HAL
open science

Un système interactif d'aide à la décision pour la régulation de charges de travail dans les ateliers

José Fidel Torres Delgado

To cite this version:

José Fidel Torres Delgado. Un système interactif d'aide à la décision pour la régulation de charges de travail dans les ateliers. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1995. Français. NNT : . tel-00144253

HAL Id: tel-00144253

https://theses.hal.science/tel-00144253v1

Submitted on 2 May 2007

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

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

Année : 1995

THESE

présentée
au **Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS**

en vue de l'obtention

du **DOCTORAT de l'Université Paul Sabatier de Toulouse (Sciences)**
Spécialité : Automatique

par

José Fidel TORRES DELGADO

Ingénieur en Electricité et Mathématicien Uni-Andes

LAAS-CNRS

UN SYSTEME INTERACTIF D'AIDE A LA DECISION POUR LA REGULATION DE CHARGES DE TRAVAIL DANS LES ATELIERS

Soutenue le 7 Septembre 1995 devant le Jury :

M.	Z.	BINDER	Rapporteur
M.	A.	GAUTHIER	Rapporteur
M.	JP.	KIEFFER	Rapporteur
Mme	C.	THURIOT	Directeur de thèse
Mme	MF.	VALAX	
M.	J.	ERSCHLER	
M.	M.	COURVOISIER	Président
M.	J.	DELMAS	
M.	M.	VILLAUMIE	

Rapport LAAS No. 95363

Cette thèse a été préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS.
7, Avenue du Colonel Roche 31077 TOULOUSE.

Avant-propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) du CNRS. J'exprime donc tous mes remerciements à Alain COSTES, directeur du LAAS de m'avoir accueilli dans ce laboratoire.

Je souhaite remercier Messieurs Robert VALETTE, Directeur de Recherche au CNRS et Jean-Claude HENNET, Directeur de Recherche au CNRS, successivement responsables du groupe Systèmes de Production, de m'avoir accuelli au sein de ce groupe.

Je tiens à remercier particulièrement Catherine THURIOT, Chargée de Recherche au CNRS, sans qui ce travail n'aurait jamais eu lieu, et qui m'a encadré au LAAS pendant ces quatre ans de recherche. La qualité scientifique et très humaine de son encadrement, liée à la confiance qu'elle m'a toujours portée ont contribué à rendre ce travail très enrichissant.

Ma reconnaissance envers Monsieur Marc COURVOISIER, Professeur à l'Université Paul Sabatier et Directeur de l'INSA de Toulouse, est double pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury de cette thèse et pour m'avoir accueilli au sein du groupe Systèmes de Production dont il était responsable.

Je suis très reconnaissant à Messieurs Zdenek BINDER, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Grenoble, Jean-Paul KIEFFER, Professeur à l'Institut Universitaire des Sciences Pour l'Ingénieur de Marseille, et Alain GAUTHIER, Professeur à l'Université des Andes à Bogotá (Colombie), pour avoir accepté d'étudier ce travail et d'en être les rapporteurs.

Je remercie également Madame Marie-Françoise VALAX, Maître de conférences à l'Université de Toulouse-Le Mirail, d'avoir acceptée d'étudier ce travail -dont elle est une des mères- et de participer à ce jury.

J'exprime tous mes remerciements à Jacques ERSCHLER, Professeur à l'INSA de Toulouse, pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux -dont il est aussi un des pères- et l'honneur qu'il me fait pour sa participation au jury.

Je remercie Monsieur Jacques DELMAS, Professeur à Sup-Aéro de Toulouse. Je lui suis très reconnaissant de l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail et d'avoir accepté de participer à ce jury.

Je remercie également Michel VILLAUMIE, Président Directeur Général de la société Cabinet Villaumié S.A, pour avoir accepté de participer à ce jury.

Je suis très reconnaissant à Nicole LOMPRE, Ingénieur Ergonome au CNRS, pour son investissement dans ce travail. Je la remercie particulièrement des précieux

conseils qu'elle a su me donner au cours de ces dernières années.

J'exprime toute ma gratitude envers toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien et leur amitié au cours de ces dernières années.

Table des Matières

Avant-propos 1

Table des Matières 3

Introduction 7

Liste des concepts 11

Liste des symboles 13

I Problématique de l'aide à la décision dans les Ateliers de fabrication 15

I.1 Une analyse de l'existant 15
I.1.1 Typologie des Systèmes de Production 16
I.1.2 Modèles et méthodologies existants 17
I.1.2.1 Les méthodes qui prennent en compte l'incertitude . 18
I.1.2.2 Les approches hiérarchisées 19
I.1.2.3 Les méthodes d'optimisation de critères 19
I.1.2.4 Les méthodes basées sur la simulation des flux de production 19
I.1.2.5 Les méthodes issues de l'Intelligence Artificielle . . . 20
I.1.2.6 Quelques techniques ou méthodologies de contrôle de la production 20
I.1.3 Structure et utilisation effective des progiciels de GPAO actuels 22
I.1.3.1 Structure 22
I.1.3.2 Utilisation effective des progiciels de GPAO actuels . 25
I.2 Besoin d'autonomie : réseau de centres de décision 26
I.2.1 Explicitation de l'autonomie locale 26
I.2.2 Fonctionnement simplifié d'un centre de décision 28
I.3 Besoin d'Ergonomie : interfaces graphiques Homme-Machine 30
I.3.1 Ergonomie des Interfaces Homme-Machine (IHM) 30
I.3.2 Niveau Conceptuel 31
I.3.3 Sur le plan perceptuel 32
I.3.4 Pluridisciplinarité : étapes de validation 32

I.3.5 Stratégies Décisionnelles 33
Bibliographie 33

II Régulation Agrégée de la Charge **39**
II.1 Introduction 39
II.2 Centres de Décision Concernés 40
II.3 Position du problème de régulation de la charge sur une ressource agrégée 43
II.3.1 Contraintes initiales 43
II.3.1.1 Données détaillées sur les opérations 43
II.3.1.2 Données agrégées sur la ressource 44
II.3.2 Approches actuelles de la notion de charge 46
II.3.2.1 Travaux de Bechte 46
II.3.2.2 Travaux de Bertrand 47
II.3.3 Nouvelle approche de la notion de charge 47
II.4 Décomposition temporelle pour la régulation de la charge 49
II.4.1 Repères 49
II.4.2 Structures Adjacentes 50
II.5 Nouvelles Courbes de Charge 51
II.5.1 Classification temporelle des opérations 52
II.5.2 Charges maximale et minimale d'un intervalle $[T_j, T_{j+1}]$ 53
II.5.2.1 Contributions des opérations 53
II.5.2.2 Calcul des charges maximale et minimale de l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$ 55
II.5.2.3 Courbes de Charge 57
II.5.3 La Marge de Charge 58
II.6 Décisions de Régulation de Charge 60
II.6.1 Relation entre décisions agrégées et décisions détaillées 63
II.6.1.1 Réactualisations de contributions d'opérations 63
II.6.1.2 Processus de vases communicants 65
II.6.2 Synthèse des décisions agrégées 72
II.7 Modélisations mathématiques 77
II.7.1 Position du problème 77
II.7.2 Modèle de flot canalisé 78
II.7.2.1 Conditions nécessaires de cohérence : bornes des arcs 79
II.7.3 Modèle de Programmation Linéaire 80
II.7.3.1 Le critère et les contraintes 80
II.7.3.2 Représentation matricielle 82
II.7.3.3 Perspectives 84
II.8 Application : MARGE 1 85
II.8.1 Description générale de l'interface 85
II.8.2 écran 1 86

II.8.2.1 Représentation des opérations et manipulations de l'Utilisateur 87
II.8.2.2 Axe temporel, quadrillage, bornes temporelles 87
II.8.2.3 Décomposition en Structure Adjacente 87
II.8.3 écran 2 88
II.8.4 écran 3 89
II.8.5 écran 4 90
II.8.5.1 Représentation des charges et des capacités, et manipulations de l'Utilisateur 91
II.8.6 Validation ergonomique de MARGE 1 92
II.9 Conclusion 94
Bibliographie 95

III Régulation Détaillée de la Charge 101
III.1 Introduction 101
III.2 Problèmes d'ordonnancement 102
III.2.1 Définition et concepts généraux 102
III.2.1.1 Les tâches 102
III.2.1.2 Les ressources 102
III.2.1.3 Les contraintes 103
III.2.2 Typologies des problèmes d'ordonnancement 104
III.2.3 Les problèmes d'atelier 105
III.2.4 Approches existantes 105
III.2.4.1 Recherche Opérationnelle 105
III.2.4.2 Intelligence Artificielle 106
III.2.4.3 Le rôle du Décideur 106
III.3 Relation entre les décisions agrégées sur les charges, et les décisions détaillées sur les opérations 107
III.4 Premier exemple d'heuristique, ou de Stratégie Machine de désagrégation 110
III.4.1 Désagrégation d'une décision agrégée de type 1 112
III.4.2 Désagrégation d'une décision agrégée de type 2 114
III.4.3 Conclusion 116
III.5 Second exemple : Stratégie Machine robuste 116
III.5.1 Notion de marge de temps résiduelle 116
III.5.2 Désagrégations robustes 117
III.5.3 Conclusion 118
III.6 Prise en compte des contraintes détaillées de ressource 119
III.6.1 Présentation du problème 119
III.6.2 Règles élémentaires de l'A.S.C., concernant des paires d'opérations, dans le cas disjonctif : 122
III.6.3 Application à une décision d'affectation et de séquencement sur un exemplaire de ressource : 124

III.7 Application : MARGE 2 124
III.7.1 Ecran 1 : lignes de charge 125
III.7.2 Ecrans 2 et 3. Plans locaux 127
III.7.3 Ecran 4 : lignes de charge locales 129
III.8 Conclusion 131
Bibliographie 131

Conclusion Générale **135**
Bibliographie 139

Introduction

Ce travail concerne les problèmes d'aide à la décision dans les systèmes de productions discrètes et diversifiées. Il s'inscrit dans une démarche pluridisciplinaire, tentant de discerner, et redonner son rôle décisionnel à l'Homme, et en particulier au niveau des ateliers.

A l'origine de la démarche présentée dans ce mémoire, un ensemble d'analyses, menées en collaboration avec une équipe de recherche en psychologie du travail, a porté sur les contenus et utilisations effectives des progiciels actuels. Il s'avère que, généralement, leur nature prescriptive, leur structure fortement hiérarchisée, les types et modes de présentations qu'ils proposent, leur confèrent un rôle prédominant dans la prise de décision, puisque reposant sur le principe de calcul de solutions uniques. Se substituant ainsi à l'Homme dans son rôle intelligent, et reposant cependant sur une modélisation forcément partielle de la réalité, de tels outils dits d'aide sont bien souvent des facteurs supplémentaires de difficulté pour les personnes chargées d'organiser le travail, en fonction des commandes et des ressources disponibles, et en tenant compte des aléas, et autres éléments difficilement ou non modélisables présents dans les ateliers.

Considérant malgré tout la nécessité d'exploiter l'objectivité, la rigueur et la puissance de calcul de l'ordinateur, que nous appellerons la "Machine", nous proposons quelques idées, éléments théoriques et applications, dont l'originalité nous semble résider dans leur tentative de répondre à un besoin double des Décideurs :

- d'une part, le <u>besoin d'Autonomie décisionnelle :</u> marge de manoeuvre suffisante pour exploiter le savoir-faire, gérer les aléas, et autres éléments que seul l'Homme peut aborder, tout en demeurant cohérent vis-à-vis de l'environnement.

- d'autre part, le <u>besoin d'Ergonomie</u> des outils d'aide à la décision, réalisant la compatibilité, ou tout au moins minimisant l'incompatibilité entre les informations proposées par la Machine, les modes d'interaction Homme-Machine, et les représentations mentales des potentiels Utilisateurs.

Pour répondre au premier besoin d'Autonomie, nous nous sommes basés sur l'approche développée au sein de l'équipe de recherche en Gestion de Production dans laquelle s'est déroulé notre travail, décomposant les systèmes décisionnels en structures réparties de <u>centres de décision</u> distincts, et liés entre eux par des relations du type "amont-aval". Toute décision prise par un centre en amont se répercutant en

termes de contraintes devant être respectées en aval, l'autonomie d'un centre donné est alors délimitée par le jeu de contraintes pesant sur lui à tout moment.

Le soucis d'Ergonomie est ici abordé à travers les concepts, mécanismes et représentations graphiques associées de marges : marges de travail, de ressources, de temps, etc., dans la conception d'Interfaces Homme-Machine.

Nos efforts ont porté sur le centre de décision de régulation de charges de travail devant être supportées par une ressource agrégée comprenant plusieurs items, ou exemplaires, de fonctionnalité identique : équipe d'opérateurs, pool de machines du même type, etc.

Le premier chapitre développe les idées précédemment exposées : partant d'une analyse de l'existant concernant les typologies des systèmes de production, les modèles et méthodologies rencontrées pour leur gestion, nous proposons une analyse critique des progiciels actuels. Les besoins d'Autonomie et d'Ergonomie sont alors abordés à travers la description simplifiée d'un centre de décision, l'explicitation de quelques éléments importants concernant les Interfaces Homme-Machine, la démarche pluridisciplinaire de validation ergonomique que nous avons adoptée pour la réalisation de nos applications.

Prenant en compte l'existence de deux niveaux d'agrégation différents lors des raisonnements liés aux décisions de régulation de charges sur une ressource donnée, le second chapitre propose une décomposition du centre de décision concerné en deux sous-centres interdépendants : l'un, agrégé, portant sur les charges de travail et capacités de la ressource, l'autre, détaillé, portant sur les opérations de fabrication, et, éventuellement, sur les quantités instantanées d'exemplaires disponibles. La décomposition temporelle de l'horizon en Structure Adjacente, faisant elle-même l'objet d'une première étape décisionnelle, permet alors de dégager certaines marges de charges, donnant lieu à un type nouveau de courbes de charges, au moyen desquelles il devient possible d'exploiter les processus de glissements dits de vases communicants pour réaliser une régulation au niveau agrégé. Une première application, MARGE 1 (**M**odule d'**A**ide à la **R**égulation **G**raphique et **E**rgonomique), est alors décrite : il s'agit d'une interface Homme-Machine graphique et ergonomique de régulation de charges concernant ce premier niveau de décision. Ce prototype a fait l'objet d'une première étape de validation ergonomique, dont nous présentons le principe et les résultats.

Le troisième chapitre concerne le niveau détaillé de la régulation. Compte tenu des décisions agrégées prises en amont et décrites dans le chapitre précédent, il s'agit, à ce niveau, de prendre des décisions sur la répartition temporelle des opérations de fabrication, de manière à ce que celle-ci corresponde effectivement aux charges régulées, en respectant des contraintes de dates limites de début au plus tôt et fin au plus tard. A ce niveau, peuvent éventuellement être prises en compte certaines contraintes détaillées sur la ressource concernée, telles que le nombre d'exemplaires disponibles et leurs plages de fonctionnement respectives. Ainsi, la problématique présentée avoisine-t-elle celle de l'ordonnancement, sans toutefois y être similaire ; une analyse succincte des différentes approches et méthodes existantes, permet de

présenter cette différence, ainsi que les principes de base utilisés, reposant d'une part sur l'objectif à atteindre : assurer la cohérence entre les niveaux agrégé et détaillé de la régulation, et d'autre part, sur les contraintes à prendre en compte, faisant intervenir quelques mécanismes élémentaires de l'Analyse Sous Contraintes. Les décisions à prendre peuvent alors être associées à des problèmes de représentations et mécanismes portant sur des marges de temps, de séquencements et d'affectations, ayant donné lieu à une seconde application : MARGE 2, connectée à la première et utilisant la métaphore des tableaux de Gantt.

La conclusion de ce mémoire présente alors une synthèse des résultats que nous avons obtenus, les limites de notre travail étant autant de perspectives.

Liste des concepts

Les différents concepts utilisés dans ce travail, figurent dans la liste suivante. Les numéros de section ou paragraphe associé à chaque concept, représentent l'endroit où ce dernier est mentionné pour la première fois dans le mémoire.

Besoin d'Autonomie(I.1.3.2 et I.2)

Besoin d'Ergonomie(I.3)

Interfaces Homme-Machine(I.3.1)

Centres de décisions(I.2)

Marges de charge(II.2 et II.5.3)

Courbes de charge(II.2 et II.5.2.3)

Charges maximales et minimales(II.5.2)

Lissage de charge(II.6)

Repères(II.4.1)

Structure Adjacente(II.4.2)

Contraintes agrégées de ressource(II.3.1.2)

Surcharge inévitable(II.6)

Sous-charge inévitable(II.6)

Risque de surcharge(II.6)

Risque de sous-charge(II.6)

Métaphores(I.3.3)

Processus de vases communicants(I.3.3 et II.6.1.2)

Métaphore du Tableau de Gantt(I.3.3 et III.6.1)

Contraintes détaillées de ressource(III.6)

Analyse Sous Contraintes(III.6.1 et III.6.2)

Marges de temps(II.3.1)

Marges de affectations(II.2, III.3 et III.6.1)

Marges de séquencements(II.2, III.3 et III.6)

Liste des symboles

C_i date de début au plus tôt de l'opération i
F_i date de fin au plus tard de l'opération i
D_i durée effective de la tâche de l'opération i
Q Quantité de travail maximale, ou disponible, appelée capacité maximale
R Quantité de travail minimale, ou devant être utilisée, appelée capacité minimale
T_j Borne de la Structure Adjacente
$\{T_0, T_1, ..., T_n\}$ La structure adjacente
Ω_j L'ensemble des fenêtres rencontrant T_j
Int_j L'ensemble des fenêtres contenues dans l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$
ω_i l'opération planifiée i
$WMAX_j$ la charge maximale de l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$
$WMIN_j$ la charge minimale de l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$
$S_{1,j}$ la marge de charge échangeable entre l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$ et l'intervalle précédent $[T_{j-1}, T_j]$
$S_{2,j}$ la marge de charge échangeable entre l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$ et l'intervalle suivant $[T_{j+1}, T_{j+2}]$
$NWMAX_j$ niveau moyen de charge maximale
$NWMIN_j$ niveau moyen de charge minimale
$WMAX_{droite,j}$ la partie de la charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$ échangée sur $[T_{j+1}, T_{j+2}]$
$WMAX_{gauche,j}$ la partie de la charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$ échangée sur $[T_{j-1}, T_j]$
$WMIN_{droite,j}$ la partie de la charge minimale de $[T_j, T_{j+1}]$ échangée sur $[T_{j+1}, T_{j+2}]$
$WMAX_{gauche,j}$ la partie de la charge minimale de $[T_j, T_{j+1}]$ échangée sur $[T_{j-1}, T_j]$
$WMAX'_j$ la nouvelle charge maximale sur l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$
$WMIN'_j$ la nouvelle charge minimale sur l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$
$N_{inf_1,j}$, $N_{inf_2,j}$ les sous-niveaux de charge inférieures
$N_{Sup_1,j}$, $N_{Sup_2,j}$ les sous-niveaux de charge supérieures
C'_i, F'_i les dates de début au plus tôt et fin au plus tard réactualisées
N Nombre d'exemplaires machines
$t_{i,j}$ la j-ième date d'arrêt pour l'exemplaire i
$D_{i,j}$ la durée du j-ième intervalle d'arrêt pour l'exemplaire i

Chapitre I

Problématique de l'aide à la décision dans les Ateliers de fabrication

I.1 Une analyse de l'existant

Pour répondre à une complexité de plus en plus croissante des systèmes de production qui doivent réagir rapidement aux demandes du marché, les gestionnaires de la production ont besoin à tout moment d'outils informatiques performants. Aujourd'hui, un bon nombre de logiciels ont été développés, qui cherchent à répondre à ce besoin. Ils ont été regroupés sous la terminologie de **Gestion de Production Assistée par Ordinateur (GPAO)**.

