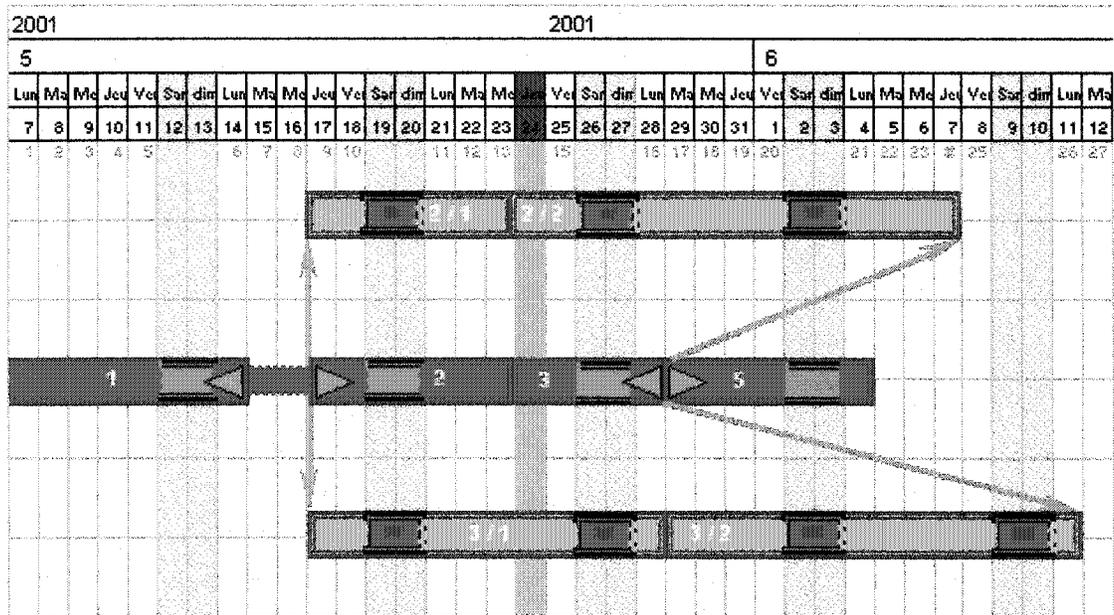


Figure 104 Influence du choix d'une alternative sur le projet

La *Figure 104* représente un exemple de choix entre trois alternatives avec des durées respectives de 8, 16 et 18 jours. La probabilité que chacune d'elles soit choisie est consécutivement de 40 %, 35 % et de 25 %. Ainsi, selon le processus démontré dans le premier exemple, l'alternative 1, composé des deux *activités 2 et 3* est considérée dans le calcul de la durée du projet.

Avec ce processus, le projet se trouve avec 60 % de chance qu'une des deux autres activités soit exécutée. Ce qui signifie une probabilité de 60 % des chances que la durée de cette section ait au moins doublé.

Ce processus a aussi complètement négligé l'effet du coût associé à chaque alternative. Bien que le choix entre les alternatives se fasse en considérant les durées et les coûts, la modélisation doit permettre l'analyse de ces deux facteurs.

7.3.2.4 Ajustement de la durée et du coût d'exécution en fonction des probabilités des alternatives

Reprenons l'exemple précédent avec les données du *Tableau II*.

Tableau II
Alternatives, durées et probabilités

Alternatives	Activités	Durée	Probabilité
Alternative 1	Activités 2 et 3	12 j	0.6
Alternative 2	Activités 2/1 et 2/2	8 j	0.1
Alternative 3	Activités 3/1 et 3/2	15 j	0.3

La durée la plus probable est calculée par la somme des produits de la durée de chacune des activités par sa probabilité respective, soit :

$$12 \times 0.6 + 8 \times 0.1 + 15 \times 0.3 = 12.5 \text{ jours}$$

La différence entre la durée de l'alternative choisie et la durée la plus probable représente la durée d'incertitude existante. Cette durée est représentée par une *Fonction temporaire* indépendante appelée *entité de probabilité*. Cette entité sert à ajuster la durée globale du projet en fonction de la durée d'incertitude existante. Une *entité de probabilité* est représentée graphiquement par un ressort *Figure 105*.

Le coût le plus probable est la somme des produits du coût de chaque alternative par sa probabilité respective. La différence entre le coût le plus probable et le coût de l'alternative choisie est associée à l'*entité de probabilité*.

La *Figure 106* représente un cas dans laquelle la durée de l'activité choisie est inférieure à la durée la plus probable. Dans une telle situation, le choix d'une autre alternative peut influencer positivement la durée totale du projet. Pour cela l'*entité de probabilité* est dessinée inversée pour ajuster la durée du projet à la baisse. Cette entité comportera aussi la différence du coût, qu'il soit positif ou négatif.

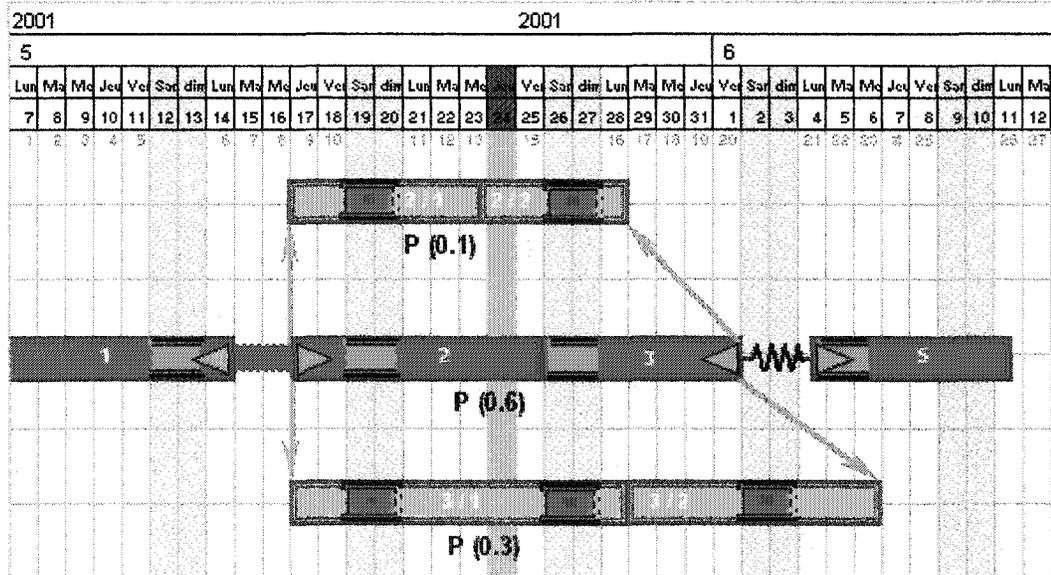


Figure 105 Ajustement de la durée d'exécution en fonction des probabilités des alternatives

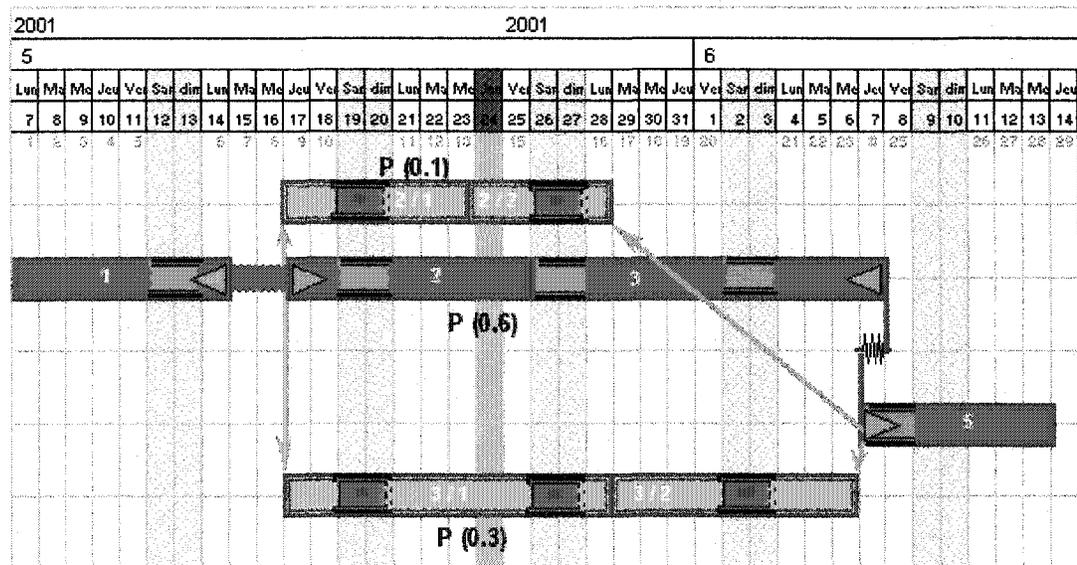


Figure 106 Entité de probabilité négative

7.3.3 Les résultats douteux

Durant la conception ou l'exécution des projets, certaines incertitudes peuvent être associées à la qualité attendue. Dans cette situation, une partie ou la totalité de l'activité concernée doit être refaite en fonction du résultat obtenu. Les quatre exemples de la *Figure 107* représentent des situations où le résultat est douteux.

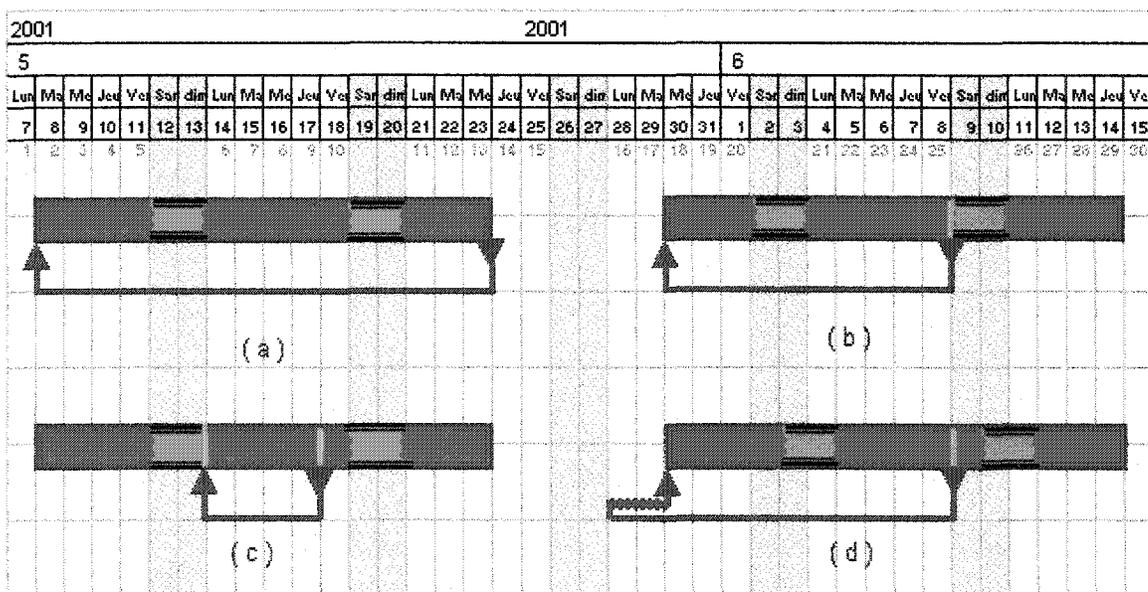


Figure 107 Les résultats douteux

1. L'exemple « a » peut démontrer une expérience où un test qui doit être repris dès le début si le résultat ne correspond pas aux attentes.
2. L'exemple « b » peut simuler la production d'une esquisse d'un plan d'une maison. L'architecte doit redémarrer l'essai chaque fois qu'il croit qu'il n'aura pas la solution voulue.

3. L'exemple « c » peut représenter le cas d'une activité de peinture. Le superviseur peut exiger une couche de base supplémentaire avant l'application de la couche finale en se basant sur le résultat obtenu avant l'application de cette dernière.
4. L'exemple « d » peut représenter l'ajout d'une pièce dans un processus de montage manuel d'un équipement. Ainsi, si l'installation est incorrecte, une tâche supplémentaire de démantèlement de la pièce doit être ajoutée.

La modélisation *chronographique* étant planifiée à l'échelle du temps, les durées supplémentaires générées par les résultats douteux doivent être représentées graphiquement.

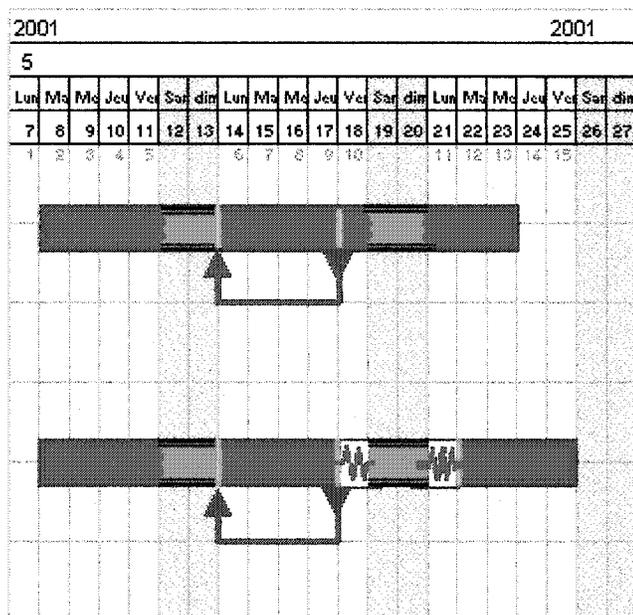


Figure 108 Présentation graphique des résultats douteux

Reprenons l'exemple « c » de la figure précédente. La décision du superviseur d'augmenter le nombre de couches de peinture doit générer des durées et des coûts supplémentaires. En supposant que la probabilité d'occurrence de cette décision est

d'une fois sur deux, cela veut dire qu'un pourcentage de 50 % de la durée et du coût de cette couche doit être pris en considération.

La *Figure 108* représente graphiquement ce résultat. La durée de la couche supplémentaire étant de 4 jours, la durée de l'activité doit être augmentée de 2 jours. Cette durée et le coût associé sont représentés toujours à travers la *Fonction temporaire* indépendante appelée *entité de probabilité*.

CHAPITRE 8

LA FORMULATION MATHÉMATIQUE DU CHRONOGRAPHE

8.1 Calcul des limites temporelles pour une activité

8.1.1 Codification

On considère un ensemble dénombrable $X_{(N, S, D)} = \{x_{(1, S\xi_1, D_1)}, x_{(2, S\xi_2, D_2)}, \dots, x_{(l, S\xi_l, D_l)}, \dots, x_{(N, S\xi_n, D_n)}\}$. À chaque élément I de $X_{(N, S, D)}$ on fait correspondre une barre flottante numéro N dans le plan allant du S_{ξ_i} qui représente la date de début de cet élément, à F_{ξ_i} représentant sa date de fin. La variable ξ peut prendre une des trois valeurs suivantes : au plus tôt, au plus tard ou réel. La valeur de F_{ξ_i} est calculée par la somme de S_{ξ_i} et D_i qui représente la durée de l'activité. À cette valeur, les jours fériés doivent être ajoutés.

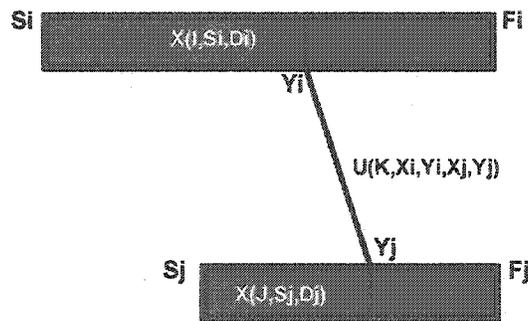


Figure 109 Formulation mathématique des
activités et fonctions temporaires

Une branche directrice $u_{(k, x_i, y_i, x_j, y_j)}$ peut exister entre deux barres flottantes $x_{(l, S_{\xi_l}, D_l)}$ et $x_{(j, S_{\xi_j}, D_j)} \in X_{(N, S, D)}$, allant d'un certain emplacement y_i qui représente le numéro d'une division se trouvant sur $x_{(l, S_{\xi_l}, D_l)}$ vers un autre emplacement y_j sur $x_{(j, S_{\xi_j}, D_j)}$. Ainsi, la

branche directrice numéro k d'un ensemble M relie le point y_i sur la barre flottante numéro x_i qui est dit prédécesseur, au point y_j sur la barre flottante numéro x_j considéré comme successeur. Si $U_{(M, X, Y, X', Y')}$ désigne l'ensemble des branches directrices, on s'accorde à désigner le chronographe par $G = (X_{(N, S, D)}, U_{(M, X, Y, X', Y')})$.

8.1.2 Limites temporelles pour une activité

Dans un projet quelconque, chaque activité est considérée comme une étape dans son processus d'accomplissement. Pour respecter les restrictions de ce processus, les activités évoluent dans un environnement sujet à des contraintes multiples.

Le déplacement dans le temps et le changement de la durée de chaque activité sont contrôlés à travers plusieurs paramètres tels que les fonctions temporaires qui les lient avec les autres activités, la disponibilité des ressources, la gestion des aires de travail, son coût et sa durée respective.

La *Figure 110* identifie des exemples de restrictions contraignant l'évolution dans le temps de l'activité j . Son début au plus tôt et sa fin au plus tard sont déterminés de façon à respecter les contraintes externes et internes avec ses prédécesseurs i_1 et i_2 et ses successeurs k_1 et k_2 .

Ces limites temporelles sont calculées en prenant comme hypothèse que chaque activité peut flotter librement, comme une seule entité, entre son début au plus tôt et sa fin au plus tard.

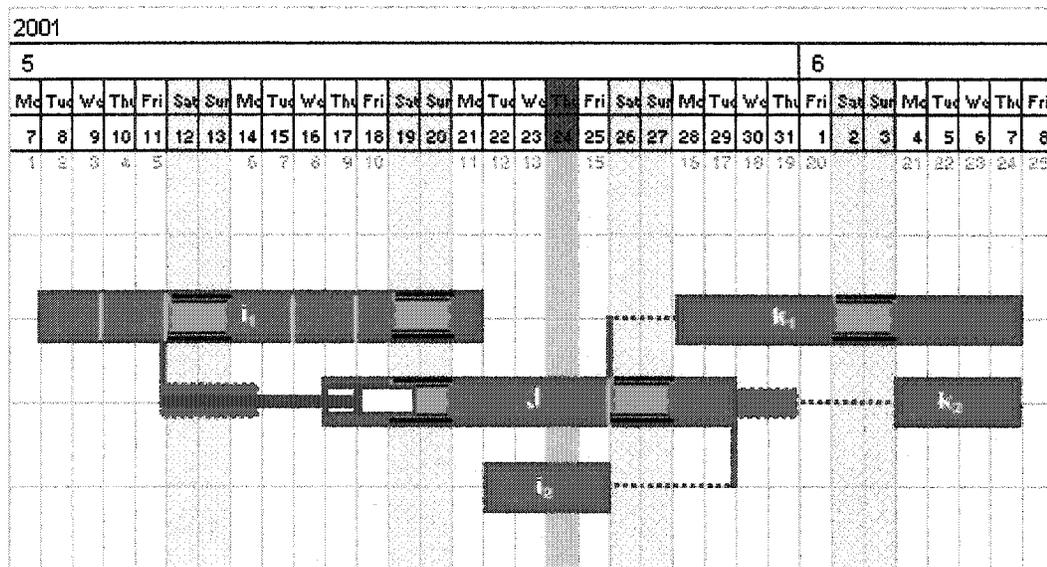


Figure 110 L'environnement d'une activité

Selon cette hypothèse, la date du début au plus tôt de l'activité j est égale à la date maximale calculée à travers l'une des deux contraintes suivantes :

1. Sa relation interne/début avec son prédécesseur i_1 : la date de la fin au plus tôt de la deuxième décomposition de l'activité i_1 augmentée du délai d'exigence minimale;
2. Sa relation fin/fin avec l'activité i_2 : La date de la fin au plus tôt de l'activité i_2 diminuée de la durée de l'activité j .

La date de la fin au plus tard de l'activité j est égale à la date minimale déterminée à travers l'une des trois relations suivantes :

1. Sa relation interne/début avec l'activité k_1 : La date au plus tard du début de l'activité k_1 augmentée de la durée entre la décomposition interne de l'activité j et sa fin;
2. Sa relation fin/début avec l'activité k_2 : La date au plus tard du début de l'activité k_2 diminuée de la durée du délai d'exigence minimale concerné par cette relation;
3. Sa relation interne/début avec l'activité i_1 : La date de la fin au plus tard de la deuxième décomposition de l'activité i_1 augmentée du délai d'exigence maximale et de la durée de l'activité j .

Le début ou la fin au plus tard d'une activité peut être déterminé, non seulement avec des relations successeurs, mais aussi avec des relations prédécesseurs contenant des délais d'exigences maximaux.

La formulation mathématique pour le calcul du début au plus tôt et de la fin au plus tard est démontrée dans la partie qui suit.

Sachant que :

ES = Début au plus tôt

EF = Fin au plus tôt

AS = Début réel

AF = Fin réelle

LS	= Début au plus tard
LF	= Fin au plus tard
Lag	= Délai d'exigence minimal entre deux activités
Lagmax	= Délai d'exigence maximal entre deux activités
F/S	= Fonction temporaire Fin / Début
S/S	= Fonction temporaire Début / Début
F/F	= Fonction temporaire Fin / Fin
Adv	= Fonction temporaire Externe / Interne ou Interne / Interne
T	= Temps d'exécution d'une activité
D	= Délai entre le début de l'activité et la décomposition interne concernée
J	= Activité actuelle
P(j)	= Ensemble des prédécesseurs immédiats de l'activité <i>j</i>
S(j)	= Ensemble des successeurs immédiats de l'activité <i>j</i>
SP(j)	= Ensemble des prédécesseurs immédiats du début de l'activité <i>j</i>
SS(j)	= Ensemble des successeurs immédiats du début de l'activité <i>j</i>
FP(j)	= Ensemble des prédécesseurs immédiats de la fin de l'activité <i>j</i>
FS(j)	= Ensemble des successeurs immédiats de la fin de l'activité <i>j</i>
DDP	= Date de début du projet
DFP	= Date de fin du projet

8.1.3 Calcul du début au plus tôt (ES)

Soit i l'activité qui donne la date maximale et qui est le prédécesseur immédiat de l'activité j .

Sachant que : $EF(j) = ES(j) + T_j - 1$

Le début au plus tôt d'une activité est égal à :

$$ES(j) = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Max}_{i \in P(j)} (EF(i) + \text{Lag}_{ij} + 1) \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Max}_{i \in P(j)} (ES(i) + \text{Lag}_{ij}) \\ \text{F/F} \rightarrow \text{Max}_{i \in P(j)} (EF(i) + \text{Lag}_{ij} + 1 - T_j) \\ \text{Adv} \rightarrow \text{Max}_{i \in P(j)} (ES(i) + D(i) + \text{Lag}_{ij} - D_j) \\ \text{P}(j) = 0 \rightarrow \text{DDP} \end{array} \right.$$

Cette formule peut être simplifiée à :

$$ES(j) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Max}_{i \in P(j)} (ES(i) + D(i) + \text{Lag}_{ij} - D_j) \\ \text{P}(j) = 0 \rightarrow \text{DDP} \end{array} \right.$$

En considérant que :

$D = \text{zéro}$

si la fonction temporaire de l'activité est Début

$D = T$

si la fonction temporaire de l'activité est Fin

8.1.4 Calcul de la fin au plus tard (LF)

Soit :

k = l'activité qui donne la date minimale et qui est le successeur immédiat de l'activité j

i = l'activité qui donne la date minimale et qui est le prédécesseur immédiat de l'activité j et qui possède avec elle une fonction temporaire limitée par un délai maximum

Sachant que : $LS(j) = LF(j) - T_j + 1$

La fin au plus tard d'une activité est égale à :

$$LF(j) = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Min} (LS(k) - \text{Lag}_{jk} - 1) \\ \quad \quad \quad k \in S(j) \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Min} (LS(k) - \text{Lag}_{jk} + T_j - 1) \\ \quad \quad \quad k \in S(j) \\ \text{F/F} \rightarrow \text{Min} (LF(k) - \text{Lag}_{jk}) \\ \quad \quad \quad k \in S(j) \\ \text{Adv} \rightarrow \text{Min} (LS(k) + D(k) - \text{Lag}_{jk} \\ \quad \quad \quad k \in S(j) \quad \quad \quad + (T_j - D_j) - 1) \\ \text{S}(j) = 0 \quad \quad \quad \rightarrow \quad \text{DFP} \end{array} \right\} \leq \text{Min}_{i \in P(j)} (LS(i) + D(i) + \text{Lag}_{maxij} + (T_j - D_j) - 1)$$

Cette formule peut être simplifiée à :

$$LF(j) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Min} (LS(k) + D(k) + \text{Lag}_{jk} \\ \quad \quad \quad k \in S(j) \quad \quad \quad + (T_j - D_j) - 1) \\ \text{S}(j) = 0 \quad \quad \quad \rightarrow \quad \text{DFP} \end{array} \right\} \leq \text{Min}_{i \in P(j)} (LS(i) + D(i) + \text{Lag}_{maxij} + (T_i - D_j) - 1)$$

En considérant que :

$D = \text{zéro}$

si la fonction temporaire de l'activité est Début

$D = T$

si la fonction temporaire de l'activité est Fin.

8.2 Les différents types de marges connues

Selon notre connaissance, il existe actuellement quatre types de marges : *La marge totale*, *la marge libre*, *la marge indépendante* et *la marge d'interférence*. La Figure 111 retrace ces quatre types de marge.

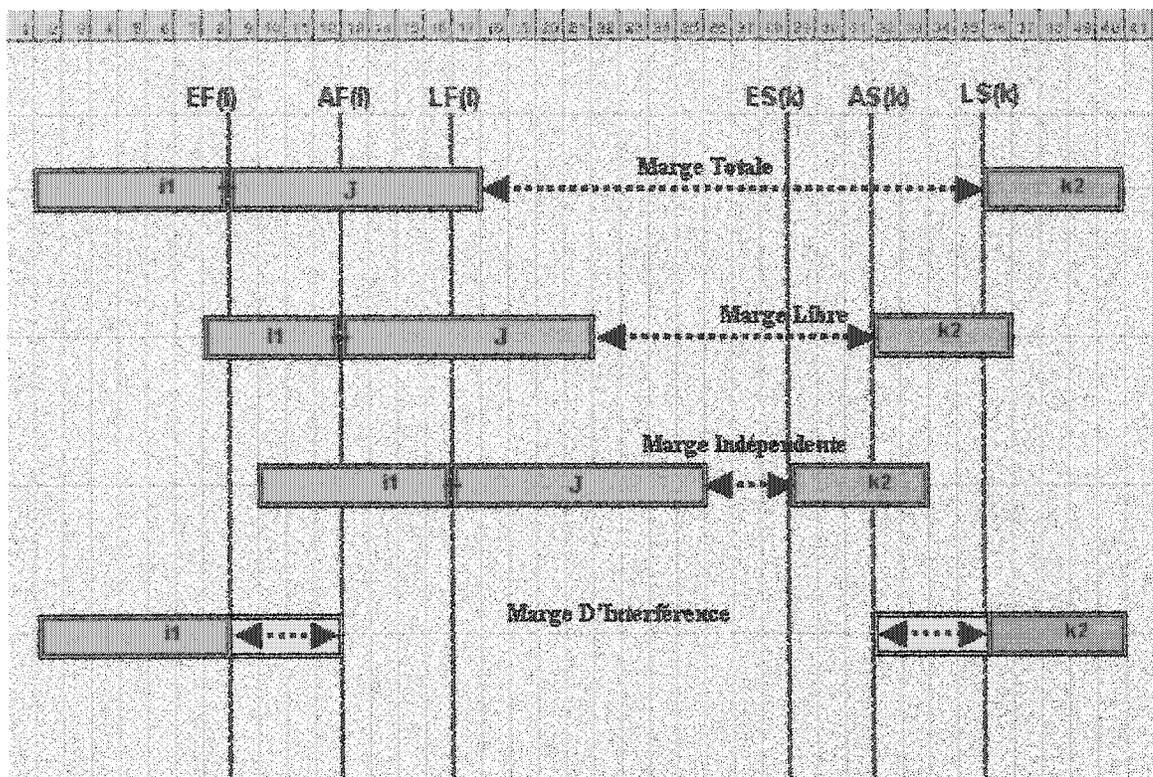


Figure 111 Marges Totale, Libre, Indépendante et d'Interférence

- La *Marge Totale* (TS) définit le délai permis à l'activité pour ne pas retarder le projet au complet. La marge totale concerne toute la chaîne d'activité du début jusqu'à la fin du projet. Dans la figure ci-dessus, la *Marge Totale* est calculée par

la différence entre le début au plus tard de K_2 et la fin au plus tôt de I_1 moins la durée de l'activité J .

- La Marge Libre (FS) est le délai permis à l'activité J pour ne pas retarder toute autre activité. Cette marge concerne seulement l'activité en cours. Traditionnellement, cette marge est calculée par la différence entre le début au plus tôt de K_2 et la fin au plus tôt de I_1 moins la durée de l'activité J .

Durant les phases de planification ou de suivi d'avancement le responsable peut pour des fins de gestion de surface, de nivellement de ressources ou autres retarder le début de l'activité J . Pour cela, cette thèse suggère la marginalisation de cette marge. Ainsi, la marge libre est calculée par la différence entre le début réel de K_2 et la fin réelle de I_1 moins la durée de l'activité J , sachant que la date réelle peut être une date au plus tôt, une date au plus tard ou une date quelconque entre ces deux dernières valeurs. Ainsi la marge libre possède une valeur maximale équivalente à la marge totale et une valeur minimale égale à la marge indépendante.

- La *Marge Indépendante* (IF) délimite le délai permis à l'activité J indépendamment de toute autre activité. Elle concerne dans son intégrité l'activité en question, soit l'activité J dans la figure ci-dessus. Dans cette figure, elle est calculée par la différence entre le début au plus tôt de K_2 et la fin au plus tard de I_1 moins la durée de l'activité
- La *Marge d'interférence* (IS) est la différence entre la marge totale et la marge libre. Elle concerne toute une chaîne d'activités. Ainsi, si une activité utilise une partie de cette marge, elle diminue le délai restant pour toutes les autres activités sur cette chaîne.

$$\text{Marge d'interférence} = \quad TS_j \quad - \quad FS_j$$

$$\begin{aligned}
&= (LS_{k2} - EF_{i1} - D_j) - (AS_{k2} - AF_{i1} - D_j) \\
&= LS_{k2} - EF_{i1} - D_j - AS_{k2} + AF_{i1} + D_j \\
&= (LS_{k2} - AS_{k2}) + (AF_{i1} - EF_{i1})
\end{aligned}$$

La *Marge d'interférence* est donc la somme de : la différence entre le début au plus tard et le début réel du successeur; et la différence entre la fin réelle et la fin au plus tôt du prédécesseur. Elle est donc indépendante de la durée de l'activité autant que cette dernière n'a pas dépassé sa marge libre.

8.3 Les diverses marges utilisées par la méthode chronographique

8.3.1 La nécessité de la création de nouvelles marges

Dans la section 8.1.2 l'hypothèse considérait que chaque activité pouvait flotter librement entre son début au plus tôt et sa fin au plus tard. Cette hypothèse est seulement valide pour les méthodes traditionnelles qui considèrent chaque activité comme une seule entité.

En réalité, chaque activité représente un processus d'exécution composé de plusieurs tâches et exécuté sur une période étendue qui peut varier entre une couple d'heures et plusieurs mois. Pour représenter cette réalité, la méthode chronographique accepte les décompositions et les exigences relationnelles internes aux activités et permet les analyses et les suivis internes. Pour cela, chaque activité est limitée par des exigences qui peuvent contraindre différemment son début, sa fin ou même une de ses sections.

Si le gestionnaire décide d'imposer à une certaine activité une durée fixe, la marge correspondante serait équivalente à la plus petite marge. Cela représente le cas actuel avec les marges connues à date. Dans le cas contraire et si la durée de l'activité est mise

en jeu, en variant la charge de travail d'une période à une autre, le gestionnaire pourrait profiter de la marge appropriée de chaque section pour optimiser au mieux son projet.

Ainsi, une deuxième hypothèse est ajoutée préconisant que chaque section d'une activité peut posséder des contraintes différentes du reste de l'activité; son déplacement est donc fonction de ces contraintes. Avec cette hypothèse plusieurs nouveaux types de marges peuvent être identifiés, notamment :

1. La marge complète : attribuée à l'activité au complet,
2. La marge du début : relative au démarrage de l'activité,
3. La marge de fin : qui détermine sa fin,
4. Les marges partielles complètes, débuts et fins : qui concernent chaque section de l'activité.

8.3.2 La marge complète

Une activité possède une marge complète si les fonctions temporaires qui la limitent ne contraignent pas différemment son début, sa fin ou ses sections internes. On considère une activité qui :

1. ne possède aucune fonction temporaire interne;
2. possède une ou plusieurs fonctions temporaires prédécesseurs F/S et/ou S/S avec son début (à condition que ces fonctions temporaires ne possèdent pas des délais maximaux);
3. Possède une ou plusieurs fonctions temporaires successeurs F/S et/ou F/F avec sa fin.

Soit :

K = l'activité qui donne la date minimale et qui est successeur immédiat de la fin de l'activité j .

I = l'activité qui donne la date maximale et qui est prédécesseur immédiat du début de l'activité j .

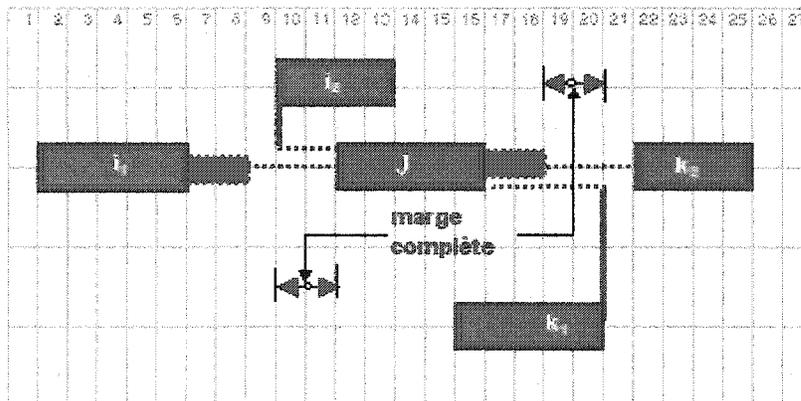


Figure 112 La marge complète

La *Figure 112* montre que les trois conditions précédentes sont toutes réalisées.

1. L'activité j ne possède aucune *fonction temporaire interne* avec d'autres activités;
2. Le début de cette activité n'est limité que par des *fonctions temporaires prédécesseurs* à savoir :
 - Fin / Début avec l'activité i_1 ;
 - Début / Début avec l'activité i_2 .
3. La fin de cette activité n'est limitée que par des *fonctions temporaires successeurs* à savoir :
 - Fin / Fin avec l'activité k_1 ;
 - Fin / Début avec l'activité k_2 .

Pour cela, l'activité j possède une marge complète et toute l'activité peut flotter librement avec son début et sa fin à l'intérieur de cette marge. Cette marge, de quatre jours, indiquée dans la *Figure 112*, représente toute la marge que l'activité j peut utiliser.

Dans cette figure, l'activité j n'a pas profité de toute sa marge complète parce que son démarrage a été retardé. Ainsi, elle profite seulement de deux des quatre jours disponibles et cette marge restante est interprétée comme la marge complète actuelle.

8.3.3 La marge début et la marge fin

Une activité possède une marge début et une autre marge fin si les fonctions temporaires contraignent son début et sa fin différemment. On considère une activité qui possède au minimum avec son début et sa fin :

Une fonction temporaire prédécesseur qui contient un délai maximal

ou

Une fonction temporaire prédécesseur et une autre fonction successeur

Soit :

K = l'activité qui donne la date minimale et qui est successeur immédiat du début ou de la fin de l'activité j .

I = l'activité qui donne la date maximale et qui est prédécesseur immédiat du début ou de la fin de l'activité j .

Lag_{max} = l'activité qui donne la date minimale et qui est prédécesseur immédiat du début ou de la fin de l'activité j et qui possède avec elle une fonction temporaire limitée par un délai maximal exigé.