Un élément essentiel dans un processus moderne de fabrication est la **gestion des flux** qui prend en charge la circulation des produits et des informations dans l'entreprise, depuis l'enregistrement des commandes jusqu'à la livraison au client. Dans cette perspective, la productivité peut être notablement accrue par l'amélioration de la gestion du **flux des produits** dans l'atelier.

Dans le cadre de la Gestion de Production Assistée par Ordinateur, on distingue [GIARD 81] :

1. la gestion de **données techniques** relatives aux produits à fabriquer : gammes, nomenclatures, processus opératoires élémentaires, durées, ressources utilisées, conception de nouveaux produits, données relatives aux ressources (machines, regroupements, outils, etc.),

2. la gestion de **données commerciales**, qui concernent les commandes et le calendrier des livraisons,

3. la gestion de **matières**, relative à l'approvisionnement en matières premières, composants, emballages, produits servant à l'exploitation, énergie, moyens ma-

tériels, entrées, sorties et gestion des stocks de produits finis, de pièces de rechange, de produits et outils usagés, etc.,

4. la gestion du **travail**, c'est-à-dire l'organisation dans le temps de la réalisation des opérations associées aux produits à fabriquer, en leur attribuant des moyens (hommes et/ou machines), matières premières ou composants.

I.1.1 Typologie des Systèmes de Production

Chaque système de production est unique car il a été organisé par des groupes d'hommes (l'organisation de l'entreprise) pour répondre aux besoins d'autres groupes d'hommes (les clients). Cependant, on peut envisager une classification des systèmes de production en fonction de plusieurs critères [COURTOIS et AL. 92].

- **Les quantités fabriquées et la répétitivité :** les quantités lancées peuvent être en production unitaire, en petites séries, en moyennes ou grandes séries. Pour chacune de ces quantités, les lancements peuvent être répétitifs ou non.

- **L'organisation des flux de production :**

  - **Production en continu (Flow shop)** lorsque l'on traite des quantités importantes d'un seul produit ou d'une seule famille de produits. Dans ce cas, les machines et les installations sont dédiées à ce type unique de fabrication. L'implantation est réalisée sous forme de ligne de production, rendant les flux de produits linéaires (par exemple, les industries pétrochimiques, les cimenteries, etc.).

  - **Production en discontinu (Job shop)** lorsque l'on traite des quantités relativement faibles de produits diversifiés, réalisés à partir d'un parc de machines à vocation générale. Les machines et les installations sont capables de réaliser un grand nombre de travaux différents. En général, l'implantation est réalisée par regroupements fonctionnels comprenant par exemple des machines de même fonctionnalité. Les flux des produits sont hétérogènes, en fonction des enchaînements d'opérations à réaliser. Il s'agit, par exemple, des industries mécaniques et de confection.

  - **Production par projet** lorsque le produit est unique et dont la réalisation est complexe. Le principe est d'enchaîner toutes les opérations qui conduisent à l'aboutissement du projet, en minimisant les temps morts afin de livrer le produit au moment convenu (par exemple, la construction d'un pétrolier, d'un barrage, d'une usine, etc.).

- **La relation avec les clients :**

  - **Production sur stock :** ce type de production consiste à stocker les produits finis. Il est adopté :

  * lorsque le délai de fabrication est supérieur au délai de livraison réclamé par le client. Il faut alors produire à l'avance pour satisfaire le client en s'appuyant sur des prévisions,
  * pour produire en grande quantité et diminuer les coûts de production.
- **Production à la commande** : ce type de production n'est engagé que si l'on dispose d'un engagement ferme du client. On évite le stock de produits finis et on diminue les frais financiers.
- **Des formules mixtes** sont possibles : on tient compte du délai acceptable par le client pour assembler les dernières phases du produit, et ainsi éventuellement le personnaliser. Cette partie d'assemblage final est alors réalisée à la commande, le reste de la production est réalisée sur stock.

• **L'autonomie de commande et de conception** : en général, on différencie trois degrés dans l'autonomie des entreprises :

- **Le concepteur-fabricant** : l'entreprise conçoit elle-même ses produits et en assure la fabrication et la distribution. Elle a besoin d'un système de gestion de production sophistiqué et bien adapté car c'est la condition de sa compétitivité,
- **Le sous-traitant** : il réalise des opérations de production en fonction d'un cahier de charges prescrit par le donneur d'ordre. En revanche, il a l'autonomie des commandes de matières premières, et des méthodes adoptées pour satisfaire le cahier de charges,
- **Le façonnier** : de même qu'un sous-traitant, il réalise des opérations de production en fonction du cahier de charges remis par le donneur d'ordre. Cependant, il ne possède pas l'autonomie des commandes de matières premières, car elles lui sont fournies par le donneur d'ordre. Parfois, les machines elles-mêmes sont fournies.

Il existe, bien sûr, d'autres critères en fonction desquels on peut réaliser différentes classifications des systèmes de production. On peut citer, entre autres, la typologie relative à la structure des produits et les modes de gestion de flux de matières et d'informations.

Le travail présenté dans ce mémoire se situe dans le cadre plus particulier des systèmes de productions manufacturières discrètes et diversifiées (production en discontinu) à la commande et en fabrication par lots en petites et moyennes séries.

I.1.2 Modèles et méthodologies existants

La gestion de production peut être abordée selon différentes perspectives, plus ou moins ponctuelles ou, au contraire, intégratrices [PLOSZAJSKI et AL. 93].

L'intérêt s'est longtemps focalisé, du moins dans le domaine des **Sciences Pour l'Ingénieur**, sur l'étude des décisions de planification et d'ordonnancement de la production.

Mais la perspective s'élargit actuellement, conçue comme un ensemble de problèmes divers liés à l'amélioration globale de la performance de l'entreprise, et posant par exemple des problèmes de conception de stratégies industrielles, de restructuration d'usines existantes, d'optimisation des processus de fabrication sur le plan technologique, d'évaluation des politiques opérationnelles, etc.

Cette démarche, supposant l'intégration d'approches, de problématiques et de disciplines différentes, a débouché sur le concept **CIM (Computer Integrated Manufacturing)** posant, notamment, le problème de la "juste place" de l'ordinateur et de l'homme dans l'entreprise, ainsi que celui de la "cohérence globale" d'un système de production.

La prise en compte d'un ensemble élargi de décisions est une tâche difficile, mais qui laisse envisager une connaissance plus approfondie des mécanismes inhérents à la production, identifiant par exemple les conséquences globales de décisions locales, qui pourraient alors constituer une base de négociations [DE TERSSAC 90], et ne plus être seulement un ensemble de prescriptions plus ou moins adaptées, à respecter en aveugle.

Différents modèles et méthodes sont utilisés pour aborder les problématiques de la gestion de production. Sans prétendre être exhaustifs, nous pouvons mentionner ceux liés à la prise en compte de l'incertitude, ou de la structure plus au moins hiérarchique de la démarche décisionnelle de ces systèmes.

Dans cette partie, nous allons résumer le cadre général des méthodes abordant les problèmes de planification et d'ordonnancement, s'appuyant souvent sur des outils de simulation, et intégrant plus récemment des approches et techniques issues de l'Intelligence Artificielle. Une description plus spécifique à l'ordonnancement sera proposée ultérieurement dans le chapitre III de ce mémoire.

I.1.2.1 Les méthodes qui prennent en compte l'incertitude

La gestion de production doit prendre en compte, à tous les niveaux, l'incertitude liée à la réalité. Des prévisions incertaines de la demande en produits finis et des prix des matières premières fluctuants influencent la planification à moyen et à long termes.

Plusieurs théories mathématiques sont utilisées pour formaliser l'incertitude ; parmi elles, on peut mentionner la théorie des probabilités, les processus stochastiques et la théorie du Flou. L'emploi des outils mathématiques liés à ces méthodes, induit le traitement de grandes quantités de données, difficiles à obtenir ou à évaluer, et pose des problèmes de temps de calcul prohibitifs et d'interprétations de résultats délicates, et pourtant tellement nécessaires aux gestionnaires de production, ou Décideurs.

Si ces techniques s'avèrent difficiles à mettre en œuvre, et à utiliser concrètement, elles permettent cependant la compréhension et la modélisation de certains problèmes et mécanismes.

I.1.2.2 Les approches hiérarchisées

Les approches basées sur les modèles hiérarchisés sont nombreuses. Elles s'appuient sur une décomposition du problème global en sous-problèmes, et introduisent généralement le concept d'**agrégation** [MERCE 87], qui sera plus précisément commenté dans la suite de ce mémoire (chapitre II).

Le principe de décomposition a été largement étudié dans le contexte de l'optimisation et de la commande optimale. Il permet de surmonter les obstacles liés à la taille et à la complexité d'un système, ramenant la résolution d'un problème global à la résolution successive de sous-problèmes de dimensions et complexités acceptables.

Au niveau supérieur d'une structure hiérarchisée, l'information est généralement synthétisée. Le problème à résoudre concerne des variables **agrégées** représentant un ensemble de variables élémentaires. La solution agrégée fournie par ce niveau constitue un objectif à poursuivre ou cadre à respecter, qui porte sur des variables plus **détaillées**. Ainsi, la solution finale est obtenue par affinements successifs.

L'intéret porté aux approches hiérarchisées provient de leur pertinence vis-à-vis des structures organisationnelles actuelles, hiérarchisées dans leur plus grande majorité, car issues de la culture Tayloriste.

I.1.2.3 Les méthodes d'optimisation de critères

Les décisions de gestion doivent généralememt être prises suivant plusieurs critères, le plus souvent contradictoires.

Cependant, un certain nombre d'outils d'aide à la décision sont basés sur la recherche de la "meilleure solution" vis-à-vis d'un critère. Dans ce cas, la décision "optimale" vis-à-vis du critère considéré est proposée au Décideur, qui a alors généralement la possibilité de l'accepter, la modifier (en modulant certains paramètres), ou la rejeter (plus rarement!), et déclencher alors une autre recherche de solution optimale vis-à-vis d'un autre critère.

Même si ces approches donnent lieu à la conception d'interfaces Homme-Machine de plus en plus sophistiquées, car permettant de nombreuses "manipulations" des solutions optimales, elles semblent cependant souvent inadaptées aux Décideurs, car encore trop éloignées de la réalité.

I.1.2.4 Les méthodes basées sur la simulation des flux de production

La démarche de simulation est aujourd'hui en pleine expansion. Elle donne lieu à des langages (SIMAN) et à des logiciels (CADENCE, HOCUS, SIMULFLEX, SE-

RETE) de plus en plus nombreux, pouvant simuler les flux de matières, de produits, et d'informations à différents niveaux [INDUSTRIES ET TECHNIQUES 92].

Cette orientation représente une alternative intéressante aux approches analytiques précédement mentionnées, lorsque celles-ci (et c'est souvent le cas) ne sont pas réalisables, ou reposent sur des modélisations trop restrictives et simplificatrices.

I.1.2.5 Les méthodes issues de l'Intelligence Artificielle

De nombreux travaux utilisent les techniques de l'IA pour résoudre les problèmes de planification et d'ordonnancement de la production. Parmi eux, mentionnons :

- les Systèmes Experts à base de règles et d'un moteur d'inférence : dans [KUSIAK et CHEN 87] sont présentés de nombreux systèmes destinés à la planification et à l'ordonnancement,
- les systèmes d'aide à la décision utilisant une base de connaissances permettant la manipulation d'une hiérarchie de critères [MUSTAFA 89],
- Les approches intégrant la simulation, l'optimisation et les systèmes à base de connaissances [KING et FISCHER 89] ; ces techniques seront commentées dans le chapitre III de ce mémoire, car elles concernent plutôt les problèmes d'ordon- nancement.

I.1.2.6 Quelques techniques ou méthodologies de contrôle de la production

Le contrôle efficace des flux de matières et d'informations est un élément clef dans la démarche d'un système de production. Plusieurs techniques ou méthodologies de contrôle ont été développées et mises au point ces dernières années, qui visent à gérer, sur le plan pratique, une grande partie des problèmes de la gestion de production.

Parmi ces "Philosophies" de la Gestion de Production pratique, celles qui ont eu le plus de succès sont les techniques MRP, MRP-2, JIT et OPT.

- <u>Le MRP</u> (Material Requirements Planning) est un concept de gestion de production mis au point aux Etats-Unis dans les annés 60 [ORLICKY 75]. Depuis son apparition, le concept a évolué pour se transformer en MRP-2 (Manufacturing Resources Planning).

  Le concept MRP est construit autour d'un principe de planification logique qui consiste à décomposer la demande en ensembles, sous-ensembles de composants et matières premières, à partir du carnet de commandes exprimé en produits finis, et à l'aide d'une structure en arbre de composants pour chaque produit (la nomenclature) [SPALANZANI 93]. Dans la démarche MRP, le Programme Directeur de Production (PDP) détermine les besoins de matériaux, produits semi-finis, finis, etc, ... à tous les niveaux. Les calculs sont simples et s'avèrent

proposer des résultats utiles et pertinents pour le niveau de planification de la production. Toutefois, portant sur de très grands nombres de données, ils peuvent introduire une certaine inertie et rigidité du système de contrôle vis-à-vis de la production effective : cet argument sera plus largement développé dans le chapitre II, au sujet des courbes de charge à capacité infinie issues de calculs du type MRP.

- **Le concept JIT** (Just-In-Time) s'est développé au Japon après la deuxième guerre mondiale. Il peut s'exprimer de la façon suivante [COURTOIS et AL. 92] :

  il faut acheter ou produire seulement ce dont
  on a besoin, quand on en a besoin

  Et ceci, à tous les stades de la production : matières premières, produits en cours de fabrication, produits finis. Le JIT est souvent associé à une technique de circulation de l'information connue sous le nom de KANBAN (étiquette en japonais) qui permet une régulation efficace du flux de production à court terme. Le système KANBAN [SHINGO 83] permet de "tirer" la production, de poste de travail en poste de travail, à partir des commandes du marché, sur une base d'informations mises à jour en temps réel. Sur le plan pratique, la méthode KANBAN ne s'applique que dans les entreprises ayant une production répétitive dans un environnement relativement stable, ce qui n'est pas toujours le cas.

- **Le concept OPT** (Optimized Production Technology) est une méthode de gestion de la production apparue aux Etats-Unis en 1978. Elle est fondée sur une gestion de l'entreprise à partir de ses goulets d'étranglement (les ressources critiques) [GOLDRATT et COX 86]. Un goulet ou goulot d'étranglement est une ressource, machine ou atelier, dont la capacité réelle (et non théorique) est inférieure à la demande du marché.

  Les concepteurs d'OPT ont défini un ensemble de neuf règles [NYEN 88] qui synthétisent l'approche retenue. Un logiciel d'ordonnancement a été développé [MULKENS 93], [COURTOIS et AL. 92], chargé de réorganiser les flux en amont et en aval des goulots.

- **De nouvelles philosophies** de contrôle de production sont développées : elles visent à adapter les stratégies de contrôle dans un environnement toujours variable auquel doit faire face le système de production. La variabilité de la demande, le cycle de vie des produits, les nouvelles technologies, le besoin d'amélioration de la qualité des produits, etc..., sont des facteurs qui déterminent la façon dont l'entreprise doit organiser la production. Parmi ces nouvelles philosophies, nous pouvons mentionner l'approche DPP (Distributed Production Planning) [LARSEN et ALTING 93] qui cherche à améliorer la flexibilité globale en décomposant le système de production en centres de planification

contrôlés localement et regroupant différentes ressources. La décomposition est réalisée sur la base de la structure des produits. L'approche DPP intègre certaines idées des approches MRP, JIT et OPT. Dans une entreprise gérée selon cette approche, chaque centre de planification est considéré comme un département de l'entreprise possédant un certain degré d'autonomie décisionnelle. Un système de planification centralisé est chargé de formuler les objectifs de production et d'affecter les opérations de fabrication par département. La tâche de planification finale est laissée sous la responsabilité de chaque département. Par exemple, dans une entreprise donnée, un atelier d'usinage de pièces peut utiliser l'approche MRP traditionnelle pour le **calcul de besoins** en matériaux et l'approche OPT comme outil de planification et d'ordonnancement, tandis que les ateliers de montage final utilisent le JIT comme outil de planification afin de répondre à la demande.

I.1.3 Structure et utilisation effective des progiciels de GPAO actuels

I.1.3.1 Structure

La structure et les fonctionnalités principales proposées dans les progiciels actuels, semblent directement liées à une décomposition hiérarchisée classique des structures décisionnelles et organisationnelles des systèmes de production que nous pouvons synthétiser dans la figure I.1 [ANTHONY 65].

Les **décisions stratégiques** sont relatives à la politique générale de l'entreprise (horizon : quelques années). Elles concernent par exemple :

- la politique budgétaire : plan d'investissement en moyens matériels, financiers ou humains,
- le choix de nouvelles orientations : introduction de produits nouveaux, de techniques récentes, etc.,
- la mise en oeuvre de campagnes publicitaires, etc.

Les **décisions tactiques** assurent la gestion du travail et des ressources de production dans le cadre délimité par les décisions stratégiques (horizon : quelques mois). Le carnet de commandes étant connu et la capacité des ressources de production ayant été fixée par le niveau supérieur, il s'agit de définir un plan de production et un plan d'utilisation des ressources disponibles.

Les **décisions opérationnelles** régissent en détail la fabrication proprement dite (horizon : quelques jours). Elles définissent par exemple l'ordonnancement des opérations de fabrication sur les ressources, l'affectation des équipes d'hommes, etc.

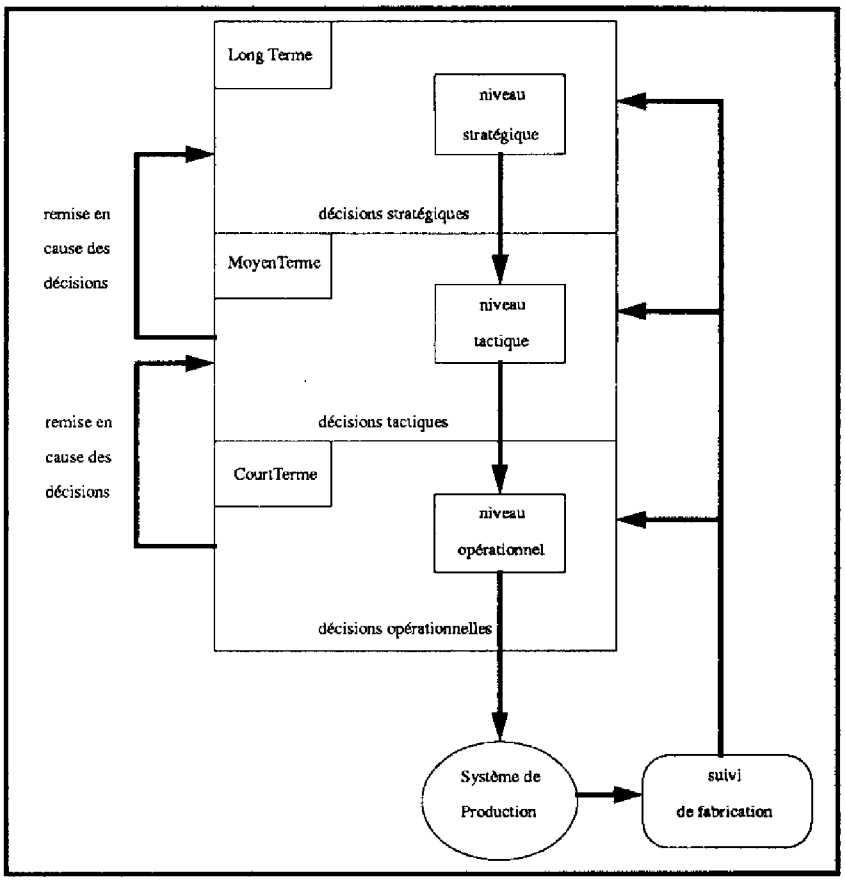


Figure I.1: Structure décisionnelle d'un système de production

Toute décision prise à un niveau donné constitue un objectif pour le niveau immédiatement inférieur de la structure. Le retour d'informations d'un niveau vers son niveau supérieur est nécessaire afin de permettre l'évaluation ou la remise en cause des décisions prises par celui-ci.

Cette structure décisionnelle reflète l'organisation hiérarchique de la plupart des entreprises. Les décisions stratégiques relèvent de la Direction Générale, les décisions tactiques sont en général du ressort des cadres, tandis que les décisions opérationnelles sont normalement prises par les agents de maîtrise dans les ateliers (chefs d'atelier ou de section, opérateurs, etc.).

Ces trois catégories de décisions diffèrent non seulement par les horizons sur lesquels elles portent et par le niveau de compétences des Décideurs concernés, mais également par le niveau de détail des informations requises pour la prise de décisions [GIARD 81]. En effet, pour les décisions stratégiques, on raisonne en général sur des familles de produits et en centaines d'heures de travail, tandis que pour les décisions tactiques et opérationnelles, on raisonne par produits (ou composants élémentaires d'un produit) et en heures ou minutes. Ainsi, les décisions sont successivement affi-

nées au fur et à mesure que l'on descend dans la structure.

Les progiciels actuels fournissent des aides destinées à ces différents niveaux de décisions, et services concernés. Ils assurent par ailleurs une certaine cohérence globale, à travers la gestion d'une base de données commune. Généralement, ils sont constitués d'un noyau central qui est un calcul des besoins reposant sur l'approche MRP présentée en I.1.2, autour duquel s'articulent différents modules, dont les principaux sont les suivants [LARSEN et ALTING 93] :

- **Module d'élaboration du Plan Industriel et Commercial**
  Pour le niveau stratégique des décisions, le Plan Industriel et Commercial peut être constitué par la Direction Générale de l'entreprise en relation avec sa politique générale et son plan d'investissements, par **simulations successives** d'un échéancier sur les ventes et les niveaux de stocks sur une période adaptée au type de fabrication considéré (de 1 à 2 ans, pouvant atteindre 5 ans).

- **Module d'élaboration du Programme Directeur de Production**
  En fonction du cadre délimité par la Plan Industriel et Commercial, et sur un horizon plus restreint, le Programme Directeur de Production est généralement élaboré par le service du Planning, et vise à déterminer dans le temps les quantités des produits à fabriquer et à approvisionner pour les semaines ou les mois à venir. C'est à ce niveau que le module central proposé dans les progiciels actuels constitue un Calcul des Besoins en produits finis, composants et matières premières, selon une approche du type MRP, aboutissant entre autre à divers plans tels que plans de ventes et d'achats, d'entrées et de sorties magasins pour les stocks, plans et courbes de charge, etc., utilisés lors des prises de décisions d'ordre tactique.

- **Module d'ordonnancement**
  L'ordonnancement est un plan plus détaillé, qui concerne les décisions opérationnelles, et qui vise à répartir dans le temps et sur les ressources la réalisation des opérations de fabrication en fonction des objectifs de quantités et de délais fixés au niveau du Programme Directeur de Production et de la disponibilité des ressources. Les outils proposés par les progiciels actuels sont le plus souvent des modules plus ou moins centralisés ou au contraire répartis, utilisant des techniques de **simulation**, élaborant des ordonnancements précis et détaillés à partir de règles heuristiques et utilisant ou non des techniques d'Intelligence Artificielle.

- **Aides au suivi de fabrication**
  Ces différentes aides sont relatives aux suivi des données techniques, commerciales, de stocks, de fabrication, de comptabilité, etc ... utilisant une base de données communes à l'entreprise. Elles tendent à indiquer, le plus fidèlement possible, les transformations permanentes du système de production en temps réel, de manière à propager ou répercuter les informations nécessaires à la fiabilité des différents modules précédents.

I.1.3.2 Utilisation effective des progiciels de GPAO actuels

Il existe aujourd'hui pléthore de progiciels de type MRP [MULKENS 93], applicables à toutes sortes de secteurs industriels [HAMICHI et KIEFFER 86]. Le travail présenté dans ce mémoire, est issu de recherches pluridisciplinaires menées conjointement par des psychologues du travail, et des automaticiens en gestion de production, et portant sur l'étude des **processus décisionnels effectifs** dans les systèmes de production utilisant des progiciels du type MRP.

Cette étude effectuée sur plusieurs sites [CELLIER et AL. 88], [VALAX et AL. 93], [CIAIS 89], aboutit au constat que de tels supports semblent relativement bien adaptés aux décisions stratégiques, tactiques, pour la gestion des données, etc, ..., mais s'avèrent plutôt facteurs de complexité supplémentaire pour les décisions d'ordre opérationnel, regroupées sous le terme de **décisions d'OTA** : **Organisation du Travail dans les Ateliers**, et comprenant entre autre les décisions de régulation de charge et d'ordonnancement.

Le "symptôme" de cette apparente inadéquation est la différence notable entre les plans issus des traitements informatiques et le travail effectivement réalisé. Le caractère prescripteur et détaillé de tels plans, qui sont le plus souvent issus d'ordonnancements précis des opérations de fabrication dans le temps et sur les ressources, laisse peu d'autonomie aux Décideurs confrontés à une réalité plus complexe que le modèle informatisé, et souvent fortement perturbée.

Par ailleurs, le manque d'interactivité et de flexibilité entre la présentation des informations relatives aux plans calculés (tableaux alphanumériques d'opérations ordonnées, datées et affectées) et les Décideurs introduit une charge mentale supplémentaire pour ces derniers qui, bien souvent, ne peuvent que s'écarter (plus ou moins clandestinement) des plans calculés pour parvenir à gérer les aléas et déterminants non modélisables et pourtant si nombreux de la conduite réelle de la production.

En d'autres termes, la nature, la structure et le format des informations proposées par les progiciels actuels au niveau opérationnel, se révèlent trop prescriptifs et incompatibles avec le raisonnement et les représentations mentales des Décideurs qui sont alors confrontés à un double besoin :

- un **besoin d'autonomie** locale, tout en maintenant une certaine **cohérence** des décisions vis-à-vis de l'environnement, ou du système global,
- un **besoin d'ergonomie**, ou de compatibilité des outils d'aide à la décision avec les représentations mentales des problèmes à résoudre, des décisions à prendre et de leurs effets sur l'environnement [TORRES et AL. 94].

L'approche proposée pour répondre au premier besoin d'autonomie et de cohérence est basée sur une décomposition des systèmes de production en structures réparties de **centres** distincts, dont les décisions sont transmises en aval en termes de **contraintes** à respecter, qui délimitent un cadre laissant certaines **marges** décisionnelles.

Les aspects ergonomiques sont envisagés, dans ce travail, à travers une démarche pluridisciplinaire de conception de modules logiciels et d'interfaces Homme-Machine associées fortement **graphiques** et **interactives**, prévoyant des étapes de validation ergonomique.

I.2 Besoin d'autonomie : réseau de centres de décision

L'approche utilisée dans ce travail pour répondre au besoin d'autonomie suppose une décomposition du système de production en centres de décisions autonomes et interconnectés.

I.2.1 Explicitation de l'autonomie locale

L'analyse des processus de prise de décisions dans les ateliers aboutissant au constat du besoin d'autonomie locale des Décideurs associée à une cohérence globale du système, confirme et valide l'approche des systèmes de production basée sur une décomposition en **réseaux de centres de décision** [ERSCHLER et THURIOT 92]. Une telle décomposition peut être évolutive et spécifique à chaque système, en fonction de plusieurs critères :

- les **critères physiques** différenciant par exemple des ateliers voisins, des sections, postes de charge, etc.,
- les **critères fonctionnels** distinguant les divers services du système : Direction Générale, services commercial, des achats, de la gestion de stocks, des méthodes, du Planning, de l'organisation du travail,
- les **critères temporels** particularisant les décisions selon les divers horizons concernés : calcul de besoins mensuel, lissage de charge hebdomadaire, ordonnancement quotidien, etc.

Une telle décomposition demeure compatible avec une approche hiérarchisée plus traditionnelle. Elle est cependant plus large, dans la mesure où elle peut correspondre à une structure plus éclatée du système de décisions, envisageant en outre des problèmes de coordination entre centres non obligatoirement soumis à une relation de hiérarchie. Ainsi, les relations entre centres sont du type **"amont-aval"** : un centre amont transmet ses décisions à son(ses) centre(s) aval, en termes de **contraintes** devant être respectées (voir figure I.2).

L'autonomie décisionnelle laissée à un centre, et nécessaire pour prendre en compte ce qui n'est pas gérable, modélisable, prévisible est alors plus explicite, et se traduit comme étant l'espace ou cadre des décisions admissibles délimité par le

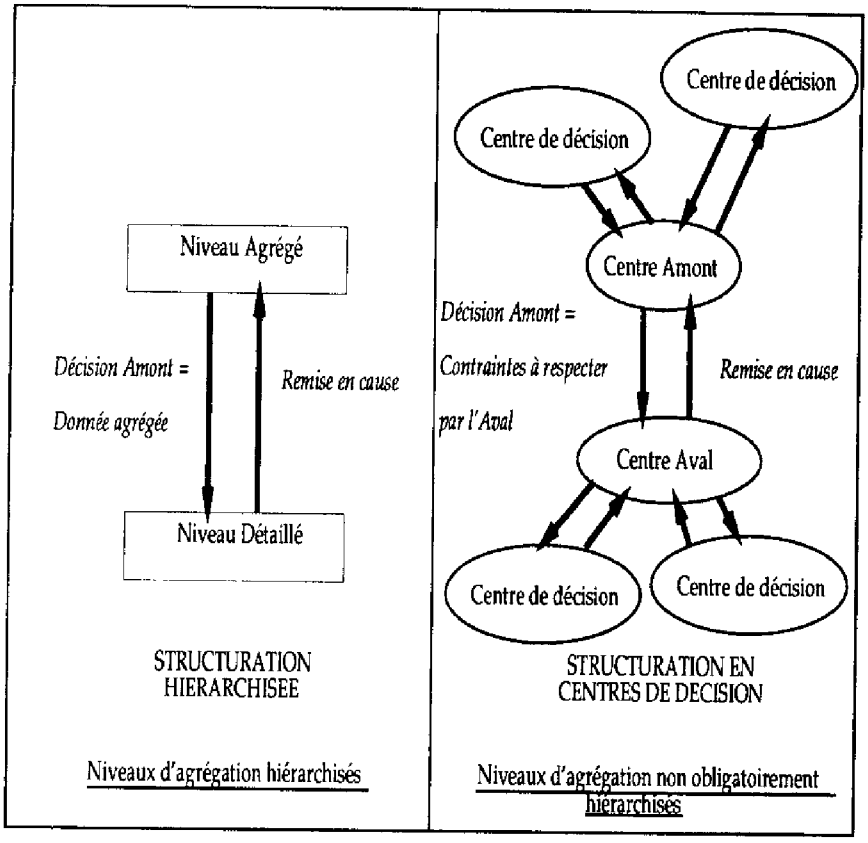


Figure I.2: L'approche hiérarchisée et la décomposition en centres de décision

jeu de contraintes qui pèsent sur le centre considéré, locales ou issues de son(ses) centres(s) amont (figure I.3). Le respect des contraintes assure alors une certaine **cohérence globale** du système de production, tout en permettant d'expliciter et d'exploiter l'autonomie réellement disponible localement.

Ainsi, des **processus de négociation de contraintes** peuvent être établis entre un centre concerné, son (ses) centre(s) en amont et son (ses) centre(s) en aval.

Plus précisément, si les décisions d'un centre donné doivent **respecter** les contraintes externes issues des décisions prises en amont et ses contraintes internes, elles doivent aussi générer pour l'aval :

- des contraintes non bloquantes : **faisabilité**, c'est-à-dire, qui laissent un espace d'autonomie non vide. En effet, toute décision amont devrait être **faisable** : si les contraintes qui en sont issues sont incompatibles entre elles ou vis-à-vis des autres contraintes pesant sur le centre aval, il y aura un blocage. Dans ce cas, des mécanismes de relaxation de contraintes susceptibles de remettre en cause les décisions de l'amont, s'avèrent nécessaires (voir figure I.3),

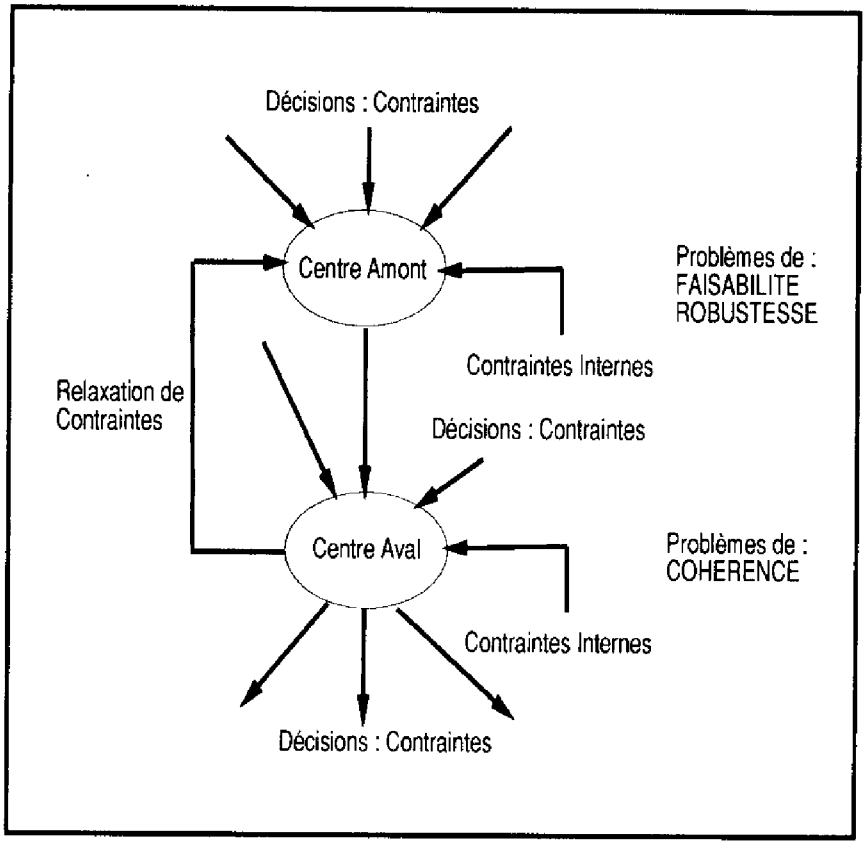


Figure I.3: Besoin de cohérence, de robustesse et de faisabilité des décisions

- et qui laissent à celui-ci un cadre décisionnel, ou espace d'autonomie acceptable : **robustesse**.