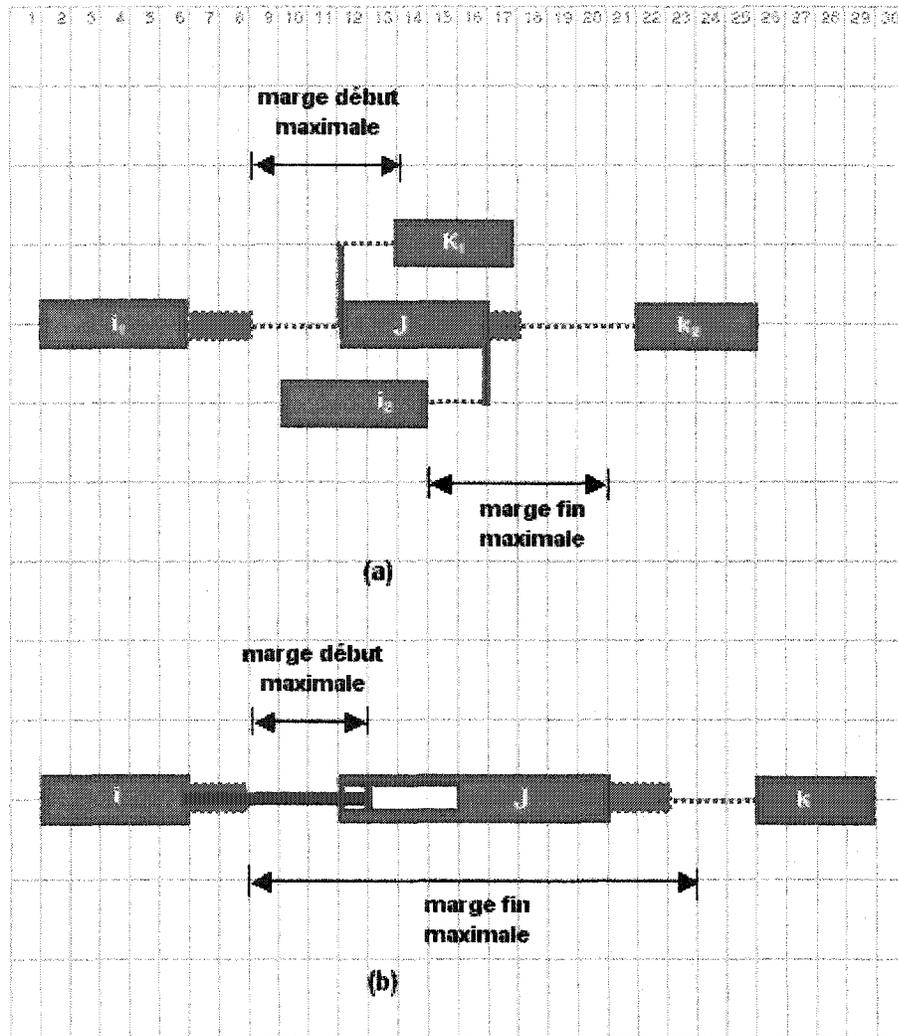


Figure 113 Marge début et marge fin

Dans la *Figure 113.a* le début de l'activité j est limité par une fonction temporaire prédécesseur avec l'activité i_1 et une autre fonction successeur avec l'activité k_1 , le début de l'activité peut donc fluctuer entre la date de fin de son prédécesseur et la date de début de son successeur. La fin de cette même activité fluctue, différemment selon ses propres contraintes, entre la date de fin de son prédécesseur i_2 et la date de début de son successeur k_2 .

Le même raisonnement peut être appliqué à la *Figure 113.b* où le début de l'activité J est limité entre la fin de l'activité i et la durée du délai maximal. La fin de cette activité J n'est limitée que par un successeur k . Ainsi cette fin peut fluctuer entre sa date de fin au plus tôt et le début de l'activité k en considérant la durée de l'activité J égale à zéro.

La marge de fin disponible dans ce deuxième cas est entre le neuvième jour, en considérant que la durée de l'activité est de zéro (0) jour, et le 23^{ème} jour pour considérer les deux jours de délai minimaux à la fin de cette activité. Par contre, sa marge de fin actuelle est de seulement trois (3) jours.

La marge début et la marge fin évoluent indépendamment selon l'évolution de leurs propres contraintes. Les marges montrées, dans la *Figure 113*, présentent les marges maximales pour lesquelles le début ou la fin de l'activité j peut profiter si la durée de l'activité est flexible.

8.3.4 Les marges partielles

Une activité qui possède au minimum une fonction temporaire interne avec une autre activité peut avoir des marges partielles. Les marges partielles concernent seulement la section de l'activité située entre ledit lien interne et le premier lien interne ou externe rencontré. Le reste de l'activité doit dépendre de ses autres liens.

Pour calculer les marges partielles, on doit décomposer l'activité en deux ou en plusieurs sous-activités selon les limites des fonctions temporaires. Pour chaque tranche, on calcule la marge partielle complète, la marge partielle début et la marge partielle fin avec les mêmes formules utilisées pour le calcul des marges complètes, début et fin. Les fonctions temporaires internes étant transformées, pour fin de calcul, en fonctions temporaires externes pour chaque tranche.

8.3.5 Exemple : Réparation d'un pilier d'un pont

8.3.5.1 Présentation du projet

L'exemple suivant montre un échancier simplifié de la réparation d'un pilier du pont Mercier qui relie la Rive-sud à Montréal. Dans cet exemple, la notion des marges partielles est éclaircie.

Dans ce projet deux types de réparations étaient prévus initialement, soit le *béton mis en place* et le *béton projeté*. La démolition des parties dé laminées est exigée dans les deux modes de réparation. De plus, pour le *béton mis en place*, la pose des coffrages est nécessaire tandis que pour le *béton projeté*, il faut renforcer la surface avec un treillis métallique.

Dans ce projet, nous pouvons constater sur le graphe que la démolition est exécutée sur deux phases. La première phase concerne la préparation des travaux de *béton mis en place* du premier au septième jour ouvrable. La deuxième phase envisage la préparation du *béton projeté* pour la période du 23^{ème} au 26^{ème} jour ouvrable. Les travaux de démolition sont donc interrompus entre le 8^{ème} et 22^{ème} jour ouvrable.

8.3.5.2 La méthode chronographique et le projet réparation d'un pilier d'un pont

La planification avec la méthode chronographique présente un avantage pour ce genre de situation. L'utilisation des divisions internes, des relations en fonction des quantités et des différents types de marges sont évidentes.

L'activité *démolition* est divisée en deux étapes. La première est ajustée en fonction des quantités destinées à être bétonnées avec la méthode *béton mis en place* et la deuxième sert à préparer les travaux de *béton projeté*. Les travaux de démolition seront interrompus après que la première étape sera terminée. Une relation Interne/Début existe donc entre la fin de cette première étape et le début de l'activité *coffrage*.

Entre les deux activités *coffrage* et *béton mis en place*, un suivi interne en fonction des quantités existe. Le bétonnage se fait sur plusieurs jours, ainsi il faut s'assurer qu'une quantité suffisante de coffrage est disponible pour chaque coulée. Avec les relations internes, des marges internes sont créées pour chaque section.

Ainsi, nous pouvons constater que la première section de l'activité coffrage est sur le chemin critique, la deuxième possède une marge libre d'une (1) journée tandis que la troisième section peut profiter de deux (2) journées de marge libre. Le gestionnaire, pour optimiser l'utilisation de ces ressources, pourra profiter de la marge disponible pour chaque section.

Pour fin de comparaison et afin de démontrer les avantages de la méthode chronographique, le même projet est planifié à travers les deux méthodes graphiques du chemin critique et le diagramme de Gantt.

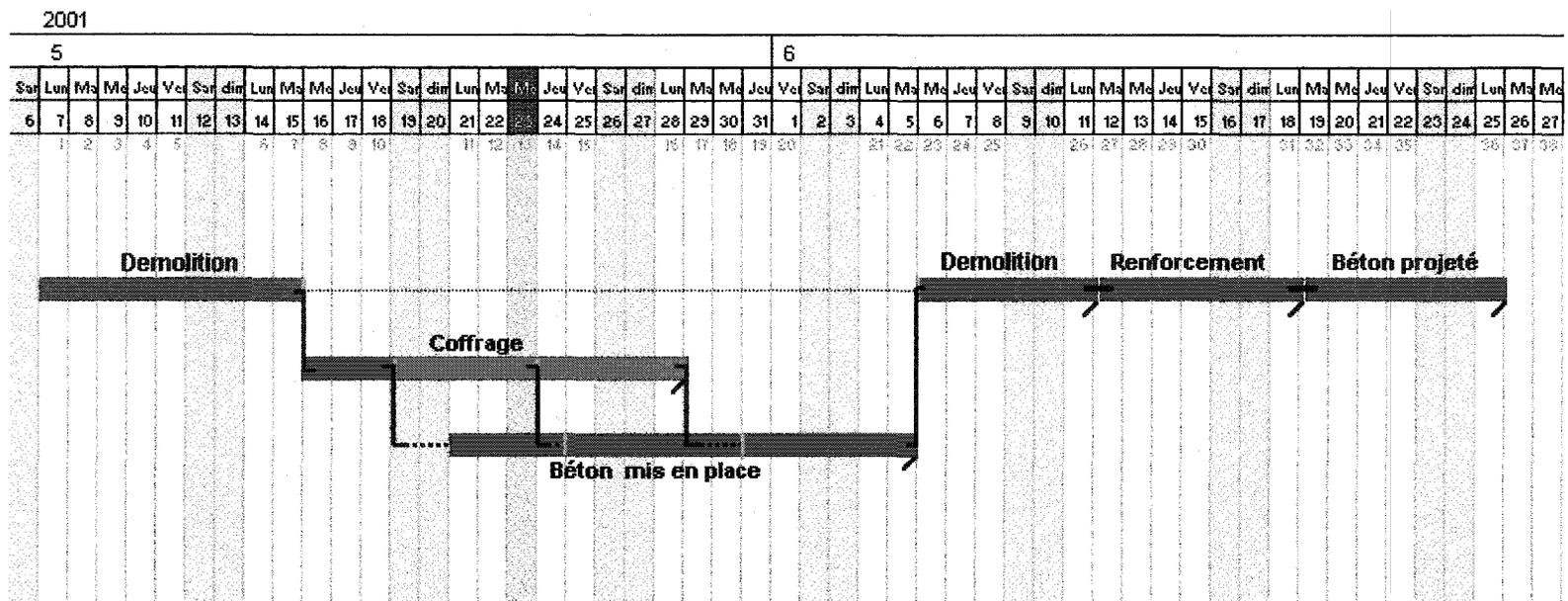


Figure 114

La planification du projet « Réparation d'un pilier » à travers la méthode chronographique

8.3.5.3 Le projet réparation d'un pilier d'un pont à travers les méthodes classiques

Avec la *Méthode des Précédences* ou le *Diagramme de Gantt*, le projet peut être planifié d'une façon simplifiée. Ce type de planification utilise la relation *Début/Début* avec des délais exigés entre le début des activités.

Avec ce type de planification, nous pouvons constater plusieurs anomalies :

1. La première se trouve au niveau du chemin critique qui se trouve inexact. Comparons les deux *Figure 117 et 118*;
2. La deuxième se situe au niveau des délais associés aux relations. Cette anomalie a été discutée à plusieurs reprises;
3. La troisième anomalie est relative à la discontinuité de l'activité démolition qui est faite et qui sera ajustée durant le contrôle d'une façon complètement arbitraire;
4. La dernière concerne le suivi interne d'avancement qui ne peut pas être fait entre les deux activités *coffrage et béton mis en place*.

Les trois méthodes, notamment, la *Précédences Figure 115*, l'*ADM Figure 116* et le *Diagramme de Gantt* peuvent être utilisées pour faire la planification d'une façon détaillée. Avec ces présentations, les anomalies rencontrées avec la planification simplifiée sont évitées; par contre, la visualisation devient plus complexe. Cette complexité est déjà discutée dans des chapitres précédents. Ainsi, nous pouvons reconfirmer la difficulté de l'utilisation de ces représentations même pour des projets de taille moyenne.

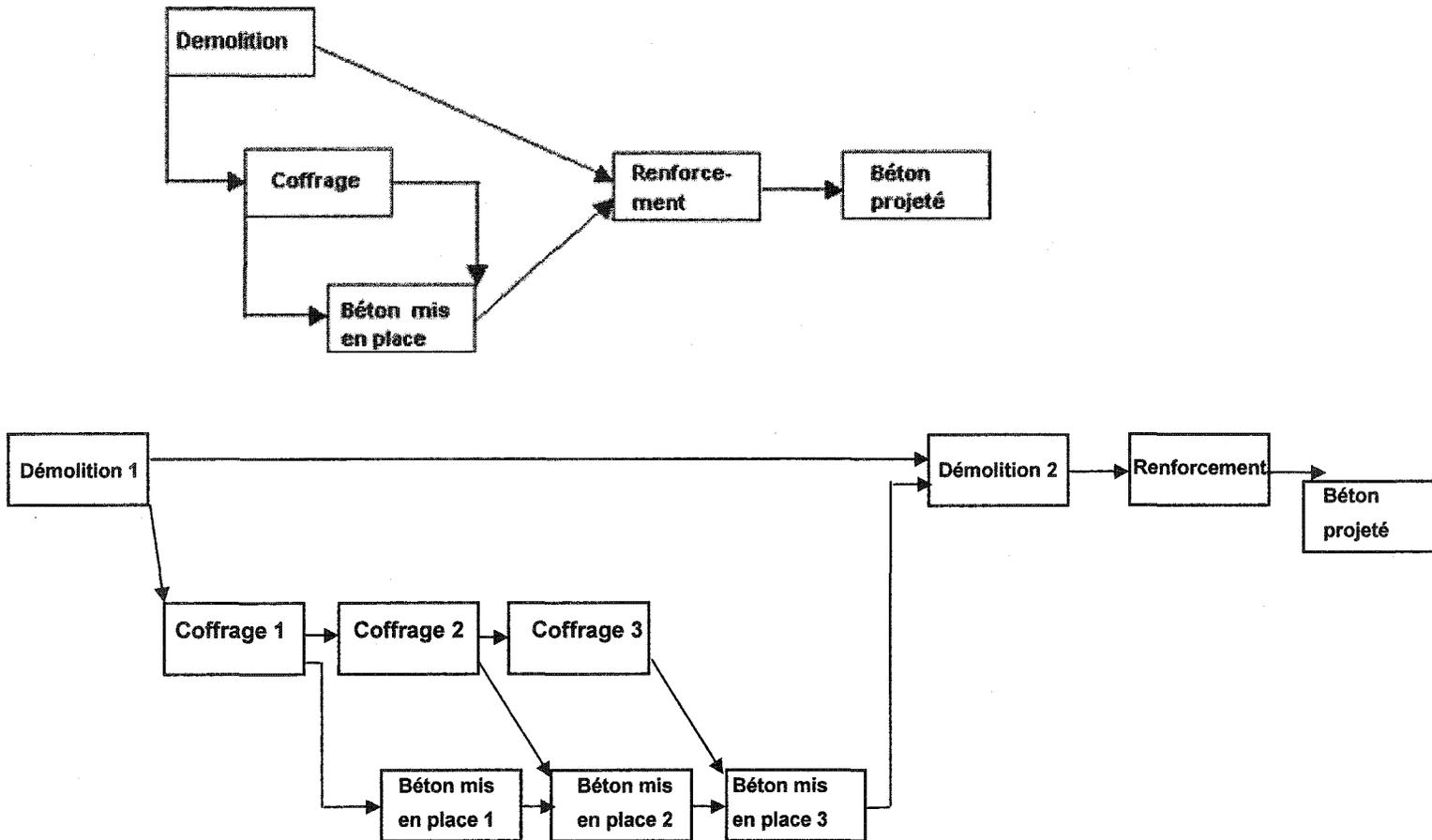


Figure 115 La planification du projet « Réparation d'un pilier » à travers la Précédence

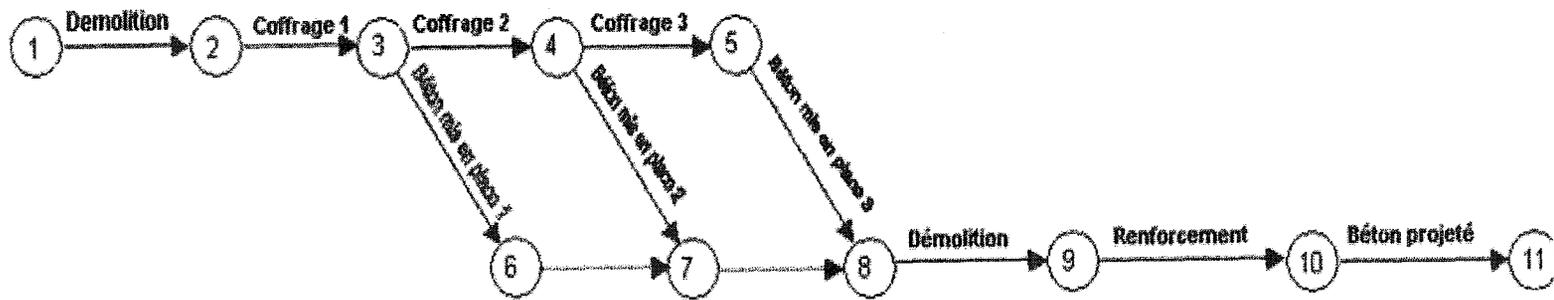


Figure 116 La planification du projet « Réparation d'un pilier » à travers l'ADM

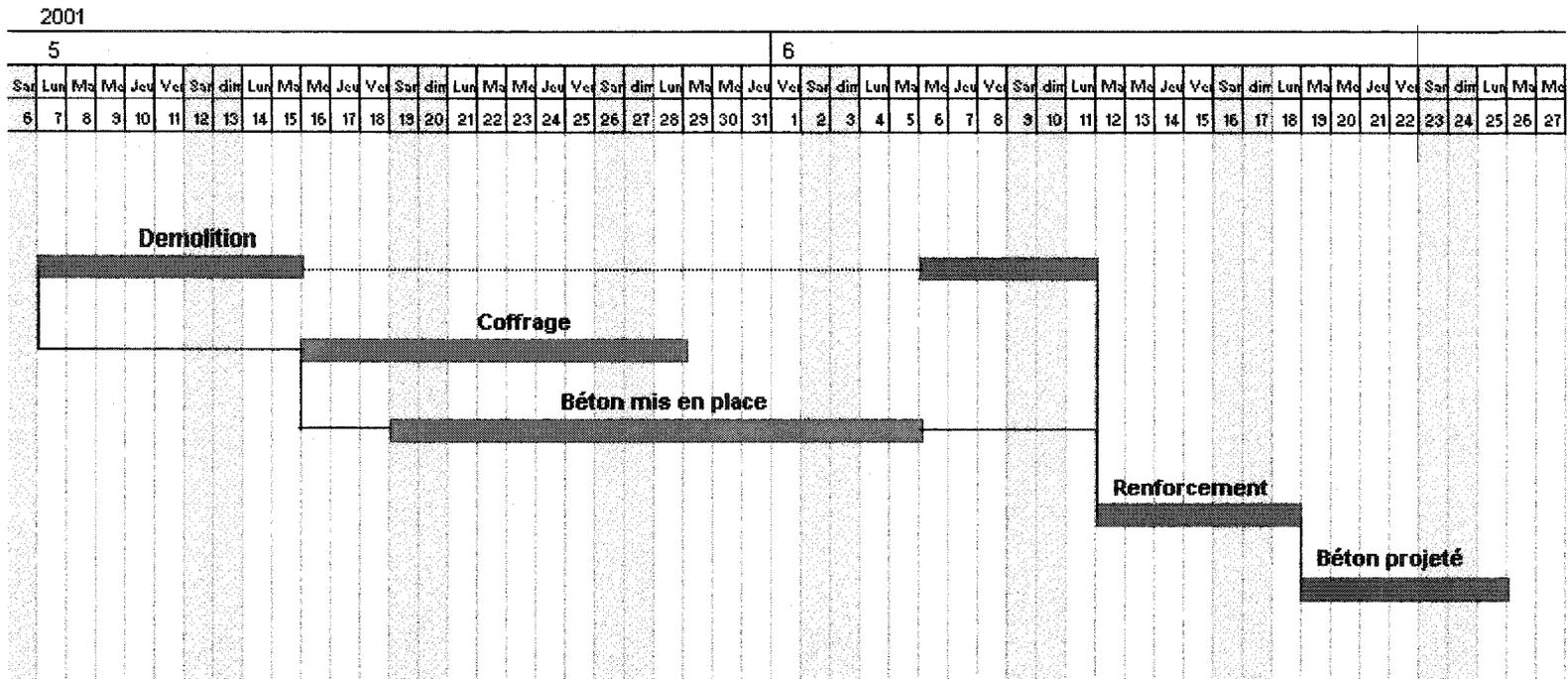


Figure 117 La planification non détaillée du projet « Réparation d'un pilier » à travers le Diagramme de Gantt

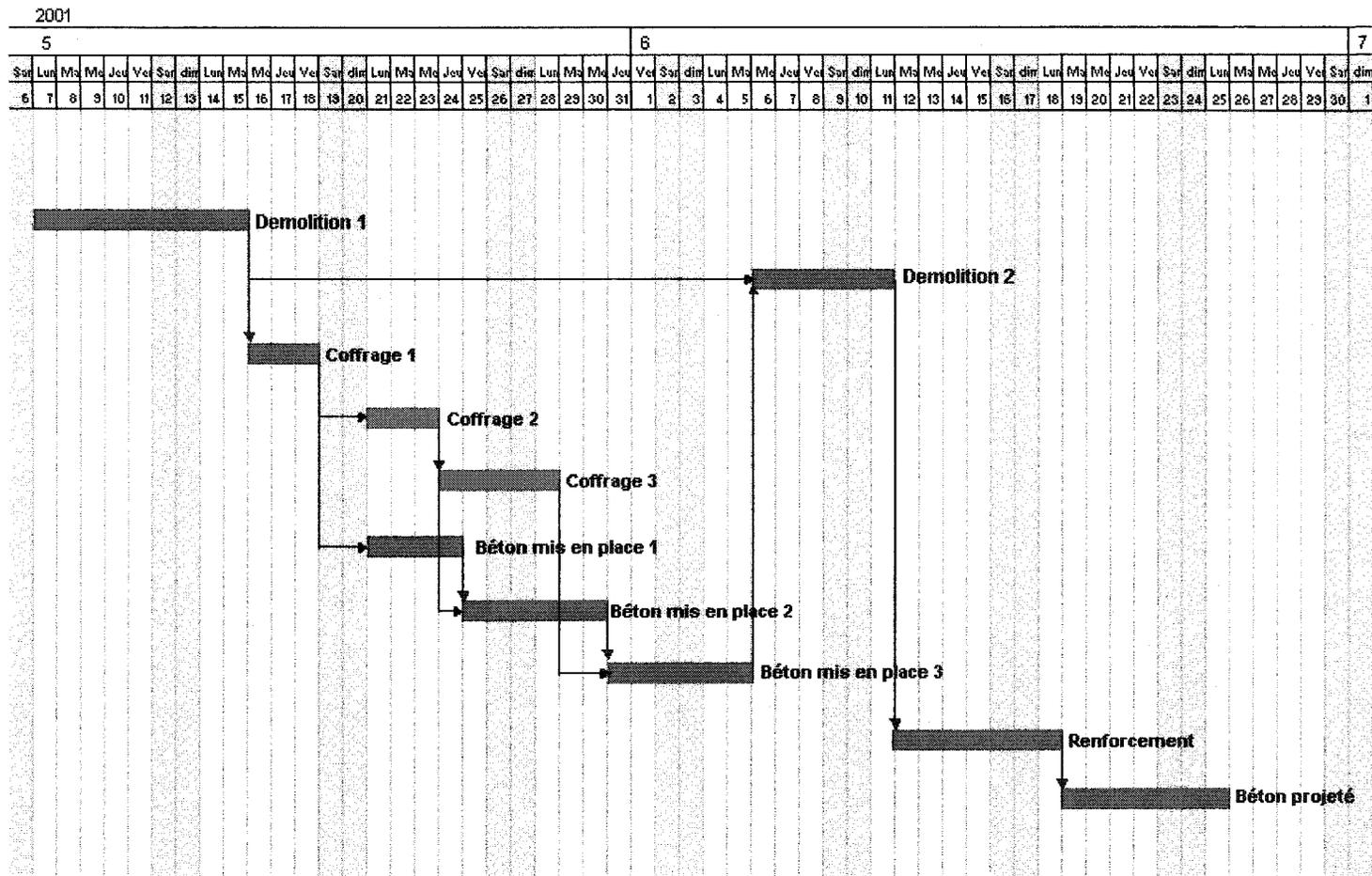


Figure 118 La planification détaillée du projet « Réparation d'un pilier » à travers le Diagramme de Gantt

8.4 La combinaison entre les marges connues et celles proposées par la méthode chronographique

La méthode chronographique a identifié trois (3) nouveaux types de marge externes, notamment : la marge complète, la marge début et la marge fin et trois (3) autres types de marges partielles, notamment : la marge partielle complète, la marge partielle début et la marge partielle fin. Chacune de ces marges, internes ou externes, peut être *Totale*, *Libre*, *Indépendante* ou d'*Interférence*.

En combinant les marges proposées par la méthode chronographique à celles connues à ce jour, 24 types de marges peuvent être déterminés. De ces types, douze (12) sont des marges externes et les douze (12) autres sont des marges partielles qui concernent chaque division interne. Le *Tableau III* énumère ces combinaisons. Ces vingt-quatre marges sont dénombrées pour fin de classification scientifique.

Dans la pratique seulement les six (6) marges partielles totales et libres seront employées d'une façon régulière. Sachant que :

- Les *marges Indépendantes* et d'*Interférences* sont utilisées d'une façon marginale dans l'industrie. Cela, s'appliquera certainement sur les douze (12) marges dépendantes de ces deux marges.
- Le début d'une activité peut être considéré comme le début d'une décomposition et la fin de l'activité comme une fin d'une décomposition. Ainsi, les relations externes peuvent être traitées à travers leurs relations internes.

Tableau III

La combinaison des marges connues avec celles
proposées par la méthode chronographique

		Les marges connues			
		Totale	Libre	Indépendante	d'Interférence
Les marges proposées	Complète	Complète Totale	Complète Libre	Complète Indépendante	Complète d'Interférence
	Début	Début Totale	Début Libre	Début Indépendante	Début d'Interférence
	Fin	Fin Totale	Fin Libre	Fin Indépendante	Fin d'Interférence
	Partielle Complète	Partielle Complète Totale	Partielle Complète Libre	Partielle Complète Indépendante	Partielle Complète d'Interférence
	Partielle Début	Partielle Début Totale	Partielle Début Libre	Partielle Début Indépendante	Partielle Début d'Interférence
	Partielle Fin	Partielle Fin Totale	Partielle Fin Libre	Partielle Fin Indépendante	Partielle Fin d'Interférence

Ce chapitre traite seulement des marges externes. Les marges internes ne seront pas présentées, sachant que le même raisonnement appliqué aux marges externes est applicable aux marges partielles. Pour fin de calcul on considère chaque division interne comme une activité indépendante. Ainsi, les relations internes seront transférées en relations externes dans les formules.

8.4.1 Les marges complètes

Les *marges complètes* sont les marges qui concernent toute l'activité. Avec ce type de marge, aucune exigence externe ou interne ne contraint différemment le début, la fin ou une des décompositions internes de l'activité. Pour cela, l'activité possède la même valeur de marge complète, pour tous les points sur cette activité, depuis son démarrage jusqu'à sa fin.

8.4.1.1 La marge complète totale « CTS »

La *marge complète totale* est calculée par la différence entre :

La date au plus tard minimale imposée par les successeurs, soit dans la *Figure 119*, le début au plus tard de l'activité k_2 moins une durée de deux jours qui représentent le délai d'exigence minimal.

et

La date au plus tôt maximale imposée par les prédécesseurs, soit dans la *Figure 119*, la date du début au plus tôt de l'activité i_2 .

De cette différence, il faut soustraire la durée de l'activité j .

8.4.1.2 La marge complète libre « CFS »

La *marge complète libre* est calculée par la différence entre :

La date réelle minimale imposée par les successeurs, soit dans la *Figure 120*, la date de fin réelle de l'activité k_2 moins une durée de deux jours qui représentent le délai d'exigence minimal.

et

La date réelle maximale imposée par les prédécesseurs, soit dans la *Figure 120*, la date du début réel de l'activité i_2 .

De cette différence, il faut soustraire la durée de l'activité j .

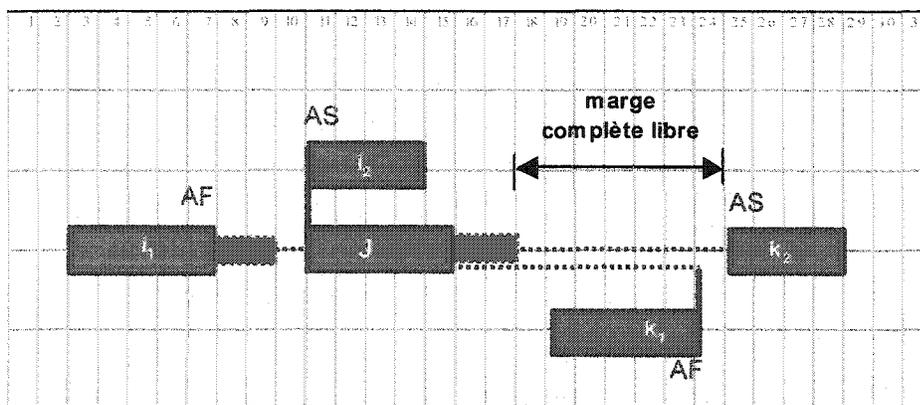


Figure 120 La marge complète libre

La formulation mathématique peut être présentée par la formule suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{CFS (j)} = \text{Min} & \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{AS}(k) - \text{Lag}_{jk} - 1) \\ \quad \quad \quad k \in \text{FS}(j) \\ \text{F/F} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{AF}(k) - \text{Lag}_{jk}) \\ \quad \quad \quad k \in \text{FS}(j) \\ \text{S(j)} = 0 \quad \rightarrow \quad \text{DFP} \end{array} \right\} - \\
 - \text{Tj} - \text{Max} & \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Max} \quad (\text{AF}(i) + \text{Lag}_{ij}) \\ \quad \quad \quad i \in \text{SP}(j) \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Max} \quad (\text{AS}(i) + \text{Lag}_{ij} - 1) \\ \quad \quad \quad i \in \text{SP}(j) \\ \text{P(j)} = 0 \quad \rightarrow \quad \text{DDP} \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

8.4.1.3 La marge complète indépendante « CIF »

La *marge complète indépendante* est calculée par la différence entre :

La date au plus tôt minimale imposée par les successeurs, soit dans la *Figure 121*, la date de fin au plus tôt de l'activité k_2 moins une durée de deux jours qui représentent le délai d'exigence minimal.

et

La date au plus tard maximale imposée par les prédécesseurs, soit dans la *Figure 121*, la date du début au plus tard de l'activité i_2 .

De cette différence, il faut soustraire la durée de l'activité j .

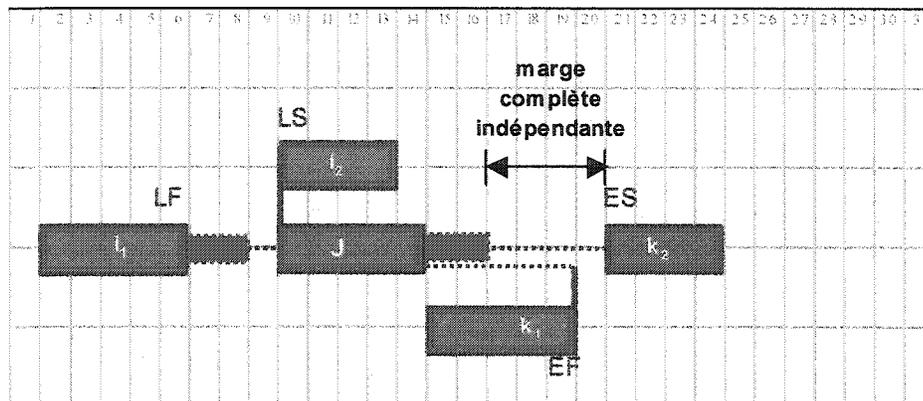


Figure 121 La marge complète indépendante

La formulation mathématique peut être présentée par la formule suivante :

$$CFS(j) = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Min}_{k \in FS(j)} (ES(k) - \text{Lag}_{jk} - 1) \\ \text{F/F} \rightarrow \text{Min}_{k \in FS(j)} (EF(k) - \text{Lag}_{jk}) \\ \text{S(j)} = 0 \rightarrow \text{DFP} \end{array} \right\} -$$

$$- T_j - \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Max}_{i \in SP(j)} (LF(i) + \text{Lag}_{ij}) \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Max}_{i \in SP(j)} (LS(i) + \text{Lag}_{ij} - 1) \\ \text{P(j)} = 0 \rightarrow \text{DDP} \end{array} \right\}$$

8.4.1.4 La marge complète d'interférence « CIS »

La *marge complète d'interférence* est la marge partagée entre les activités d'une même chaîne. Cette marge ne peut pas être attribuée à une activité particulière. Chaque activité de cette chaîne, peut avoir accès à cette marge une fois sa marge libre est complètement utilisée.

La *marge complète d'interférence* est calculée par la différence entre la *marge complète totale* et la *marge complète libre*. Elle peut être aussi calculée par la somme de :

La différence entre les dates minimales au plus tard et les dates minimales réelles des successeurs, soit dans la *Figure 122*, la date de fin au plus tard de l'activité k_2 moins la date de fin réelle de cette même activité.

et

La différence entre les dates maximales réelles et les dates maximales au plus tôt des prédécesseurs, soit, dans la *Figure 122*, la date du début réel de l'activité i_2 moins la date du début au plus tôt de cette même activité.

Cette dernière formule est valide autant que l'activité n'a pas dépassé la marge libre.

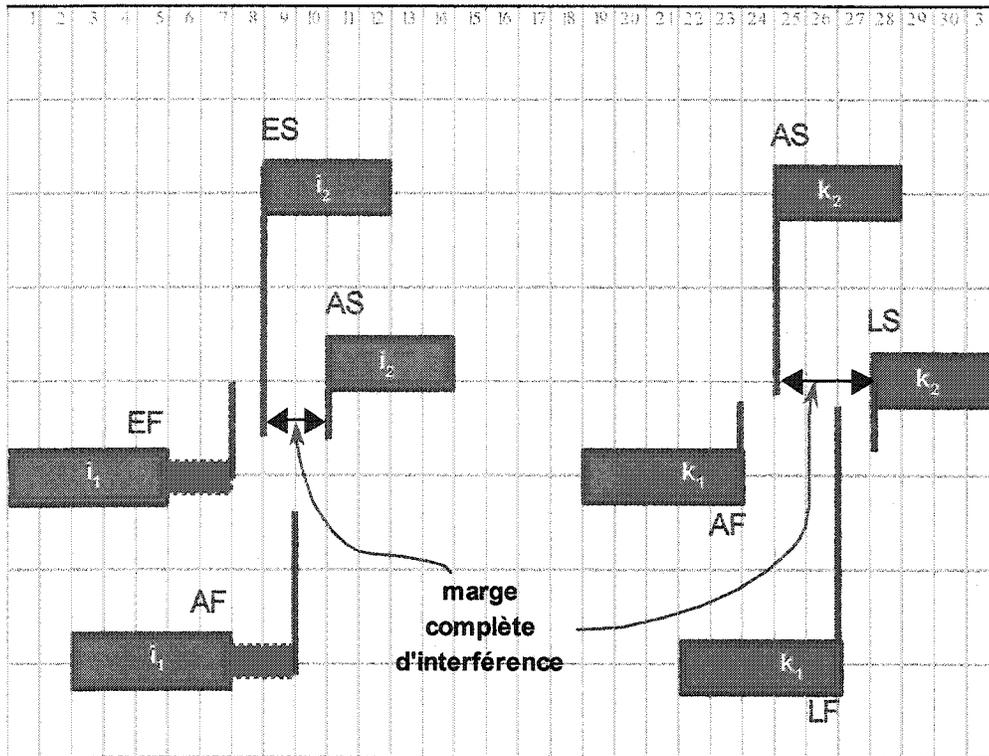


Figure 122 La marge complète d'interférence

La formulation mathématique peut être présentée par la formule suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{CIS (j)} = & \left[\text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{LS(k)} - \text{Lag}_{jk} - 1) \\ \quad \quad \quad k \in \text{FS(j)} \\ \text{F/F} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{LF(k)} - \text{Lag}_{jk}) \\ \quad \quad \quad k \in \text{FS(j)} \\ \text{S(j)} = 0 \quad \rightarrow \quad \text{DFP} \end{array} \right\} \right] - \\
 & - \left[\text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{AS(k)} - \text{Lag}_{jk} - 1) \\ \quad \quad \quad k \in \text{FS(j)} \\ \text{F/F} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{AF(k)} - \text{Lag}_{jk}) \\ \quad \quad \quad k \in \text{FS(j)} \\ \text{S(j)} = 0 \quad \rightarrow \quad \text{DFP} \end{array} \right\} \right] + \\
 & + \left[\text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Max} \quad (\text{AF(i)} + \text{Lag}_{ij}) \\ \quad \quad \quad i \in \text{SP(j)} \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Max} \quad (\text{AS(i)} + \text{Lag}_{ij} - 1) \\ \quad \quad \quad i \in \text{SP(j)} \\ \text{P(j)} = 0 \quad \rightarrow \quad \text{DDP} \end{array} \right\} \right] - \\
 & - \left[\text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Max} \quad (\text{EF(i)} + \text{Lag}_{ij}) \\ \quad \quad \quad i \in \text{SP(j)} \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Max} \quad (\text{ES(i)} + \text{Lag}_{ij} - 1) \\ \quad \quad \quad i \in \text{SP(j)} \\ \text{P(j)} = 0 \quad \rightarrow \quad \text{DDP} \end{array} \right\} \right]
 \end{aligned}$$

8.4.2 Les marges début

Les *marges début* sont les marges qui concernent seulement le démarrage d'une activité. Ces marges évoluent d'une façon complètement indépendante de celles des marges de fin de l'activité.

8.4.2.1 La marge début totale « STS »

La *marge début totale* est calculée par la différence entre :

La date au plus tard minimale imposée par les successeurs du début de l'activité ou par les prédécesseurs du début qui imposent des délais d'exigences maximaux, soit dans la *Figure 123*, la date du début au plus tard de l'activité k_1 .

et

La date au plus tôt maximale imposée par les prédécesseurs de ce début, soit dans la *Figure 123*, la date de fin réelle de l'activité i_3 .

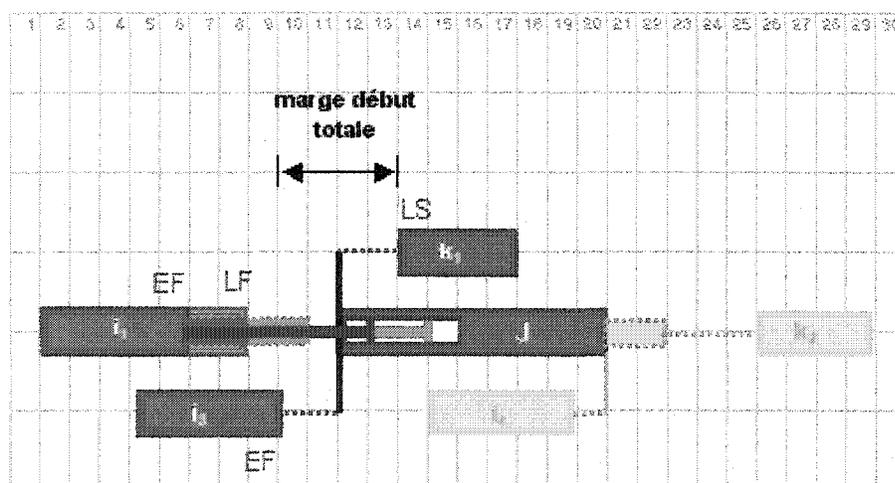


Figure 123 La marge début totale

La formulation mathématique est la suivante :

$$\begin{array}{l}
 \text{STS (j) - Min} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{F/S} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{LF(i)} + \text{Lagmax}_{i \in \text{SP}(j)} + 1) \\
 \text{S/S} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{LS(i)} + \text{Lagmax}_{i \in \text{SP}(j)}) \\
 \text{S/S} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{LS(k)} - \text{Lag}_{jk}) \\
 k \in \text{SS}(j)
 \end{array} \right\} - \\
 \\
 - \text{Max} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{F/S} \rightarrow \text{Max} \quad (\text{EF(i)} + \text{Lag}_{ij} + 1) \\
 i \in \text{SP}(j) \\
 \text{S/S} \rightarrow \text{Max} \quad (\text{ES(i)} + \text{Lag}_{ij}) \\
 i \in \text{SP}(j)
 \end{array} \right\}
 \end{array}$$

8.4.2.2 La marge début libre « SFS »

La *marge début libre* est calculée par la différence entre :

La date réelle minimale imposée par les successeurs du début ou les prédécesseurs de ce début qui possèdent des délais d'exigences maximaux, soit dans la *Figure 124*, la date du début réel de l'activité k_1 .

et

La date réelle maximale imposée par les prédécesseurs du début, soit dans la *Figure 124*, la date de fin réelle de l'activité i_3 .

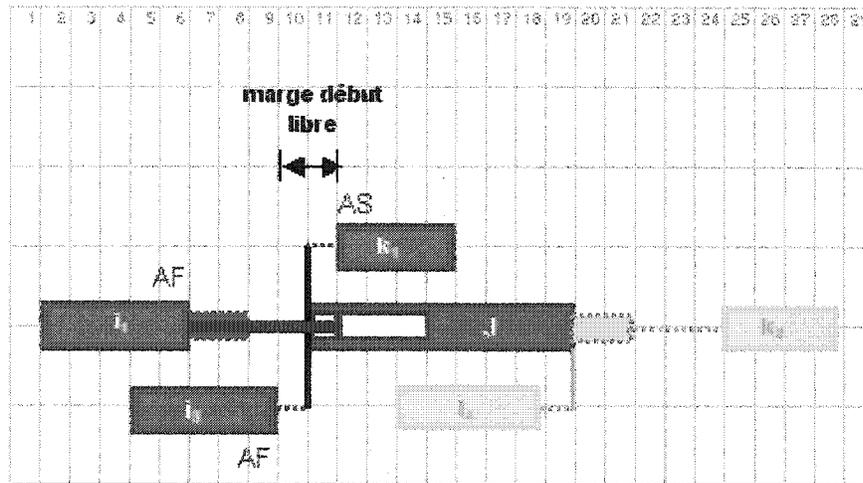


Figure 124 La marge début libre

La formulation mathématique est comme suit :

$$SFS(j) = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Min} \quad (AF(i) + \text{Lagmax}_{i \in SP(j)} + 1) \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Min} \quad (AS(i) + \text{Lagmax}_{i \in SP(j)}) \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Min} \quad (AS(k) - \text{Lag}_{jk}) \end{array} \right.$$

$$- \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Max} \quad (AF(i) + \text{Lag}_{ij} + 1) \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Max} \quad (AS(i) + \text{Lag}_{ij}) \end{array} \right.$$

8.4.2.3 La marge début Indépendante « SIF »

La *marge début indépendante* est calculée par la différence entre :

La date au plus tôt minimale imposée par les successeurs du début ou les prédécesseurs de ce début qui possèdent des délais d'exigences maximaux. soit dans la *Figure 125*, la date du début au plus tôt de l'activité k_1 .

et

La date au plus tard maximale imposée par les prédécesseurs du début, soit dans la *Figure 125*, la date de fin au plus tard de l'activité i_3 .

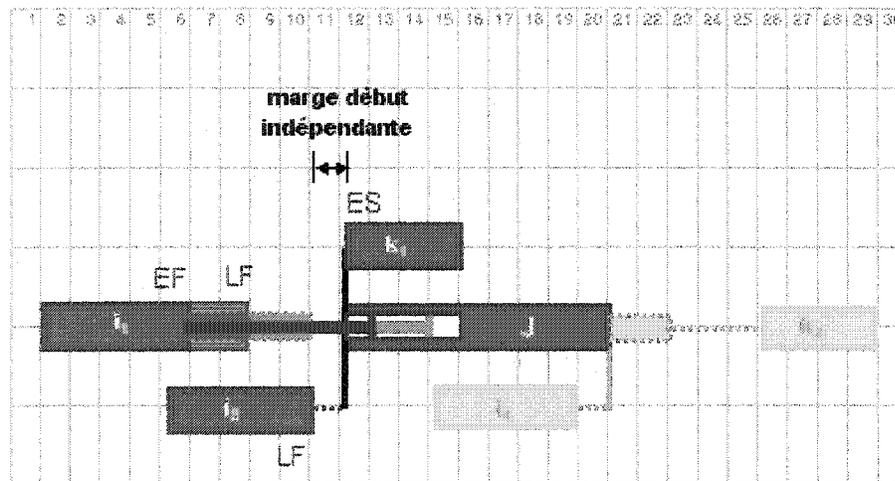


Figure 125 La marge début indépendante

La formulation mathématique est comme suit :

$$\text{SFS (j)} = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{EF(i)} + \text{Lagmax}_{i \text{lagmax } j} + 1) \\ \quad \quad \quad i_{\text{lagmax}} \in \text{SP}(j) \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{ES(i)} + \text{Lagmax}_{i \text{lagmax } j}) \\ \quad \quad \quad i_{\text{lagmax}} \in \text{SP}(j) \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Min} \quad (\text{ES(k)} - \text{Lag}_{jk}) \\ \quad \quad \quad k \in \text{SS}(j) \end{array} \right\} -$$

$$- \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Max} \quad (\text{LF(i)} + \text{Lag}_{ij} + 1) \\ \quad \quad \quad i \in \text{SP}(j) \\ \text{S/S} \rightarrow \text{Max} \quad (\text{LS(i)} + \text{Lag}_{ij}) \\ \quad \quad \quad i \in \text{SP}(j) \end{array} \right\}$$

8.4.2.4 La marge début d'interférence « SIS »

La *marge début d'interférence* est calculée par la différence entre la *marge début totale* et la *marge début libre*. Elle peut être aussi calculée par la somme de :

La différence entre les dates minimales au plus tard et réelles des successeurs du début de l'activité.

et

La différence entre les dates maximales réelles et au plus tôt des prédécesseurs du début de l'activité.

8.4.3 Les marges de fin

Les *marges fins* sont les marges qui sont liées à la date d'achèvement d'une activité. Ces marges évoluent d'une façon complètement indépendante de celles des marges de début de l'activité.

8.4.3.1 La marge fin totale « FTS »

La *marge fin totale* est calculée par la différence entre la date au plus tard minimale imposée par les successeurs de la fin de l'activité et la date au plus tôt maximale des prédécesseurs de cette même fin.

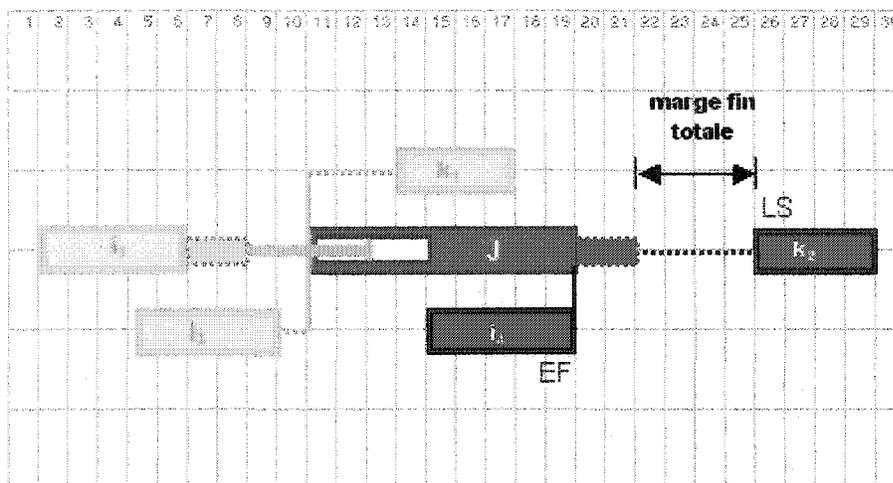


Figure 126 La marge fin totale

Dans la *Figure 126*, la fin de l'activité J possède une relation prédécesseur Fin / Fin avec l'activité i_4 et une relation successeur Fin / Début avec l'activité k_2 . La date de fin de l'activité J est donc limitée entre la fin au plus tôt de l'activité i_4 et le début au plus tard de l'activité k_2 . Cette limite est indépendante des contraintes subites au début de l'activité.

La formulation mathématique est la suivante :

$$\begin{aligned}
 FTS(j) = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{F/S} \longrightarrow \text{Min}_{k \in \text{FS}(j)} (\text{LS}(k) - \text{Lag}_{jk} - 1) \\
 \text{F/F} \longrightarrow \text{Min}_{k \in \text{FS}(j)} (\text{LF}(k) - \text{Lag}_{jk})
 \end{array} \right\} - \\
 - \text{F/F} \longrightarrow \text{Max}_{i \in \text{FP}(j)} (\text{EF}(i) + \text{Lag}_{ij})
 \end{aligned}$$

8.4.3.2 La marge fin libre « FFS »

La *marge fin libre* est calculée par la différence entre :

La date réelle minimale imposée par les successeurs de la fin, soit dans la *Figure 127*, la date du début réel de l'activité k_2 .

et

La date réelle maximale imposée par les prédécesseurs de la fin, soit dans la *Figure 127*, la date de fin réelle de l'activité i_4 .

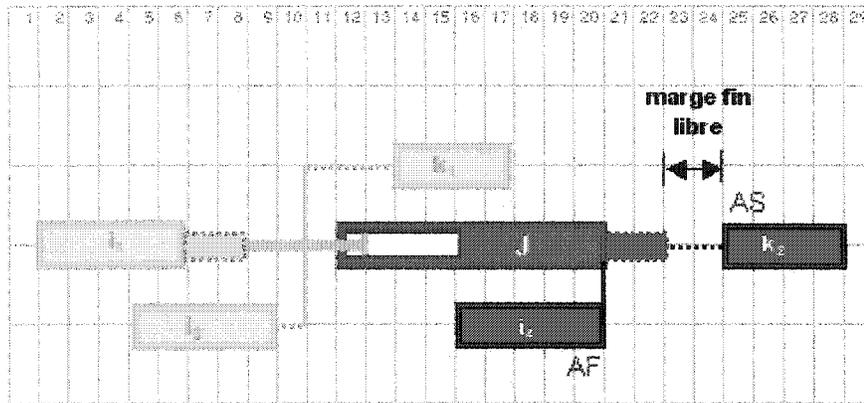


Figure 127 La marge fin libre

La formulation mathématique est comme suit :

$$\text{FFS}(j) = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Min}_{k \in \text{FS}(j)} (\text{AS}(k) - \text{Lag}_{jk} - 1) \\ \text{F/F} \rightarrow \text{Min}_{k \in \text{FS}(j)} (\text{AF}(k) - \text{Lag}_{jk}) \end{array} \right\}$$

$$- \quad \text{F/F} \rightarrow \text{Max}_{i \in \text{PF}(j)} (\text{AF}(i) + \text{Lag}_{ij})$$

8.4.3.3 La marge fin indépendante « FIF »

La *marge fin indépendante* est calculée par la différence entre :

La date au plus tôt minimale imposée par les successeurs de la fin, soit dans la *Figure 128*, la date du début au plus tôt de l'activité k_2 .

et

La date au plus tard maximale imposée par les prédécesseurs de la fin, soit dans la *Figure 128*, la date de fin au plus tard de l'activité i_4 .

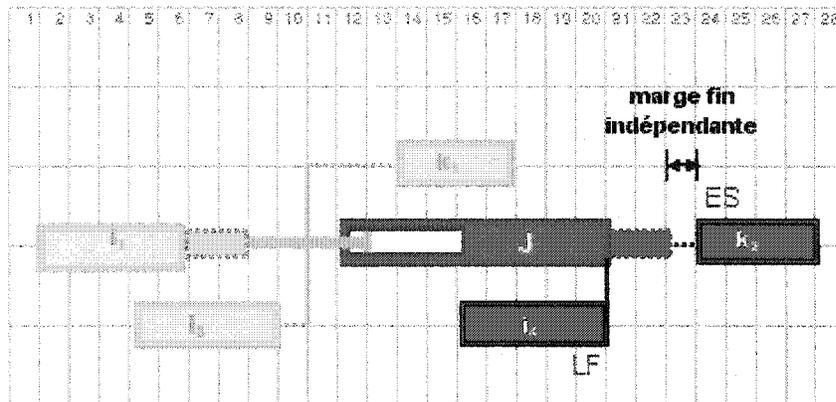


Figure 128 La marge fin indépendante

La formulation mathématique est comme suit :

$$\text{FFS}(j) = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \text{F/S} \rightarrow \text{Min}_{k \in \text{FS}(j)} (\text{ES}(k) - \text{Lag}_{jk} - 1) \\ \text{F/F} \rightarrow \text{Min}_{k \in \text{FS}(j)} (\text{EF}(k) - \text{Lag}_{jk}) \end{array} \right\} - \\
 - \quad \text{F/F} \rightarrow \text{Max}_{i \in \text{PF}(j)} (\text{LF}(i) + \text{Lag}_{ij})$$

8.4.3.4 La marge fin d'interférence « FIS »

La *marge fin d'interférence* peut être calculée par la différence entre la *marge fin totale* et la *marge fin libre*. Elle peut être aussi calculée par la somme de :

La différence entre les dates minimales au plus tard et réelles des successeurs de la fin de l'activité.

et

La différence entre les dates maximales réelles et au plus tôt des prédécesseurs de la fin de l'activité.

CHAPITRE 9

LA PLANIFICATION ET LE CONTRÔLE DES PROJETS

9.1 Les niveaux de détail

9.1.1 Importance de la planification sur plusieurs niveaux de détail

Les utilisateurs ont besoin d'une planification pouvant leur montrer ce qu'ils veulent connaître dans une forme facile à assimiler. Pinnell (1980) voit qu'il est préférable de travailler avec des ordonnancements qui n'excèdent pas 300 activités. Les détails peuvent être représentés à l'aide des sous-réseaux.

Un problème commun se présente lorsqu'un seul ordonnancement est destiné à remplir deux ou plusieurs fonctions, par exemple, les travaux de contrôle globaux et le contrôle détaillé des travaux. Séparer ces fonctions en deux ou en plusieurs niveaux de détails hiérarchiques semble être une solution plus acceptable. Il apparaît donc opportun de produire des réseaux sur plusieurs niveaux de détail et ayant une taille facile à gérer.

Avec plusieurs niveaux de détails *Figure 129*, ou la combinaison de ceux-ci *Figure 130* le projet peut présenter une cédule ajustée au besoin de tous les intervenants. Avec le niveau de détail le plus bas, elle peut donner une vue d'ensemble normalement plus convenable pour la haute direction. Les niveaux de détail sont aussi augmentés au fur et à mesure pour préciser toutes les tâches à exécuter pour satisfaire les besoins du gestionnaire.

La méthode chronographique est basée sur le regroupement des sous-réseaux dans le but d'optimiser l'aspect visuel. Une décomposition des *super-activités* en *sous-activités*, aide à faciliter le regroupement des activités qui possèdent des relations entre elles.

Au début, un plan de gestion est développé avec le plus bas niveau de détail qui contient les bornes majeures pour tous les éléments du programme de construction. De cet ordonnancement initial, on développe un ordonnancement maître dans lequel les critères sont décidés à l'avance pour l'ingénierie, la logistique, la construction, etc. Le développement de l'ordonnancement continue à s'étendre en détail au fur et à mesure que les informations d'ingénierie se profilent et que les alternatives de construction sont étudiées.

9.1.2 Exemple d'application

L'exemple montré dans la *Figure 129* représente un projet planifié avec trois niveaux de détails. L'explication de cette figure est comme suit :

1. Le premier niveau est composé de deux *super-activités* identifiées « 01 » et « 02 ».
2. Chacune de ces deux *super-activités* est décomposée en un *sous-réseau*.
La *super-activité* « 01 » est décomposée en trois activités à savoir : 01.01; 01.02 et 01.03.
La *super-activité* « 02 » est décomposée en deux activités à savoir : 02.01 et 02.02.
3. Chaque activité du « niveau 2 » est ensuite décomposée en un sous-réseau pour représenter le troisième niveau de détail. Comme exemple, l'activité 01.01 est décomposée en cinq sous-activités à savoir : 01.01.01; 01.01.02; 01.01.03; 01.01.04 et 01.01.05.

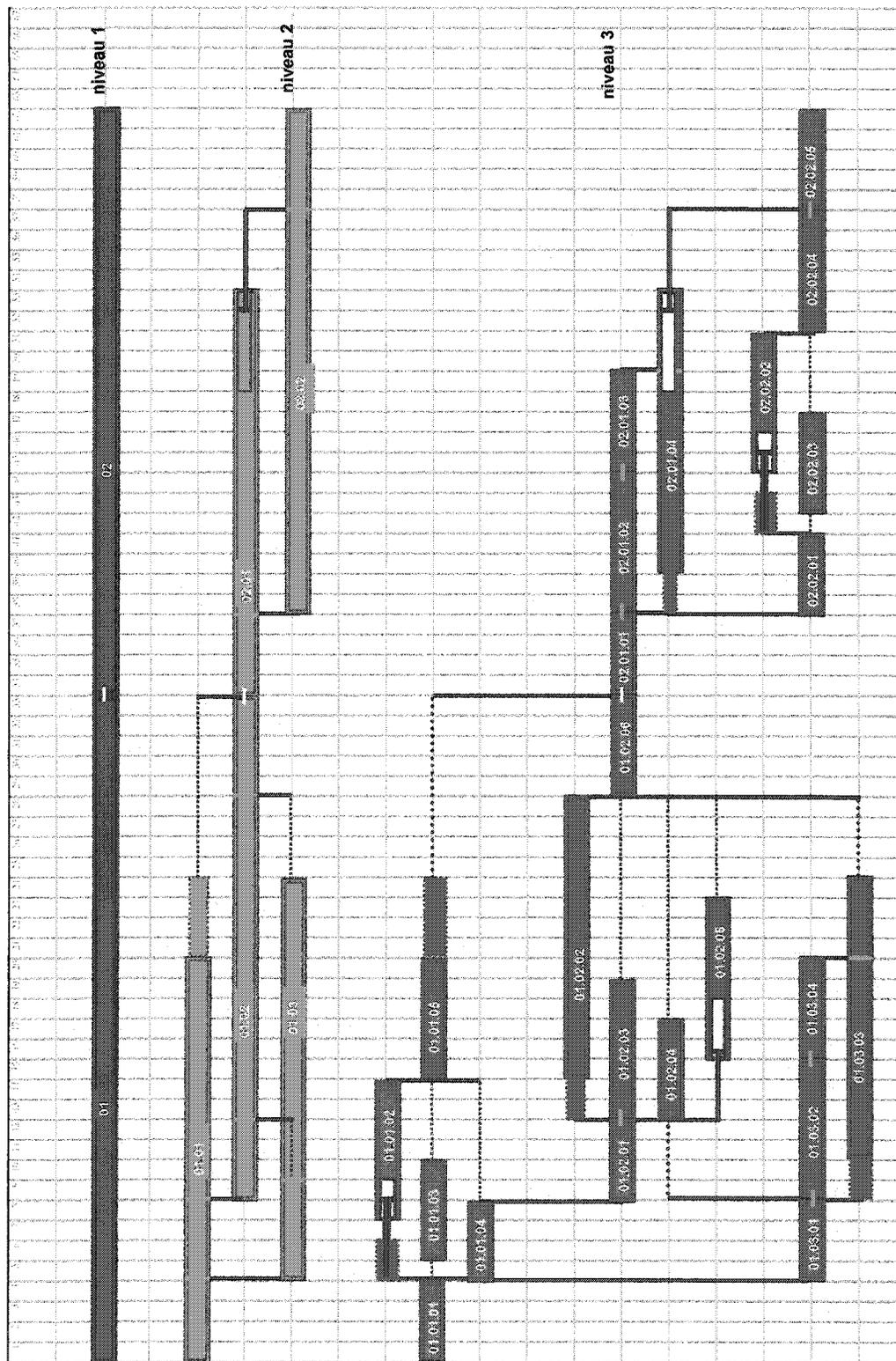


Figure 129 Les niveaux de détail

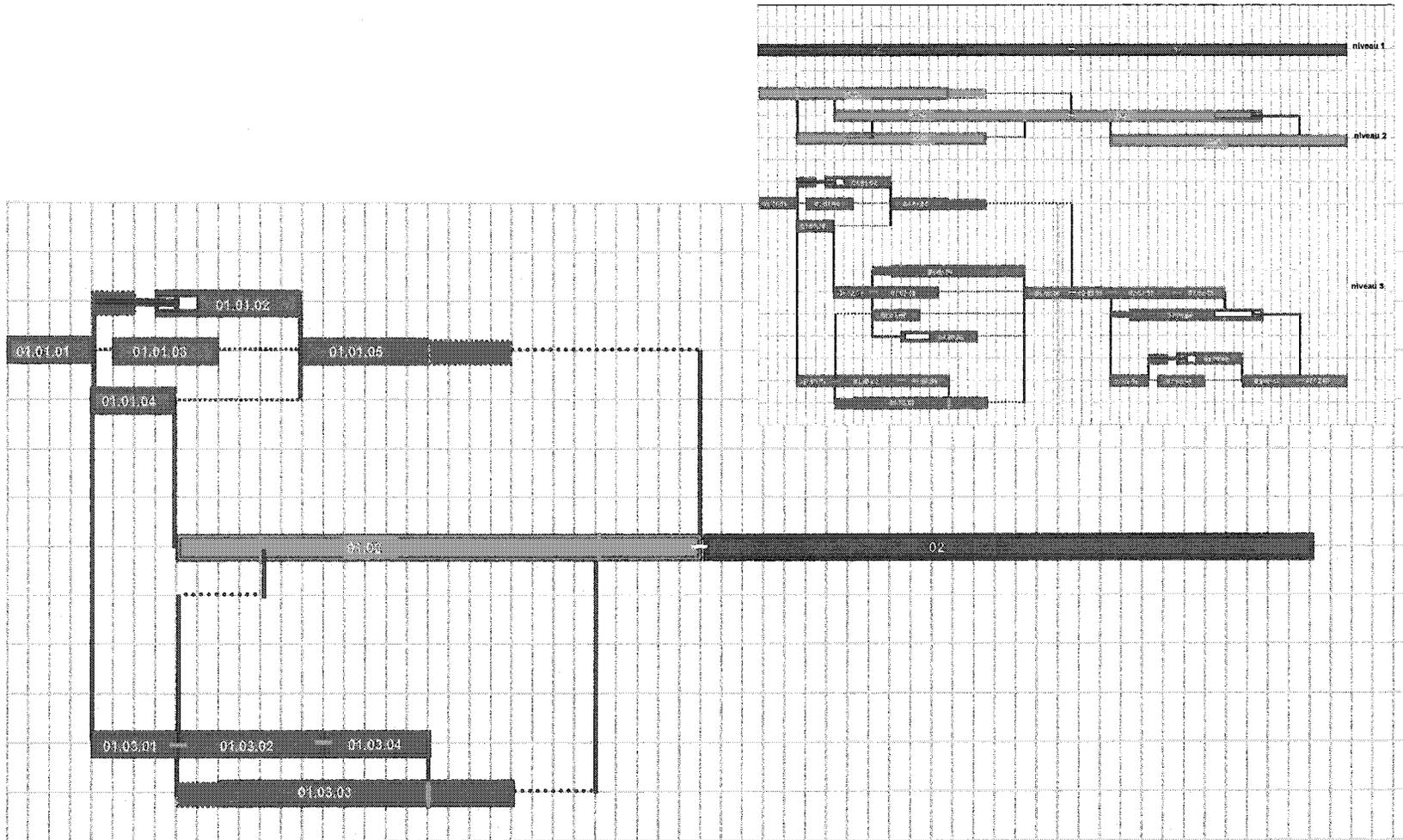


Figure 130 Combinaison entre les niveaux de détail

4. Les relations de dépendance entre les sous-activités du troisième niveau montrent les exigences d'exécution.

Au début, on détermine celles qui existent entre chaque sous-réseau. Ensuite, on ajoute celles qui sont entre les activités des différents sous-réseaux. Les relations entre les activités appartenant à des sous-réseaux différents sont représentées graphiquement avec des attributs différents.

5. Les relations entre les activités du deuxième niveau sont calculées depuis les relations du troisième niveau. Chaque relation entre deux sous-activités appartenant à deux sous-réseaux différents est traduite en une relation du deuxième niveau.

Ainsi, la relation Fin/Début entre les deux sous-activités 01.01.01 et 01.03.01 est traduite au deuxième niveau par une relation Interne/Début entre les deux activités 01.01 et 01.03.

Pour pouvoir présenter cette relation, une division interne dans la première activité 01.01 est nécessaire. L'emplacement de cette division doit être lié avec la fin de la sous-activité 01.01.01. et doit répondre de cette fin autant que la relation du troisième niveau existe.

Les divisions internes et les relations internes/internes ou internes/externes s'avèrent donc d'une importance primordiale pour pouvoir représenter les relations entre les activités des niveaux supérieurs.

6. Enfin, les relations entre les activités appartenant à des sous-réseaux différents, du deuxième niveau sont traduites par des relations entre les deux super-activités. La relation Fin/Début entre les deux activités 01.02 et 02.01 devient donc une relation Fin/Début entre les deux activités 01 et 02.

9.2 Processus de contrôle de l'avancement des projets

9.2.1 Évaluer l'état du projet

Pinnell, (1980) et Rahbar (1984) partagent avec plusieurs le même avis sur la représentation de l'état d'avancement en utilisant le *diagramme de Gantt*. Selon cette méthode, l'avancement de chaque activité peut être démontré à travers une ligne verticale cassée en zigzag. La *Figure 131* illustre un exemple d'avancement sur le *diagramme de Gantt* à travers *MS-Project*.

En réalité, il faut différencier entre l'état d'avancement de chaque activité individuellement et l'état d'avancement global du projet. Pour cela, J. Hinze (1998) affirme que : « *Même si le statut d'avancement de chaque activité peut être montré sur un Diagramme de Gantt, le statut d'avancement du projet ne peut pas être déterminé si quelques activités ne respectent pas leurs calendriers d'exécution* ». Cela rend l'évaluation des ajustements nécessaires difficile à voir et contraint la détermination des activités cibles qui doivent être accélérées.

Par contre, l'état d'avancement de chaque activité reste important pour pouvoir évaluer son effet sur l'état global du projet. Pour cette fin, il faut évaluer correctement l'état d'avancement de chaque activité. Genest et Nguyen (1995) disent que la meilleure technique, pour déterminer de façon correcte et précise l'état d'avancement d'un projet, est d'évaluer le temps requis pour compléter toutes les tâches qui, à la date où s'effectue le contrôle de l'avancement, devraient être terminées ou entreprises. Ils précisent que la méthode traditionnelle qui évalue le pourcentage d'avancement des activités, malgré sa simplicité et rapidité, présente trois inconvénients majeurs :

1. subjectivité de l'évaluation,
2. elle suppose que l'évaluation originelle était correcte,
3. et suppose un rythme de travail constant.

Notons ici un autre avantage de la décomposition interne des activités en fonction des quantités. Avec ces divisions internes, en plus de pouvoir déterminer l'avancement des travaux d'une façon plus précise, le rythme de travail peut facilement changer d'une division à l'autre.

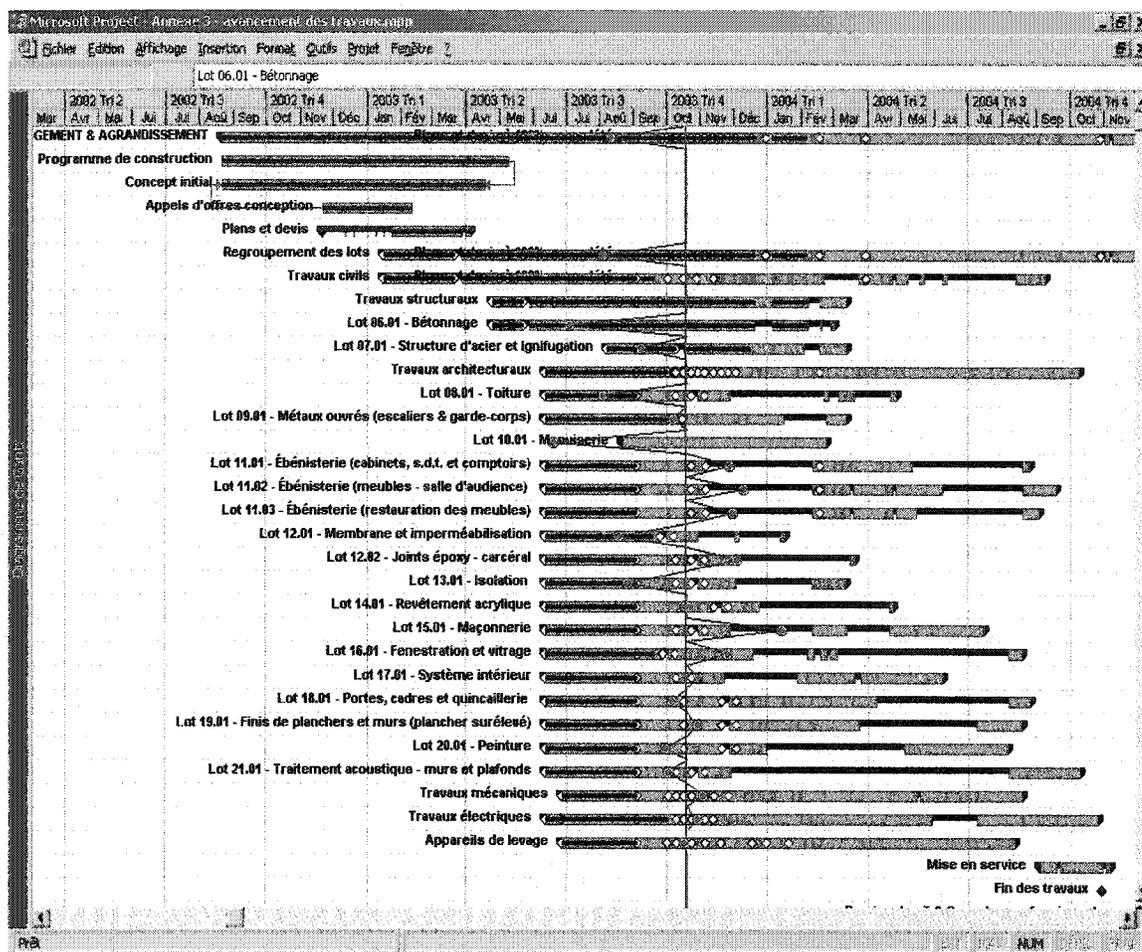


Figure 131 Contrôle d'avancement avec le diagramme de Gantt

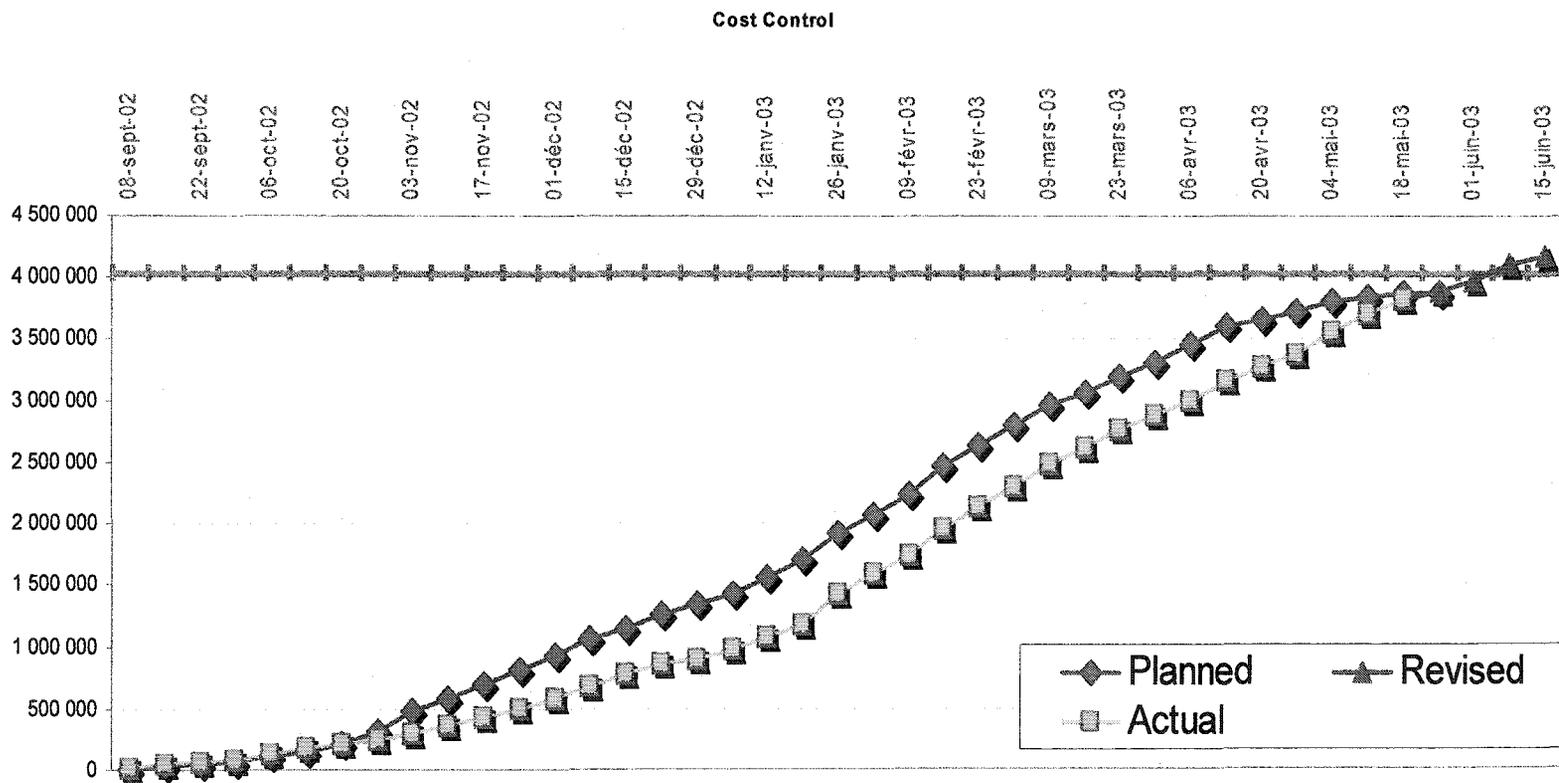


Figure 132 Suivi des coûts des projets à travers la Courbe S

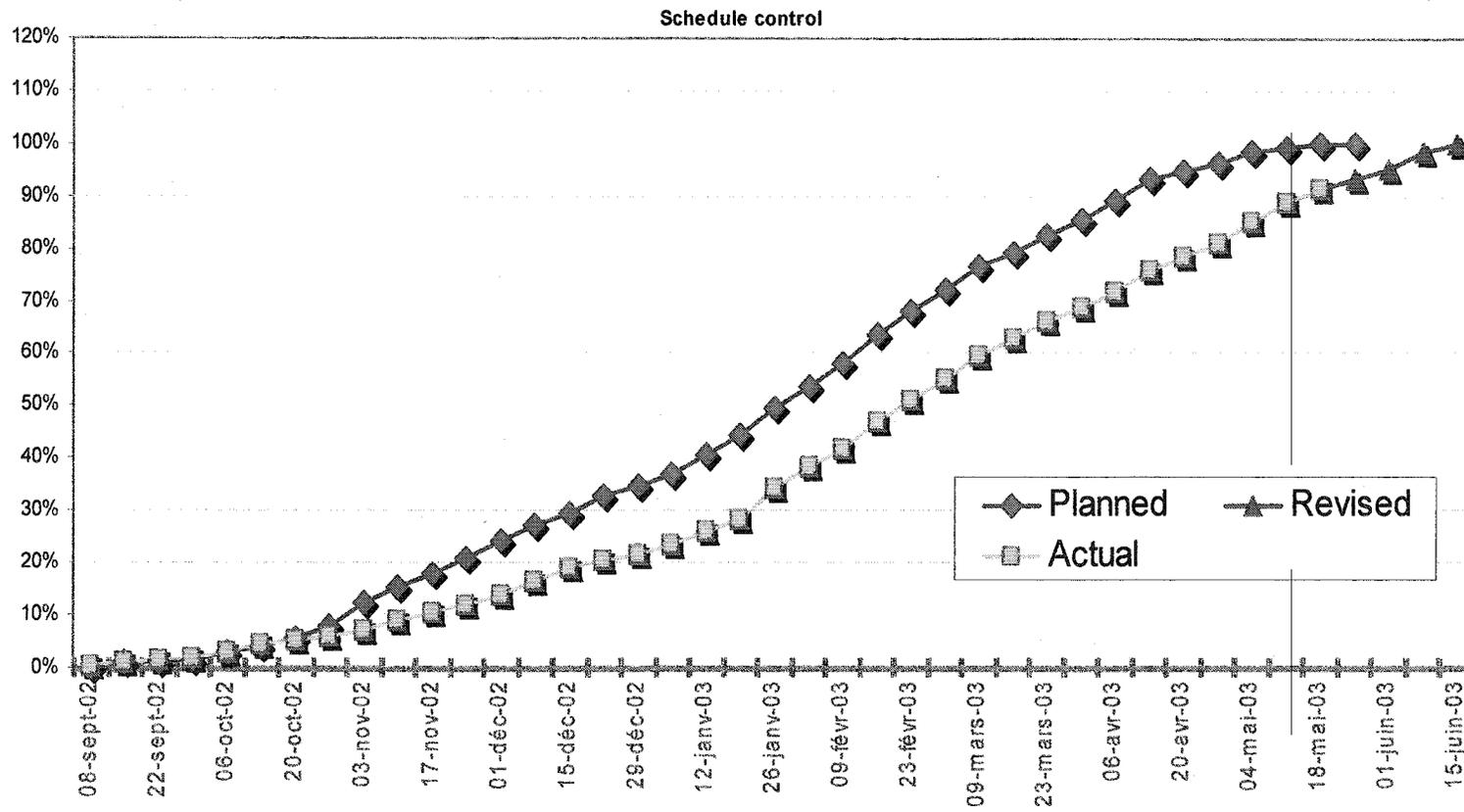


Figure 133 L'état d'avancement des projets à travers la Courbe S

Une fois l'état individuel de chaque activité déterminé, l'état global d'avancement du projet peut être calculé. La *Figure 132* fait le suivi des coûts du projet de *Station d'épuration de Kahnawake* à travers la *Courbe S* et la *Figure 133* montre l'état d'avancement de ce même projet. Ces deux figures comparent l'avancement actuel avec le planifié et illustre aussi l'avancement révisé et le coût projeté du projet. La section suivante stipule des mesures d'évaluation de l'avancement du projet.