Ainsi, la **robustesse** d'une décision prise par un centre est liée à la **marge** d'autonomie laissée par les contraintes issues de cette décision et pesant sur les centres en aval.

Cohérence **vis-à-vis de l'amont** et faisabilité et robustesse **vis-à-vis de l'aval** sont des facettes d'un même processus de **coordination** entre centres de décision. La cohérence est d'autant plus facile à assurer que les décisions en amont sont robustes.

I.2.2 Fonctionnement simplifié d'un centre de décision

Le travail présenté dans ce mémoire, s'appuie sur une schématisation simplifiée du modèle de fonctionnement général d'un centre de décision [HUGUET et AL. 94]. Nous en proposons ici une brève description (figure I.4) :

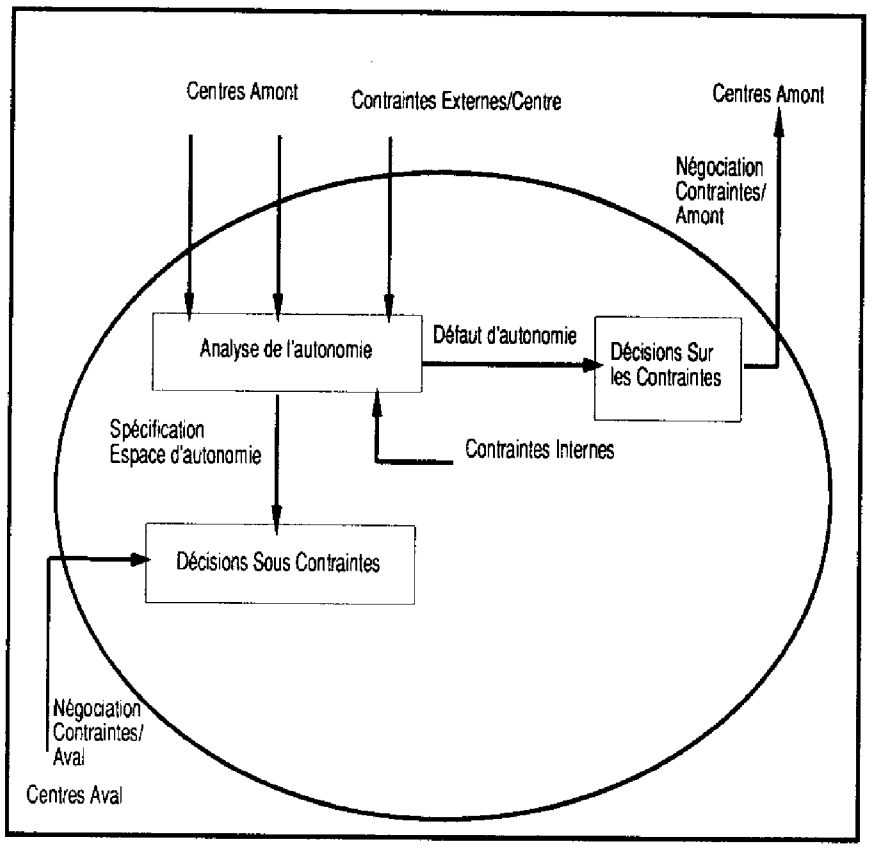


Figure I.4: Modèle de fonctionnement d'un centre de décision

Une phase d'analyse de l'autonomie :
Permet d'expliciter le cadre décisionnel pour le centre considéré, c'est-à-dire les marges de manoeuvre dont il dispose, compte tenu de ses contraintes externes et internes.

Cette phase peut révéler un **blocage** ou un **défaut d'autonomie** : dans ce cas, un processus de **Décisions sur les Contraintes**, faisant intervenir des négociations avec l'amont, et visant à relaxer certaines contraintes doit être déclenché pour lever le blocage, ou augmenter l'autonomie insuffisante.

Une phase de prise de Décisions sous contraintes :
Si l'autonomie explicitée est (ou a été rendue) pertinente, cette phase permet la prise effective des décisions à l'aide de mécanismes facilitant le choix entre plusieurs stratégies décisionnelles et qui, éventuellement, prennent en compte des conditions de faisabilité et de robustesse vis-à-vis de l'aval.

I.3 Besoin d'Ergonomie : interfaces graphiques Homme-Machine

I.3.1 Ergonomie des Interfaces Homme-Machine (IHM)

Le besoin d'ergonomie est abordé dans ce travail à travers l'élaboration de modules logiciels fortement interactifs privilégiant l'idée que les Hommes, en tant que Décideurs, demeurent un facteur indispensable au bon fonctionnement des systèmes de production. Dans cette perspective, et conformément au besoin d'autonomie, ceux-ci nécessitent à tous les niveaux d'outils leur permettant de :

- faciliter leurs raisonnements à partir desquels ils vont prendre les décisions,
- être informés sur les marges de manoeuvre dont ils disposent vis-à-vis d'une situation particulière afin de pouvoir les exploiter au mieux.

Décideur et système informatique sont abordés comme étant deux **systèmes de traitement de l'information** différents [VALAX 86], dont les caractéristiques et spécificités propres doivent être mises en rapport à l'aide de supports de communication que sont les Interfaces Utilisateur, encore communément appelées Interfaces Homme-Machine : IHM. Ainsi, l'interface doit rendre compatibles ou tout au moins minimiser l'incompatibilité, les sources de conflits et les difficultés entre :

- le traitement cognitif basé sur la logique d'utilisation de l'Homme, et
- le traitement symbolique de l'information effectué par la Machine et associé à la logique de fonctionnement de celle-ci.

Par ailleurs, l'outil informatique est ici conçu comme une Aide à la Décision facilitant celle-ci, mais sans s'y substituer.

Conformément au modèle élémentaire présenté dans la figure suivante [MEINADIER 91], l'interface Homme-Machine peut être décomposée en deux niveaux :

- Le niveau de l'**interface conceptuelle**,
  Concerne les différents modèles sous-jacents :
  1. Celui du Concepteur : modèle(s) mathématique(s) issu(s) de la représentation mentale que se fait le Concepteur des problèmes à résoudre, et des décisions à prendre par le futur Utilisateur.
  2. Celui de l'Utilisateur : sa représentation mentale des problèmes à résoudre, des décisions à prendre, des comportements du système informatique, et de son propre comportement opératoire.

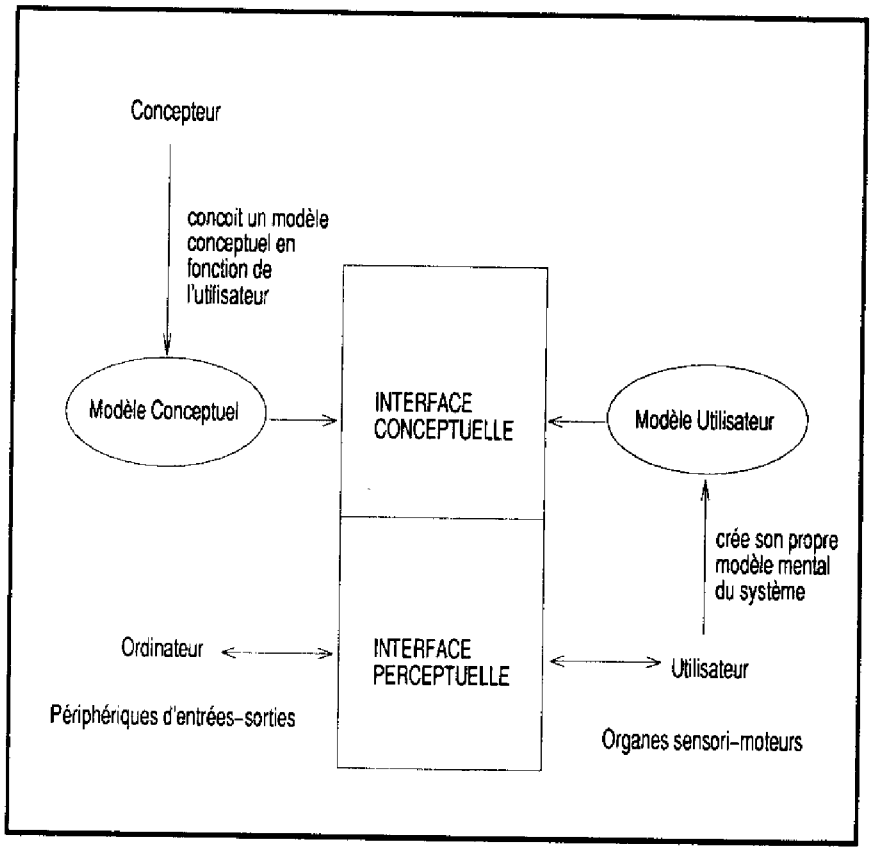


Figure I.5: Modèle d'Interface Utilisateur [MEINADIER 91]

- Le niveau de l'**interface perceptuelle**,
  appelé aussi **interface de surface**, met en relation les périphériques d'entrées-sorties de l'ordinateur et les organes sensori-moteurs de l'homme. Ce niveau est composé de tout ce que ce dernier perçoit du système par ses sens et de ses moyens d'action.

I.3.2 Niveau Conceptuel

En tant que concepteurs des IHM présentées dans ce travail, et conformément au besoin d'autonomie de leurs potentiels Utilisateurs, nos modèles sont basés sur les marges (de temps, de charges, de ressources, d'affectation) et leurs bornes (valeurs minimales et maximales de dates, de charges, de capacités et/ou nombre d'exemplaires ressources, ...).

Les modèles mathématiques présentés plus en détail dans les chapitres suivants, concernent essentiellement les mécanismes de consommation des marges de charges et de propagations conséquentes sur leurs bornes, ainsi que ceux de consommation de

marges de temps et/ou d'affectation, et de propagations et déductions conséquentes sur leurs bornes.

I.3.3 Sur le plan perceptuel

Il s'agissait, à ce niveau, de proposer une représentation des marges et de leurs bornes, ainsi que la possibilité de les manipuler, les plus adaptées possible au modèle de l'Utilisateur.

Notre choix repose sur une représentation graphique, fondée sur le concept des métaphores :

1. la métaphore des **vases communicants**, pour les marge de charge, et leurs mécanismes de transferts ou glissements.

2. la métaphore du **tableau de Gantt** pour les marges de temps, et d'affectation des opérations aux exemplaires de ressources, et leurs mécanismes de propagations et déductions.

I.3.4 Pluridisciplinarité : étapes de validation

La compatibilité entre IHM et le modèle, ou représentation mentale et besoins de l'Utilisateur, ne peut être testée qu'au moyen d'une observation rigoureuse de l'utilisation effective des prototypes, dans la mesure où seule cette dernière peut être observable [GUILLEVIC 91] :

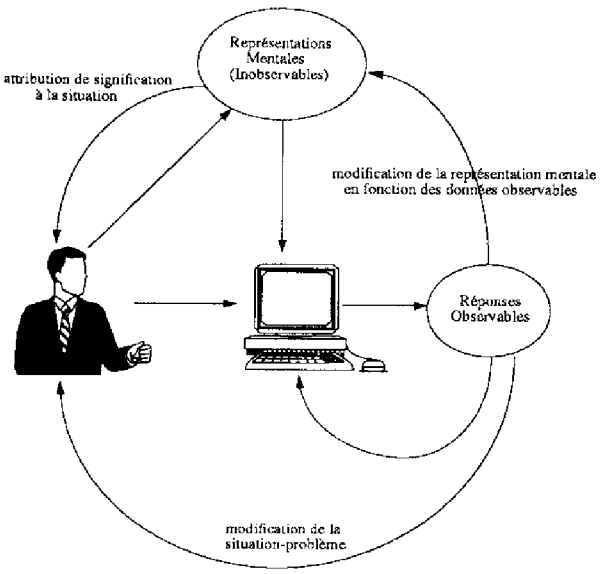


Figure I.6: Modèle de comportement de l'Utilisateur dans une interface graphique

Ceci justifie notre démarche pluridisciplinaire, menée avec une équipe de recherche en Psychologie du Travail, se chargeant des diverses étapes de validations ergonomiques, et aboutissant :

1. Au niveau conceptuel, à confirmer la compatibilité des concepts de marges, et leurs mécanismes associés, avec les représentations mentales des Utilisateurs.

2. Au niveau perceptuel, à valider et améliorer les représentations graphiques et manipulations associées.

I.3.5 Stratégies Décisionnelles

Nous proposons dans notre démarche de conception d'IHM, une classification de trois types de stratégies décisionnelles, délimitant de manière générique les tâches entre l'Homme et la Machine :

- **Les Stratégies Homme**,
  selon lesquelles l'Utilisateur conserve toute l'initiative décisionnelle. Il élabore lui-même sa solution à un problème donné, utilisant et exploitant à "sa guise" les manipulations offertes par l'interface. La Machine calcule et l'informe à chaque instant de ses marges de manoeuvre, des conséquences de ses choix et éventuelles décisions.

- **Les Stratégies Machine**,
  selon lesquelles la solution est calculée automatiquement par méthodes d'optimisations ou heuristiques. L'Utilisateur ne peut que consulter les décisions "Machine", influençant celles-ci par l'entrée éventuelle de paramètres initiaux.

- **Les Stratégies Hybrides Homme-Machine**,
  consistant pour l'Utilisateur à se référer à une solution "Machine", en la modifiant manuellement par l'exploitation des manipulations offertes par l'interface, conformément aux Stratégies Hommes présentées ci-dessus.

Bibliographie

[ANTHONY 65] **R.N. ANTHONY**
"Planning and Control Systems : A Framework for Analysis". Harvard University Press. Cambridge, Mass. 1965.

[CELLIER et AL. 88] **J.M. CELLIER, M.F. VALAX, J. ERSCHLER, C.THURIOT**
"Une analyse des fonctions planification-ordonnancement de la division mécanique de l'A.T.S.". Rapport interne. 1988.

[CIAIS 89] **B. CIAIS**
"Planification des données temporelles : Etude des plans et de leur utilisation dans la fonction ordonnancement d'un système de production". Mémoire de Maîtrise. Université Toulouse Le Mirail. 1989.

[COURTOIS et AL. 92] **A. COURTOIS, M. PILLET, C. MARTIN**
"Gestion de Production". Les Editions d'Organisation. 1992.

[DE TERSSAC et REYNAUD 92] **G. DE TERSSAC, J.D. REYNAUD**
"L'Organisation du Travail et Les Régulations Sociales", dans *"Les Nouvelles Rationalisations de la Production"*. Editions Cépaduès. 1992.

[DE TERSSAC 90] **G. DE TERSSAC**
Autonomie et Régulation dans le travail. 1990

[ERSCHLER et THURIOT 92] **J.ERSCHLER, C.THURIOT**
"Approche par Contraintes pour l'Aide aux décisions d'ordonnancement" dans *"Les Nouvelles Rationalisations de la Production"*. Editions Cépaduès. 1992.

[GIARD 81] **V. GIARD**
"Gestion de la Production". 1981.

[GOLDRATT et COX 86] **M. GOLDRATT, J. COX**
"Le but, l'Excellence en Production". Afnor Gestion. 1986.

[GUILLEVIC 91] **C. GUILLEVIC**
"Psychologie du Travail". Editions Nathan. 1991.

[GUPTA et GHOST 88] **T. GUPTA, B. GHOSH**
"A Survey of Expert Systems in Manufacturing and Process Planning". Computer in Industry 11. (1988) 195-204.

[HAMICHI et KIEFFER 86] **S. HAMICHI, J.P. KIEFFER**
"Les progiciels de la Gestion de Production". Ed. de l'Usine Nouvelle. 1986.

[HUGUET et AL. 94] **M.J. HUGUET, G. DE TERSSAC, J. ERSCHLER**
"Autonomie et Cohérence dans un réseau de centres de décision : Contraintes et Négociations" dans *Actes des Journées de Rochebrune "Autonomie et Interactions Fonctionnelles"*. Janvier 1994.

[INDUSTRIES ET TECHNIQUES 92] **INDUSTRIES ET TECHNIQUES**
"Guide d'Achat : Logiciels de Gestion des Flux de Production". Juin 1992.

[KING et FISCHER 89] **C.U. KING, E.L. FISCHER**
"BARBS : integrating simulation, optimization and knowledge-based techniques to identify and eliminate production bottlenecks". Int. J. Computer Integrated Manufacturing 2 (6). 1989. 317-328.

[KUSIAK et CHEN 87] **A. KUSIAK, M. CHEN**
"Expert systems for planning and scheduling manufacturing systems". Europ. J. Op. Res. 34. 1987. 113-130.

[LARSEN et ALTING 93] **N.E. LARSEN, L. ALTING**
"Criteria for selecting a production control philosophy". Production Planning and Control. 1993. Vol 4. No. 1. 54-68.

[MARTEL 93] **J. MARTEL**
"Le pilotage des flux". Revue française de Gestion Industrielle. No. 4. 1993.

[MEINADIER 91] **J.P. MEINADIER**
"L'Interface Utilisateur". Dunod 1991.

[MERCE 87] **C. MERCE**
"Cohérence des décisions en planification hiérarchisée". Thèse de doctorat d'état. Université Paul Sabatier. Toulouse 1987.

[MULKENS 93] **H. MULKENS**
"Les nouvelles organisations productives". Revue française de Gestion Industrielle. No. 3. 1993.

[MUSTAFA 89] **M.A. MUSTAFA**
"An integrated hierarchical programming approach for industrial planning". Computers and Industrial Eng. 16 (4). 1989.

[NYEN 88] **P.A. NYEN**
"OPT-rules in discrete events simulation models. An algorithm for scheduling based on critical source identification". Proc. of 4th Int. Conf. Simulation in Manufacturing. 1988. 21-32.

[ORLICKY 75] **J. ORLICKY**
"Material Requirements Planning". 1975.

[PLOSZAJSKI et AL. 93] **G. PLOSZAJSKI, M.G. SINGH, K.S. HINDI**
"An Overview of some computer-aided production management issues". Information and Decision Technologies 18. (1993) 405-413.

[PIRTTEM 88] **Programme PIRTTEM CNRS pour la année 1988**
"Planification et Contrôle de l'exécution des activités dans les systèmes de production".

[SCIENCES HUMAINES] **SCIENCES HUMAINES**
"L'Enigme de la décision". No. 2. Mai-Juin 1993.

[SHINGO 83] **S. SHINGO**
"Maîtrise de la Production et Méthode Kanban". Editions d'Organisation. 1983.

[SPALANZANI 93] **A. SPALANZANI**
"Précis de Gestion Industrielle et Production". Presses Universitaires de Grenoble. 1993.

[THURIOT et LOMPRE 93] **C. THURIOT, N. LOMPRE**
"Coopération entre automaticiens et Ergonomes dans la Conception de MARGE : Module d'Aide à la Régulation de charge, Graphique et Ergonomique " dans *"Ergonomie des Interfaces Homme-Machine "*. Rapport LAAS No. 93370. 1993.

[THURIOT et AL. 92] **C. THURIOT, F. TORRES, N. LOMPRE**
"MARGE : Module d'Aide à la Régulation de charge, Graphique et Ergonomique ". Journée des Affiliés du LAAS-CNRS. Juin 92.

[TORRES et AL. 94] **F. TORRES, C. THURIOT, M.F. VALAX**
"Conception et Validation d'une Interface d'Aide aux décisions hybrides d'Atelier". ERGO-IA. Biarritz. 1994.

[VALAX 86] **M.F. VALAX**
"Cadre temporel et planification des tâches quotidiennes". Thèse de Doctorat Psychologie du travail. Université Toulouse Le Mirail. 1986.

[VALAX et CELLIER 92] **M.F. VALAX, J. CELLIER**
"Aides à l'Organisation du Travail dans les Ateliers : problèmes du décalage entre prévision et réalisation", dans *"Les Nouvelles Rationalisations de la Production"*. Editions Cépaduès. 1992.

[VALAX et AL. 93] **M.F. VALAX, C. THURIOT, E. TREMBLAY, F. TORRES**
"Niveaux de planification dans une interface d'Aide Logicielle à l'Organisation de Travail dans les Ateliers", dans *Actes du Colloque de prospective Recherches pour l'Ergonomie*, Université de Toulouse- Le Mirail. Novembre 1993.

Chapitre II

Régulation Agrégée de la Charge

II.1 Introduction

Ce travail concerne certaines décisions opérationnelles, prises au niveau de l'atelier, et en aval du niveau tactique du Programme Directeur de la Production, élaboré en général par le service du Planning. Elles concernent le chef d'atelier, les chefs de sections ou d'équipes dans certains cas, et visent à réguler, ou répartir le travail dans le temps et sur les ressources en fonction des contraintes de production issues de l'amont, et d'autres contraintes, souvent plus locales, sur les ressources. Lorsque les opérations sont nombreuses, diversifiées, contraintes par des dates, et que les ressources sont disponibles en quantités limitées ou soumises à des contraintes de rentabilité, il devient nécessaire d'organiser le travail, c'est-à-dire distribuer les opérations dans le temps et les affecter aux ressources. Pour une affectation aux ressources donnée, la distribution temporelle est généralement abordée à travers une problématique d'ordonnancement qui consiste à élaborer un ordre et un calendrier pour les opérations.

Pour les problèmes de grande taille (quelques dizaines à quelques centaines d'opérations), il est difficile ou coûteux de raisonner directement sur les opérations. Il s'avère nécessaire de passer par une étape intermédiaire, faisant intervenir des raisonnements et décisions sur un concept plus agrégé que celui d'opération, et représentant la somme de travail requise pour la réalisation d'un ensemble d'opérations : il s'agit du concept de charge.

Traditionnellement, la comparaison entre courbe de charge au plus tôt (obtenue en calant les opérations à leurs dates de début au plus tôt) et courbe de charge au plus tard, fait apparaître la flexibilité associée aux marges temporelles des opérations.

La gestion de cette flexibilité demeure toutefois difficile : le lissage de la charge se fait généralement intuitivement, en repoussant ou en avançant des opérations dans le temps, compte tenu du profil plus ou moins incurvé des courbes. Le Décideur est alors soumis à une contradiction inconfortable : pour lui éviter de raisonner directement sur un ensemble trop complexe d'opérations, des actions "plus agrégées" sur la charge lui sont proposées. Mais elles passent nécessairement par des raisonnements "plus

détaillés" sur les opérations, faute de connaissances suffisantes sur les mécanismes et raisonnements portant sur la charge.

Par ailleurs, nous avons déjà mentionné dans le chapitre I de ce mémoire que les études menées dans plusieurs entreprises sur l'utilisation effective des progiciels de gestion de production ont dénoté un décalage entre les différents plans calculés par les logiciels (plans de charge, ordonnancement, etc) ou tâches prescrites, et l'organisation effective du travail dans les ateliers, ou réalisation des tâches effectives.

L'analyse des sources d'un tel décalage, tend vers le constat d'une réduction, pour l'atelier, à un rôle d'exécutant des plans élaborés par des tels progiciels.

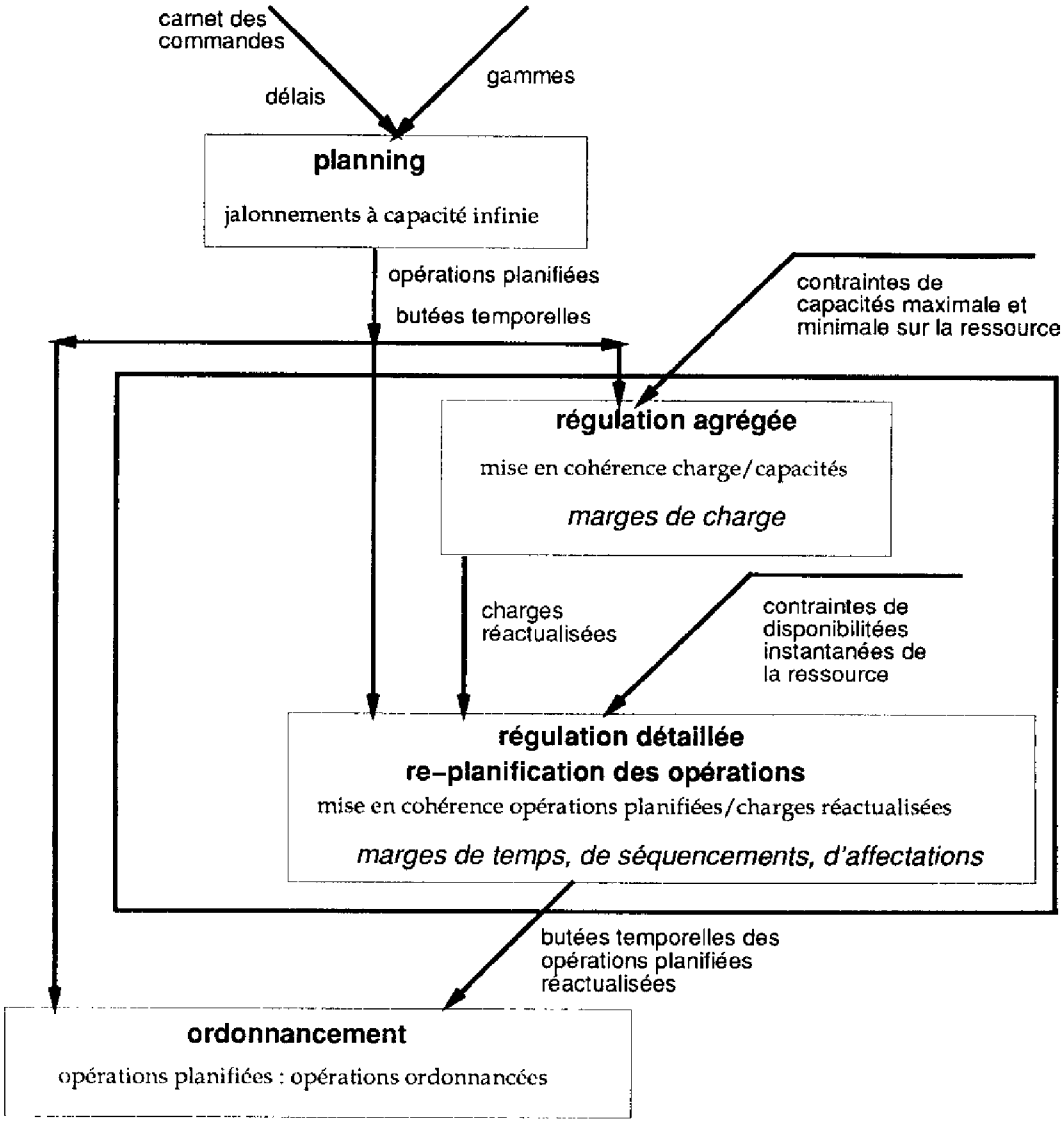
L'approche développée ici, consiste à concevoir des supports d'aide à la décision de façon à permettre à l'atelier d'être un réalisateur, et un régulateur de ses propres plans, lui conférant un rôle décisionnel formel, que dans la réalité actuelle il est amené à se réapproprier de manière plus ou moins clandestine, compte tenu des aléas, et autres déterminants peu ou non modélisables, et mal ou non gérés par l'informatique.

L'approche proposée nécessite donc d'étudier les différents concepts liés à la flexibilité ou autonomie décisionnelle. Dans cette perspective, une réflexion a été menée, portant sur les divers types de marges disponibles au niveau de l'atelier pour prendre une décision, compte tenu de contraintes à respecter, issues des décisions prises en amont.

Concernant plus précisément les décisions de régulation ou lissage de charge, sur une ressource agrégée donnée, du type équipe d'opérateurs, ou pool de machines identiques, nous proposons ici de nouvelles courbes de charge : elles présentent plus explicitement les marges ou variabilités de charge, issues des marges de temps des opérations, et les mécanismes de propagations ou glissements temporels de la charge, sans faire nécessairement intervenir en amont de raisonnement plus détaillé.

II.2 Centres de Décision Concernés

Conformément à l'approche par centres de décision décrite en I.2, nous nous sommes intéressés au Centre de Régulation de Charge, et avons considéré, en amont, le centre du Planning et en aval, le centre d'ordonnancement.



Le Planning prend des décisions détaillées sur les opérations. Il élabore un Plan d'Opérations initial généralement basé sur un calcul du type M.R.P., déterminant un ensemble de produits à fabriquer, contraints par des **délais** et des dates de lancement, généralement convenus avec le service commercial. Dans ce Plan d'Opérations initial, chaque opération est contrainte par des dates de début au plus tôt et de fin au plus tard calculées lors de jalonnements au plus tôt et au plus tard des gammes de fabrication, à capacité infinie, c'est-à-dire sans prendre en compte les contraintes de ressources.

Par cumuls, ou agrégations réalisées à partir du Plan d'Opérations initial, des plans, ou courbes de charges sont transmis au Centre de Régulation qui a alors pour but de modifier ou réactualiser ces derniers, de manière à respecter les contraintes

de ressources.

De telles contraintes sont généralement structurées en deux niveaux d'agrégation différents :

- Au niveau agrégé, il s'agit des contraintes de capacités :
  - capacité maximale, ou disponibilité globale des ressources sur une période de temps donnée.
  - capacité minimale, que nous appelons aussi rentabilité, exprimant une éventuelle utilisation ou occupation minimale des ressources sur une période donnée.
- Au niveau détaillé, ce sont des contraintes de disponibilité instantanée, fonction du nombre d'items ou exemplaires (opérateurs, machines) disponibles, de leurs plages de fonctionnement, etc, ...

Une telle distinction nous a amenés à une décomposition du Centre de Régulation, en deux niveaux ou sous-centres :

- Le sous-centre de régulation agrégée,
  au sein duquel les décisions consistent à mettre en cohérence les plans de charge avec les capacités agrégées des ressources.

  De telles décisions nécessitent une décomposition temporelle de l'horizon de planification, en intervalles successifs. La réactualisation des plans de charges pour chaque ressource agrégée, va consister à modifier des niveaux de charges sur certains intervalles, en prenant en compte des mécanismes automatiques de glissements de charges sur leurs intervalles voisins.

  A ce niveau, les décisions exploitent les Marges de Charge disponibles. Les plans de charge réactualisés constituent alors les contraintes agrégées, ou objectifs à poursuivre par :

- Le sous-centre de régulation détaillée, encore appelé Centre de re-planification des opérations,
  au sein duquel les décisions consistent à modifier certaines dates de début au plus tôt ou fin au plus tard pour les opérations, de façon à ce que le Plan d'Opérations ainsi réactualisé corresponde effectivement au Plan de Charge précédemment modifié.

  A ce niveau, certaines contraintes détaillées sur la ressource peuvent être prises en compte, même s'il ne s'agit pas encore obligatoirement d'un ordonnancement précis.

  Lors de ce processus décisionnel, ce sont les Marges de temps attribuées aux opérations par le Planning qui sont utilisées, et, éventuellement, les marges de séquencements et d'affectations dans le cas de prise en compte des contraintes détaillées de ressource.

II.3 Position du problème de régulation de la charge sur une ressource agrégée

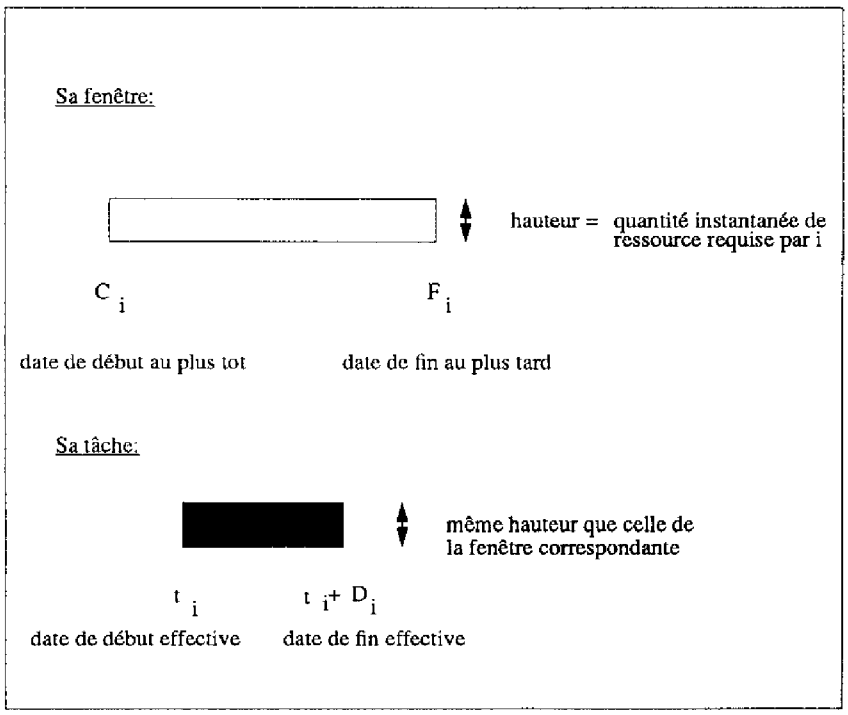
II.3.1 Contraintes initiales

II.3.1.1 Données détaillées sur les opérations

Conformément aux décisions prises par le Planning, les contraintes, ou données initiales pour les décisions de régulation consistent en un ensemble d'opérations de durées connues et contraintes respectivement par des dates de début au plus tôt, et des dates de fin au plus tard.

La réalisation d'une opération nécessite à chaque instant une quantité de ressource précise (par exemple 1 exemplaire machine). Par mesure de simplification, nous supposerons que cette quantité est constante dans le temps et égale à 1 unité.ressource pour toutes les opérations. La généralisation à des fonctions constantes dans le temps ne poserait pas de problème particulier, mais une telle hypothèse facilite la représentation graphique, les notations et équations présentées dans ce mémoire.

Graphiquement, deux "blocs", ou rectangles sont associés à chaque opération i planifiée :



D_i est la durée de réalisation de l'opération i : elle est spécifiée par le service des méthodes, qui élabore les gammes de fabrication.

C_i et F_i sont considérées comme des contraintes à respecter. C_i est la date de début au plus tôt et F_i est la date de fin au plus tard.

La surface de la tâche (surface noire) est égale au produit de la durée de l'opération par la quantité instantanée de ressource requise pour sa réalisation. Ce concept, assimilable à une énergie [LOPEZ 91], représente la charge de travail induite par l'opération i, et est exprimée en unités du type temps.ressource (par exemple en heures.machine).

La date de début effective t_i de la réalisation de l'opération, constitue une inconnue pour le problème de l'ordonnancement. La marge de temps allouée à l'opération i est représentée par l'intervalle admissible pour t_i, c'est-à-dire $[C_i, F_i - D_i]$: t_i peut varier entre les deux bornes de cet intervalle.

Comme les décisions de régulation (agrégées et détaillées), sont prises en amont des décisions d'ordonnancement, la possibilité de mener des raisonnements au cours desquels on positionne de différentes manières la tâche à l'intérieur de la fenêtre correspondante, représente en réalité le glissement temporel admissible de la charge induite par l'opération i :

C_i F_i

II.3.1.2 Données agrégées sur la ressource

Lors des décisions de lissage de charge, les contraintes de ressource prises en compte sont des grandeurs du type énergie, exprimant en unités temps.ressource, les quantités de travail fournies sur des intervalles de temps, par le fonctionnement de la ressource considérée. Ces contraintes sont :

- La quantité de travail maximale, ou disponible, appelée capacité maximale. Elle est notée Q.
- La quantité de travail minimale, ou devant être utilisée, appelée capacité minimale. Elle est notée R, et peut correspondre, par exemple, à un objectif de rentabilité pour la ressource considérée.