9.2.2 Mesure d'évaluation de l'avancement du projet

Les planificateurs évaluent l'état d'avancement d'un projet en fonction des pourcentages d'exécution. Ces pourcentages sont calculés en fonction des coûts des travaux, des durées d'exécution ou des heures travaillées. Se baser sur un de ces trois facteurs pour évaluer l'état d'avancement s'avère insuffisant. Les points suivants élaborent ce point de vue :

1. Un projet d'installation d'une machine qui coûte 1M\$ est exécuté sur 3 mois. Le prix d'achat de la machine est de 0.8M\$. Le montant restant est attribué à une centaine de tâches liées à cette installation. Le contrôle d'avancement à travers les coûts de travaux donnera une vue non réaliste de l'avancement du projet.
2. Un projet où la concentration d'utilisation de la main-d'œuvre et des autres types de ressources en matériel et matériaux varie considérablement d'une période à une autre n'est pas adapté pour un contrôle d'avancement basé sur les durées d'exécution.
3. L'utilisation des heures travaillées apparaît plus réaliste pour monter l'avancement des projets. Par contre, cette méthode ignore totalement les coûts associés aux matériaux, aux matériels, etc. Les prévisions des flux monétaires seront irréalistes. La comparaison de l'avancement du projet avec les montants dépensés sera incompréhensible pour la haute direction.

En conclusion, il faut admettre que chaque cas possède ses particularités. Une méthode standard qui ne tient pas compte de ces particularités peut générer des résultats douteux. Cela peut provoquer un manque de confiance vis-à-vis des pourcentages d'avancement obtenus.

Un taux d'avancement réaliste doit résulter de l'association de ces trois facteurs précédemment cités. À chaque cas, le gestionnaire doit déterminer la combinaison optimale. Il effectuera la somme des produits de chaque facteur par un coefficient propre. Cette combinaison peut être valide pour tout le projet ou pour une activité quelconque de ce projet.

9.2.3 Illustration de l'avancement des activités avec la méthode chronographique

La planification à l'échelle du temps s'avère essentielle pour effectuer les travaux de contrôle des projets. Pour cela, les méthodes qui représentent la logique pure d'ordonnancement semblent peu propices à accomplir cette tâche. En utilisant le diagramme de Gantt qui représente la planification à l'échelle du temps, le statut d'avancement des projets est difficile à identifier.

De plus, dans ce diagramme chaque activité occupe une ligne. L'avancement réel est montré graphiquement sur la même ligne que la tâche planifiée. Avec ce processus, même le suivi de l'avancement des activités, individuellement, est difficile à suivre si un retard important se produit. Pour cela, il est actuellement fréquent de modifier la planification originale afin de permettre ce suivi.

Avec la méthode chronographique, ce processus de contrôle n'est pas adapté. Pour cela, cette méthode propose de diviser la surface de travail en deux. La partie supérieure montre la planification et la partie inférieure fait le suivi de l'avancement du projet. L'application informatique, qui représentera la planification et le contrôle des projets,

devra être capable de défiler indépendamment chaque partie afin de faciliter les travaux de comparaison.

La *Figure 134* présente un exemple de contrôle de projet à travers la méthode chronographique. Dans cet exemple, la surface de travail étant divisée en deux, l'application informatique peut défiler chaque partie d'une façon indépendante de l'autre. Ainsi, le début réel des travaux peut être ajusté avec le début planifié. Cela, bien entendu, pourra être faisable pour toute autre date. Avec cette méthode, la performance de gestion pourra être évaluée sur toute partie du projet sans devoir modifier la planification originale.

La comparaison de la planification et du contrôle montre les remarques suivantes :

1. Le chemin critique n'est pas continu dans la planification originelle du projet. Les deux premières tâches ont une marge totale de 1 jour. Durant l'exécution, la deuxième tâche a pris un jour de retard et le chemin critique est devenu continu mais le projet n'a pris aucun jour de retard.
2. L'activité remblai a pris un seul jour de retard. Ce jour est traduit par trois (3) jours de retard pour le projet. Cela est dû au fait que le délai d'exigence minimal qui suit l'activité *enduit mural* n'est plus absorbé par les jours fériés.

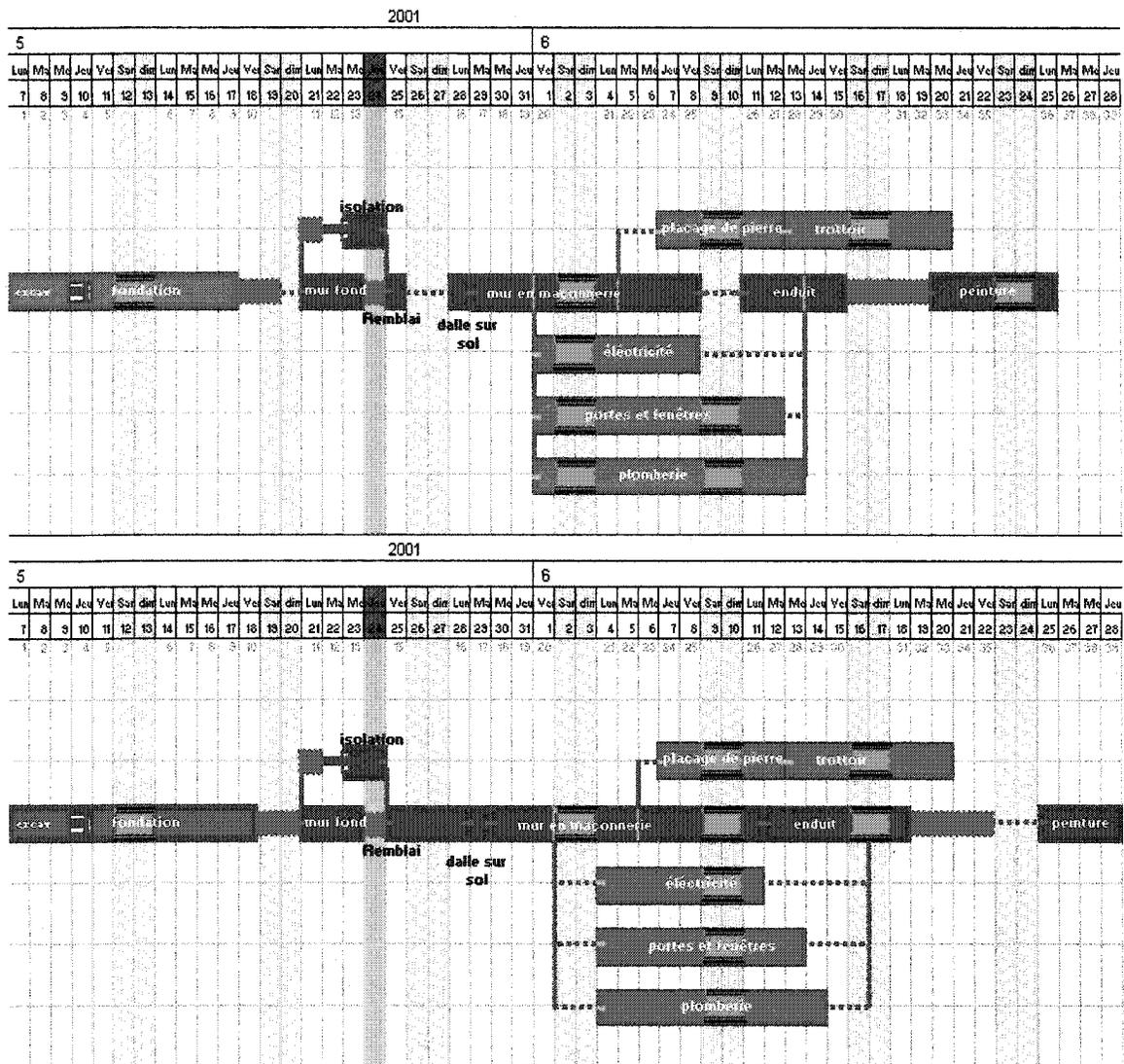


Figure 134 Le contrôle des projets à travers la méthode chronographique

9.3 Les Ressources

9.3.1 Méthodologie d'application

La méthodologie associée à la méthode chronographique est résumée dans les deux points suivants :

1. Elle propose que tous les types de ressources soient alloués et nivelés en même temps pour une certaine période, normalement une journée, avant de passer à la période suivante. La comparaison met en évidence l'application d'une méthodologie d'allocation verticale contre une procédure d'allocation horizontale (allocation d'un seul type de ressource à la fois pour tout le projet).
2. Elle n'exige pas que la quantité totale d'un certain type de ressource soit disponible pour débiter une activité. On peut donc débiter une activité avec une partie de sa main-d'œuvre à condition de respecter la composition des équipes.

9.3.2 Procédure d'allocation et de nivellement de ressources

La procédure proposée étant complexe, elle ne peut être appliquée qu'à l'aide d'un programme informatique spécialement conçu à cette fin. Un exemple simple est montré dans les *annexes 1 et 2* pour éclaircir le fonctionnement de la technique. Les points suivants donnent certaines explications à cet exemple.

Étape 1

L'activité *A* est représentée dans la *Figure 135*. Les jours de travail apparaissent sur cette activité à travers les lignes verticales. Les lignes horizontales sont tracées pour séparer les différents types de ressources qui devront être allouées à une activité.

Les ressources sont représentées dans les cellules de la façon suivante :

(Type de ressource) nombre d'équipes X quantités de ressources par équipe.

La quantité totale de ressources

(2)2x2	(1)2x3	(3)2x3	(1)2x3
6	6	6	6
(2)1x1	(3)1x1	(2)1x2	(2)1x3
2	3	2	2
(5)2x5	(5)2x5	(5)2x5	(5)2x5
10	10	10	10

Figure 135 Présentation des ressources

Étape 2

Les critères qui déterminent les priorités d'allocation et de nivellement entre les différentes activités doivent être définis par l'utilisateur. Dans cet exemple, les critères utilisés sont par ordre : la *marge libre*, la *marge totale* et la *durée de l'activité*. Le *Tableau IV* présente le nombre de ressources allouées à chaque activité.

Dans cet exemple, les deux activités *A* et *C* ont la même *marge libre* de zéro, donc ils ont la même priorité. Pour ce qui est du deuxième critère, la *marge totale* devrait donc être utilisée. Les deux activités *B* et *D* sont au troisième rang. Ces deux activités possèdent les mêmes priorités selon les trois premiers critères. Leurs priorités seront donc évaluées en fonction de la disponibilité des ressources.

Tableau IV
Ressources associées aux activités

Activités	Marge libre	Marge totale	Durée	Ressources						
				R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
A	0	0	4	6	1	0	0	10	0	0
B	1	3	2	6	0	0	0	10	0	0
C	0	2	3	6	0	0	0	10	0	0
D	1	3	2	0	1	0	0	0	12	0

Étape 3

L'analyse démarre avec le premier type de ressource *type 1*. Pour la première journée 18 ressources sont demandées. La quantité disponible étant de 9 ressources, certaines activités doivent être décalées au jour suivant en utilisant les règles de priorité.

L'activité *A* utilise six (6) ressources *type 1*, il reste donc trois (3) ressources pour l'activité *C*. Cette activité nécessite 6 ressources *type 1* réparties en deux équipes de 3 ressources chacune. Une seule équipe de 3 ressources pourra donc démarrer la première journée. Une partie des travaux, qui devraient être exécutés cette journée par les trois (3) autres ressources, serait décalée d'une journée. Les travaux manquant et les ressources relatives seront donc ajoutés à ceux déjà existants dans la deuxième journée (voir *Annexe 2* page 2 de 7).

Si cette *activité C* utilisait une seule équipe de 6 ressources de *type 1*, le nombre minimal qui pourra être utilisé pour démarrer cette activité dépasserait le nombre de

ressources disponible. Dans ce cas, on devrait décaler toute l'activité d'un jour et passer à l'activité qui aura la troisième priorité.

Étape 4

Tous les autres types de ressources existantes dans l'*activité C* devront être utilisées avec la même proportion que celle utilisée pour le *type 1*. L'*activité C* utilise dix (10) ressources de *type 5*, divisées en deux équipes de 5 ressources chacune, donc 50 % seront toujours utilisées et les 50 % autres seront décalées d'un jour.

Étape 5

L'*activité B* utilise le *type 1*, elle est donc décalée d'une journée tandis que l'*activité D* qui n'a pas besoin de ce type de ressource reste inchangée.

Étape 6

Les étapes précédentes, soit de 3 à 5, sont répétées avec les ressources de *types 2, 3, 4, 5, 6 et 7* jusqu'à ce que l'allocation des ressources soit terminée pour la première journée.

Étape 7

La même procédure utilisée pour la première journée est employée pour la deuxième journée et ensuite la troisième et ainsi de suite jusqu'à la fin du projet.

9.3.3 Renivellement des ressources

En utilisant la procédure d'allocation et de nivellement des ressources présentée dans l'*annexe 2*, la durée totale du projet a augmenté d'une journée. De plus, nous pouvons constater que l'utilisation des ressources, après ce premier nivellement, reste inefficace.

Ainsi, un deuxième nivellement s'avère nécessaire afin de pouvoir optimiser l'utilisation des ressources.

La méthode employée au deuxième nivellement utilise toujours un nivellement passe avant comme le premier nivellement. Par contre, durant le premier nivellement, les activités non prioritaires étaient décalées d'une journée si la quantité de ressources disponibles était insuffisante pour exécuter toutes les activités. Au deuxième nivellement, l'exécution des activités est anticipée, dans la mesure du possible, de la journée suivante si des ressources se trouvent inutilisées dans la journée en cours.

Dans *l'annexe 2, page 7*, la quantité de ressources *type 1* utilisée, le mardi de la troisième semaine s'élève à six (6) ressources. La disponibilité durant cette journée étant de neuf (9) ressources, trois (3) ressources restent inutilisées. Pour faire le renivellement il faut sélectionner, par ordre de priorité, une activité qui pourra utiliser ces ressources. Dans le cas présenté, une seule activité, *l'activité h*, répond à ce critère. Une partie équivalente à ces trois (3) ressources de l'activité est donc empruntée de la journée suivante.

Ce processus est utilisé dès le début jusqu'à la fin du projet, À chaque jour, il faut vérifier les ressources libres et emprunter une portion d'une activité équivalente. Avant de faire cet emprunt, une vérification de la disponibilité des autres types de ressources utilisées par cette activité sera donc nécessaire. *L'annexe 3* démontre le processus utilisé par le deuxième nivellement.

La Figure 136 montre l'utilisation des ressources après un nivellement pour la spécialité mécanique de procédé du projet de station d'épuration à Kahnawake.

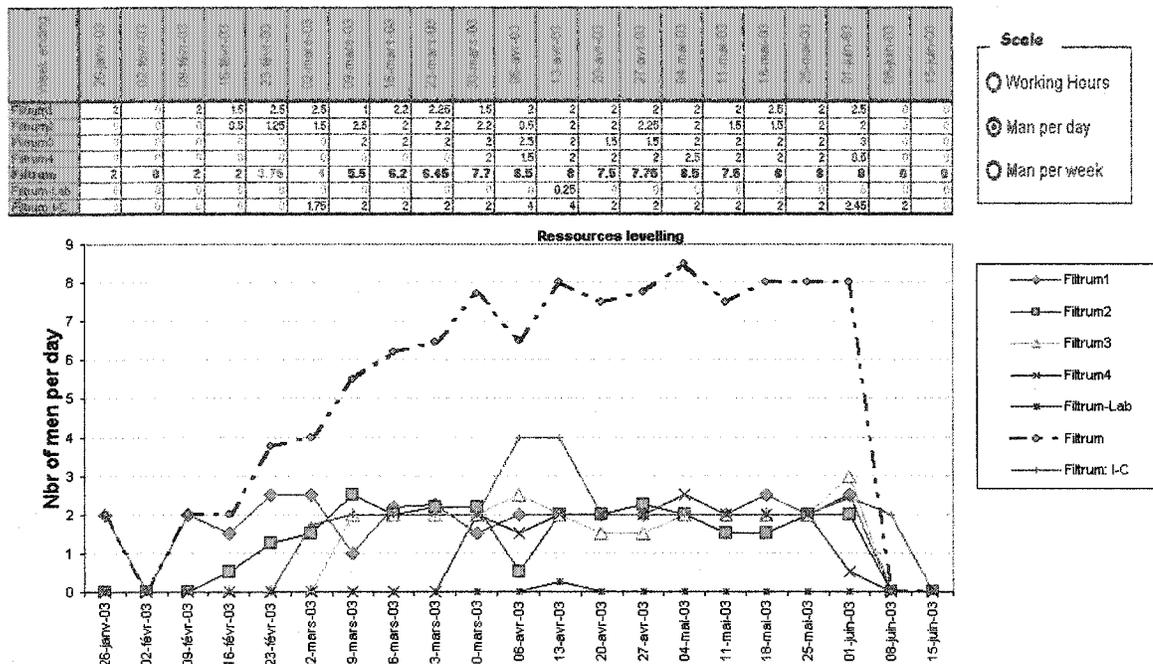


Figure 136 Utilisation des ressources

9.3.4 Rassemblement des ressources

Reprenons l'exemple cité dans la section 1.1.3 : Rassemblement des ressources. Cet exemple traite du rassemblement des ressources d'un petit projet constitué de 17 activités. Ce même exemple est montré dans cette partie à titre de comparaison. Les deux Figure 137 et Figure 138 illustrent cette comparaison.

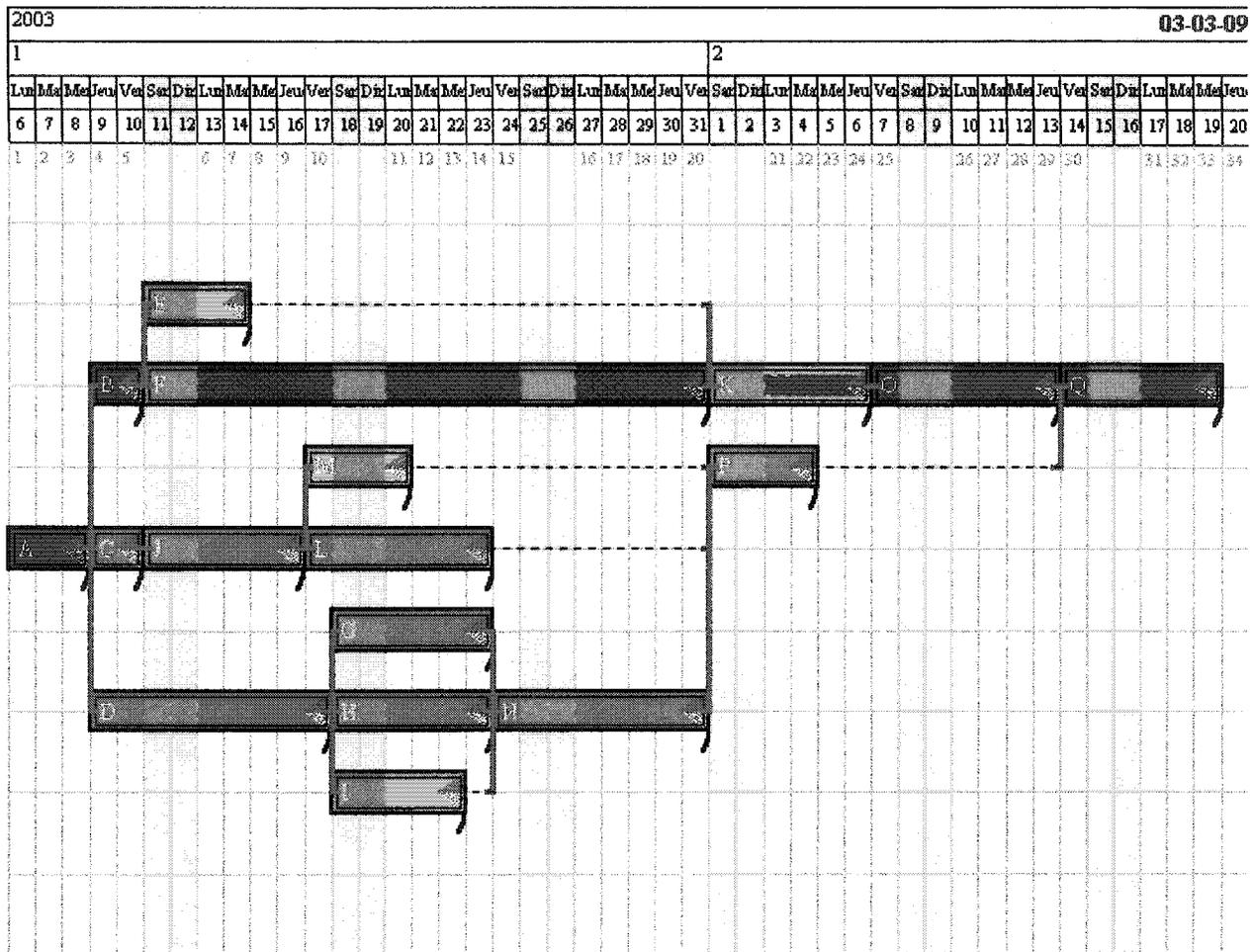


Figure 137 Le projet avant rassemblement des ressources

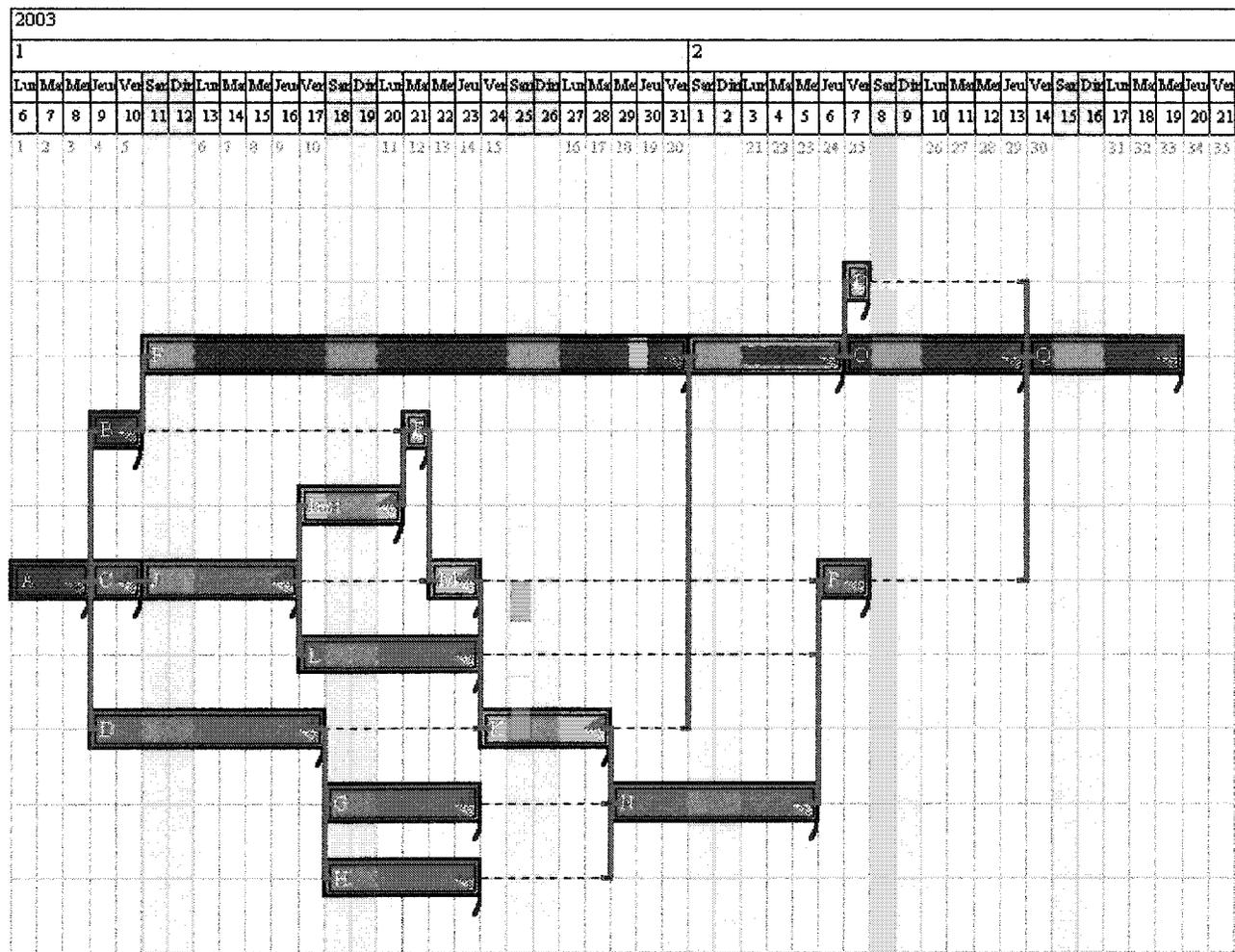


Figure 138 Le projet après rassemblement des ressources

9.4 Plan de validation de la méthode chronographique

Afin de pouvoir renforcer l'argumentation scientifique de cette thèse, un processus de validation de la méthode chronographique a été établi selon le plan suivant :

- L'application de la méthode chronographique sur trois projets réels :
 1. la construction de la Station d'Épuration de Kahnawake,
 2. la construction du Palais de Justice de Mont-Laurier,
 3. la planification du projet Le Scop les brises du fleuve.
- L'analyse des mesures de performance des modèles de planification à travers la littérature existante dans le but de définir les critères d'évaluations existantes.
- Le développement des coefficients pour mesurer la clarté et la fidélité des modélisations graphiques. Ces coefficients développés devraient servir à évaluer la méthode chronographique en la comparant aux autres méthodes existantes.
- Établir un protocole de validation externe afin de pouvoir confirmer les constats notés durant l'application de la méthode sur les trois projets réels. Ce protocole pourrait être appliqué par un étudiant de la maîtrise sur deux étapes :
 1. la comparaison des modélisations graphiques des différentes méthodes sur un nombre suffisant de projet déjà exécuté dans le passé,
 2. l'application des diverses méthodes simultanément sur un projet réel.
- Enfin, nous croyons que plusieurs années d'application seront nécessaires afin que les données puissent être réellement validées.

9.4.1 Applications réelles

9.4.1.1 La Station d'Épuration de Kahnawake

La première application réelle de la modélisation *chronographique* fût le projet de *station d'épuration à Kahnawake*. Ce projet dont le coût de construction s'élevait à 4 millions \$ a été réalisé par le *Technical Engineering Services of the Mohawk Council of Kahnawake* durant la période de septembre 2002 à juin 2003.

Durant ce projet, plusieurs facettes des réseaux d'ordonnancement à deux directions de flux de logique ont pu être testées. Sachant que le prototype principal s'intéresse surtout aux modélisations à une direction de flux de logique, des applications informatiques spécifiques ont été développées.

Plusieurs exemples de ces modélisations ont été montrés tout au long de la présentation de cette thèse. Pour fin de comparaison ce même projet est présenté dans l'annexe 3 avec la méthode chronographique et sur MS-Project avec le Diagramme de Gantt et la précédence.

Cette comparaison montre la supériorité de la modélisation chronographique sur plusieurs aspects dont la surface de présentation utilisée qui se trouve largement diminuée, la clarté de présentation de l'information qui se trouve nettement améliorée et la capacité de présentation de l'information sur plusieurs formes compatibles les unes avec les autres qui est devenue possible à l'aide de la modélisation chronographique.

Avec ces améliorations, la modélisation chronographique s'est avérée très efficace et très utile dans le processus de prise de décision. De plus, le suivi du chantier fût grandement facilité.

9.4.1.2 Le Palais de Justice de Mont-Laurier

Un projet dont le budget de construction s'élève à 12 millions de dollars. Ce projet est en cours d'exécution et la date de mise en service est prévue pour le mois mars 2004. Ce projet fût originalement planifié avec MS-Project selon la demande du client. L'auteur de cette thèse a été désigné le 10 mai 2004 comme gérant du projet. À cette date, le pourcentage d'avancement des travaux de construction a été évalué à 15%.

Durant le mois de juin 2004, des facettes à deux directions de la modélisation chronographique ont été testées afin de faciliter les travaux de suivi. Les réactions des hommes de chantier se sont avérées très positives de sorte qu'actuellement une généralisation de l'application de la méthode chronographique sur tout le projet est en cours.

Pour fin de comparaison, l'annexe 3 montre la planification du projet sur MS-Project à travers Le Diagramme de Gantt et la précédence et les facettes des parties testées du projet à travers la modélisation chronographique. Les mêmes remarques d'améliorations citées pour le projet de *station d'épuration à Kahnawake* sont valides pour ce projet. Ainsi, l'efficacité d'utilisation de la surface de présentation et la clarté d'illustration de l'information qui se trouvent nettement améliorées.

9.4.1.3 Le Scop les brises du fleuve

Ce troisième projet concerne le renforcement sismique d'un immeuble de 12 étages à Montréal. Les travaux sont prévus entre le 2 août et le 14 décembre 2004. Ce projet à caractère répétitif s'applique principalement sur deux appartements et certaines colonnes sur chaque étage. Les travaux comprennent la protection temporaire, les travaux de démolition, le renforcement à travers des plaques d'acier soudées sur des cornières et les travaux de finition.

Ce projet fût planifié à titre de comparaison à travers la modélisation chronographique, et le Diagramme de Gantt et la Précédence en utilisant MS-Project. Les réactions du gérant du projet et de son surintendant se sont avérées très positives. Ainsi, ils ont décidé d'utiliser la méthode chronographique pour les travaux de gestion et de suivi de leur projet. Cette décision a été basée sur plusieurs critères dont la clarté, la facilité de suivi du chantier, l'effort nécessaire pour modifier l'échéancier et la compréhension générale du projet.

9.4.2 Mesures de performance des modèles de planification

Cette section a comme objectif de définir les critères d'évaluation actuels des modélisations graphiques de planification. Cette évaluation qualifie la complexité de l'utilisation de ces modélisations. Gidado (1996) classe les sources de complexité dans les projets en deux catégories :

Catégorie A : porte sur les composantes intrinsèques des opérations reliées aux tâches individuelles et qui sont originaires des ressources employées ou de l'environnement.

Catégorie B : porte sur les complexités provenant de la construction du flux de travail en mettant les différentes parties ensemble.

La catégorie B s'intègre dans le sujet traité par cette thèse. C'est elle qui sera considérée dans cette section. Plusieurs chercheurs (Johnson 1967), (Kaimann 1974), (Davies 1974 et 1975), (Badiru 1988b) ont étudié la complexité des réseaux et ont proposé des formules à cette fin. Ces propositions évaluent le niveau de difficulté rencontré et l'effort nécessaire pour la production du réseau.

À notre connaissance, aucun travail ne s'intéresse à l'analyse de la complexité des réseaux en fonction de :

1. l'optimisation de l'utilisation de la surface de représentation;

2. la clarté visuelle;
3. la fidélité au projet;
4. l'échelle du temps.

Selon Shugar (1985), pour pouvoir planifier un projet convenablement, un outil de gestion compréhensible est nécessaire. F.B.Vernadet (1996) est d'avis que les modèles doivent être suffisamment complets pour approximer au mieux la réalité des projets.

9.4.3. Les coefficients de comparaison

Les coefficients utilisés dans cette section comparent la visualisation et la fidélité de représentation entre les différentes méthodes de planification à l'échelle du temps. Ces coefficients servent à classer les méthodes en les comparant comme un ensemble. Plus la valeur du coefficient augmente, plus la méthode apparaît plus intéressante. Ainsi, il n'y a pas de limite pour dire que la méthode est bonne ou mauvaise, mais plutôt comment elle se situe par rapport aux autres méthodes. Il est de plus évident que les méthodes comparées doivent représenter le même niveau de détail.