Ces deux quantités sont souvent associés à des quantités instantanées, ou niveaux moyens instantanés de la ressource, du type intensité. Lorsque par exemple la ressource est constituée de plusieurs machines de même fonctionnalité, appelées "exemplaires machines", ces caractéristiques instantanées moyennes sont obtenues

à partir de considérations portant sur le nombre d'exemplaires effectivement utilisés, leurs durées respectives de fonctionnement, éventuellement pondérées de coefficients d'utilisation qui prennent en compte, de manière prévisionnelle, les pauses, les pannes de courte durée,...

Ainsi, les quantités ou énergies de travail Q et R sont les intégrations temporelles des intensités moyennes de la ressource considérée. Généralement, ces intensités moyennes sont constantes par morceaux ; les dates de changement correspondent par exemple à des dates prévisionnelles d'arrêt ou d'ajout d'exemplaires dans la ressource.

Les courbes de ressource traditionnelles, utilisées lors des décisions de lissage, sont donc de la forme suivante :

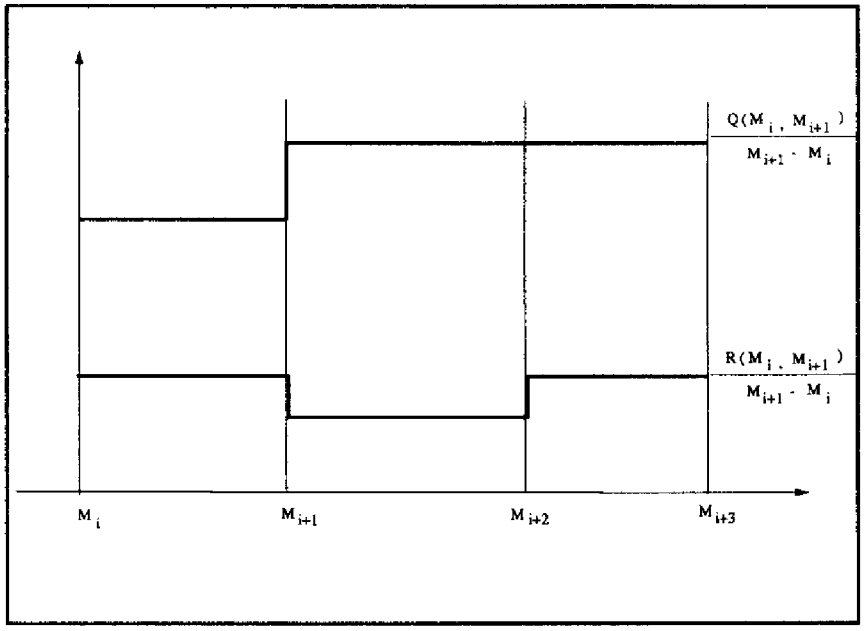


Figure II.1: Courbes de ressource traditionnelles

Où :

- M_i est une date de changement d'au moins l'une des capacités de ressource.
- $Q(M_i, M_{i+1})$ est la quantité de travail maximale disponible entre les deux dates de changement M_i etM_{i+1}.

- $R(M_i, M_{i+1})$ est la quantité de travail minimale à utiliser entre M_i et M_{i+1}.

Par exemple, si l'on suppose que la ressource est constituée de deux machines identiques, l'une fonctionnant à 100% et l'autre à 50% de 8h à 16h, le niveau moyen d'intensité de ressource est égal à 1,5 machines (par heure) entre ces deux dates. La quantité de travail maximale, ou capacité maximale entre 8h et 16h, est donc égale à (16-8).1,5 = 12 heures.machine.

Toutes ces caractéristiques de ressource sont considérées comme des contraintes à respecter. Elles proviennent évidement des décisions stratégiques d'investissements en ressources, et sont généralement affinées, au niveau local de l'atelier, qui bien souvent ajuste les plages d'ouvertures, coefficients divers, ..., au fil du temps, en fonction des suivis historiques. C'est pourquoi on peut considérer qu'il s'agit de contraintes locales à l'atelier.

Le concept de charge abordé précédemment est homogène aux contraintes de ressource Q et R : la charge est une quantité de travail requise pour la réalisation des opérations, la capacité maximale est une quantité de travail maximale fournie par la ressource, la capacité minimale est une quantité de travail minimale devant être utilisée de la même ressource.

Mais une agrégation, sur l'ensemble des opérations, de la charge requise pour leur réalisation est nécessaire pour prendre des décisions de régulation ou lissage.

II.3.2 Approches actuelles de la notion de charge

Outre les approches traditionnelles utilisant les courbes de charge au plus tôt et au plus tard calculées à capacités infinies des ressources, et commentées en II.1, le concept de charge de travail a été utilisé par certains auteurs dans des contextes très particuliers ; parmis ces plus récentes approches, nous pouvons citer :

II.3.2.1 Travaux de Bechte

Bechte [BECHTE 88], [BECHTE 94], présente une technique de contrôle de la fabrication dans un atelier du type job-shop. Le principe fondamental de cette approche repose sur le contrôle du lancement des ordres de fabrication en fonction de leur charge induite, dans le but d'obtenir une régulation des flots assurant un fonctionnement optimal des ressources, ou postes, tout en réalisant les ordres le plus vite possible de manière à les livrer à temps.

Les flots d'entrées, de sorties, en amont et en aval des postes, et les stocks sont évalués et contrôlés dynamiquement.

A chaque poste correspond un diagramme de charges en fonction du temps, utilisé pour le contrôle du lancement, et constitué de deux courbes représentant, en quantités de charge (heures de travail), et pour chaque journée, respectivement l'entrée et la sortie du poste considéré.

La régulation est basée sur l'évaluation d'un temps de fabrication moyen, calculé à partir d'un ordonnancement au plus tard.

On se heurte alors aux mêmes difficultés liées à la nécessité de passer par des considérations et calculs fortement combinatoires et prématurés au niveau détaillé des opérations. De plus, dans cette approche, le choix repose sur un seul ordonnancement. Cela rend impossible l'exploitation de la marge de manoeuvre effectivement disponible provenant du fait que, pour une situation donnée, il existe la plupart du temps plusieurs ordonnancements admissibles (et pas seulement celui au plus tard). L'approche s'avère plus adaptée aux cas de fabrications très régulières pour lesquelles les flots et les cycles moyens de fabrication sont peu perturbés.

II.3.2.2 Travaux de Bertrand

Dans une autre perspective, Bertrand [BERTRAND 81], [BERTRAND 83], s'intéresse au problème d'évaluation des dates de livraison des ordres de fabrication en fonction de leurs charges induites dans des ateliers du type job-shop. Ici, le principe fondamental repose sur une procédure itérative portant sur une ressource agrégée donnée, et consistant à déterminer, pour chaque opération de fabrication, une date de début cohérente avec la marge de capacité résiduelle, non utilisée par les opérations déjà placées dans le temps.

Un tel principe repose effectivement sur des comparaisons agrégées entre charges (cumuls faits sur les opérations positionnées à chaque étape), et capacités, faisant intervenir les concepts de :

- marges agrégées : ici, marges de capacités de ressources, et
- limites de charge : ici, les capacités des ressources.

L'approche est basée sur le positionnement de chaque ordre de fabrication sur un horizon de planification qui est découpé en intervalles figés, de durées égales ; à chaque étape, les décisions de "positionnement" des opérations sont figées et le Décideur ne peut pas revenir sur les décisions prises. On perd alors la possibilité d'exploiter toute l'autonomie effectivement disponible.

II.3.3 Nouvelle approche de la notion de charge

Nous considérons donc les décisions de régulation de la charge sur une ressource agrégée consistant par exemple en un ensemble de machines, ou exemplaires, de fonctionnalité identique, ou bien une équipe d'opérateurs.

Chaque régulation locale à une ressource donnée, devra tenir compte des mécanismes de propagation, ainsi que des exigences de coordination avec les décision de régulation portant sur les autres ressources agrégées de l'atelier, constituant autant de centres de décisions de régulation de charges, conformément à l'approche présentée en I.2.

Mais le travail présenté dans ce mémoire, ne porte que sur des considérations locales, c'est-à-dire sur une seule ressource agrégée.

Graphiquement, les données initiales présentées en II.3.1.1, peuvent être représentées de la manière suivante :

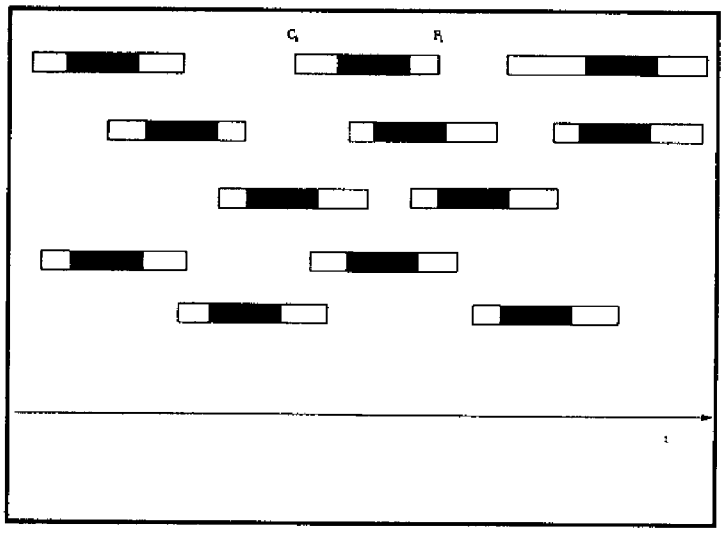


Figure II.2: Répartition temporelle des opérations

Il est clair, d'après cette figure, que si les opérations sont nombreuses et diversifiées, et si de plus leur répartition temporelle est irrégulière, la complexité du problème devient rapidement impossible à supporter par le raisonnement humain, et bien souvent aussi par l'ordinateur.

Par ailleurs, ces décisions ont généralement pour objectif de réaliser la compatibilité entre les charges de travail et les caractéristiques ou contraintes de ressource présentées dans le paragraphe précédent. Il y a donc discordance entre les niveaux d'agrégations associés aux opérations d'une part, et à la ressource d'autre part.

L'approche présentée ici tend à répondre à ces deux types de difficultés, ou besoins. Elle propose une étape d'agrégation, consistant à effectuer des cumuls de charges sur des sous-ensembles d'opérations voisines dans le temps. Les marges de temps allouées, détaillées, vont être traduites en marges de charges plus agrégées.

Le regroupement d'opérations voisines dans le temps est réalisé par l'intermédiaire d'une décomposition de l'horizon de planification en intervalles temporels adjacents, sur lesquels sont effectués les cumuls de charges induites par les opérations qu'ils "rencontrent" [ALLEN 81], [ALLEN 83].

II.4 Décomposition temporelle pour la régulation de la charge

II.4.1 Repères

Le fait d'introduire, sur la figure précédente, une droite verticale d'abscisse T, permet de percevoir les proximités, ou positionnements temporels relatifs des opérations : par rapport à la date T d'une part, et les unes par rapport aux autres d'autre part. En effet, d'une manière un peu simpliste, on peut distinguer les premières fenêtres qui rencontrent T, les secondes qui rencontrent au moins l'une des premières, les troisièmes qui rencontrent au moins l'une des secondes, etc, ...

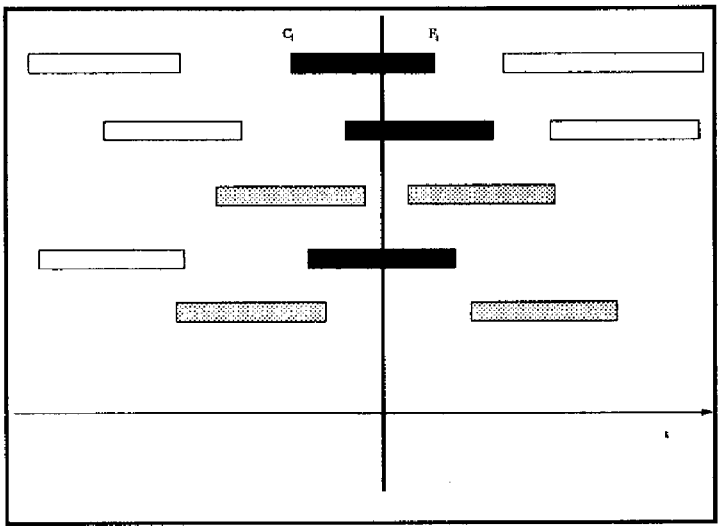


Figure II.3: Répartition temporelle des opérations et un repère

Ainsi, l'introduction, dans un problème de planification, de dates ou repères, en tant que **références temporelles**, permet de structurer le raisonnement dans le temps. Bien évidemment, le choix de tels repères n'est pas indépendant de l'utilité que l'on en attend, ni de l'objectif que l'on poursuit, ou de la stratégie décisionnelle que l'on compte adopter lors de la recherche de solutions régulant la charge [VALAX 86] : l'élaboration de structures temporelles particulières, à partir du choix d'un jeu de repères spécifiques, s'inscrit dans cette problématique.

II.4.2 Structures Adjacentes

La complexité des problèmes de planification, d'ordonnancement, ou autres raisonnements portant sur des ensembles d'opérations, peut être amoindrie par des décompositions de différents types. Dans le cas de décompositions temporelles, on tente généralement de dégager des intervalles temporels sur l'horizon de planification, associés à des sous ensembles d'opérations "voisines dans le temps" [PORTMANN 88].

Mais le plus souvent, la difficulté de telles approches provient des phénomènes de chevauchements temporels entre les fenêtres des opérations planifiées : la plupart du temps, il est impossible de trouver des intervalles "indépendants" ou "déconnectés", à partir desquels on puisse distinguer des classes d'opérations voisines, sans aucun chevauchement entre classes. Le problème global ne peut être ramené à une simple juxtaposition de sous-problèmes indépendants.

Toutefois, il est toujours possible de générer des décompositions de l'horizon telles que les chevauchements n'apparaissent au maximum qu'entre deux intervalles successifs. Les phénomènes de couplage sont ainsi minimisés.

De telles décompositions sont appelées ici Structures Adjacentes ; elles découpent l'horizon en intervalles successifs du type $[T_j, T_{j+1}]$, où les T_j sont des repères, et respectant la propriété ou contrainte d'adjacence suivante :

$$\forall i\ \exists j,\ T_{j-1} \leq C_i < F_i \leq T_{j+1}$$

qui signifie que toute fenêtre d'opération i planifiée ne chevauche pas plus de deux intervalles successifs de la Structure Adjacente.

Par mesure de commodité, on notera $(T_0, T_{-1}, T_1, T_{-2}, T_2, ..., T_{-n}, T_n)$ la Structure Adjacente associée à l'ensemble des repères $\{T_0, T_{-1}, T_1, T_{-2}, T_2, ..., T_{-n}, T_n\}$.

Cette définition est générique, et ne suppose pas d'à priori sur l'élaboration des Structures Adjacentes. Le choix peut être confié au Décideur, qui pourra utiliser les repères adaptés à son problème, son mode de raisonnement, l'objectif poursuivi..., sous réserve de respect de la contrainte d'adjacence.

On peut toutefois proposer des heuristiques informatisables, encore appelées "Stratégies Machine", ainsi que nous le verrons par la suite, d'élaboration de Structures Adjacentes à partir du choix d'un repère initial.

Nous pouvons par exemple présenter l'heuristique d'élaboration de la Structure Adjacente minimale, c'est-à-dire décomposant l'horizon d'une manière la plus détaillée possible, à partir du choix initial d'un repère T_0 et d'ensembles successifs $context_1(T_0)$, $context_2(T_0)$,... de fenêtres associées aux opérations planifiées :

1. $context_1(T_0)$ est l'ensemble des fenêtres $[C_i, F_i]$ telles que $C_i < T_0 < F_i$. Les deux repères T_{-1} et T_1 sont égaux respectivement à min (C_i) et max (F_i) sur l'ensemble des fenêtres appartenant à $context_1(T_0)$.

2. à l'étape n, $context_n(T_0)$, est l'ensemble des fenêtres n'appartenant pas à un $context_j(T_0)$ déjà trouvé, et "d'intersection temporelle" non vide avec au

moins une fenêtre appartenant à $context_{n-1}(T_0)$. Les deux repères T_{-n} et T_n sont respectivement égaux à min (C_i) et max (F_i) sur l'ensemble des fenêtres appartenant à $context_n(T_0)$.

Exemple :

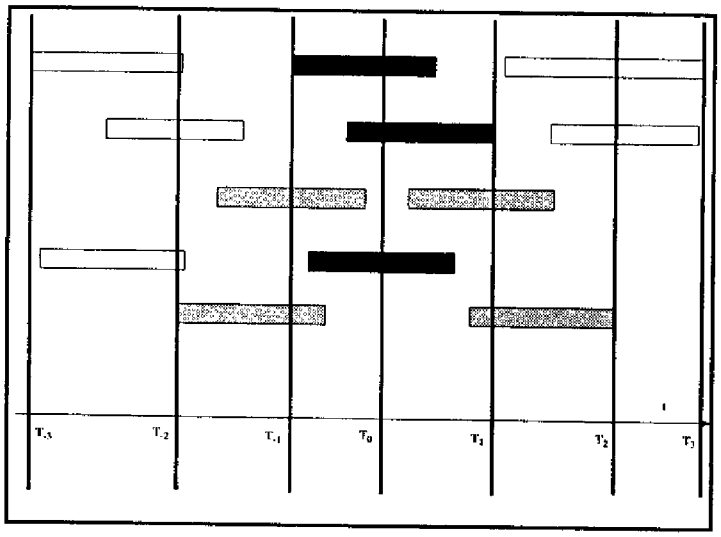


Figure II.4: Une Structure Adjacente

II.5 Nouvelles Courbes de Charge

La décomposition temporelle de l'horizon de planification en Structure Adjacente, va permettre une homogénéisation -en l'occurrence une agrégation- du travail à réaliser, avec les contraintes de capacités de ressource.

En effet, sur chaque intervalle de l'horizon, et pour une ressource agrégée donnée des cumuls de charge portant sur les opérations dont les fenêtres chevauchent l'intervalle considéré, utilisant la notion de contribution individuelle, vont permettre de dégager les charges minimale et maximale.

De nouvelles courbes de charges seront alors présentées, révélant explicitement la marge de charge effectivement disponible sur chaque intervalle.

II.5.1 Classification temporelle des opérations

L'élaboration d'une Structure Adjacente permet de décomposer l'ensemble des opérations planifiées sur la ressource agrégée concernée, en sous-ensembles de types Ω_j et Int_j, dont la définition est la suivante :

Soit $(T_0, T_1, T_2, ..., T_n)$ la Structure Adjacente choisie,

1. $\Omega_j = \{\omega_i / C_i < T_j < F_i\}$ est l'ensemble des fenêtres rencontrant T_j.

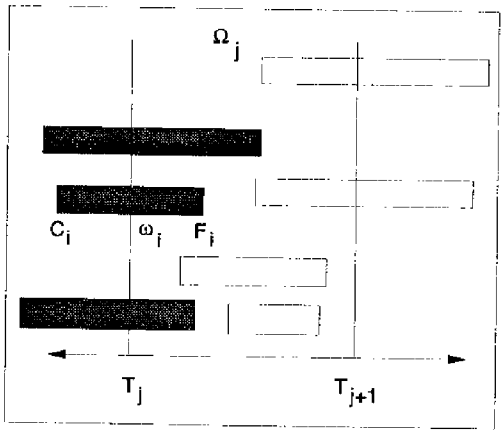


Figure II.5: L'ensemble Ω_j de fenêtres associées au repère T_j

2. $Int_j = \{\omega_i / T_j \leq C_i < F_i \leq T_{j+1}\}$ est l'ensemble des fenêtres contenues dans l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$.

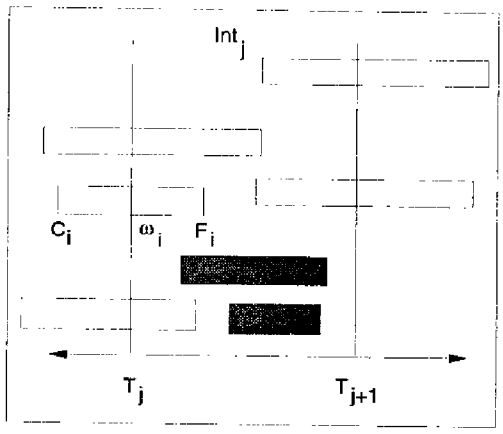


Figure II.6: L'ensemble Int_j de fenêtres contenues dans l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$

II.5.2 Charges maximale et minimale d'un intervalle $[T_j, T_{j+1}]$

Compte tenu du fait que les raisonnements étudiés à ce niveau se situent en amont de tout ordonnancement, la possibilité de prévoir tous les positionnements admissibles des tâches à l'intérieur de leurs fenêtres :

C_i F_i

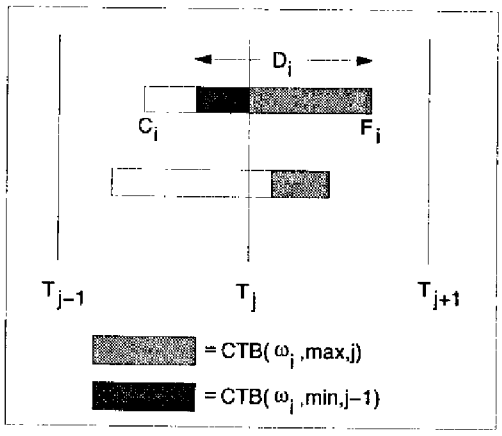
permet au niveau agrégé de la charge et de la ressource, de faire la distinction entre charge maximale (WMAX) et charge minimale (WMIN) planifiables sur chaque intervalle de la Structure Adjacente. Ces quantités sont déterminées par des cumuls des contributions individuelles de charge sur les ensembles des fenêtres de Ω_j et Int_j, correspondant à des positionnements des tâches le plus à l'intérieur, ou à l'extérieur possible de l'intervalle considéré.

II.5.2.1 Contributions des opérations

La contribution d'une opération à la charge maximale ou minimale d'un intervalle, correspond à la partie (ou totalité dans certains cas) de la quantité de travail à réaliser sur cette opération pendant l'intervalle considéré, lorsque la position de sa tâche à l'intérieur de sa fenêtre correspond à la charge concernée. La charge maximale étant calculée à partir d'un positionnement le plus à l'intérieur possible de l'intervalle considéré, et la charge minimale est calculée à partir d'un positionnement le plus à l'extérieur possible.

De cette définition générique, nous pouvons dégager plusieurs cas, selon l'appartenance des fenêtres aux divers Ω_j et Int_j :

1. Contributions des opérations dont les fenêtres appartiennent à Ω_j :
   (a) Le positionnement de la tâche au plus tard dans sa fenêtre, correspond :
   - à un positionnement le plus à l'intérieur possible de $[T_j, T_{j+1}]$,
   - et à un positionnement le plus à l'extérieur possible de $[T_{j-1}, T_j]$.

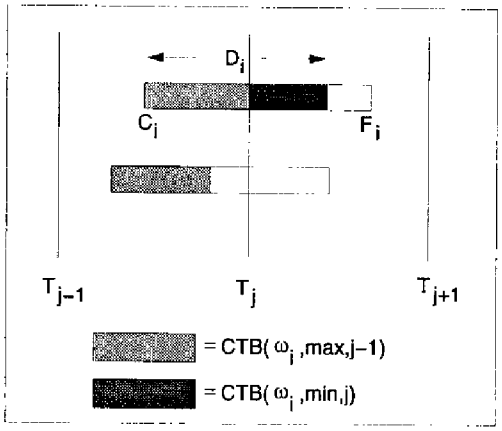


Ainsi, on montre facilement que :

- La contribution d'une opération i à la charge maximale de l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$, notée $CTB(\omega_i, max, j)$, est égale à $min(D_i, F_i - T_j)$.
- La contribution d'une opération i à la charge minimale de l'intervalle $[T_{j-1}, T_j]$, notée $CTB(\omega_i, min, j-1)$, est égale à $max(0, T_j - (F_i - D_i))$.

(b) Le positionnement de la tâche au plus tôt dans sa fenêtre, correspond :

- à un positionnement le plus à l'extérieur possible de $[T_j, T_{j+1}]$,
- et à un positionnement le plus à l'intérieur possible de $[T_{j-1}, T_j]$.

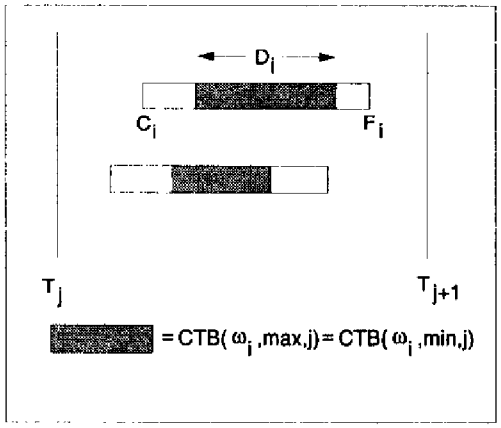


On montre alors que :

- La contribution d'une opération i à la charge maximale de l'intervalle $[T_{j-1}, T_j]$, notée $CTB(\omega_i, max, j-1)$, est égale à $min(D_i, T_j - C_i)$.
- La contribution d'une opération i à la charge minimale de l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$, notée $CTB(\omega_i, min, j)$, est égale à $max(0, C_i + D_i - T_j)$.

2. Contributions des opérations dont les fenêtres appartiennent à Int_j :

   Quel que soit le positionnement de la tâche dans sa fenêtre, l'opération contribue, de la même manière, à la charge minimale et à la charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$.
   Très simplement, $CTB(\omega_i, min, j) = CTB(\omega_i, max, j) = D_i$.



II.5.2.2 Calcul des charges maximale et minimale de l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$

1. La charge maximale $WMAX_j$ est obtenue en calant toutes les tâches le plus à l'intérieur possible de $[T_j, T_{j+1}]$:

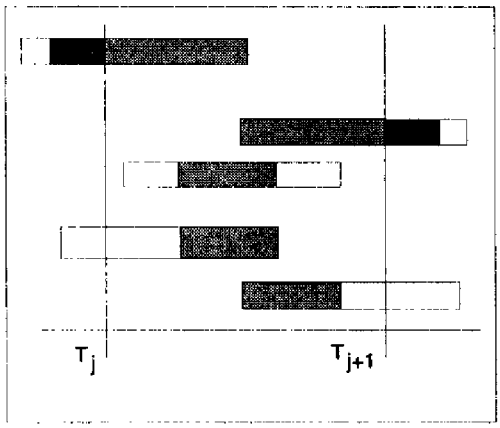


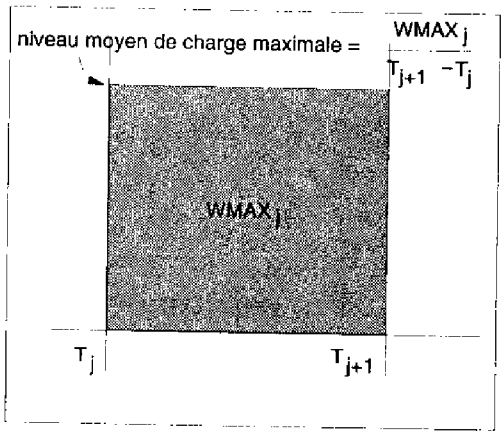
Figure II.7: Le calcul de $WMAX_j$

Par cumuls des contributions de toutes les opérations dont les fenêtres sont d'intersection non vide avec $[T_j, T_{j+1}]$, on obtient :

$$WMAX_j = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} CTB(\omega_i, max, j) + \sum_{\omega_i \in Int_j} CTB(\omega_i, max, j) + \sum_{\omega_i \in \Omega_{j+1}} CTB(\omega_i, max, j)$$

$$WMAX_j = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} min(D_i, F_i - T_j) + \sum_{\omega_i \in Int_j} D_i + \sum_{\omega_i \in \Omega_{j+1}} min(D_i, T_{j+1} - C_i)$$

Cette charge maximale peut être représentée graphiquement par une surface rectangulaire délimitée par $[T_j, T_{j+1}]$, dont la valeur numérique est égale à $WMAX_j$:



2. La charge minimale $WMIN_j$, est obtenue en calant toutes les tâches le plus à l'extérieur possible de $[T_j, T_{j+1}]$:

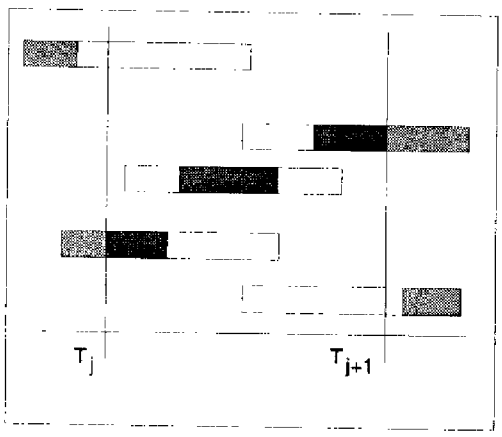


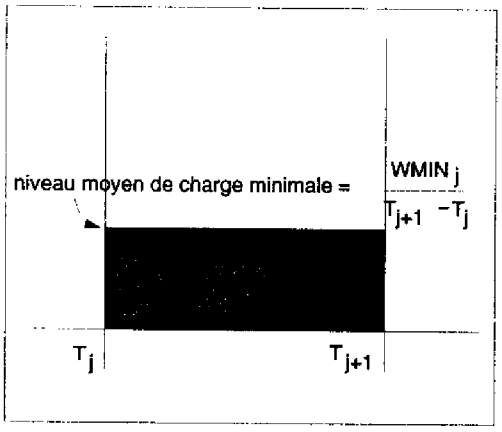
Figure II.8: Le calcul de $WMIN_j$

Par cumuls des contributions de toutes les opérations dont les fenêtres ont une intersection non vide avec $[T_j, T_{j+1}]$, on obtient :

$$WMIN_j = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} CTB(\omega_i, min, j) + \sum_{\omega_i \in Int_j} CTB(\omega_i, min, j) + \sum_{\omega_i \in \Omega_{j+1}} CTB(\omega_i, min, j)$$

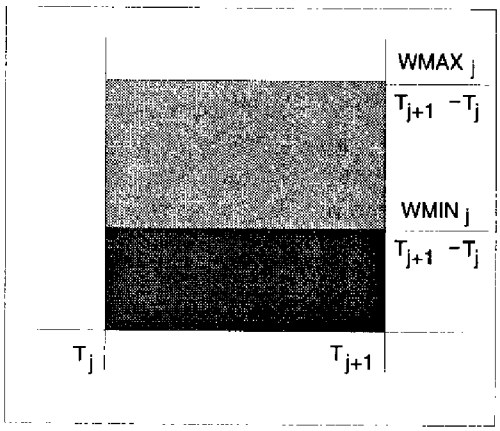
$$WMIN_j = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} max(0, C_i + D_i - T_j) + \sum_{\omega_i \in Int_j} D_i + \sum_{\omega_i \in \Omega_{j+1}} max(0, T_{j+1} - (F_i - D_i))$$

Cette charge minimale peut être représentée graphiquement par une surface rectangulaire délimitée par $[T_j, T_{j+1}]$, dont la valeur numérique est égale à $WMIN_j$:



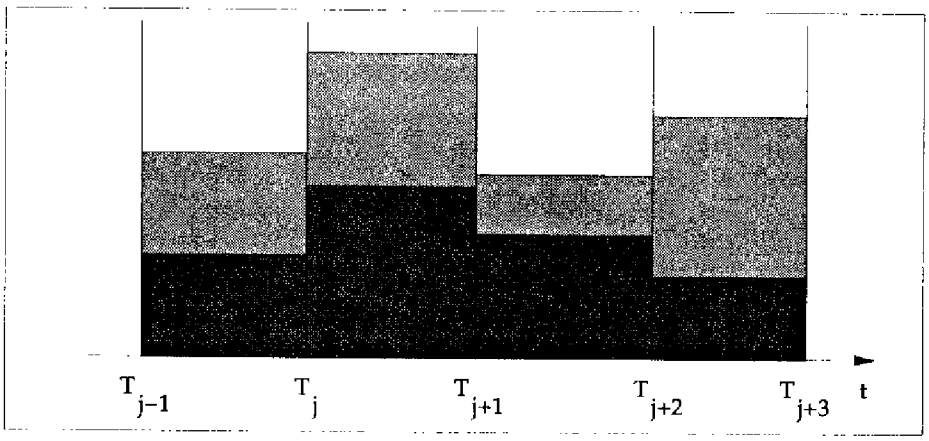
II.5.2.3 Courbes de Charge

D'après ce qui précède, et sur un intervalle donné $[T_j, T_{j+1}]$, nous pouvons proposer la représentation graphique suivante :



La surface visible en clair, représente la différence entre $WMAX_j$ et $WMIN_j$, appelée Marge de Charge disponible sur l'intervalle considéré.

Par ailleurs, et par concaténation de la représentation graphique précédente sur tous les intervalles de la Structure Adjacente, on obtient les nouvelles courbes de charges suivantes :



La surface visible en clair représente le double de la marge globale de charge disponible sur tout l'horizon de planification, ainsi que cela sera expliqué dans le paragraphe suivant.

II.5.3 La Marge de Charge

$WMAX_j - WMIN_j$ est la marge de charge disponible dans l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$.

On peut la décomposer en deux valeurs $S_{1,j}$ et $S_{2,j}$ qui représentent les **marges de charge échangeables** entre l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$ et ses intervalles voisins, respectivement son précédent $[T_{j-1}, T_j]$, et son suivant $[T_{j+1}, T_{j+2}]$.

$S_{1,j}$ provient des "glissements" temporels admissibles des tâches associées aux opérations de Ω_j, à l'intérieur de leurs fenêtres :

- Un positionnement au plus tôt, correspondant à une contribution minimale sur $[T_j, T_{j+1}]$, revient à reporter, ou "faire glisser" un maximum de charge sur $[T_{j-1}, T_j]$, depuis $[T_j, T_{j+1}]$.
- Un positionnement au plus tard, correspondant à une contribution maximale sur $[T_j, T_{j+1}]$, revient à reporter, ou "faire glisser" un maximum de charge sur $[T_j, T_{j+1}]$, depuis $[T_{j-1}, T_j]$.

Ainsi,

$$S_{1,j} = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} [CTB(\omega_i, max, j) - CTB(\omega_i, min, j)]$$

De la même façon, $S_{2,j}$ provient des glissements temporels admissibles des tâches associées aux opérations de Ω_{j+1} à l'intérieur de leurs fenêtres.