9.4.2.1 La performance visuelle

La performance visuelle compare les différentes méthodes de planification en tenant compte de l'aspect de clarté visuelle et de l'optimisation de l'utilisation de la surface de travail. Cette comparaison est effectuée avec un *Coefficient d'Optimisation Visuelle* « *COV* ».

$$COV = C_1 \times FS + C_2 \times FI + C_3 \times FR + C_4 \times FP$$

Dont :

FS = Facteur de surface

FI = Facteur d'intersection

FR = Facteur de relation

FP = Facteur de préférence

C_1, C_2, C_3, C_4 = Coefficients d'ajustement pour réduire les quatre facteurs à des tailles comparables. Chaque coefficient est ajusté pour donner une valeur de 1 au facteur correspondant qui apporte la plus grande valeur.

Exemple : Un projet est planifié à travers deux méthodes de planification. Le facteur d'intersection *FI* est de 3 et 0.8 respectivement pour chacun des projets. Le coefficient d'ajustement C_2 deviendra donc $1/3 = 0.3333$. Les valeurs des deux facteurs seront de $0.3333 * 3 = 1$ pour le premier projet et $0.333 * 0.8 = 0.2666$ pour le deuxième projet.

Sachant que :

Facteur de surface = Nombre d'activités jour / Surface

Facteur d'intersection = Nombre de relations / Nombre d'intersections

Facteur de relation = Nombre de relations / Longueur verticale des relations

Facteur de préférence = Préférence personnelle de l'utilisateur qui reflète la facilité de lecture. Une note de 1 à 4 est attribuée à ce facteur soit :

4 = très facile,

3 = assez facile,

2 = assez difficile,

1 = très difficile.

Surface = Nombre de points sur la grille = Nombre d'unité de temps (points horizontaux) X Nombre de lignes utilisées pour présenter les activités en parallèle (points verticaux).

Nombre d'intersections = Nombre de fois où deux relations se croisent + Nombre de fois où une relation coupe une activité.

Longueur verticale des relations = Nombre de points verticaux sur la grille utilisés par la relation.

9.4.2.2 La fidélité de représentation des projets

Le *Coefficient de fidélité au projet « CoFAP »* évalue la fidélité de la méthode pour modéliser la réalité des projets.

$$\text{CoFAP} = \text{NTA} / (\text{NTC} + \text{NCI})$$

NTC = Nombre total de contraintes représentées dans la cédule. Sachant qu'une relation qui comporte un délai est considéré comme deux contraintes.

NCI = Nombre de contraintes représentées dans la cédule et qui ne représente pas des contraintes réelles. Comme exemple, utiliser un délai avec une relation pour représenter une quantité exécutée.

NTA = Nombre total d'activités.

9.4.2.3 La performance de modélisation

Ce coefficient mesure la performance de la modélisation autant du point de vue visuel que fidélité de représentation. Cette mesure est la plus réaliste et la plus représentative. Sachant qu'une modélisation pourra être très visuelle mais ne représente qu'une quantité limitée d'information. Au contraire, une modélisation pourra être trop fidèle au projet mais sa visualisation est très complexe.

La combinaison entre les deux coefficients précédents s'avère importante. Cette section propose donc le *Coefficient de la Performance de la Modélisation « PM »*

$$PM = C_1 \times COV + C_2 \times CoFAP$$

C_1 et C_2 = Coefficients d'ajustement pour réduire les deux coefficients à des tailles comparables. Chaque coefficient est toujours ajusté pour donner une valeur de 1 au facteur correspondant qui apporte la plus grande valeur

9.4.3 Protocole de validation externe

Finalement, un protocole de validation externe est établi afin de pouvoir confirmer les constats notés durant l'application de l'approche chronographique sur les trois projets réels. Ce protocole pourrait être appliqué par un étudiant lors d'un projet de maîtrise sur deux étapes. La première étape concerne la comparaison des modélisations graphiques sur un nombre suffisant de projet déjà exécuté dans le passé et la deuxième est relative à l'application des diverses méthodes simultanément sur un projet réel.

9.4.3.1 la comparaison de la planification d'un nombre suffisant de projet déjà exécuté dans le passé.

Cette étape concerne la comparaison de la planification d'un nombre suffisant de projet déjà exécuté dans le passé avec les méthodes traditionnelles et la méthode chronographique. Cette comparaison devrait être faite à l'aide des coefficients :

- les coefficients traditionnels afin d'évaluer le niveau de difficulté rencontré et l'effort nécessaire pour la préparation des réseaux;
- les coefficients développés par cette thèse, afin de mesurer la performance de la modélisation autant du point de vue de la clarté visuelle (optimisation de l'utilisation de la surface de travail, complexité de lecture, etc.) et de la fidélité de modélisation de la réalité des projets;
- d'autres coefficients qui pourront être suggérés par l'étudiant, le cas échéant.

Notons que les méthodes comparées doivent contenir le même niveau de détail et le même type d'information.

9.4.3.2 L'application des diverses méthodes simultanément sur un projet réel.

Cette deuxième étape concerne la comparaison des méthodes traditionnelles avec la méthode chronographique sur un projet réel. Cette comparaison pourrait se faire sur plusieurs étapes.

Lors de la planification du projet

- Le coût d'utilisation des équipements de travail nécessaires (ordinateurs, imprimantes, papier, etc.);
- Le niveau de formation technique nécessaire à pouvoir planifier ou participer à la planification du projet;
- Évaluer les efforts nécessaires pour la préparation des échéanciers en terme du temps requis, des coûts associés, des difficultés et des problèmes rencontrés et du pourcentage des travaux de préparation manuelle requise;
- Comparer la performance de la modélisation autant du point de vue visuel que fidélité de représentation.
- Juger le niveau de satisfaction général des intervenants envers les différentes méthodes.

Lors du suivi du chantier

Effectuer un rapport mensuel d'avancement de chantier pour l'évaluation des méthodes employées de point de vue :

- de la facilité de compréhension et de modification;

- des problèmes rencontrés lors de l'application de chaque méthode;
- du niveau de confiance envers ces modélisations;
- de l'analyse des résultats obtenus durant le processus de prise de décision;

des préférences et des réactions personnelles du client, du gestionnaire, du surintendant et des hommes du chantier..

À la fin du chantier

- Faire un bilan qui synthétise le processus d'utilisation de chaque méthode et qui dresse les comparaisons et les évaluations effectuées tout au long de ce processus.
- Évaluer l'importance générale d'utilisation de chaque méthode durant les différentes étapes du projet.
- Effectuer les recommandations et les suggestions selon le point de vue de l'étudiant, du client, du gestionnaire, du surintendant et des différents hommes du chantier.

CHAPITRE 10

LA PLANIFICATION À TRAVERS LE PROTOTYPE INFORMATIQUE

10.1 Objectifs de développement

Au cours des travaux de recherche, un prototype informatique compatible aux concepts a été développé. Ce développement est apparu essentiel dans le processus d'accomplissement de cette thèse. Dans le cas actuel, le prototype informatique remplaçait les tests de laboratoire et les travaux de simulation, normalement nécessaires aux travaux de recherche. Pour cela, le prototype développé n'est pas considéré comme une finalité en soi, mais plutôt comme outil qui transpose les concepts d'un état statique à un état dynamique.

Ce développement qui s'est effectué tout au long de l'avancement des recherches a permis de vérifier la validité des concepts à chaque étape. En plus, la réorientation continuelle et mutuelle de la méthode et l'application informatique ont démontré leur pertinence dans le processus de développement de la méthode chronographique.

L'outil informatique a aussi permis d'effectuer des travaux de comparaison avec les applications informatiques existantes. Il a facilité à plusieurs reprises de profiter de la réaction de l'industrie afin de mieux orienter les travaux de recherche.

Avec des interfaces conviviales, des représentations graphiques visuelles et flexibles, le prototype dans sa forme actuelle répond parfaitement aux attentes et aux objectifs initialement visés. Bien entendu qu'avec un tel processus de développement, le prototype reste un outil de laboratoire non-commercial.

10.2 Caractéristique du prototype

Les critiques de l'intelligence artificielle prétendent que des machines ne peuvent être savantes et que la résolution rationnelle des problèmes n'est pas une essence de l'intelligence, ainsi chaque système possède ses limites (Turk, 1998). Associer l'utilisateur dans le processus de décision et dans l'organisation visuelle de l'ordonnancement s'avère une solution qui aide à étendre les limites du système informatique.

L'outil informatique développé est considéré comme un prototype à fin ouverte. Cela veut dire qu'il permet une organisation graphique libre de l'ordonnancement à l'écran et à l'échelle du temps. Cette caractéristique spécifique le distingue des logiciels commerciaux de planification.

Le prototype informatique comporte des algorithmes qui lui permettent de présenter les différentes contraintes internes et externes aux activités et de gérer les données d'ordonnancement sous différents niveaux de détail. Il est aussi constitué des modules capables de résoudre les opérations pertinentes de gestion. Ainsi, il peut organiser les informations avec des techniques de rassemblement des sous-réseaux.

10.3 Planification à travers le prototype

La *Figure 139* montre l'interface utilisateur principal proposé par le prototype. Cette interface est constituée :

- D'un tableau qui démontre les informations concernant les activités et qui peut être personnalisé;
- D'un arrière-plan du chronographe qui démontre les jours du calendrier à l'échelle du temps;

- D'une barre inférieure pour faciliter la gestion des projets multiples. Cette barre contient les icônes minimisées des différents projets ou des sous-projets.

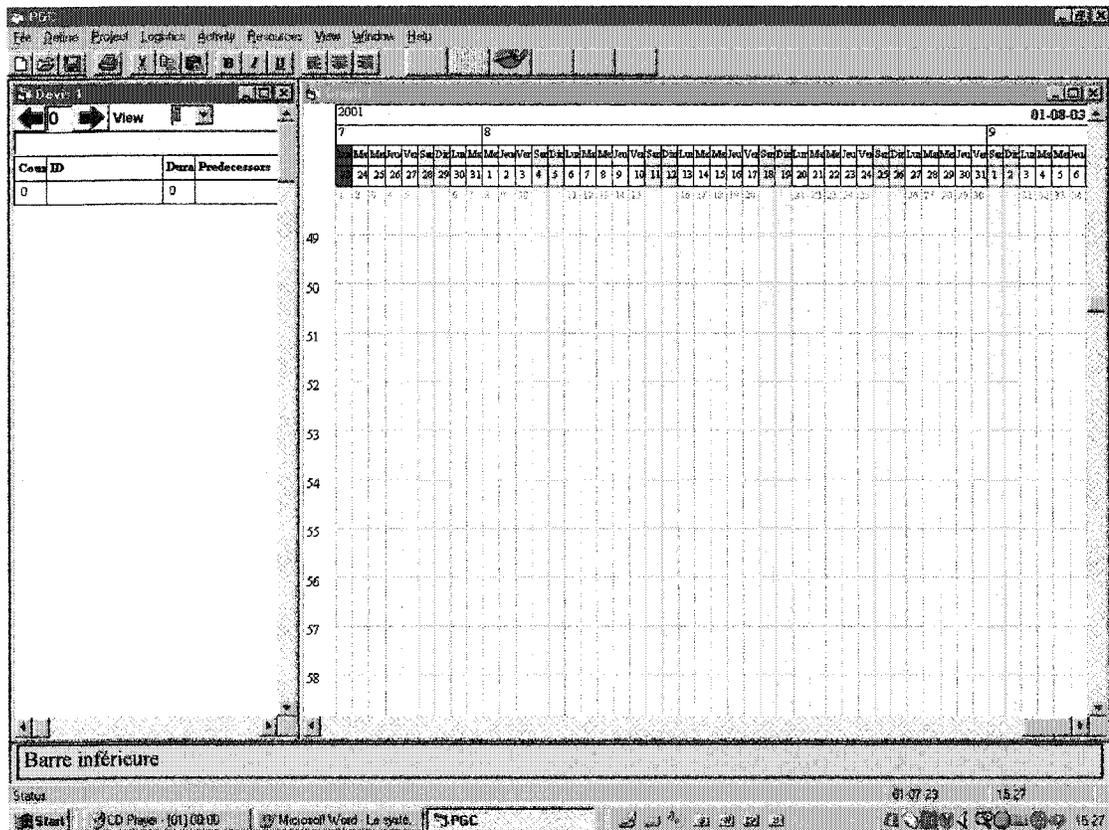


Figure 139 Interface utilisateur

Le processus de planification à travers le prototype est simplifié. Ainsi, la plupart des fonctions peuvent être exécutées à l'intermédiaire de la souris. La *Figure 140* montre la planification d'une activité en utilisant la souris.

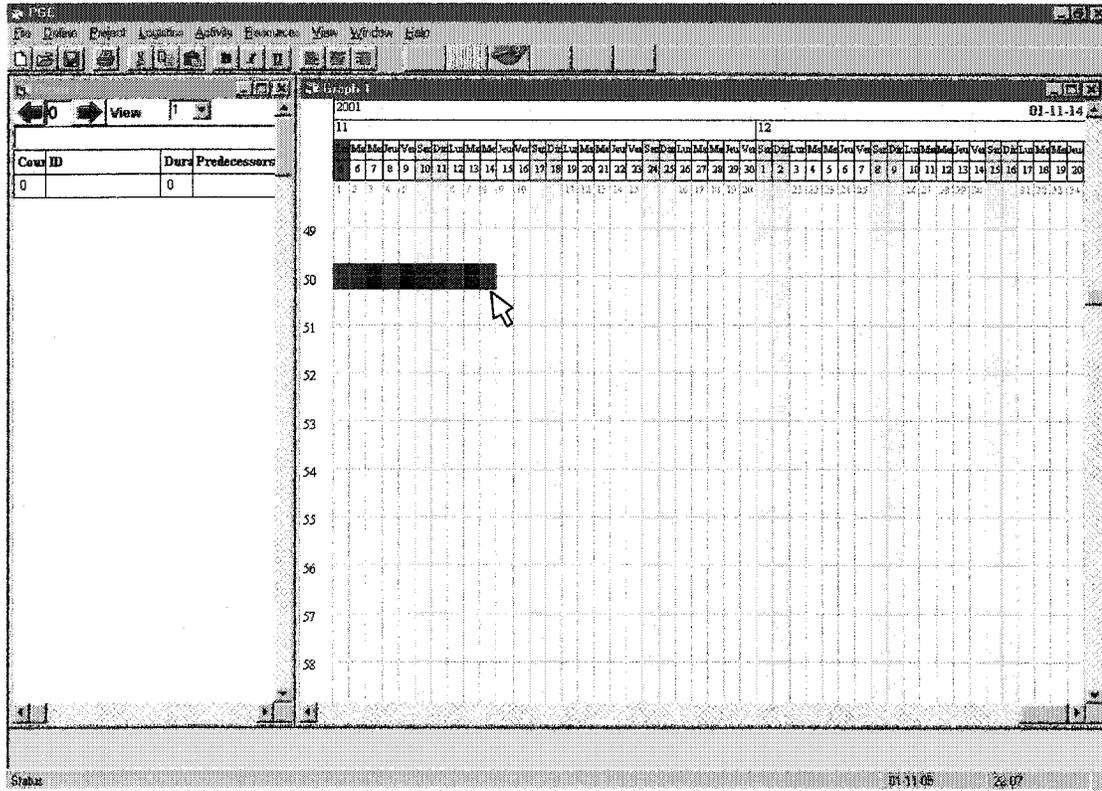


Figure 140 Dessiner une activité

Les *Figure 141* et *Figure 142* montrent la facilité de manipulation des activités. En utilisant la souris, une activité peut être déplacée horizontalement pour changer sa période d'exécution ou verticalement pour faciliter le rassemblement des sous-réseaux. De plus, la durée d'exécution pourra être augmentée ou diminuée.

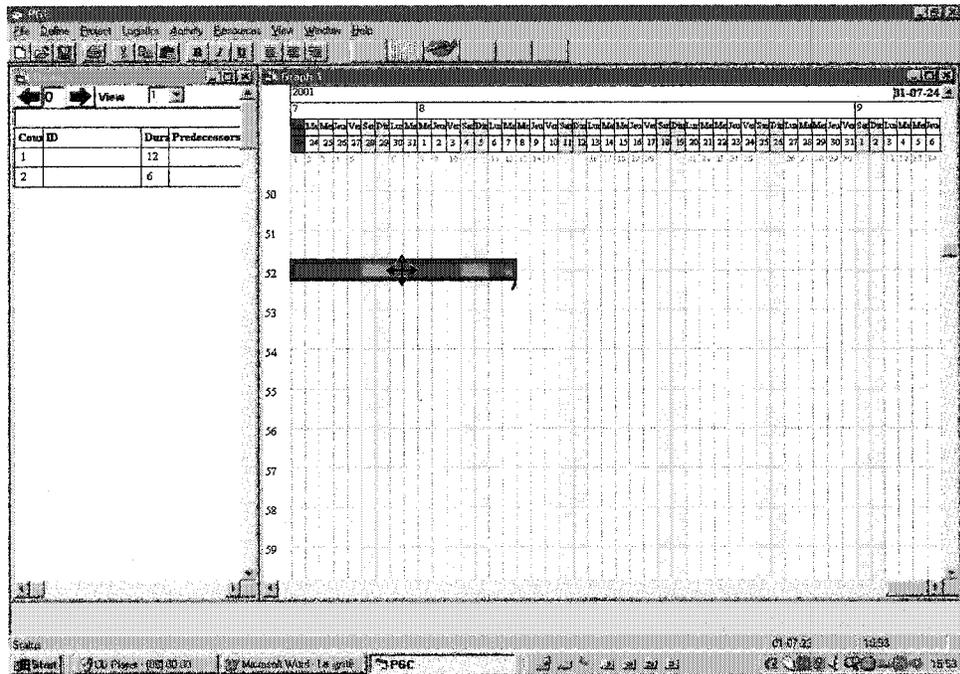


Figure 141 Déplacement d'une activité

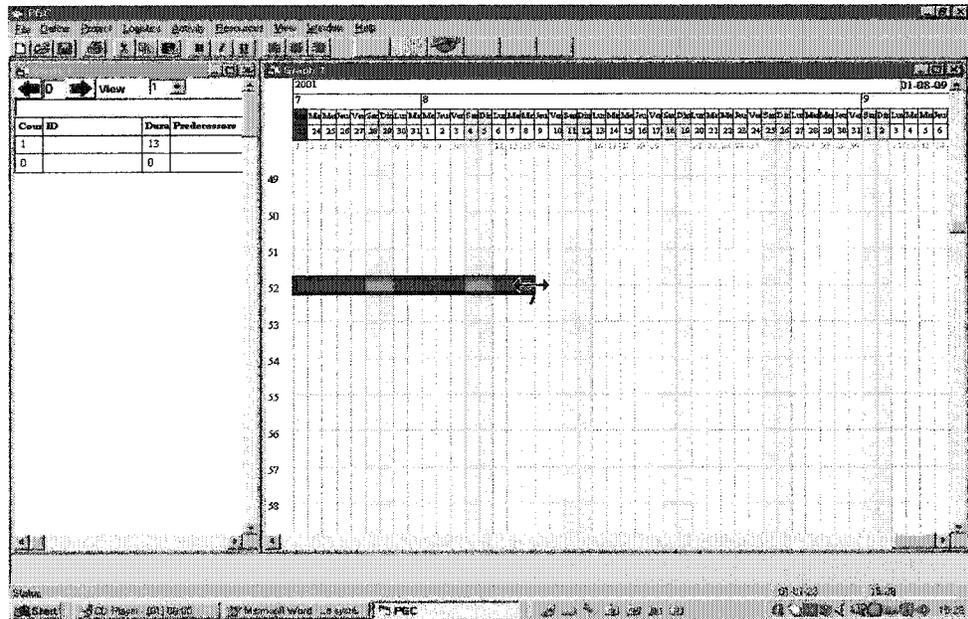
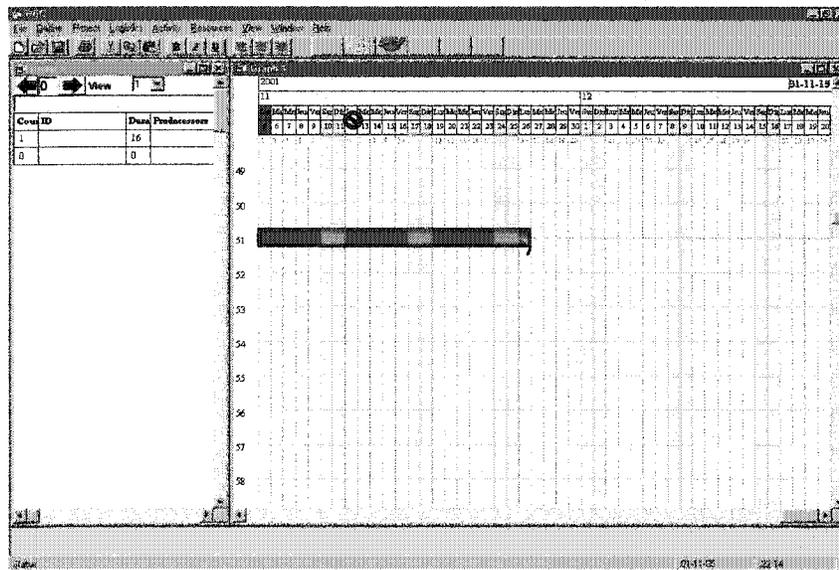
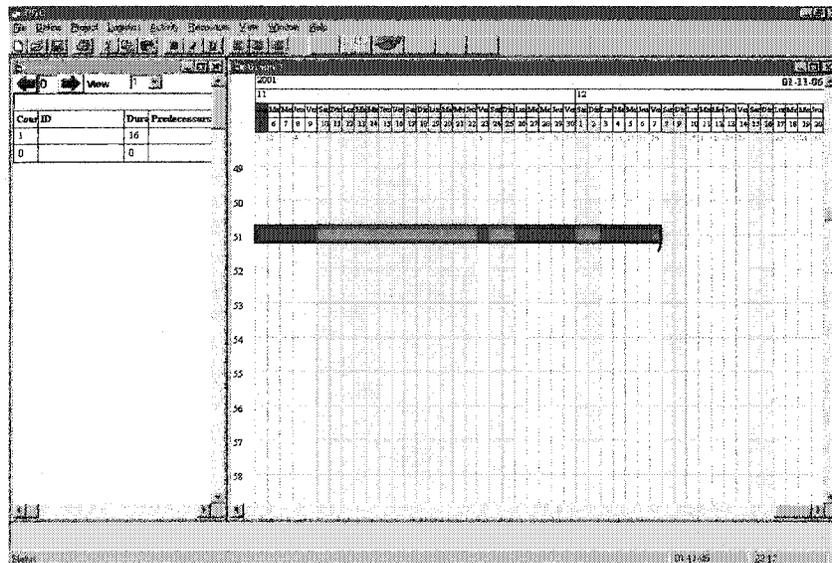


Figure 142 Changement de la durée d'une activité

Les Figure 143 a et b, démontrent l'ajout ou l'enlèvement des jours fériés de l'arrière plan en utilisant la souris.



(a)



(b)

Figure 143 Les jours fériés

Les gestionnaires peuvent ajouter les différents types de fonctions temporaires entre les activités en utilisant la souris, *Figure 144*.

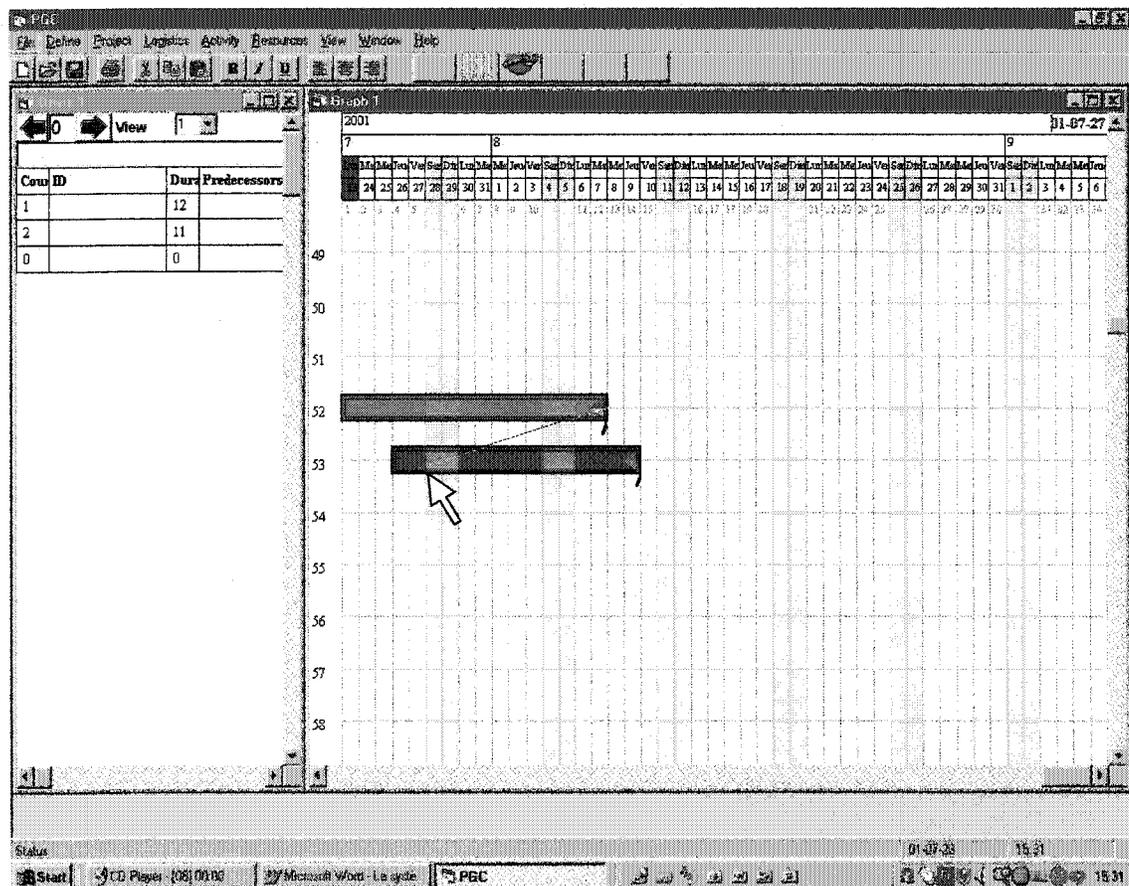


Figure 144 Fonctions temporaires

Le logiciel regroupe au fur et à mesure, côte à côte, les activités ayant des relations entre elles. Cela se fait à travers le module de regroupement des sous-réseaux existants dans la base de modèle. La *Figure 145* montre un sous-réseau groupé à travers le module associé au logiciel. Il faut toujours mentionner que le prototype permet l'arrangement du chronographe selon le besoin du gestionnaire en déplaçant manuellement les activités verticalement.

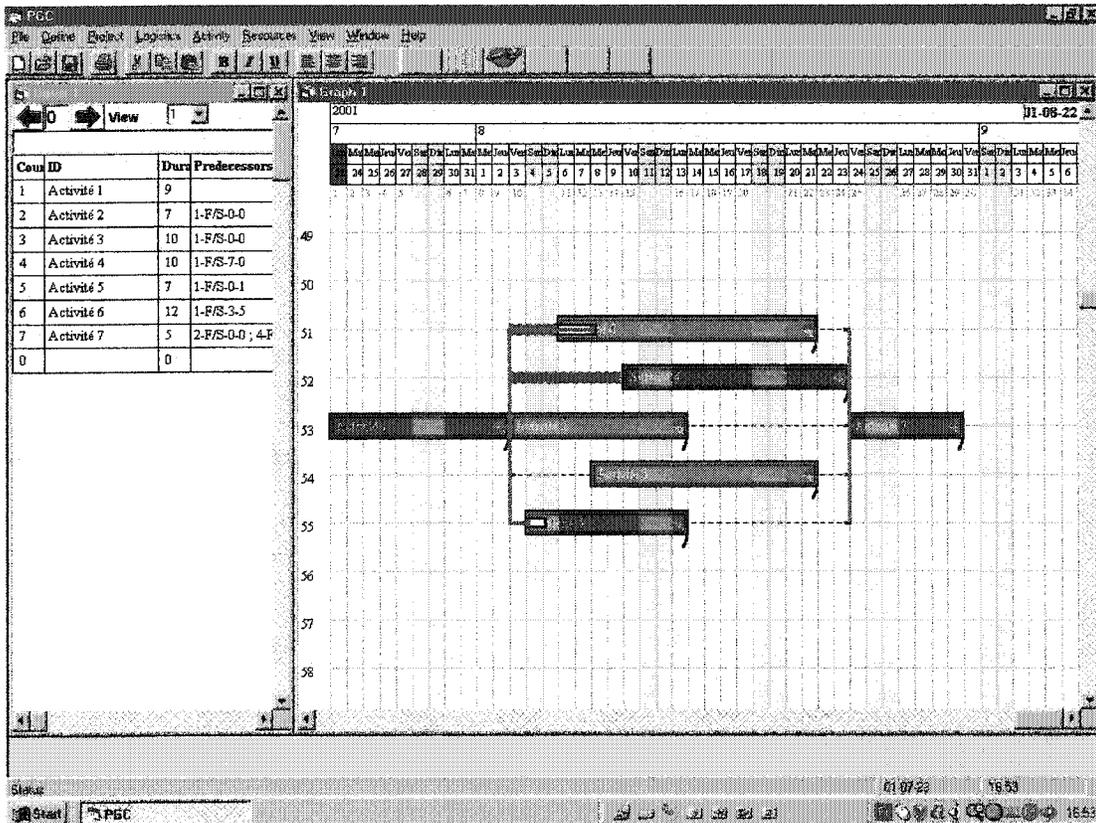


Figure 145 Un sous-réseau

À travers la souris, les décompositions des activités et les fonctions temporaires internes peuvent être exécutées. La *Figure 146* montre une fonction temporaire entre la division interne de l'activité 1 et le début de l'activité 2.

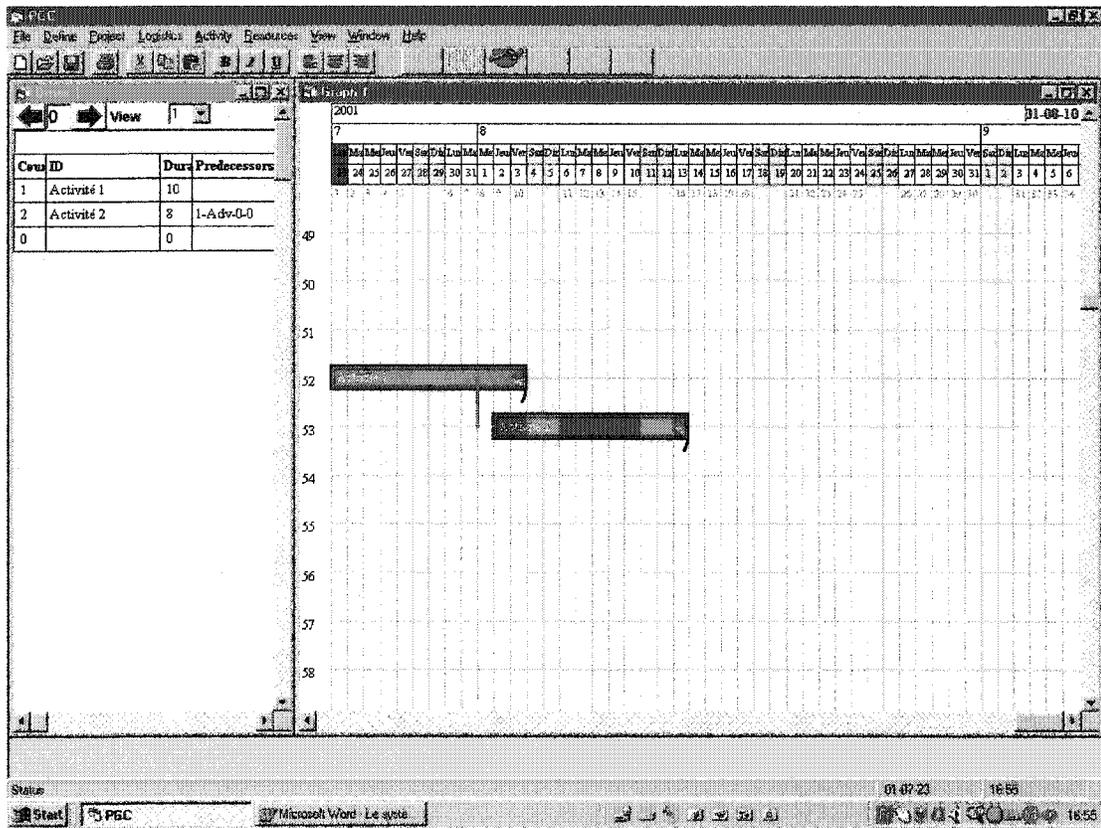


Figure 146 Fonctions temporaires internes

Les Figure 147, Figure 148 et Figure 149 illustrent des exemples planifiés à travers l'outil informatique. Ces figures témoignent la clarté des informations représentées par la méthode chronographique. Les informations peuvent être aussi vues sur différentes formes. Ainsi, des arrières plans avec des jours des calendriers, des semaines Figure 150, des mois ou des années peuvent être utilisés.

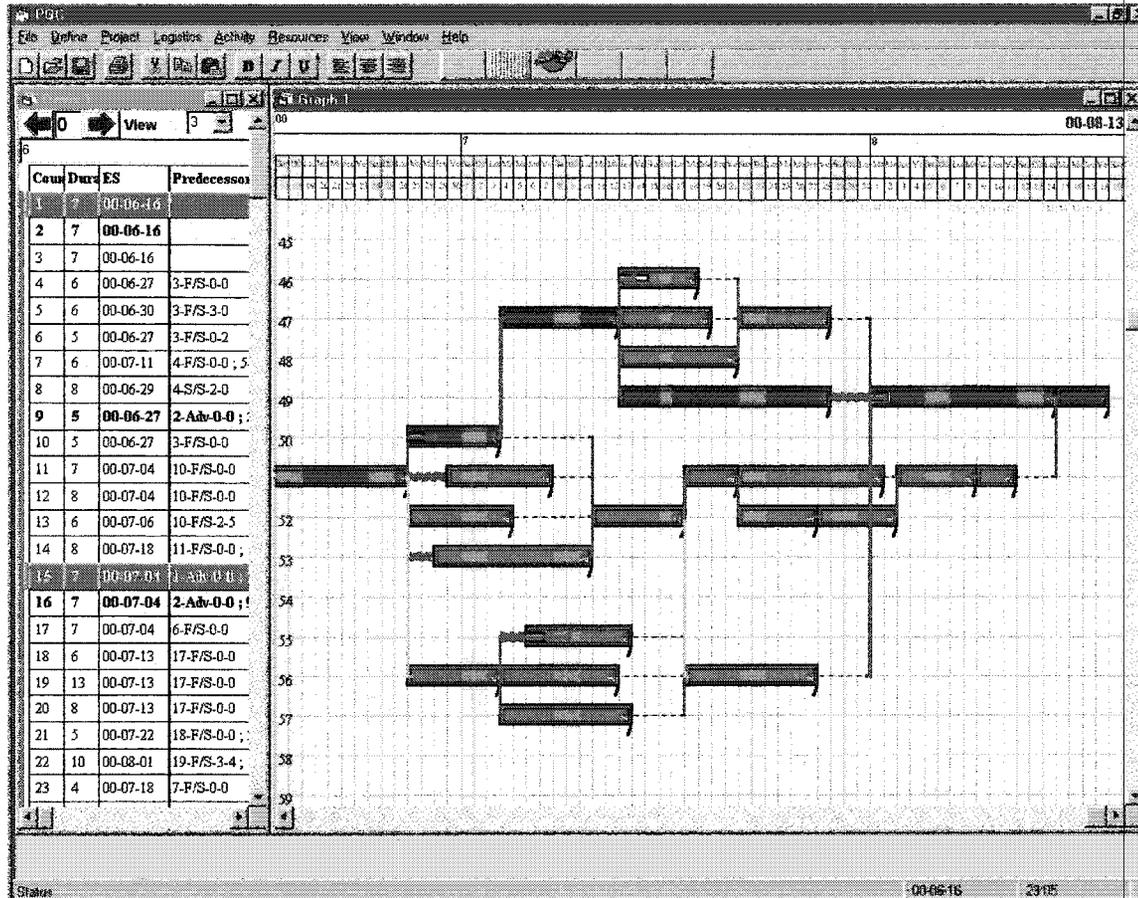


Figure 148 Chronographe planifié avec les jours du calendrier et démontrant les informations concernant les activités

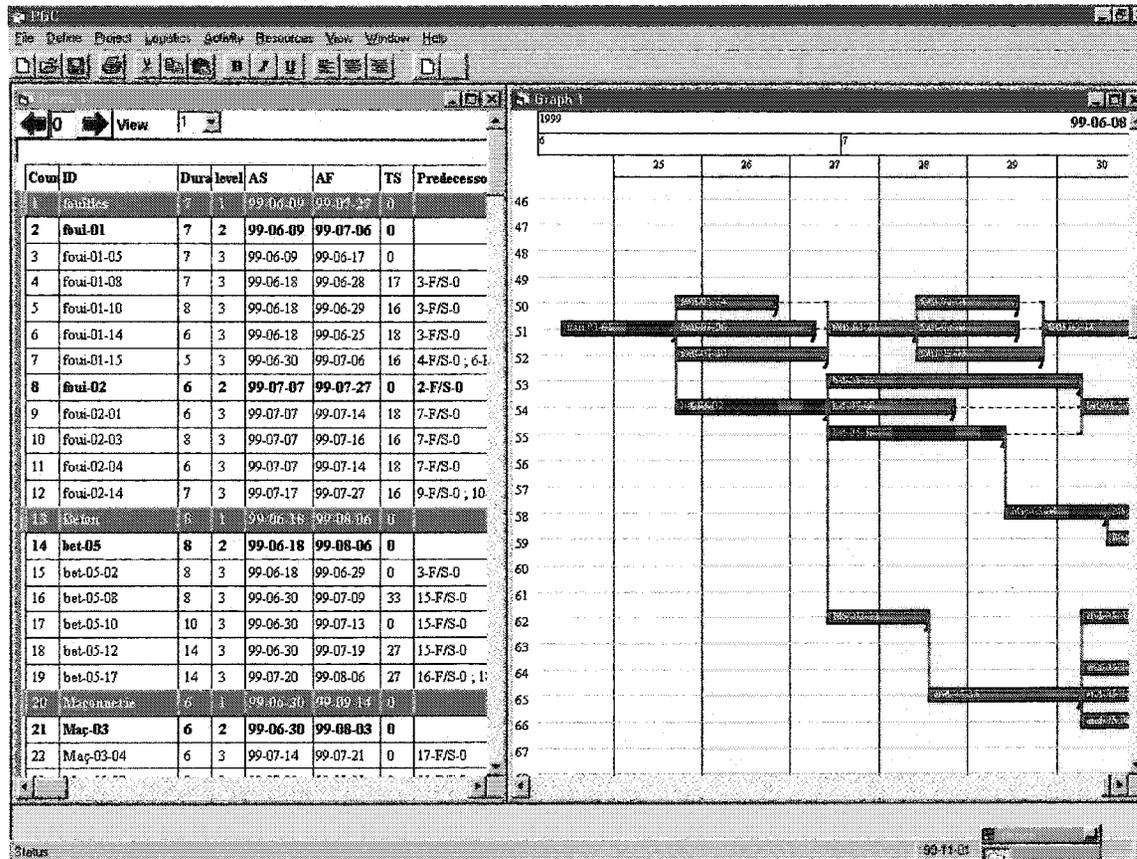


Figure 150 Chronographe planifié avec les semaines comme unité de temps et démontrant des informations concernant les activités

L'utilisateur peut aussi visualiser l'information ou faire l'entrée des données, concernant chaque activité à travers des formes spécifiques. Plusieurs choix existent pour montrer toutes les informations concernant une activité ou une partie sélectionnée de ces informations.

La Figure 151 montre les informations concernant l'activité 4-ferrailage. Avec une durée de 5 jours, cette activité possède l'activité 3-coffrage comme prédécesseur avec une relation *interne* (*advanced 0/1 - 0 - 0*) entre son début (0) et la première division (1) du prédécesseur. Cette relation ne comporte aucun délai d'exigence. L'activité 4-ferrailage possède toujours l'activité 5-bétonnage comme successeur avec une relation *fin/début*, aucun délai minimal exigé et un délai maximal exigé de 2 jours.

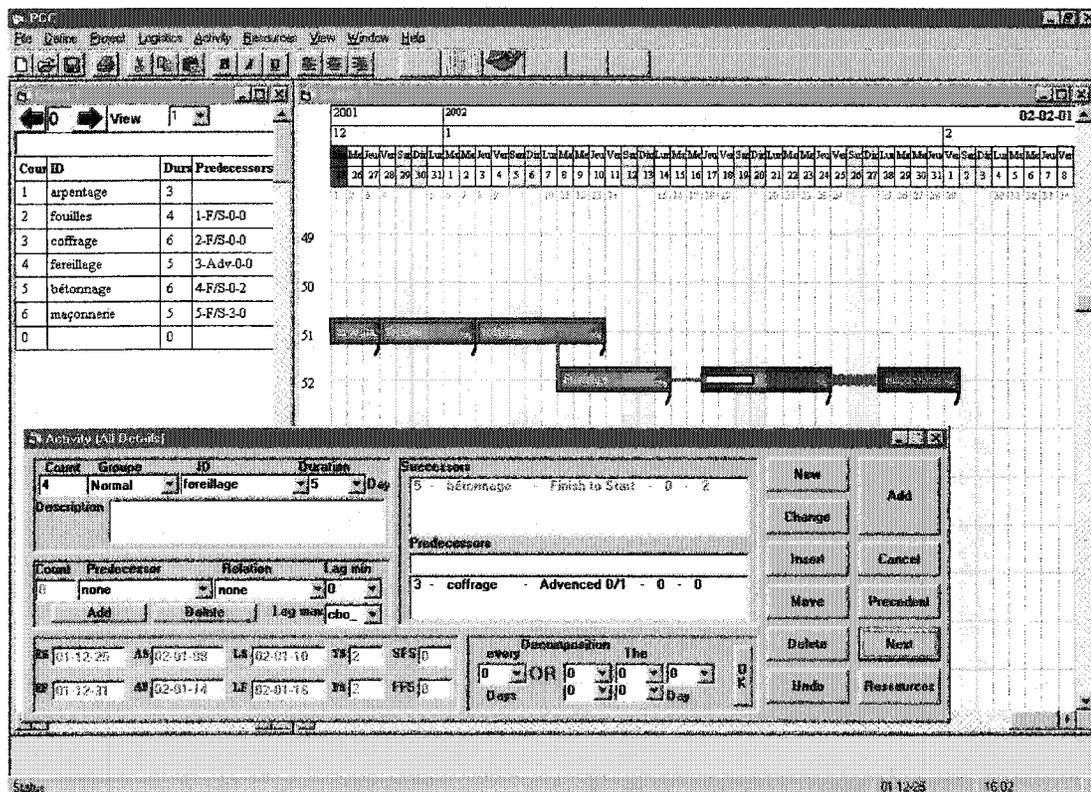
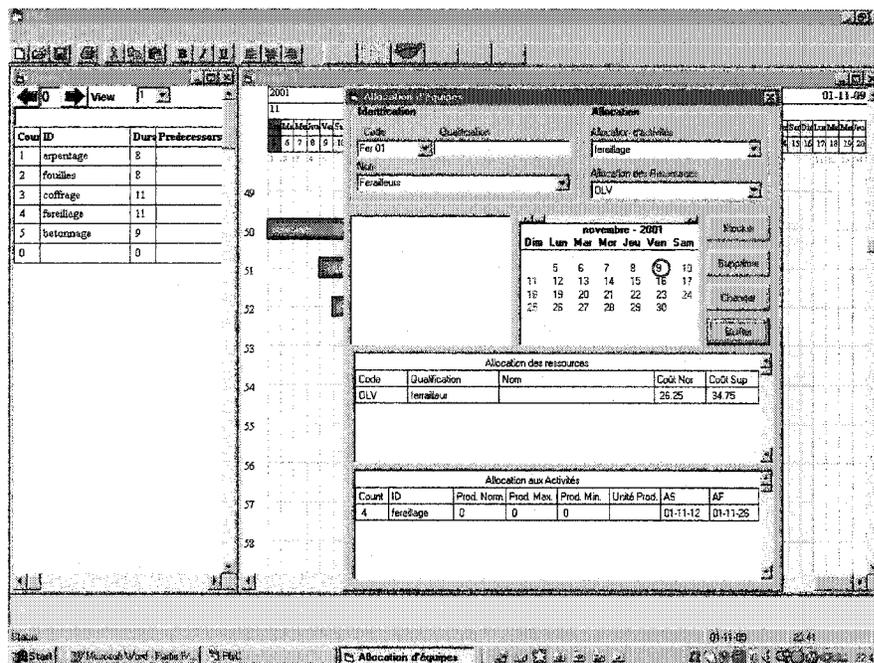
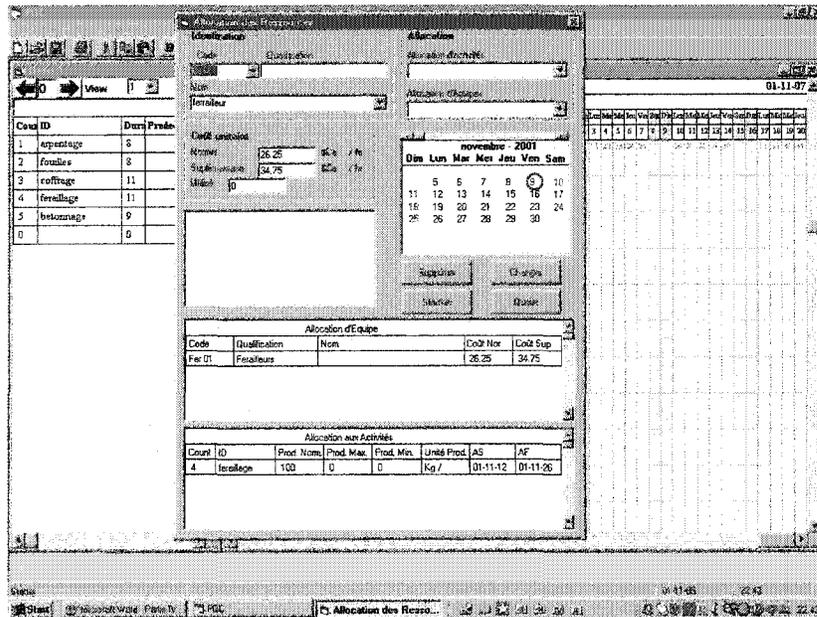


Figure 151 Informations sur les activités

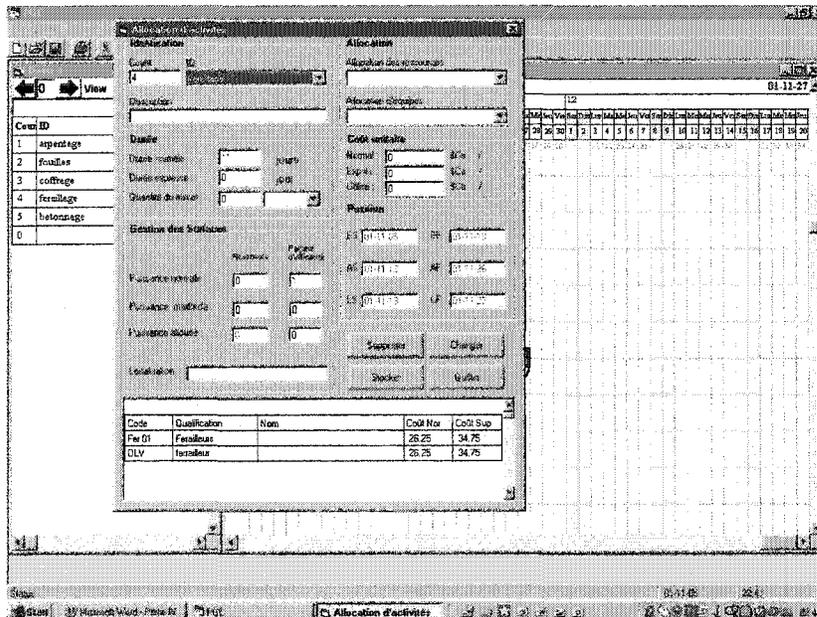
Les Figure 152a, b, c exposent respectivement la constitution des équipes, la base de données des ressources et l'allocation des ressources aux activités. Chaque ressource ou équipe peut avoir son propre calendrier qui peut être différent du calendrier global du projet. Ces calendriers désignent les exigences associées à l'utilisation de ces ressources. Le transfert d'informations entre les trois modules se fait automatiquement étant donné que l'information n'est entrée qu'une seule fois. Avant d'être validé, le module ressource vérifie l'information et avertit l'utilisateur de toute non-conformité d'utilisation.



a – Allocation d'équipe



b- Allocation des ressources



c- Allocations aux activités

Figure 152 Module d'allocation des ressources

10.4 Différents exemples d'application

10.4.1 Un projet à trois niveaux

Le prototype possède des modules qui peuvent organiser l'information sur plusieurs niveaux de détail. Les durées des niveaux supérieurs sont ajustées afin de refléter les changements qui se produisent au niveau le plus détaillé.

La méthode chronographique est capable de décomposer les activités et de démontrer des relations internes aux activités. Ainsi, les relations entre les activités des niveaux supérieurs peuvent être présentées d'une façon plus réaliste.

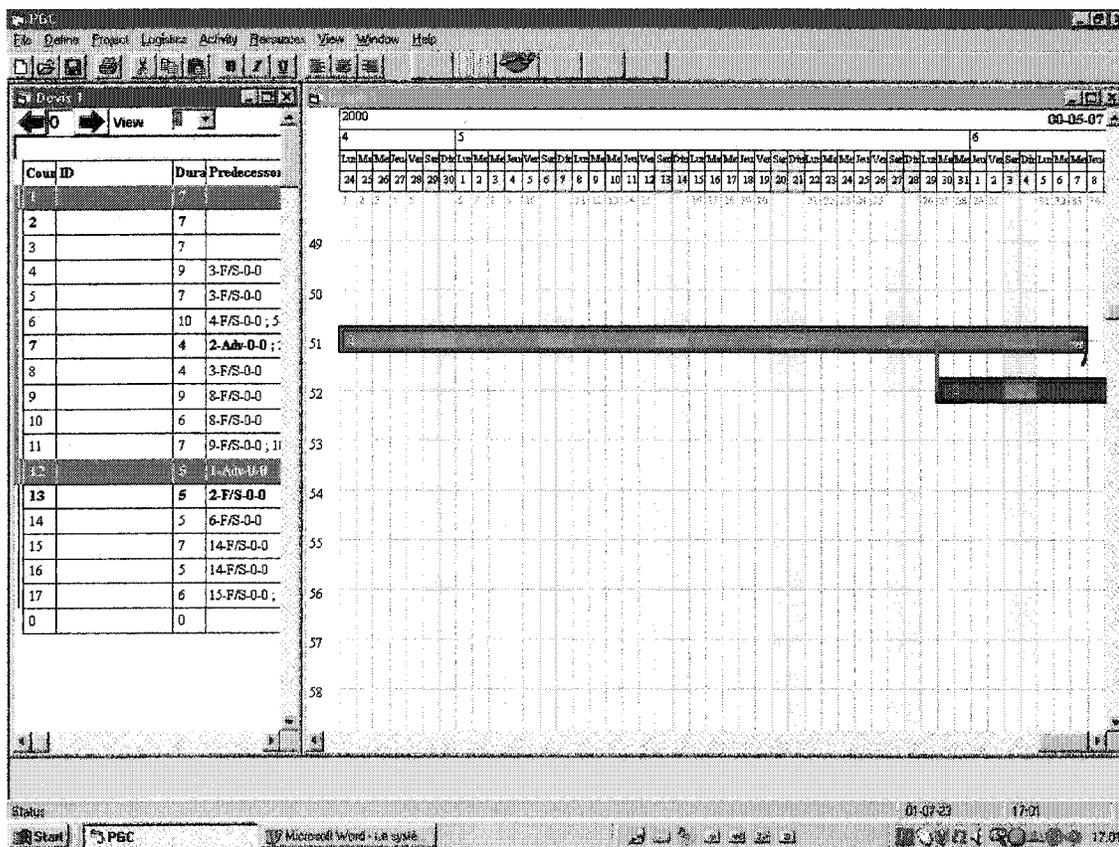


Figure 153 Niveau 1 - supérieur

Dans la *Figure 155*, les activités 3, 4, 5 et 6 représentent un sous-réseau détaillé du troisième niveau. Les relations entre les activités sont représentées avec la couleur mauve. Ces quatre activités sont représentées en une seule activité au niveau 2 soit l'activité 2. La durée et la position de l'activité 2 sont ajustées automatiquement pour avoir un début réel équivalent au début de l'activité 3 et une fin réelle égale à la fin de l'activité 6.

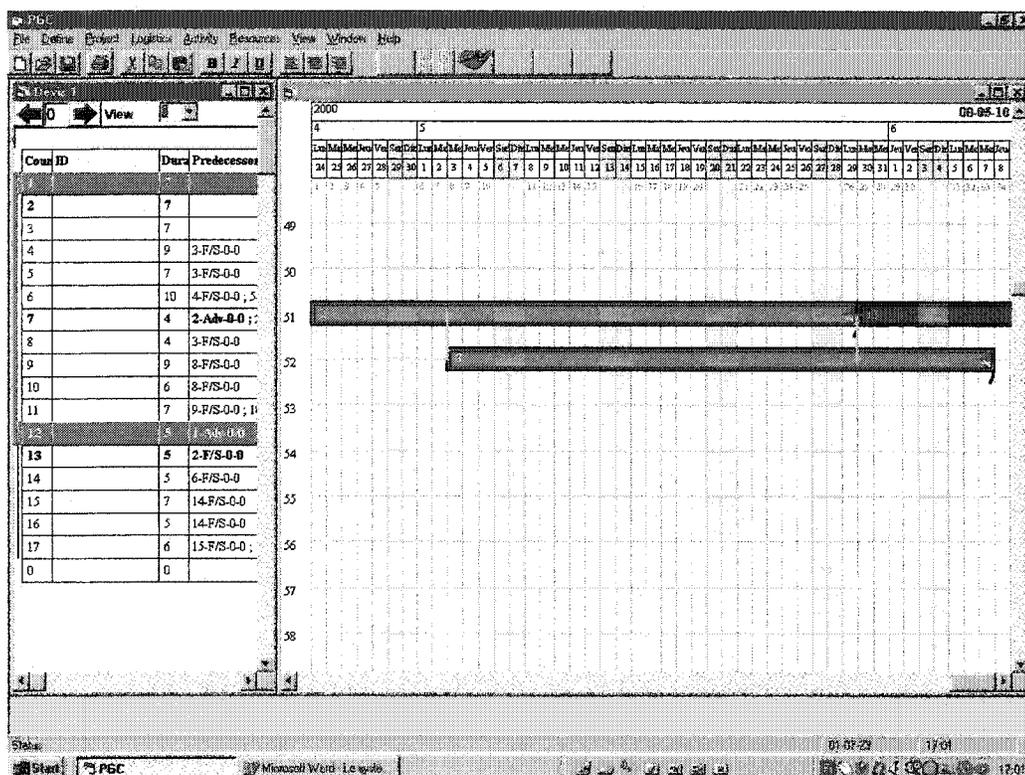


Figure 154 Niveau 2 – intermédiaire

Les quatre activités 8, 9, 10 et 11 représentent un sous-réseau détaillé du niveau 3. Les relations entre les activités sont toujours représentées avec la couleur mauve. Ces quatre activités sont représentées en une seule activité au niveau 2 soit l'activité 7.

Une relation existe entre la fin de l'activité 3 et le début de l'activité 8. Cette relation est entre deux sous-réseaux. Ainsi, la relation entre les deux activités 3 et 8 possède un autre attribut (couleur jaune).

Pour pouvoir représenter cette relation correctement au deuxième niveau, le prototype décompose l'activité 2 en deux. Cette décomposition est reliée avec la fin de l'activité 3. Ainsi, si cette fin prend une avance ou un retard, la décomposition se déplacera pour être toujours dépendante de cette fin. Une relation interne / début est ensuite créée entre les deux activités du niveau 2 soit les activités 3 et 7. La même logique est appliquée pour les autres activités sur les trois niveaux.

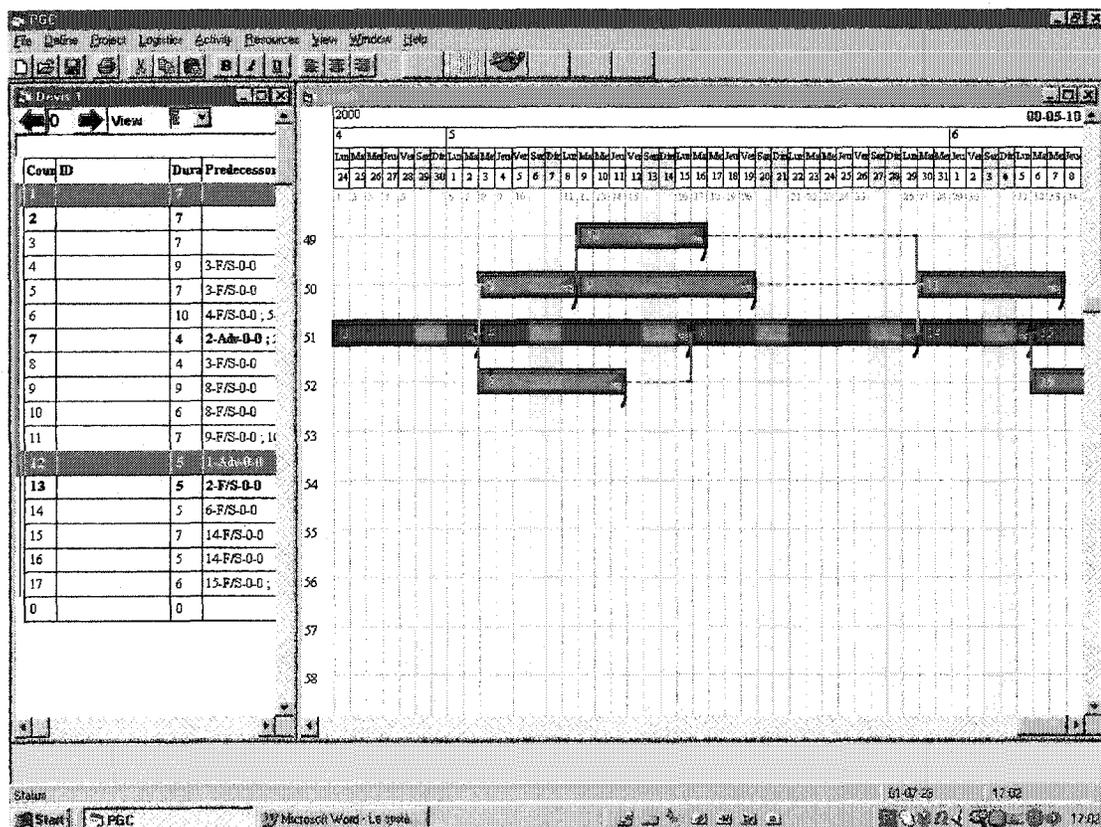
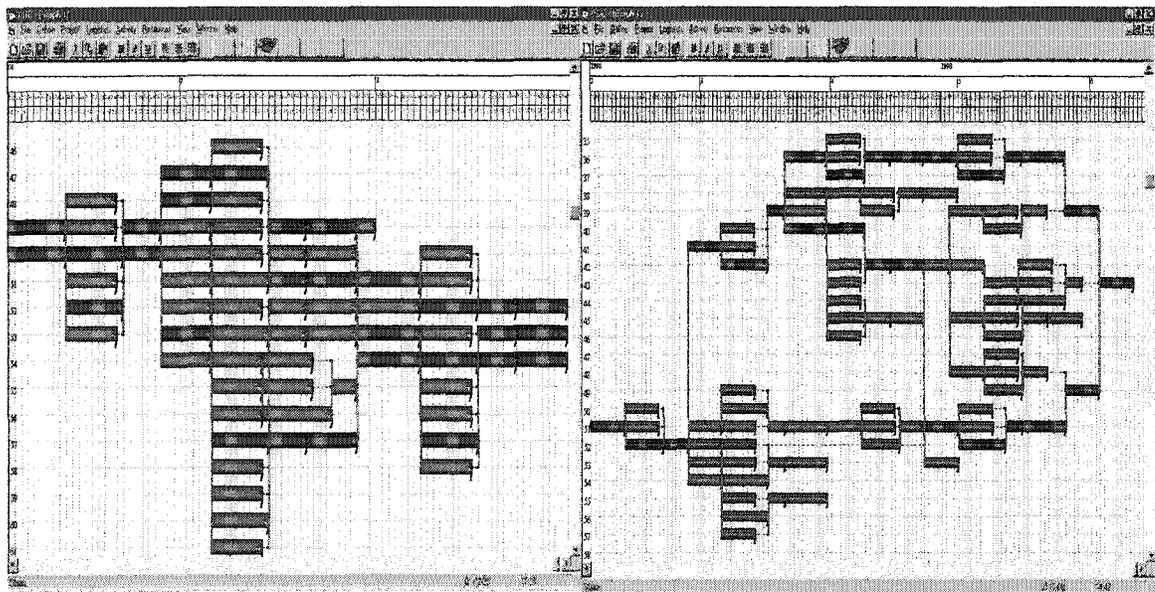


Figure 155 Niveau 3 - détaillé

10.4.2 Organisation de l'information

Le prototype informatique possède des modules capables de regrouper les sous-réseaux et d'organiser l'information d'une façon visuelle. La *Figure 156* présente un projet avant et après l'utilisation du module d'organisation automatique.

Bien sûr, pour pouvoir démontrer clairement l'information après l'organisation, l'échelle utilisée est plus petite sur la deuxième figure. En plus, seulement une partie de l'information est présentée sur l'écran après l'organisation.



a- Avant organisation

b- Après organisation

Figure 156 Organisation visuelle de l'information

10.4.3 Projets à caractère répétitifs

Le prototype est encore capable d'organiser l'information des projets à caractère répétitifs. L'exemple suivant montre un projet à caractère répétitif de type horizontal. Le prototype calcule le nombre d'équipes nécessaire en fonction de la durée disponible pour exécuter le projet. Il ajuste la planification afin de respecter les différentes exigences d'exécution et de favoriser la continuité d'utilisation des équipes.

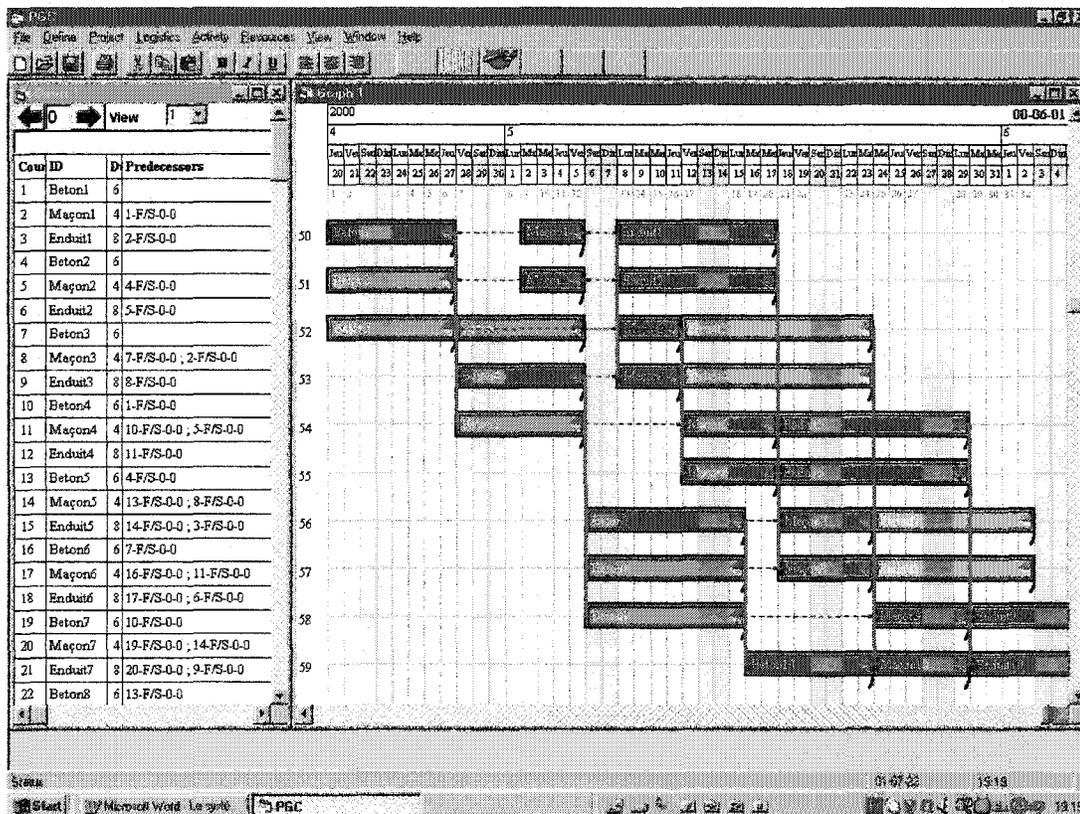


Figure 157 Projet à caractère répétitif

10.5 Système d'aide à la décision

10.5.1 Le SIAD « X- PERT »

Le SIAD « X-PERT » (Miresco, 1994) fait partie de la catégorie des SIAD intelligents. X-PERT est autonome et génère d'une manière interactive la logique de construction de projets de bâtiments. Il offre aussi une possibilité immédiate d'accumulation ou de mise à jour des connaissances ainsi qu'une représentation des données d'ordonnancement selon différents niveaux de détail.

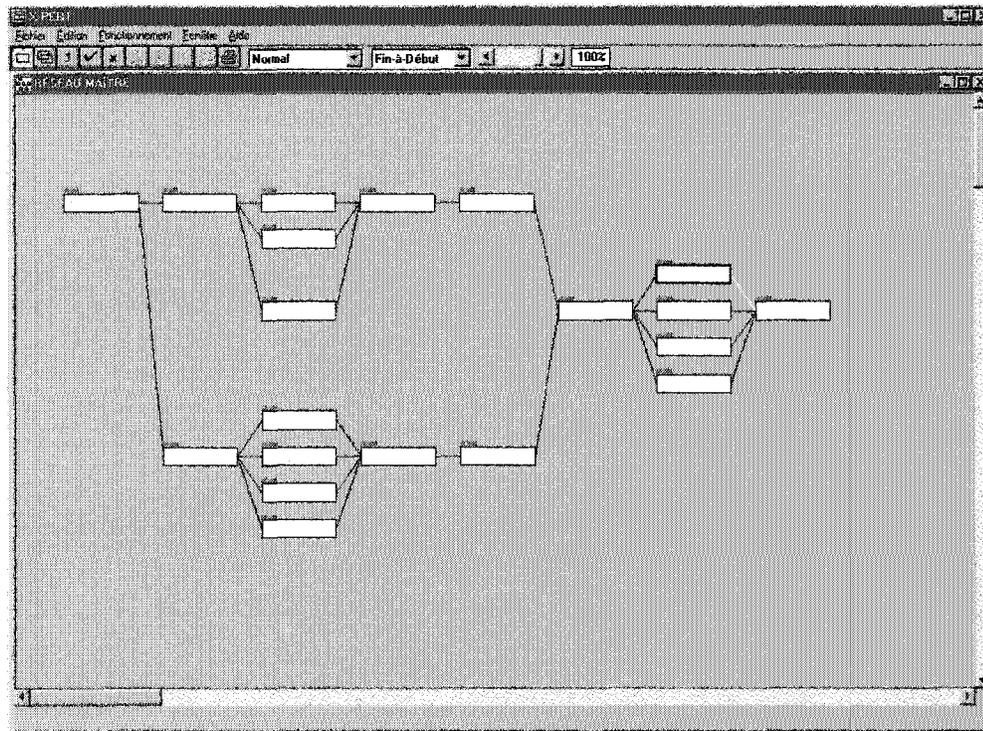


Figure 158 Le SIAD X-PERT
(Adapté de Miresco, 1994)

X-PERT se base sur une modélisation de connaissance qui peut présenter la séquence généralisée des opérations de construction. Ainsi il est capable de manipuler une quantité considérable de connaissance. La figure suivante montre le graphe de modélisation proposé par X-PERT.

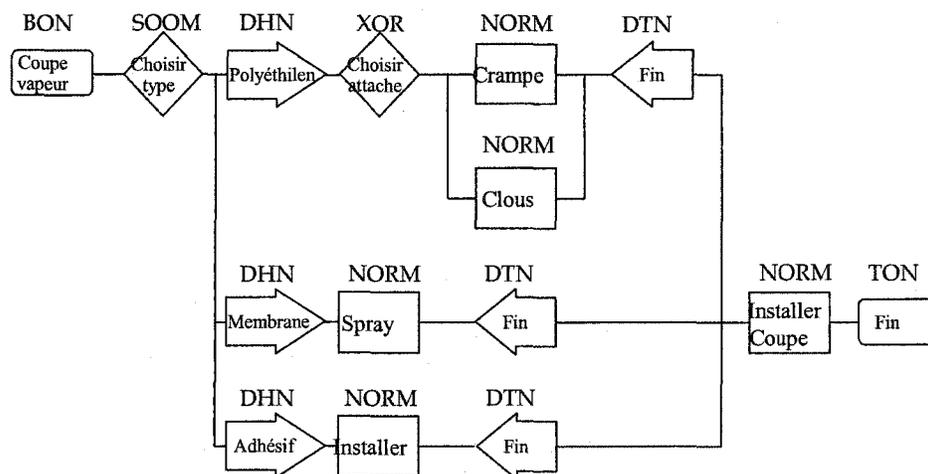


Figure 159 Graphe de modélisation de connaissance selon X-PERT (Adapté de Miresco, 1994)

X-PERT est constitué de trois sous-prototypes principaux :

1. La base de modèle : qui représente l'outil qui permet le traitement de l'information;
2. La base de données : contenant les séquences d'opérations rencontrées dans la pratique courante de construction des bâtiments;
3. L'interface de dialogue : qui consiste en un lien entre l'utilisateur et le prototype et tout le fonctionnement du prototype en dépend.

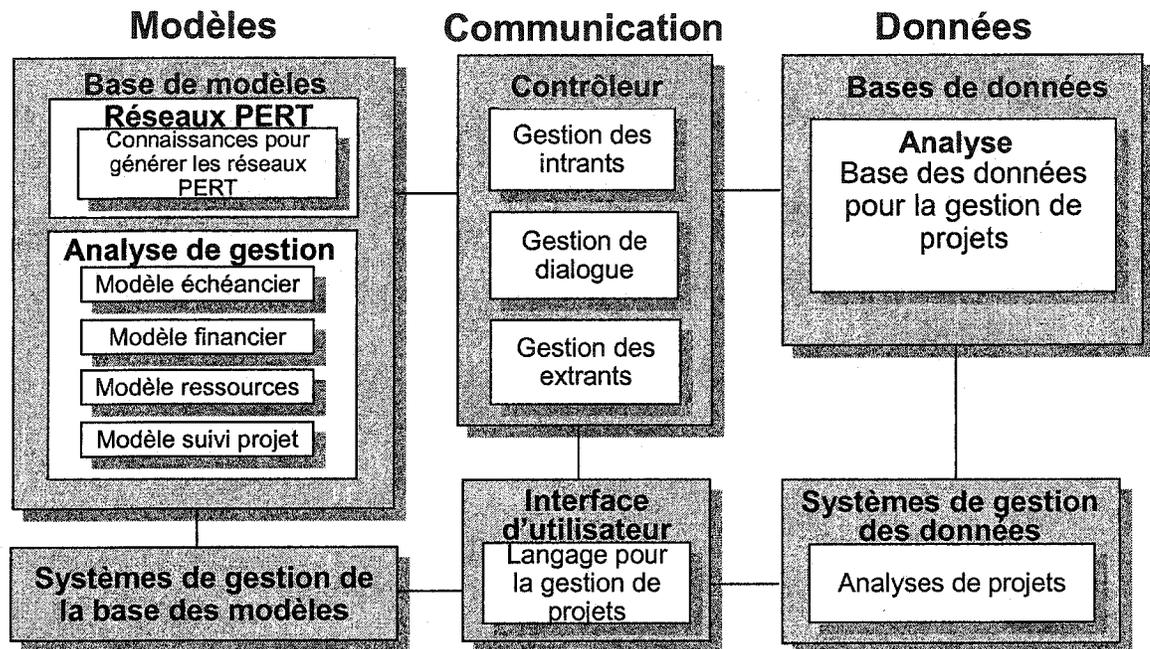


Figure 160 Architecture d'X-PERT
(Adapté de Miresco, 1994)

10.5.2 La combinaison des deux prototypes

Des essais préliminaires réussis ont été effectués pour associer le prototype informatique avec le SIAD X-PERT (Miresco, 1994). Ainsi, l'application informatique pourrait profiter du SIAD et de sa base de connaissance contenant les séquences d'opération rencontrées dans la pratique courante de construction des bâtiments.

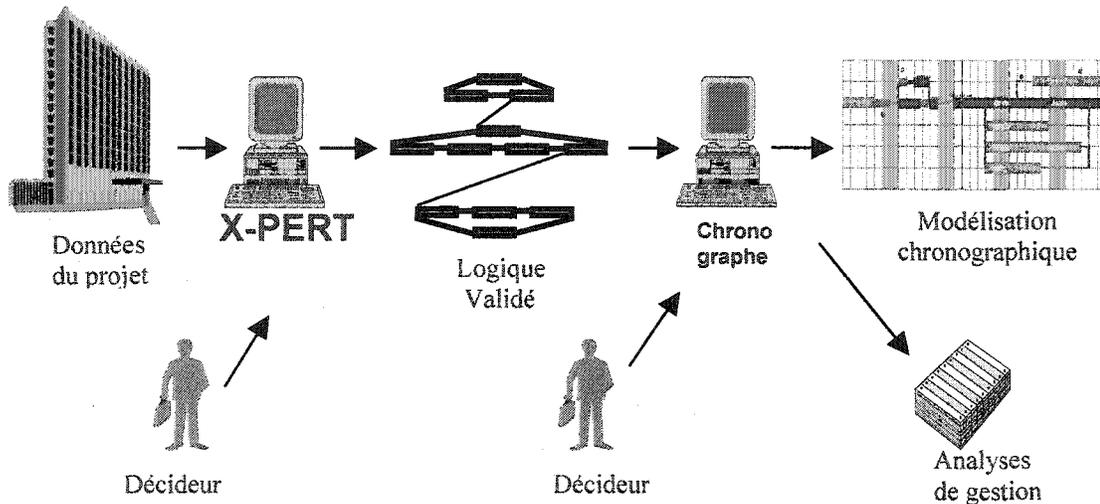


Figure 161 Le processus de planification à travers les deux prototypes intégrés

La combinaison des deux prototypes apparaît profitable pour un tel type d'application. D'une part, la tâche de préparation est allégée et les réseaux produits sont validés et d'autre part la visualisation du planning et la convivialité des interfaces sont assurés. La *Figure 161* montre le processus de planification à travers les deux prototypes intégrés.

Dans le prototype jumelé, l'utilisation de X-PERT reste optionnelle. Le planificateur peut se servir des connaissances associées avec X-PERT s'elles s'appliquent à son projet, et profitera ainsi des avantages du SIAD. Il peut aussi démarrer une planification libre à l'échelle du temps de son projet.

10.6 Vers une approche de planification intégrée

Avec l'avancement technologique rapide, les projets deviennent de plus en plus complexes, la coordination des travaux par plusieurs spécialistes est nécessaire.

L'objectif global de toute méthode est d'optimiser au maximum l'efficacité et l'efficience des travaux de planification et de contrôle des projets. Pour atteindre ces objectifs globaux, plusieurs travaux et recherches deviennent importants. Notamment :

- Des recherches dans le domaine de l'informatique pour :
 1. Coordonner l'entrée de l'information de plusieurs sources. Durant les réunions, chaque intervenant possédant un clavier et une souris pourra intervenir pour proposer les modifications nécessaires.
 2. Augmenter les surfaces des écrans, leurs résolutions, leurs qualités graphiques et la rapidité d'exécution afin de faciliter et d'accommoder les travaux durant ses réunions.

- Des recherches dans le domaine de la planification des projets. Cette thèse est concernée par ce deuxième objectif. Ainsi, l'approche chronographique proposée permet de préparer à l'écran et selon les besoins de l'utilisateur une planification visuelle, flexible et fidèle au projet.

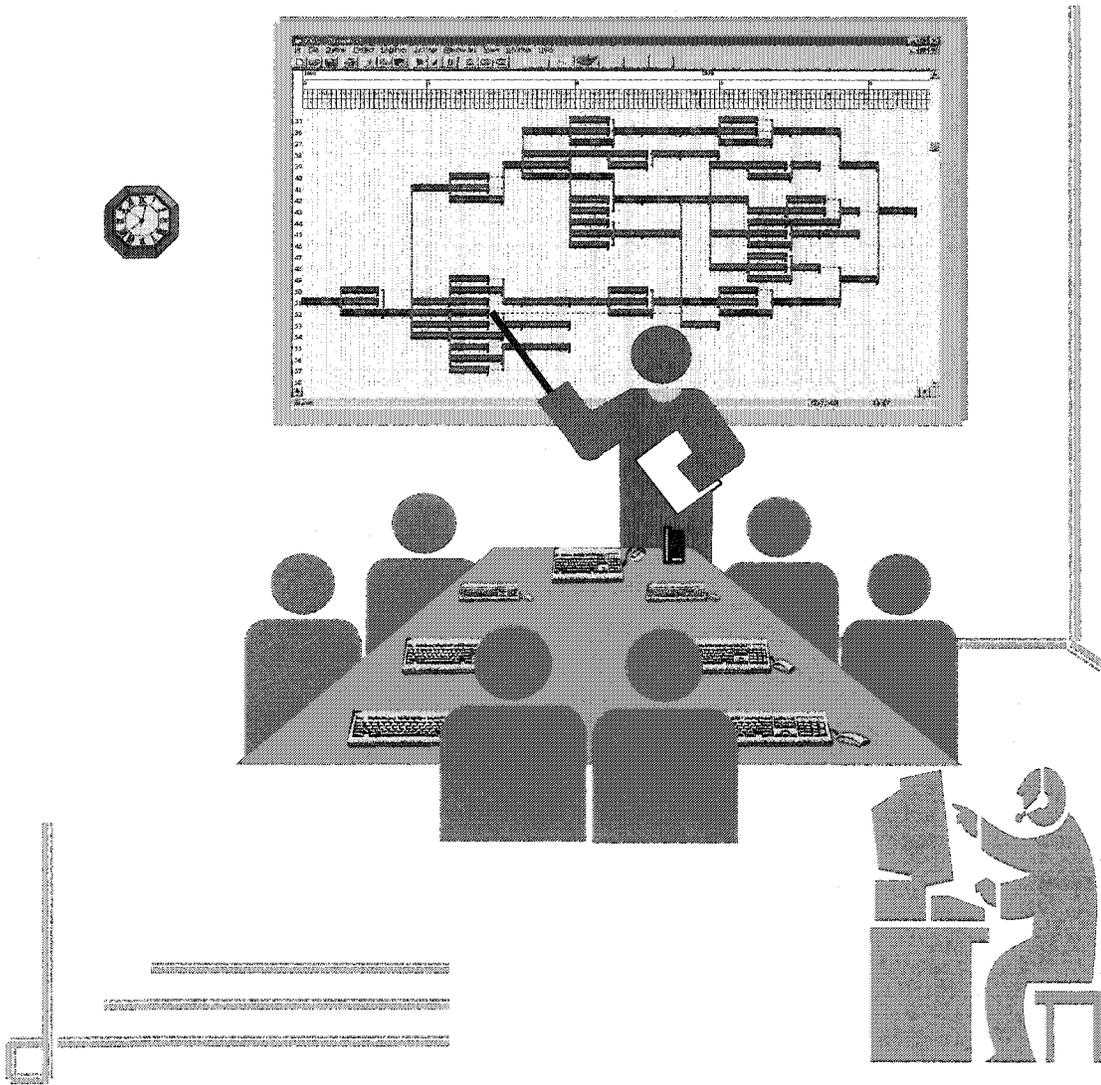


Figure 162 Vers une approche de planification globale des projets

Considérant que les travaux de recherche proposés dans cette thèse ne constituent qu'un pas vers l'atteinte de cet objectif global, plusieurs recherches futures seront nécessaires. Ces recherches pourront améliorer et étendre la capacité de l'approche chronographique proposée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de recherche a été motivé en grande partie par l'intérêt manifesté par les professionnels de la construction pour le développement des meilleures méthodes pour la planification et le contrôle des projets. L'analyse de la situation actuelle, le constat de dépassement en délai et en coût des projets de construction et les expériences personnelles de l'auteur de ces lignes confirment cette manifestation.

Pour remédier à la situation, les travaux de recherche entrepris dans le passé se sont intéressés à l'amélioration des méthodes et des outils de gestion. Par contre, et à l'exception des projets à caractère répétitifs, peu de travaux ont touché à la modélisation graphique de la planification des projets.

La méthode chronographique proposée par cette thèse voulait une tentative pour améliorer cette situation. Elle répond à une nouvelle orientation qui visait deux objectifs : la représentation des projets le plus fidèlement possible et la production d'une modélisation claire et capable de montrer l'information sur plusieurs facettes selon le besoin du planificateur. Cette thèse présente ainsi un outil convivial d'aide à la décision pour ce domaine.

La modélisation chronographique repose sur deux entités génériques. L'entité principale, qui symbolise l'outil de production et l'entité dépendante, qui détermine les fonctions décisionnelles et les contraintes relationnelles. L'entité principale suggérée par la méthode est l'activité basée sur la quantité comme unité de mesure interne. Cependant, la méthode chronographique reste ouverte à l'utilisation de toutes autres contraintes comme entité principale de modélisation.

En utilisant l'activité quantifiée comme entité principale, le système de mesure interne peut contenir une ou plusieurs divisions dans le but de :

- Répondre à certaines contraintes d'une façon plus réaliste en ajustant les interdépendances en fonction des quantités et non en fonction des jours de travail;
- Favoriser les analyses, le suivi interne d'avancement afin de créer un mécanisme d'autoadaptation aux changements et de calculer les marges qui concernent chaque partie de l'activité;
- Permettre l'utilisation des taux de progression variables afin de favoriser une flexibilité d'utilisation des ressources à l'intérieur d'une même activité et de faciliter et optimiser les travaux de nivellement et de compression des ressources;
- Montrer la planification sur plusieurs niveaux de détail et présenter les relations entre les activités des niveaux supérieurs d'une façon plus réaliste.

L'approche de modélisation chronographique est principalement orientée par le temps comme unité de mesure externe de la direction primaire. Les directions secondaire et tertiaire peuvent montrer une autre contrainte. Cette contrainte secondaire choisie doit, en général, être différente de l'entité principale, c'est à dire l'activité.

Cette approche de modélisation qui peut être orientée sur une, deux ou trois directions de flux de logique associée aux mesures internes favorisent la représentation de l'ordonnement sous plusieurs formes afin de répondre aux différents besoins. L'approche chronographique supporte ainsi le regroupement des sous-réseaux à l'échelle du temps dans les modélisations à une direction de flux de logique. Ce regroupement minimise la longueur verticale des relations et diminue par conséquent les intersections. Elle accepte aussi le regroupement des différentes tâches, quantités, unités, ressources ou surfaces de travail dans les modélisations à deux directions.

Nous pouvons conclure que la méthode chronographique cadre bien avec les attentes de l'industrie. Les retombées prévues sont importantes, car la précision du travail, notamment pour la phase de planification et de contrôle constituent une problématique de taille. La planification judicieuse d'un projet et le suivi adéquat de son déroulement pourront contribuer à obtenir des économies substantielles et un respect accru des délais de construction. Concrètement, la méthode a été appliquée avec succès dans le projet de station d'épuration de Kahnawake et les résultats étaient très encourageants. Actuellement, plusieurs facettes de l'approche chronographique sont testées dans le cadre du projet de Palais de Justice de Mont-Laurier. Les premières facettes ont reçu une appréciation positive de la part des différents intervenants du projet.

Il devient évident que le modèle de planification, sur lequel est simulée l'évolution du projet dans le temps, doit refléter le plus fidèlement possible la réalité de l'exécution. Ainsi, les résultats présentés permettent au décideur d'avoir une vue plus complète et plus nuancée du projet, et de réfléchir sur les différentes solutions proposées en vue d'un choix optimal de gestion.

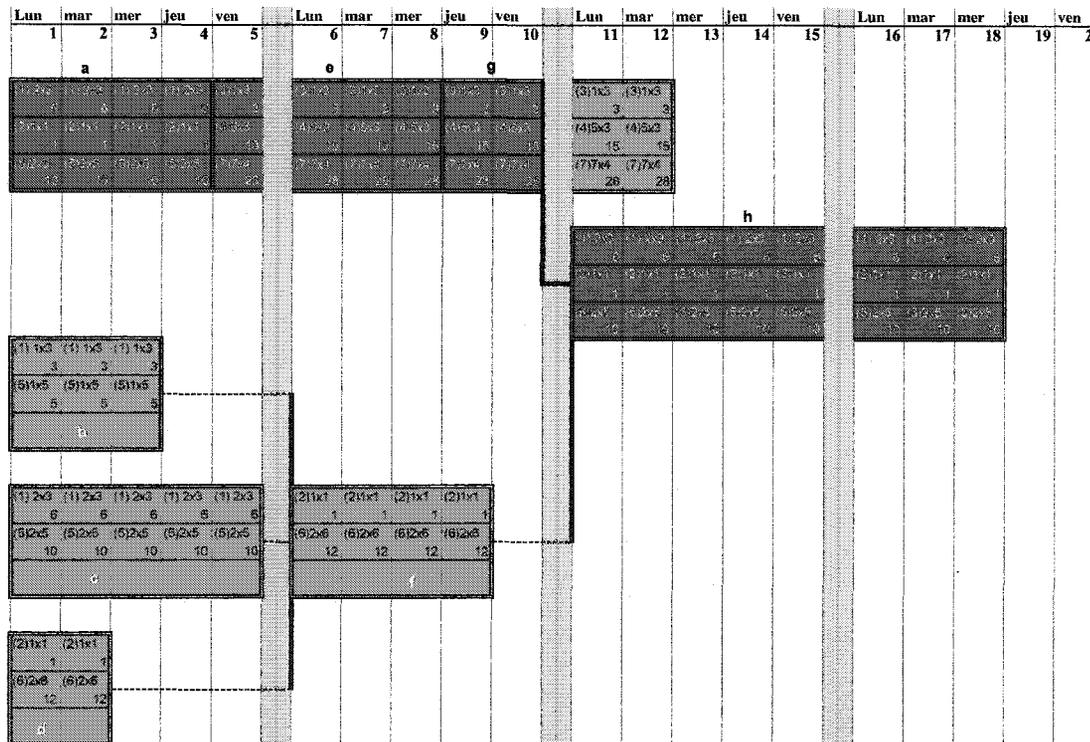
Si la modélisation graphique trouve des réponses dans cette recherche, des études futures pourraient s'intéresser à l'un ou l'autre des aspects de gestion, afin d'enrichir et d'approfondir les concepts de la modélisation chronographique. Ci-après quelques suggestions :

1. Bien que plusieurs étapes de préparation manuelle aient disparu, les travaux préparatoires ne sont pas totalement éliminés. L'association complète avec le SIAD X-PERT et l'ajout des bases de connaissances qui couvrent plusieurs domaines aideront à surmonter cette lacune.
2. Les divers aspects de gestion tels que l'allocation et le nivellement des ressources et les travaux de contrôle d'avancement sont à approfondir.

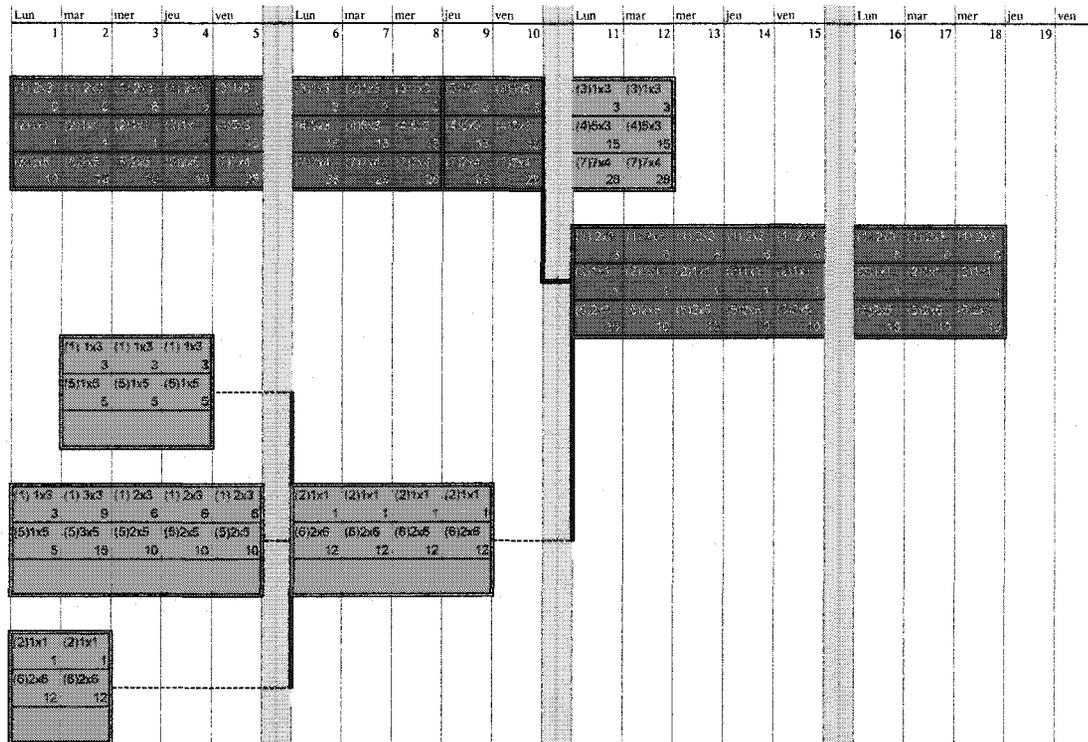
3. Les notions de planification sont devenues plus complexes. Une formation plus avancée pour les planificateurs et les gestionnaires est suggérée.
4. Comme toutes les autres applications informatiques, les limites technologiques reliées à la taille des écrans sont considérées comme le plus grand obstacle pour l'amélioration de la visualisation et la diminution des efforts de préparation. Les nouveaux grands écrans à plasma semblent à cet effet, une solution prometteuse.

ANNEXE 1

Allocation et nivellement des ressources

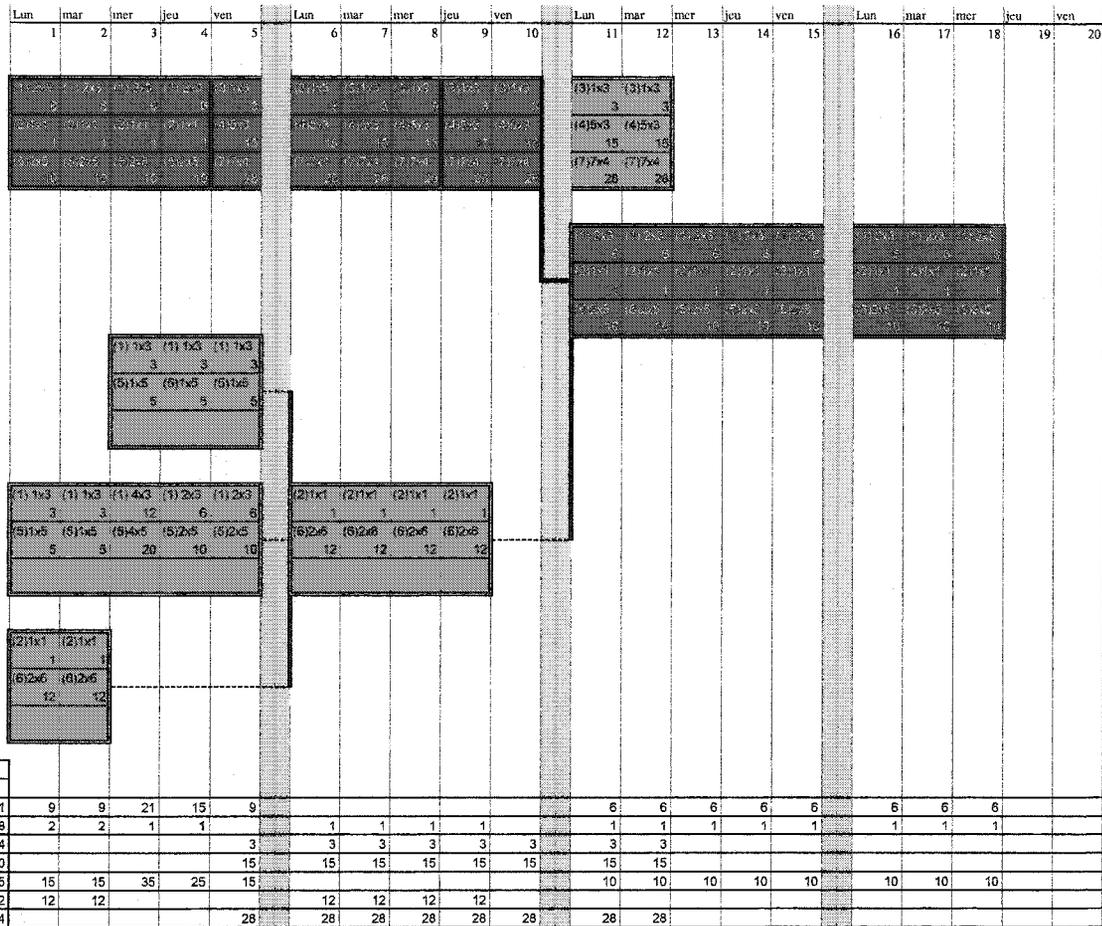


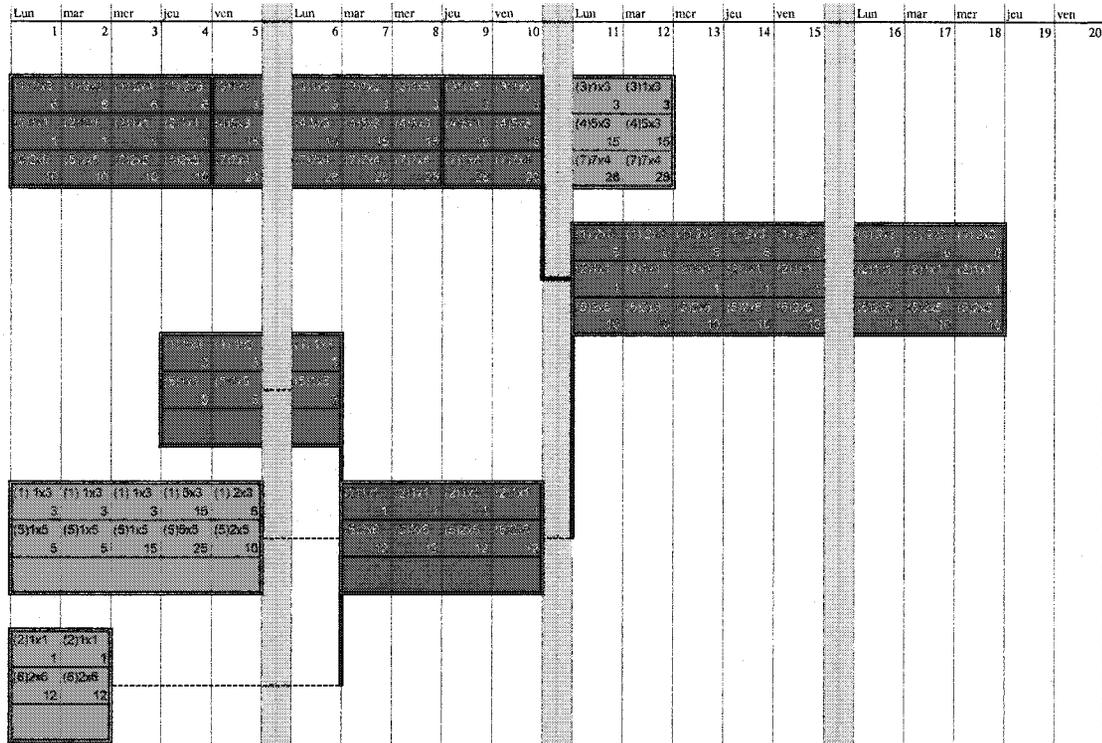
Ressources										
Type	Qty	max	min	N/J-util	moy	E-M +/-	Total			
1	9	15	6	13	8.5385	1.7574	111	15	15	15
2	2	2	1	16	1.125	0.1094	18	2	2	1
3	3	3	3	8	3	0	24			3
4	15	15	15	8	15	0	120			15
5	20	25	10	13	14.231	2.929	185	25	25	25
6	30	12	12	6	12	0	72	12	12	12
7	24	28	28	8	28	0	224	28	28	28



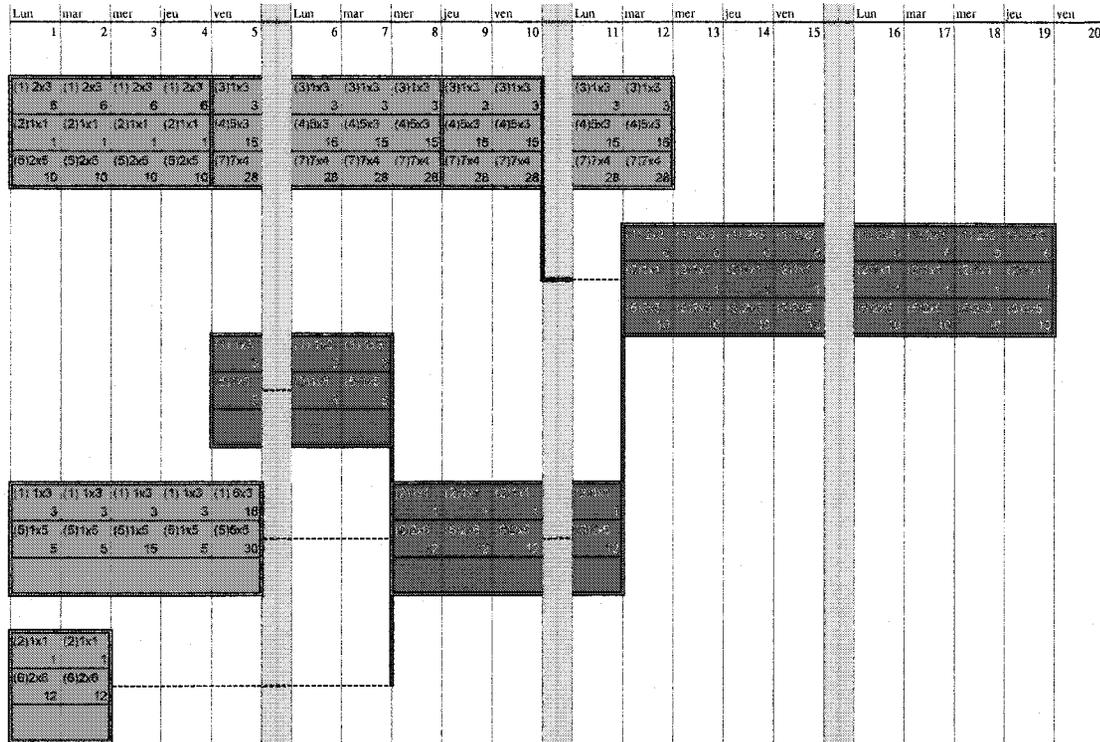
Durée total du projet
18

Ressources									
Type	Qte	max	min	N/J-uti	moy	E-M +/-	Total		
1	9	18	6	13	8.5385	1.7574	111	9	18
2	2	2	1	16	1.125	0.1094	18	2	2
3	3	3	3	8	3	0	24		
4	15	15	15	8	15	0	120		
5	20	30	10	13	14.231	2.929	185	15	30
6	12	12	12	6	12	0	72	12	12
7	28	28	28	8	28	0	224	28	28



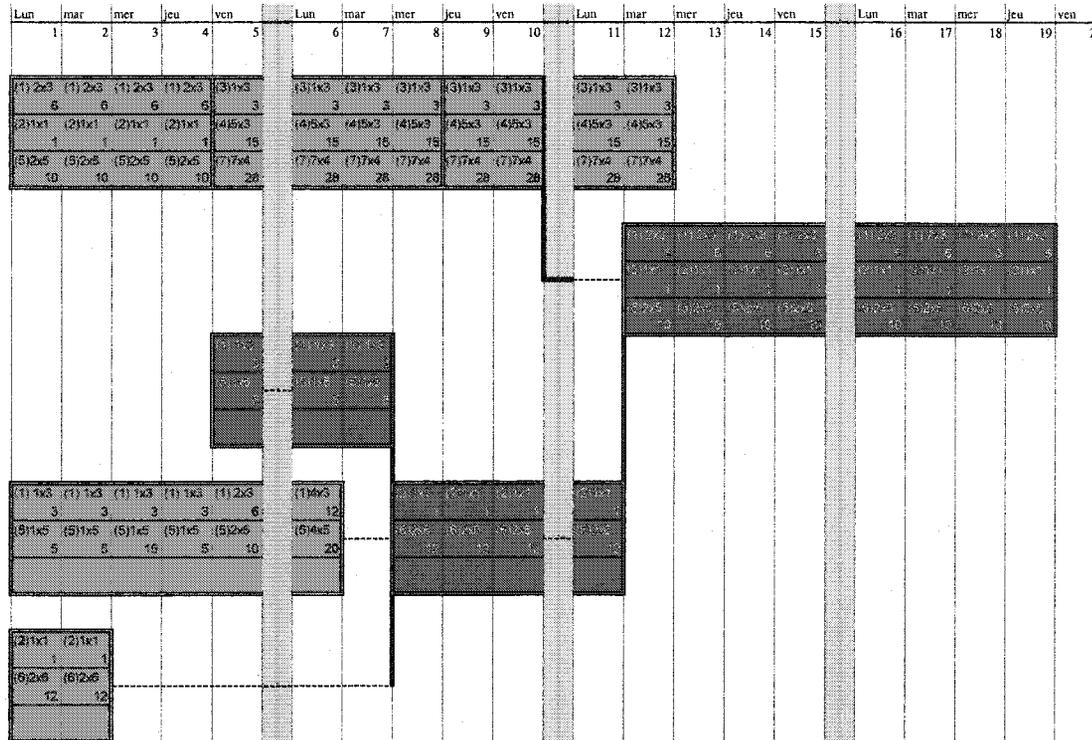


Ressources										
Type	Qte	max	min	NJ-utls	moy	E-M +/-	Total			
1	9	24	3	14	7.9286	1.4541	111	9	9	9
2	2	2	1	16	1.125	0.1094	18	2	2	1
3	3	3	3	8	3	0	24			3
4	15	15	15	8	15	0	120			15
5	20	40	5	14	13.214	2.4235	185	15	15	15
6	12	12	12	6	12	0	72	12	12	12
7	28	28	28	8	28	0	224			28



Durée total du projet
19

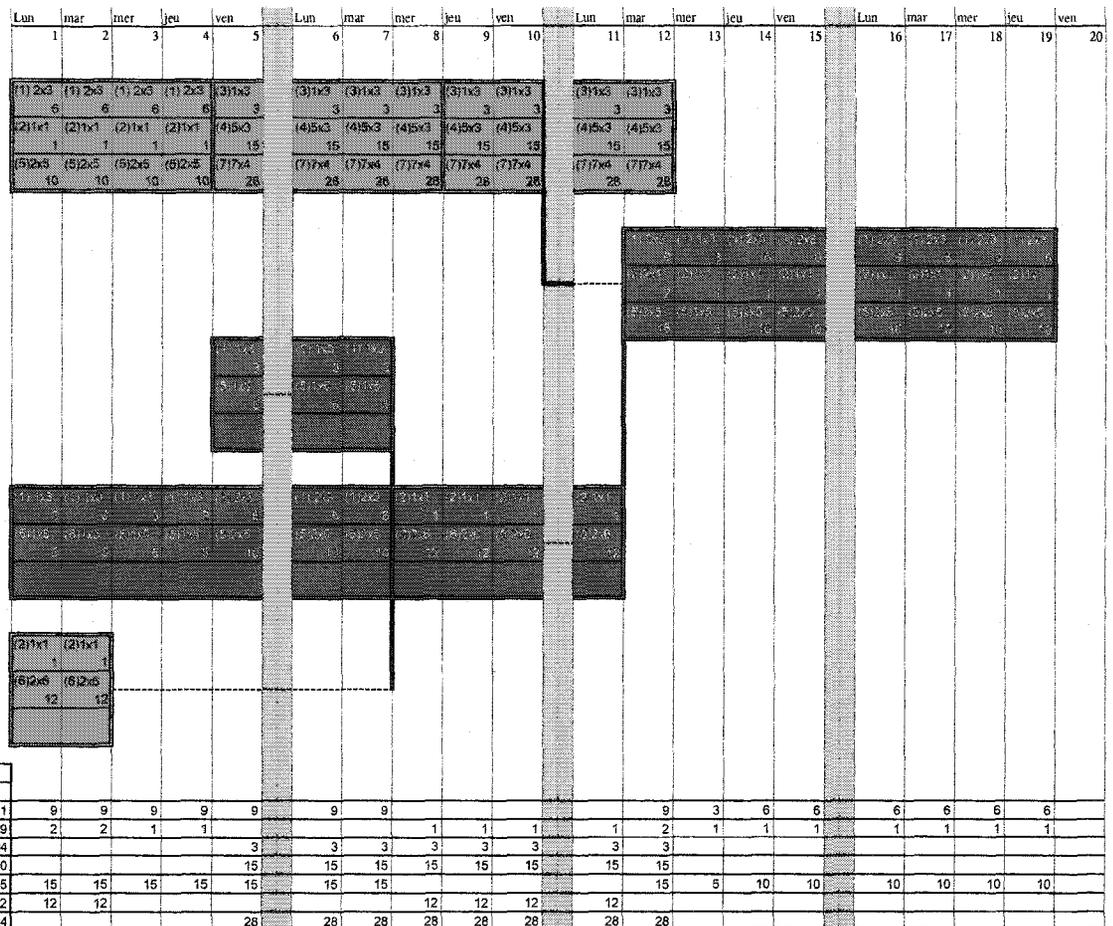
Ressources									
Type	Qty	max	min	N/J-util	moy	E-M +/-	Total		
1	9	21	3	15	7	1.3929	111	9	9
2	2	2	1	16	1.0625	0.1156	18	2	2
3	3	3	3	8	3	0	24	3	3
4	15	15	15	8	15	0	120	15	15
5	20	35	5	15	11.667	2.3214	185	15	15
6	12	12	12	6	12	0	72	12	12
7	28	28	28	8	28	0	224	28	28



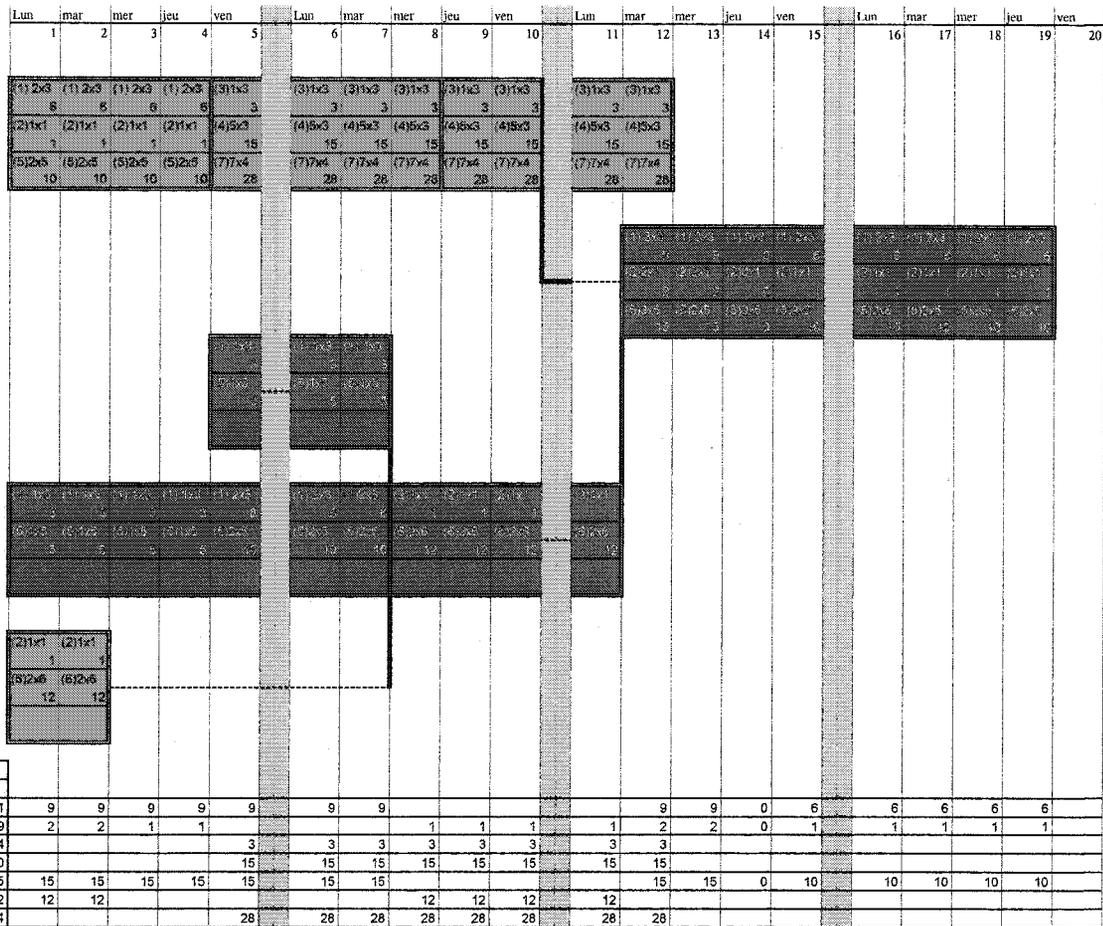
Ressources																				
Type	Qte	max	min	N/J-util	moy	E-M +/-	Total													
1	9	15	3	15	7	1.0714	111	9	9	9	9	9	15	3						
2	2	2	1	16	1.0625	0.1156	18	2	2	1	1				1	1	1	1	1	1
3	3	3	3	8	3	0	24				3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	15	15	15	8	15	0	120				15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
5	20	25	5	15	11.667	1.7657	185	15	15	15	15	15	25	5		10	10	10	10	10
6	12	12	6	12	0	72	72	12	12					12	12	12	12	12	12	12
7	28	28	8	28	0	224	224						28	28	28	28	28	28	28	28

ANNEXE 2

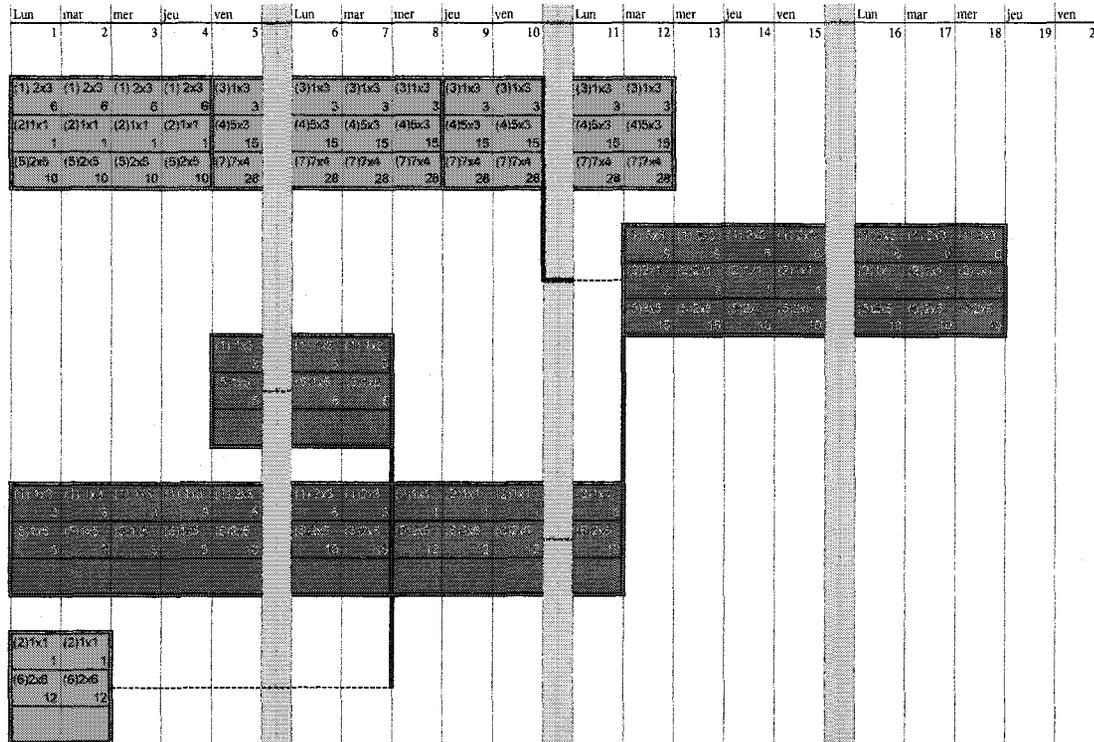
Renouvellement des ressources et compression



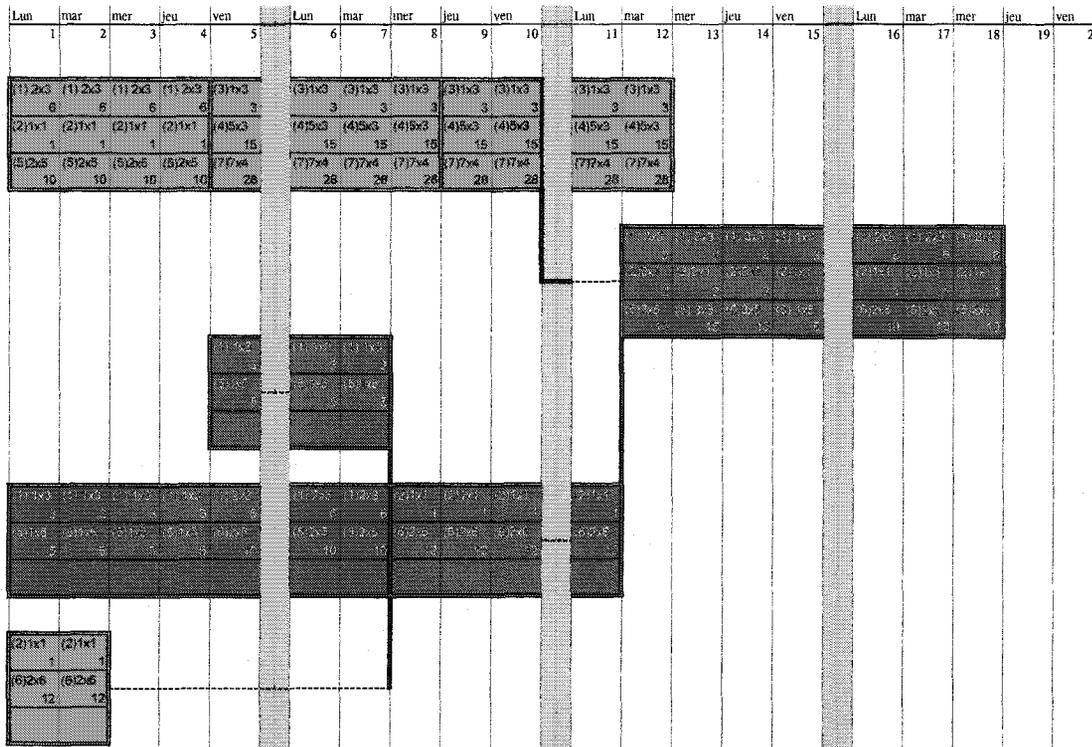
Durée total du projet
19



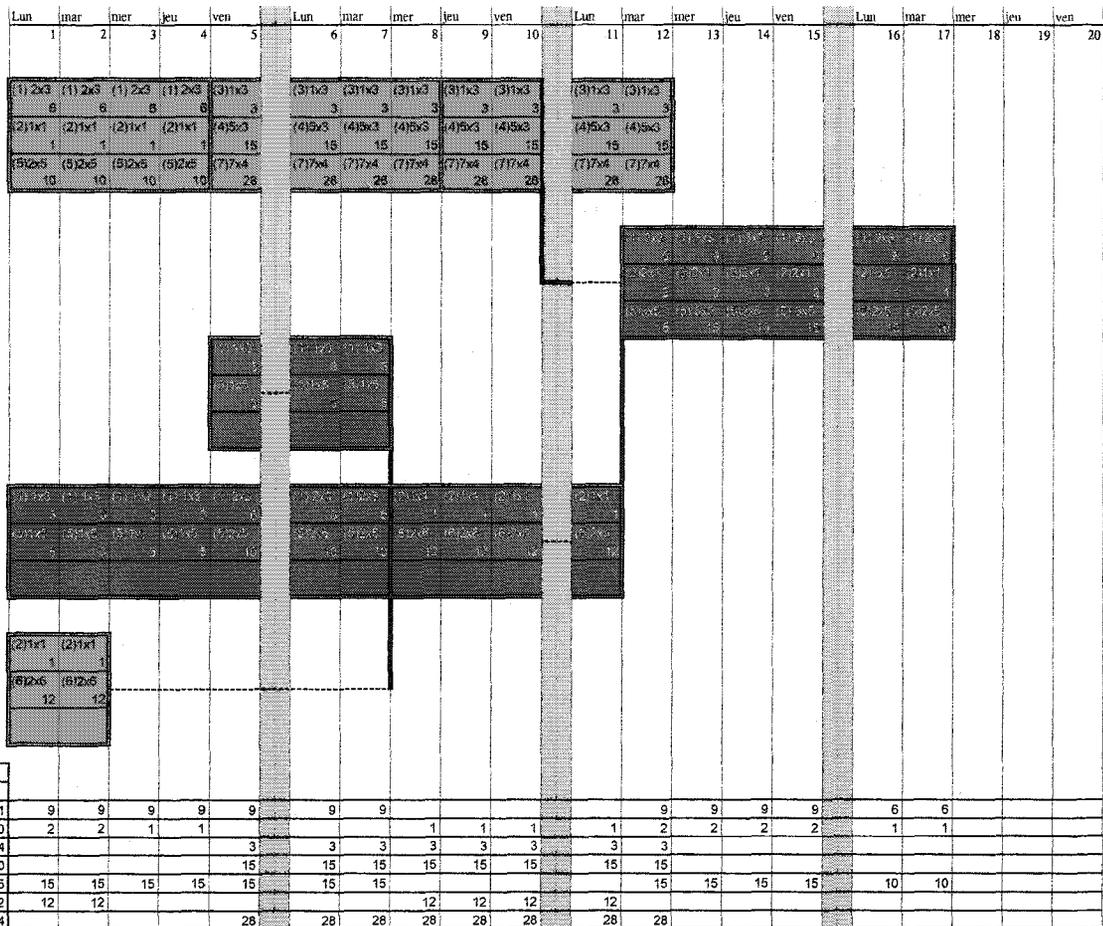
Durée total du projet
19



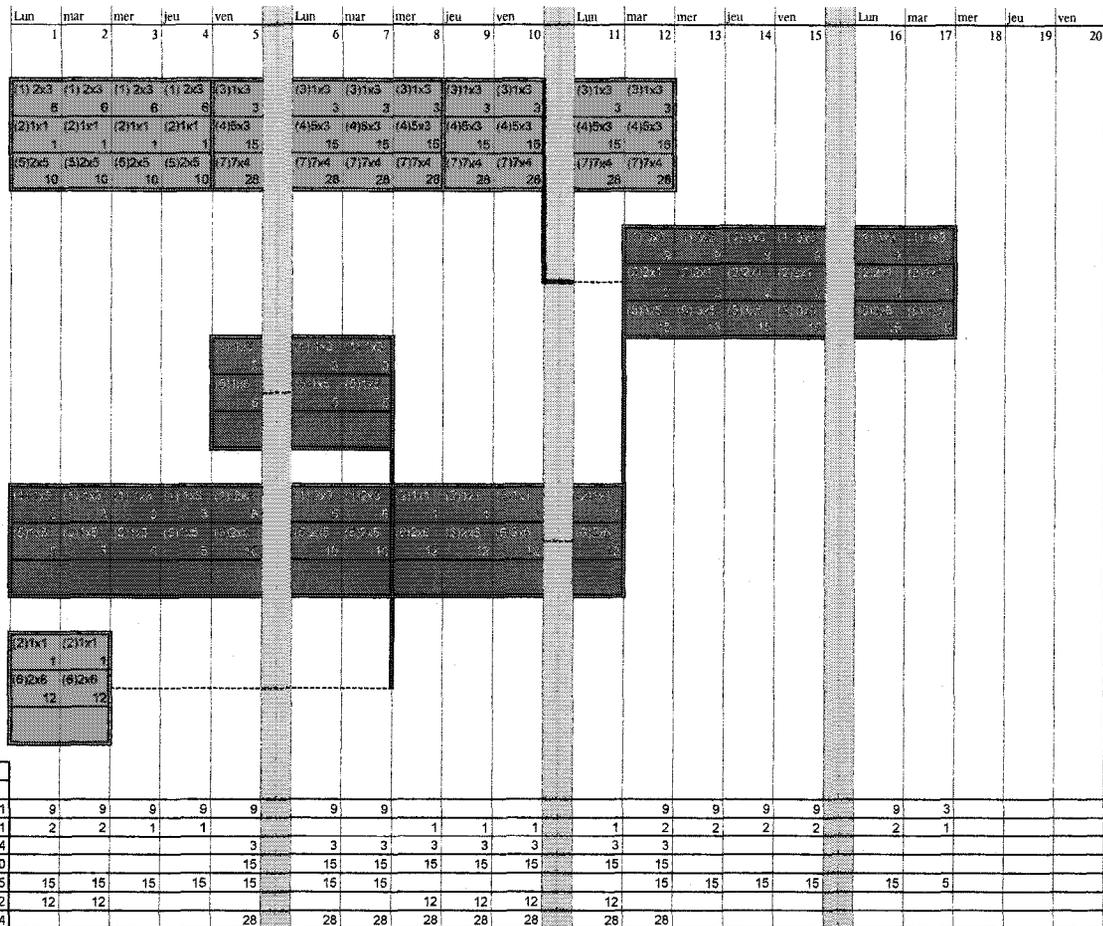
Ressources							
Type	Qte	max	min	NNJ-util	moy	E-M +/-	Total
1	9	9	6	14	7,9286	0,6898	111
2	2	2	1	15	1,2667	0,1956	19
3	3	3	3	8	3	0	24
4	15	15	15	8	15	0	120
5	20	15	10	14	13,214	1,148	185
6	12	12	12	6	12	0	72
7	28	28	28	8	28	0	224



Ressources																			
Type	Qte	max	min	N/N-uti	moy	E-M +/-	Total												
1	9	9	3	14	7.9286	0.7653	111	9	9	9	9	9							
2	2	2	1	15	1.3333	0.2222	20	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	3	3	3	8	3	0	24					3	3	3	3	3	3	3	3
4	15	15	15	8	15	0	120					15	15	15	15	15	15	15	15
5	20	15	5	14	13.214	1.2755	185	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	5
6	12	12	12	6	12	0	72	12	12										
7	28	28	28	8	28	0	224												



Durée total du projet
17



Durée total du projet
17

ANNEXE 3

Projets d'applications

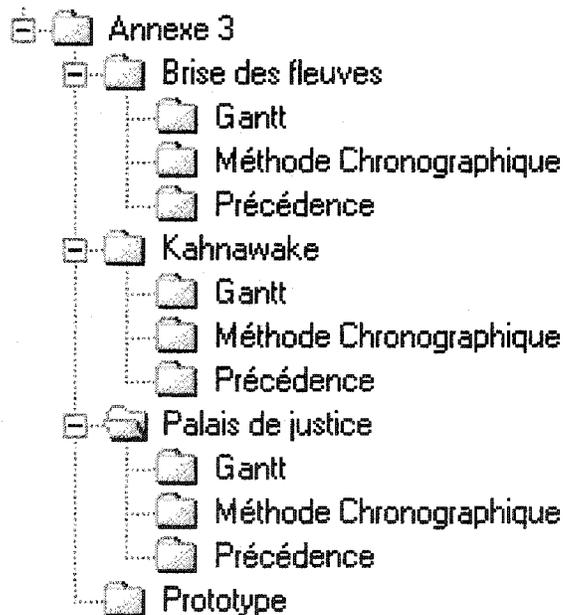
Contenu du CD

1. La construction de la Station d'Épuration de Kahnawake.
 - MS-Project
 - Le Diagramme de Gantt
 - La précédence
 - La méthode chronographique

2. La construction du Palais de Justice de Mont-Laurier.
 - MS-Project
 - Le Diagramme de Gantt
 - La précédence
 - La méthode chronographique

3. La planification du projet Le Scope les brises du fleuve.
 - MS-Project
 - Le Diagramme de Gantt
 - La précédence
 - La méthode chronographique

4. Le prototype informatique.



BIBLIOGRAPHIE

AbouRisk, S. M., Halpin, D.W. (1990). Probabilistic Simulation Studies for Repetitive Construction Processes. *Journal of Construction Engineering and management*, 116(4), pp. 575-594.

Ahuja, H. N., Dozzi, S.P., and AbouRizk, S.M. (1994). *Project Management Techniques in Planning and Controlling Construction Projects* (2e éd.). New York: John Wiley & Sons Inc, pp. 127-162.

Al Sarraj, Z. (1991). Formal Development of Line-of-Balance Technique. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(4), pp. 689-704.

Alshawi, M. (1989). An Expert System to Assist in Generating and Scheduling Construction Activities. *Proceedings of the International Conference on the Application of Artificial Intelligence to Civil and Structural Engineering: AI-CIVIL-COMP 89, 19-21 septembre, Londres, U.K.*, pp. 109-114.

Antill, J., Woodhead, R. (1990). *Critical Path Methods in Construction Practice*. New York: John Wiley & Sons, inc, pp. 5; 132.

Aouad, G., Price, A. (1992). Departement of Civil Engineering, Loughborough University of Technology, Loughborough LE11 3TU, UK, pp. all.

Ashley D. B. (1980). Simulation of Repetitive-Unit Construction, *Journal of the Construction Division*, 106(CO2), pp. 185-194.

Badiru, A. B. (1988a). Graphic Evaluation of Amortization Schedules. *Industrial engineering*, 20(9), pp. 18-22.

Badiru, A. B. (1988b). *Project Management in Manufacturing and High Technology Operations*. New York: John Wiley & Sons, inc, pp. 82-89.

Badiru, A. B., Pulat P.S. (1995). *Comprehensive Project Management : Integrating Optimization Models, Management Principles, and Computers*. New Jersey: Prentice hall PTR. pp. 18; 142-144; 163-166; 168-170.

Balaguru, P. N., Ramakrishnan, V., Naaman, A.E. (1977). Cost and Time Scaled Networks : Graphical model. *Journal of the Construction Division*, 103(CO2), pp. 247-258.

Bedworth, D. D. (1973). *Industrial Systems: Planning, Analysis and Control*. New York: Ronald Press.

Bolivar, A., Halpin, D.W. (1998). Simplified Simulation System for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(1), pp. 72-81.

Brooks, G. H., White C.R. (1965). An Algorithm For Finding Optimal Or Near Optimal Solutions To The Production Scheduling Problem. *Journal Of Industrial Engineering*, January – February pp. 34–40.

Burman, P. J. (1980). *Precedence Networks For Project Planning And Control*. New York : McGraw-Hill Book Company, pp.19; 21-22; 37; 41; 57; 125-129.

Campinos-Dubernet, M.(1984) *La rationalisation du travail dans le BTP : des avantages du taylorisme orthodoxe au néo-taylorisme*. Paris : La découverte.

Carr, R. I., Meyer, W. L. (1974). Planning Construction of Repetitive Buildings Units. *Journal of Construction Division, ASCE*, 100(CO3), pp. 403-412.

Chehayeb, N. N., AbouRisk, S.M. (1998). Simulation-Based Scheduling With Continuous Activity RelationShips. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(2), pp. 107-115.

Chevallier, N., Russell, A.D., (1998). Automated Schedule Generation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 25, pp. 1059-1077.

Choo, H. J., Tommelein, I. D., Ballard, G., Zabelle, T. R. (1999). Work Plan : Constraint-based database for work package scheduling. *Journal of Construction Engineering and management*, 125(3), pp. 151-160.

Crowston, W. B., Thompson, G.L. (1967). Decision CPM: a Method for Simultaneous Planning, Scheduling and Control of Projects. *Operations Research*, 15, pp. 407-426.

Daniels, R. L. (1968). *ICES PROJECT/I, Project Engineering Control*. M.I.T. Research Report R68-11, M.I.T., Cambridge, Massachusetts, pp.1-178.

Davies, E. M. (1974). An Experimental Investigation of Resource Allocation in Multiactivity Projects. *Operational Research Quarterly*, 24(4), pp.587-591.

Davies, E. M. (1975). Project Network Summary Measures and Constrained-Resource Scheduling. *AIIE Transactions*, 7(2), pp.132-142.

Donncha, P. K. (1985). SIREN : A Repetitive Construction Simulation Model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 111(3), pp. 308-323.

Eisner, H. (1961). A Generalized Network Approach to the Planning and Research and Scheduling of the Research Program. *Operations Research*, 10, pp. 115-125.

Elmaghraby, S. E., Herroelen, W. S. (1980). On the Measurement of Complexity in Activity Networks. *European Journal of Operations Research*, 5, pp. 223-234.

Elmaghraby, S.E. (1964). An Algebra for the Analysis of the Generalized Activity Network. *Management Sciences*, 10, pp. 494-514.

El-Rayes, K., Moselhi, O. (1998). Resource-Driven Scheduling of Repetitive Activities. *Construction Management and Economics*, 16, pp. 433-446.

Elsayed, E.A. (1982). Algorithms for Project Scheduling with Ressource Constraints. *International Journal of Production Research*, 20(1), pp. 95-103.

Eppinger, S. D. (1997). Three Concurrent Engineering Problems in Product Development Seminar. Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management, Cambridge, Mass. pp. all.

Fisk, R. E. (2003). *Construction Project Administration* (7e éd.). New Jersey : Prentice hall, pp. 349-350.

Fondahl, J. (1962). *A non-Computer Approach to the Critical Path Method for the Construction Industry*. Technical Report No. 9, The Construction Institute, Departement of Civil Enginnering, Stanford University, pp. all.

Fondahl, J. (1964). *Methods for Extending the Range of Non-Computer Critical Path Application*. Technical Report No. 47, The Construction Institute, Departement of Civil Enginnering, Stanford University, pp. all.

Ford, L. R., Fulkerson, D.R. (1957). A Simple Algorithm for Finding Maximal Network Flows and an Application to the Hitchcok Problem. *Journal Canadien des Mathématiques*, 9, pp. 210-218.

Fox, S. (1998). Why Use Object-Oriented Project Managenment. *First International Conference on New Information Technologies for Decision Making in Civil Engineering, Montréal, Canada, October 98*, pp. 157-168.

Francis, A., Miresco, E. T. (2000). Decision Support for Project Management Using a Chronographique Approach. *2nd International Conference on Decision Making in Urban and Civil Engineering, Lyon, France*, pp. 845 –856.

Francis, A., Miresco, E. T. (2002a). "Amélioration de la représentation des contraintes d'exécution par la méthode chronographique", Société canadienne de génie civil, 30e congrès annuel, Montréal, Québec, GE019, pp. g-27.

Francis, A., Miresco, E. T. (2002b). "Decision Support for Project Management Using a Chronographique Approach", Hermes Science Publications, Journal of Decision

Systems, Special issue JDS-DM in UCE : Decision Making in Urban and Civil Engineering, Vol 11, N°3-4/2002.

Fulkerson, D. R. (1962). Expected Critical Path Lengths in Pert Networks. *Operations Research*, 10, pp. 808-817.

Huang, G. H., Baezt B. W., Patry, G. G. (1997). Development of Grey Critical Path Method for Construction Planning. *Engineering Optimization*, 28, pp.157-174.

Genest, B. A., Nguyen, T. (1995). *Principes et techniques de la gestion de projets* (2e éd.). Québec: Les éditions Sigma Delta, pp. 182; 357-364.

Giard, V. (1989). *Gestion de la Production, Édition Économica*, (2e éd.). Paris: Collection Gestion, pp. 355-396.

Giard, V. (1991). Quelques problèmes méthodologiques actuels en gestion de projets. *Revue française de gestion industrielle*, 2/1991, pp. 51-68.

Gidado, K. I. (1996). Project Complexity : The Focal Point of Construction Production Planning. *Construction Management and Economics*, 14, pp. 213-225.

Gong, D., Hugsted, R. (1993), "Time Uncertainty Analysis in Project Networks With a New Merge-Event Time-Estimation Technique", *Operation Research*, 11(3), pp. 165-174.

Grubbs F. F., (1962). Attempts to Validate Certain PERT Statistics. *Operations Research*, 10, pp. 912-915.

Halpin, D. W., Woodhead, R. (1998). *Construction Management*. New York: John Wiley & Sons, Inc, pp. 183.

Halpin, D. W. (1973). *An Investigation of the Use of Simulation Networks For Modeling Construction Operations*. PhD thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Ill, pp. all.

Halpin, D. W., Riggs, L. (1992). *Planning and Analysis of Construction Operations*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Harris, R. B., Ioannou, P. G. (1998). Scheduling Projects with Repeating Activities. *Journal of Construction Engineering and Management*, 119, pp. 196-214.

Hendrickson, A., Zozaya-Gorostiza, C. Rehak, D., Baracco-Miller, E., Lim, P. (1987a). Expert System For Construction Planning, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1(4), pp. 253-269.

- Hendrickson, C., Martinelli, A. M., and Rehak, D. (1987b). Hierarchical Rule-Based Activity Duration Estimation. *Journal of Construction Div. ASCE*, 113(2), pp. 288-301.
- Hespos, R. F., Strassmann P. A. (1965). Stochastic Decision Trees for the Analysis Investment Decisions. *Management. Sciences*, Serie B 11, pp. 244-259.
- Hinze, J.W. (2004). *Construction Planning and Scheduling* (2e éd.). Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall, pp. 5; 111; 214; 316.
- Johnson, T. J. (1967). *An Alghoritm for the Ressource-Constrained Project Scheduling Problem*. PH.D. thesis, MIT. Cambridge, Massachusetts.
- Johnston, D. W. (1981). Linear Scheduling Methods for Highway Construcion. *Journal of Construction Division. ASCE*, 107(2), pp. 247-261.
- Kaimann, R. A. (1974). Coefficient of Network Complexity. *Management Science*, 21(2), pp. 172-177.
- Kelly, J. E. Jr. (1960). Critical-Path Planning and Scheduling: Matthematical Basis. *Operations Research*, 8, pp. 296-320.
- Kelly, J. E. Jr., Walker, M. (1959). Critical-Path Planning and Scheduling. *Proceedings Eastern Joint Computer Conference, 1-3 décembre, Boston*, pp. 160-173.
- Khisty, C. J. (1970). The Application of the Line of Balance Technique to the Construction Industry. *Indian Concrete Jornal.*, July, pp. 297-320.
- Kundig, B., (1984), *Du taylorisme classique à la flexibilisation du système productif : L'impact macro-économique des différents types d'organisation du travail industriel*. Critique de l'Économie Politique, Janv, pp. 26-27,
- Lannone, A. L., Civitello, A. M. (1985). *Construction Scheduling Simplified*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Lee, D. M. (1982). Discussion: Fencing a Bar Chart. *Journal of the Construction Division, ASCE*, 108(CO2), pp. 357-359.
- Lee, J., Lee, S., Bae, Z. (1986). The Practice of R&D Management: An Empirical Study of Korean Firms. *R&D Management*, 16(4), pp. 297-308.
- Levitt, R. E., Kunz, J. C. (1985). Using Knowledge of Construction and Project Management for Automated Schedule Updating. *Project management journal*, 16(5), pp. 57-76.

- Libratore, M., Pollack-Johnson, B., Smith, C. (2001). Project Management in Construction: Software Use and Research Directions. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(2), pp. 101-107.
- Lock, D. (1996). *Project Management* (6e éd.). New York: Gower Publishing Limited, pp. 127; 141; 148; 214-238.
- Lu, M., AbouRisk, S. M. (2000). Simplified CPM/PERT Simulation Model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(3), pp. 219-226.
- Lumsden, P. (1968). *The Line of Balance Method*, London, England: Pergamon Press, pp. all.
- MacCrimmon, K. R., Ryavec, C.A. (1964). An Analytical Study of the PERT Assumptions. *Operations Research*, 12(1).
- Malcom, D. G., Roseboom, J. H., Clark, C. E., Fazar, W. (1959). Applications of a Technique for R and D Program Evaluation, PERT. *Operations Research*, 7(5), pp. 646-669.
- Martinez, J. C., Ioannou, P. G. (1997). *State-Based Probabilistic Scheduling Using Stroscope's CPM add-On*. Construction Congress V, Minneapolis, Minnesota, pp.438-445.
- Martinez, J. C., Ioannou, P. G. (1999). General-Purpose Systems for Effective Construction Simulation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(4), pp. 265-276.
- Mason, D. (1984). The CPM Technique in Construction: A Critique. *AACE Transactions*, pp. E.2.1-E.2.10
- Massicard, C. (1999). *Vers une démarche logistique intégrée: Le prototype OSL d'organisation et de suivi de chantier*. Thèse de Doctorat, Université de Savoie, Laboratoire Génie Civil et Habitat (LGCH). France, pp. 37.
- McGough, E. H. (1982). Scheduling: Effective Methods and Techniques. *Journal of the Construction Division*, 108(CO1), pp. 75-84.
- Melin, J. W., Whiteaker, B. (1981). Fencing a Bar Charts. *Journal of the Construction Division, ASCE*, 107(CO3), pp. 497-507.
- Melin, J. W., Whiteaker, B. (1983). Closure: Fencing a Bar Charts. *Journal of the Construction Division, ASCE*, 109, pp. 123-124.

Miresco, E. T., Beliveau M., Gilbert P. (1987). New Graphical Planning Representation with ICES-Project 1. *AACE Transactions*, pp. A.6.1- A.6.7.

Miresco, E. T. (1980). Development of New Features for ICES-PROJECT/I. *The Second Conference On Computing in Civil Engineering Baltimore, Maryland*, pp. 151-157.

Miresco, E. T. (1984). ICES-PROJECT/I-ON Microcomputer. *AACE Transactions* : pp. G.3.1-G.3.11.

Miresco, E. T. (1984). ICES-PROJECT\I Adaptation for Microcomputer. *Proceedings of 3rd. Conference in Computing in Civil Engineering, ASCE, 2-6 April, San-Diago, USA*, pp. 439-448.

Miresco, E. T. (1985). PROJECT\I-80, an ICES\PROJECT\I Like Systems for Micro-computers. *Proceedings of Second International Conference on Computing in Civil Engineering, 5-9 June 1985, Hangzhou, China*, pp. 419-433.

Miresco, E. T. (1994). *Conception et réalisation d'un système interactif d'aide à la décision basé sur la connaissance pour la gestion de projets de construction de bâtiments*. Thèse de Doctorat, Université Paris-IX Dauphine. U.F.R. Sciences des Organisations, Paris, pp. 21; 46-47.

Miresco, E. T. (1996). SPACE - An Automated Multi-Project Scheduling System. *Third Canadian Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Montréal en 24-28 août 1996*, pp. 137-146.

Miresco, E. T. (1996). Decision Support System for Multi-Project Scheduling. *First International Conference on Computing and Information Technology for Architecture, Engineering and Construction, Singapore le 16-17 mai 96*, pp. 213-218.

Miresco, E. T., Pomerol, J-Ch. (1995a). A Knowledge-Based Decision Support System for Construction Project Management. *Proceedings of the 6th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Berlin, Germany, 12-15 July, 1995*, pp. 1501-1507.

Miresco, E. T., Pomerol, J-Ch. (1995b). Un modèle de représentation graphique des connaissances pour la gestion de projets de construction. *Revue Internationale en gestion et management de projets*, 2(1), pp. 4-16.

Moder, J.J., Philips, C.R. (1970). *Project Management with CPM and PERT* (2e éd.). Van Nostrand : Reinhold Company, pp. 34, 128-132.

- Moder, J. J., Philips, C. R., Davis, E. W. (1983). *Project Management with CPM, PERT and Precedence Diagramming* (3rd ed.). New York : Van Nostrand Reinhold Company, pp. 61; 192.
- Moeller, G. L., Digman, L. A. (1981). Operations planning with VERT. *Operations Research*, 29(4), pp. 676-697.
- Morand, D. (1994). *Liaison entre la conception et la gestion de projet de bâtiment, PROJECTOR, un prototype pour la planification*. Thèse de Doctorat mention Génie Civil sciences de l'habitat, Université de savoie, pp. all.
- Murray, J. E. (1963). Consideration of PERT Assumptions. *IEEE Transaction*. EM-10, pp. 94-99.
- Neale, R. H., Neale, D. E. (1989). *Construction Planning*. (1e Ed.). London, England: Thomas Telford Ltd, pp. 24.
- O'Brien, J. J. (1975). VPM Scheduling for Hight-Rise Building. *Journal of Construction Division*, 101(4), pp. 895-905.
- O'Brien, J. J. (1984). *CPM in Construction Managment*. New York : McGraw-Hill Book Company, pp. 601.
- Patterson, J. H. (1976). Project Scheduling : The Effects of Problem Structure on Heuristic Performance. *Naval Research Logistics Quarterly*, 23(1), pp. 95-123.
- Peña-Mora, F., Li, M. (2001). Dynamic Planning and Control Methodology for Design/Build Fast-Track Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(1), pp. 1-17.
- Perera, S. (1980). Linear Programming Solution to Network Compression. *Journal of the Construction Division*, 106(CO3), pp. 315-326.
- Perera, S. (1982). Compression of Overlapping Precedence Networks. *Journal of the Construction Division*, 108(CO1), pp. 1-12.
- Perera, S. (1982). Network planning of Projects Comprising Repetitive Activities. *IAHS Conf. On Impact of Economy and Technology, International Association of Housing Science, Vienna Austria*, pp. 927-985.
- Personm J. C. (1991). Who Own Float. *Construction Briefing, Federal Publication, Inc.*, 91(7), pp. 1-12.
- Pinnell, S. S. (1980). Critical Path Scheduling an Overview and a Practical Alternative. *Civil engineering – ASCE*, July, pp. 66-70.

- Pritsker, A. B. (1966). *Gert: Graphical Evaluation and Review Technique*. Memorandum RM-4973-NASA, The Rand Corporation, Avril, pp.1-11
- Pritsker, A. B. (1995). *Introduction to simulation and SLAM II*. New York: John Wiley & Sons, inc, pp. 723-759.
- Pultar, M. (1990). Progress-Based Construction Scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(4), pp. 670-688.
- Rahbar, F. (1984). A Scheduling Tool for Smaller Jobs, *AACE Transactions*, pp. E.8.1-E.8.7
- Rahbar, F., Rowing, J. E. (1992). Repetitive Activity Scheduling Process. *AACE 36th Annual Meeting, Orlando, Florida*, pp. 0.5.1-0.5.8.
- Reda, R. (1990). RPM: Repetitive Project Modeling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(2), pp. 316-330.
- Roy, B. (1959). Contribution de la théorie des graphes à l'étude de certains problèmes linéaires. *C.R. Acad. Sciences, séances du 27 avril 1959.*, T. 248, pp. 2437-2439.
- Roy, B. (1960). Contribution de la théorie des graphes à l'étude de certains problèmes d'ordonnancement. *Comptes rendus de la 2^{ème} conférence internationale sur la recherche opérationnelle, Aix-en-Provence, English Universities Press, Londres*, pp. 171-185.
- Roy, B. (1962). Graphes et ordonnancement. *Revue française de recherche opérationnelle, SofRO*, 25, 6^{ème} an, 4^{ème} trim, pp. 323-333.
- Russell, A. D., Wong, W. M. (1993). New Generation of Planning Structure. *Journal of Construction Engineering and Management*, 119, pp. 196-214.
- Selinger, S. (1980). Construction Planning for Linear Projects. *Journal of the Construction Division, ASCE*, 106(CO2), pp. 195-205.
- Shash, A., Al-Abdullatif, A. (1993). A Survey of Planning and Controlling Techniques Used by Contractors in Saudi Arabia. *Construction Engineering* 35(2), pp. 19-23.
- Shoderbeck, P. P., Digman, L. A. (1967). Third Generation, PERT/LOB. *Harvard Business Rev.*, 45(5), pp. 100-110.
- Shugar, H. B. (1985). Pert Time Scaled Summary Network. *AACE Transactions*, pp. E.5.1 – E.5.4

- Stevens, J. D. (1990). *Techniques for Construction Network Scheduling*. New York: McGraw-Hill, pp. 123.
- Stradal, O., Cacha, J. (1982). Time Space Scheduling Method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 108(CO3), pp. 445-457.
- Suhail, S. A., Neale, R. H. (1994). CPM/LOB: "New methodology to integrate CPM and Line of balance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 120, pp. 667-684.
- Taylor, R. M. (1991). Towards a Knowledge-Based Model of Project Management. *International Journal of Project Management*, 9(3), pp. 169-177.
- Thabet, W. Y., Beliveau, Y. J. (1994). Modeling Work Space to Schedule Repetitive Floors in Multistory Buildings. *Journal of Construction Engineering and Management*, 120, pp. 667-684.
- Trimble, G. (1984). Ressource-Oriented Scheduling. *Project Management Journal, Project Management Institute*, 2(2), pp. 70-74.
- TurK, Z. (1998). Hermeneutic Constructivism and Engineering Decision Making. *First International Conférence on New Information Technologies for Decision Making in Civil Engineering, Montréal, Canada, October 98*, pp. 115-124.
- Vanegas, J. A., Bravo, E., Halpin, D. W. (1993). Simulation Technologies for Planning Heavy Construction Processes. *Journal of Construction Engineering and Management*, 119(2), pp. 336-354.
- Vernadet F. B. (1996). *Entreprise Modeling and Integration : Principles and Applications*. Chapman & Hall.
- Whitehouse, G. E., Brown, J. R. (1979). Genres: An extension of Brooks' algorithm for project scheduling with resource constraints. *Computer and Industrial Engineering*, 3(4), pp. 261-68.
- Wiest, J. D. (1981). Precedence Diagramme Methods : Some Unusual Characteristics and their Implications for Project Managers. *Journal of Operations Management*, 1(3), pp. 121-30.
- Winstanley, G., Kellet, J. M. (1993). A Computer-Based Configuration and Planning System. *International Journal of Project Management*, 11(2), pp. 103-110.
- Woodgate, H. S. (1970). *Comment utiliser les plannings par réseaux*. Paris: les éditions d'organisation, pp. 225-230; 253-263.