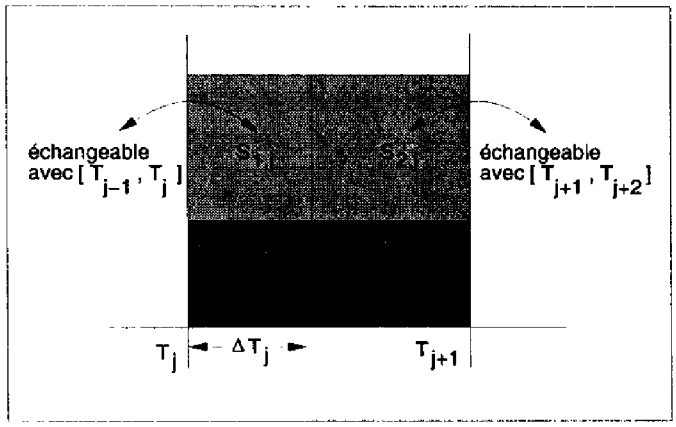
Ainsi,

$$S_{2,j} = \sum_{\omega_i \in \Omega_{j+1}} [CTB(\omega_i, max, j) - CTB(\omega_i, min, j)]$$

La marge de charge globale de $[T_j, T_{j+1}]$ est donc égale à :

$$WMAX_j - WMIN_j = S_{1,j} + S_{2,j} =$$
$$\sum_{\omega_i \in \Omega_j} [CTB(\omega_i, max, j) - CTB(\omega_i, min, j)] + \sum_{\omega_i \in \Omega_{j+1}} [CTB(\omega_i, max, j) - CTB(\omega_i, min, j)]$$

Graphiquement, cette marge globale, représentée par la surface visible en clair sur la figure , peut être décomposée en deux sous surfaces $S_{1,j}$ et $S_{2,j}$ de la manière suivante :



où

$$\Delta T_j = \frac{S_{1,j}(T_{j+1} - T_j)}{WMAX_j - WMIN_j}$$

II.6 Décisions de Régulation de Charge

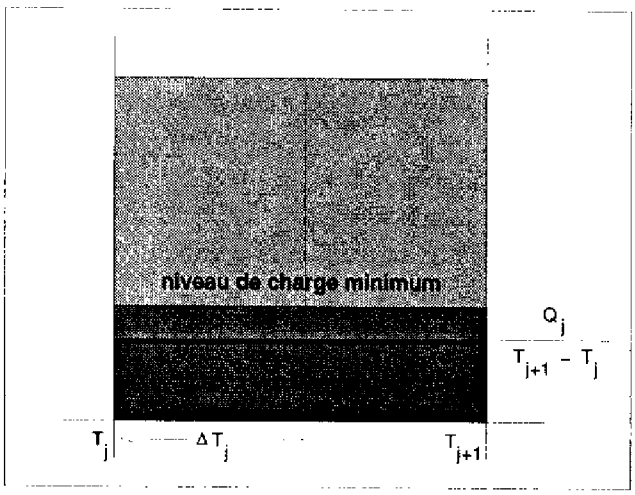
Au niveau agrégé du plan de charge, les décisions de régulation consistent à rendre compatibles les charges maximale et minimale de chaque intervalle de la Structure Adjacente, avec les contraintes de capacités maximale et minimale de ressource, sur ce même intervalle. Pour cela, il est nécessaire de réaliser un changement de référentiel de ces contraintes présentées en II.3.1.2, selon la même Structure Adjacente des courbes de charges maximale et minimale. Ce changement de référentiel est réalisé par une simple intégration numérique sur chaque intervalle de la Structure Adjacente choisie des courbes des contraintes de capacités maximale et minimale.

Plus précisément, il s'agit de faire un lissage de charges sur tous les intervalles de l'horizon de planification en échangeant de la marge de charge entre intervalles voisins de telle façon que les nouvelles charges soient comprises entre les capacités maximale et minimale de ressource.

On peut distinguer quatre cas :

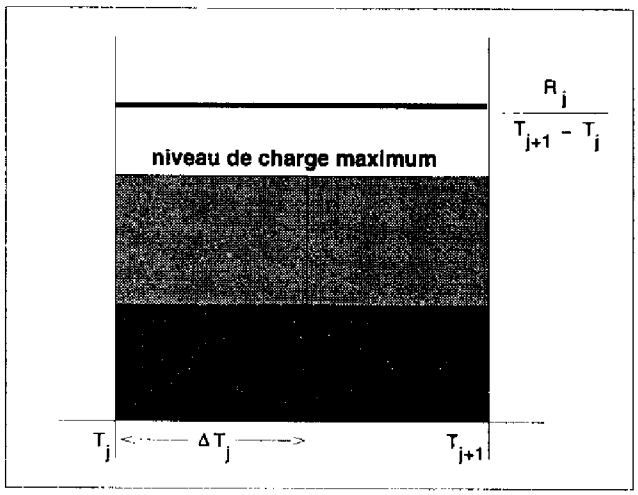
- Surcharge inévitable,
- Sous-charge inévitable,
- Risque de surcharge,
- Risque de sous-charge.

Une surcharge inévitable, se présente lorsque le niveau de capacité maximale sur un intervalle est inférieur au niveau de charge minimum. La position des tâches le plus à l'extérieur possible de l'intervalle considéré, correspond à une charge ne pouvant être accueillie par la capacité maximale de la ressource.



Une sous-charge inévitable se présente lorsque le niveau de charge maximum est inférieur au niveau de capacité minimale. La position des tâches le plus à l'intérieur

possible de l'intervalle considéré, ne peut assurer l'utilisation de la capacité minimale de la ressource.



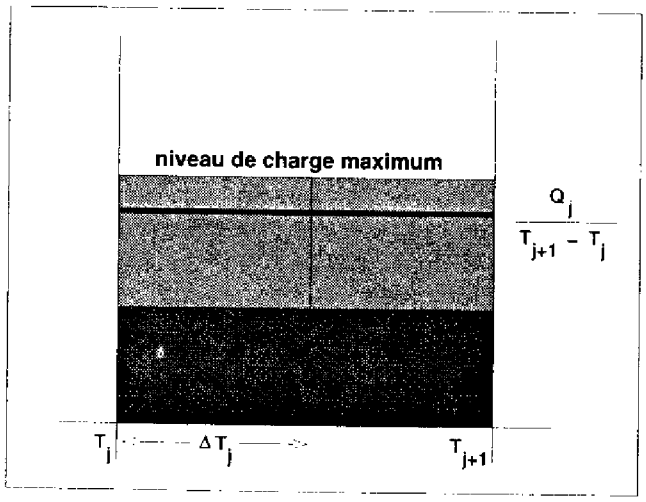
Ces deux cas représentent une infaisabilité du plan issu de Planning (Plan d'opérations initial) vis-à-vis des contraintes de ressources considérées. Il faut alors prendre des décisions de relaxation de contraintes, telles que :

- retarder un délai,
- avancer une date de lancement,
- introduire des heures supplémentaires, ou, au contraire, des heures de chômage technique,
- sous-traiter , etc.

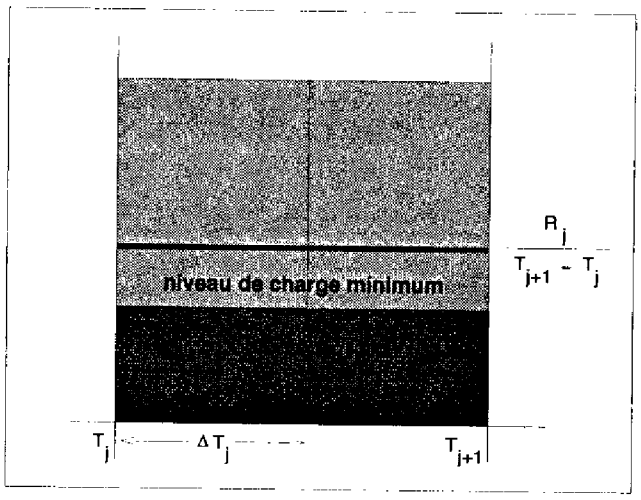
et qui consistent à remettre en cause les décisions prises en amont du centre de régulation.

Traditionnellement, le terme "Régulation de la charge" est employé pour ces types de décisions. Pour nous ici, il s'agit d'autres types de décisions, concernant les deux cas suivants :

1. Risque de surcharge : lorsque le niveau de charge maximum est supérieur au niveau de capacité maximale, sans que le niveau minimum ne le soit.



2. Risque de sous-charge : lorsque le niveau de charge minimum est inférieur au niveau de capacité minimale, sans que le niveau maximum ne le soit.



Dans ces deux cas, il y a seulement risque. Le plan issu du Planning a encore des chances d'être faisable vis-à-vis des contraintes de ressources, mais il est nécessaire de prendre quelques précautions :

- empêcher de "trop charger" vis-à-vis de la contrainte de capacité maximale,
- éviter de "sous charger" vis-à-vis de la contrainte de capacité minimale.

Pour ce mode cohérent vis-à-vis des décisions de l'amont, nous présenterons les relations existant entre les décisions détaillées portant sur les fenêtres des opérations

et induisant des réactualisations de leurs contributions, et les décisions agrégées portant sur les niveaux de charges et faisant intervenir des mécanismes automatiques de glissements, ou échanges, traduits sur le plan graphique par des processus de vases communicants.

Deux approches différentes sont proposées pour la modélisation du niveau agrégé de régulation de charge :

- Un modèle de flot canalisé, mis en oeuvre dans notre première application MARGE 1, et utilisé lors des "Stratégies Machine" de régulation.
- Un modèle de programmation linéaire, plus prometteur que le premier, mais non encore exploité sur le plan pratique.

II.6.1 Relation entre décisions agrégées et décisions détaillées

Pour les divers cas de risques (de surcharge, et/ou de sous-charge) qui sont étudiés dans ce travail, les décisions prises au niveau détaillé vont consister à "rétrécir" certaines fenêtres, c'est-à-dire :

- augmenter leurs dates de début au plus tôt, et/ou
- diminuer leurs dates de fin au plus tard

Il s'agit bien d'un mode cohérent de prises de décisions, respectant (puisque "resserrant") celles prises en amont par le Planning.

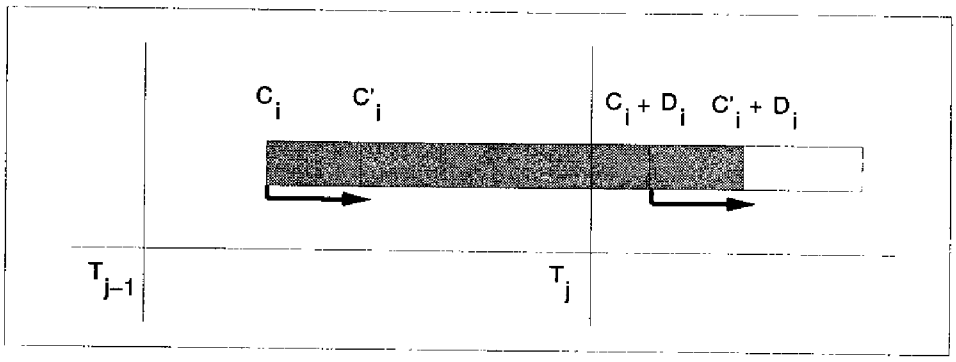
En effet, les valeurs des charges maximale et minimale d'un intervalle $[T_j, T_{j+1}]$ donné de la Structure Adjacente, dépendant de positionnements précis des tâches associées aux opérations de Ω_j et Ω_{j+1} à l'intérieur de leurs fenêtres, la réactualisation de ces dernières induisant une réactualisation des contributions, est directement liée à la modification des charges de l'intervalle concerné, ainsi que de celles de ses voisins.

II.6.1.1 Réactualisations de contributions d'opérations

Les divers rétrécissements des fenêtres d'opérations de Ω_j et Ω_{j+1}, induisent des modifications de leurs contributions aux charges maximale et minimale des intervalles concernés.

Quatre cas peuvent être différenciés :

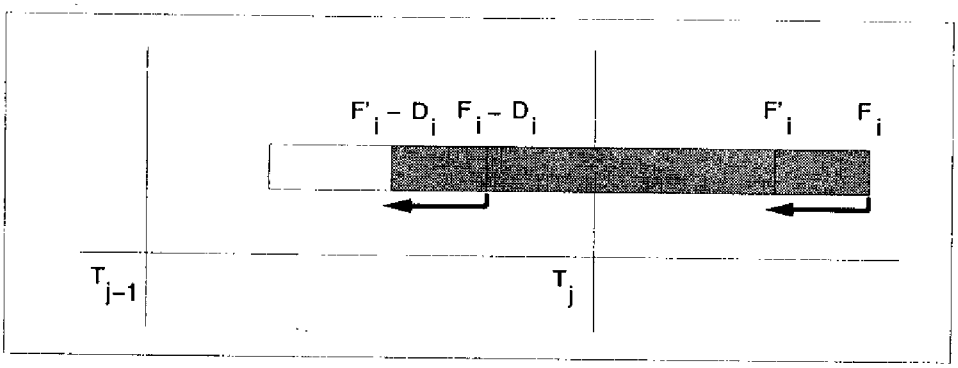
1. Augmentation d'une date de début au plus tôt de la fenêtre d'une opération de Ω_j



La contribution de l'opération à la charge maximale de $[T_{j-1}, T_j]$, et sa contribution à la charge minimale de $[T_j, T_{j+1}]$, ont respectivement diminué et augmenté de :

$\Delta CTB(\omega_i, max, j-1) = \Delta CTB(\omega_i, min, j) =$
$min(D_i, T_j - C_i) - min(D_i, T_j - C'_i) = max(0, C'_i + D_i - T_j) - max(0, C_i + D_i - T_j)$

2. Diminution d'une date de fin au plus tard de la fenêtre d'une opération de Ω_j

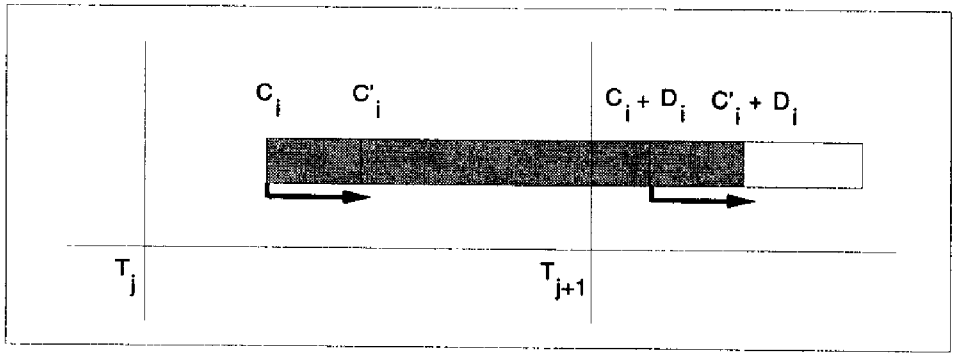


Les contributions à la charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$ et à la charge minimale de $[T_{j-1}, T_j]$ ont respectivement diminué et augmenté de :

$\Delta CTB(\omega_i, max, j) = \Delta CTB(\omega_i, min, j-1) =$
$min(D_i, F_i - T_j) - min(D_i, F'_i - T_j) = max(0, T_j - (F'_i - D_i)) - max(0, T_j - (F_i - D_i))$

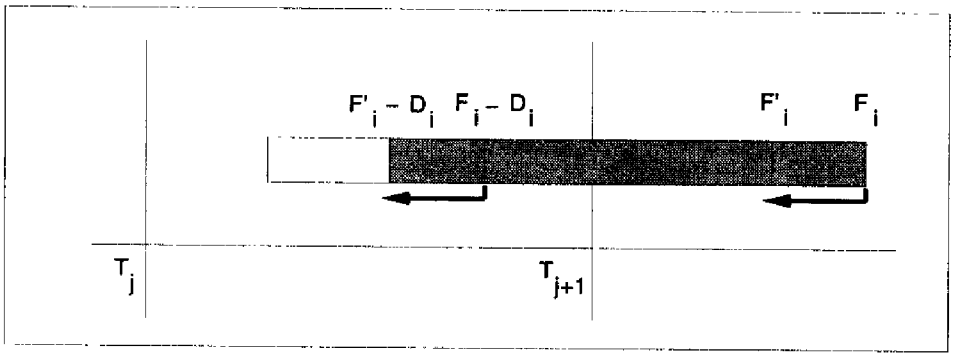
3. Augmentation d'une date de début au plus tôt de la fenêtre d'une opération de Ω_{j+1}

La contribution de l'opération à la charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$, et sa contribution à la charge minimale de $[T_{j+1}, T_{j+2}]$, ont respectivement diminué et augmenté de :



$\Delta CTB(\omega_i, max, j) = \Delta CTB(\omega_i, min, j+1) =$
$min(D_i, T_{j+1} - C_i) - min(D_i, T_{j+1} - C'_i) = max(0, C'_i + D_i - T_{j+1}) - max(0, C_i + D_i - T_{j+1})$

4. Diminution d'une date de fin au plus tard de la fenêtre d'une opération de Ω_{j+1}



Les contributions à la charge maximale de $[T_{j+1}, T_{j+2}]$ et à la charge minimale de $[T_j, T_{j+1}]$ ont respectivement diminué et augmenté de :
$\Delta CTB(\omega_i, max, j+1) = \Delta CTB(\omega_i, min, j) =$
$min(D_i, F_i - T_{j+1}) - min(D_i, F'_i - T_{j+1}) = max(0, T_{j+1} - (F'_i - D_i)) - max(0, T_{j+1} - (F_i - D_i))$

II.6.1.2 Processus de vases communicants

Les quatre cas précédents peuvent être associés aux quatre cas suivants concernant le niveau agrégé des charges minimale et maximale d'un intervalle $[T_j, T_{j+1}]$:

1. Augmentation de la charge minimale de $[T_j, T_{j+1}]$ et diminution de la charge maximale de $[T_{j-1}, T_j]$

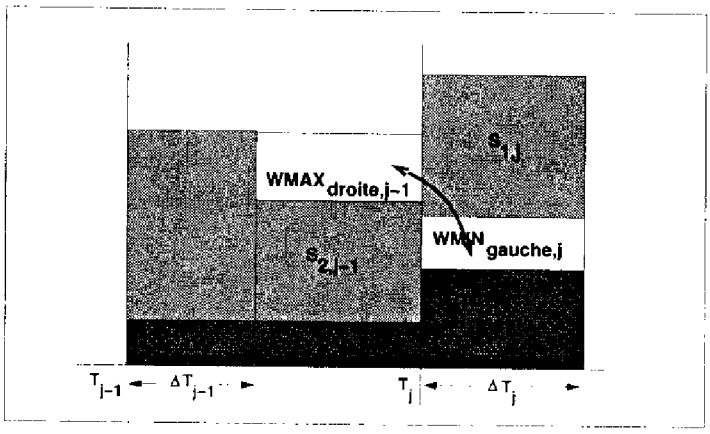
Les augmentations de certaines dates de début au plus tôt de fenêtres d'opérations de Ω_j au niveau détaillé des opérations vont avoir pour effet, au niveau agrégé des charges, et par les réactualisations de leurs contributions respectives :

- d'augmenter la charge minimale de $[T_j, T_{j+1}]$, et
- de diminuer la charge maximale de $[T_{j-1}, T_j]$,

d'une valeur égale, notée :

$WMIN_{gauche,j} = WMAX_{droite,j-1} =$
$\sum_{\omega_i \in \Omega_j} \Delta CTB(\omega_i, max, j-1) = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} \Delta CTB(\omega_i, min, j)$

Sur le plan graphique, on peut considérer $WMIN_{gauche,j}$ et $WMAX_{droite,j-1}$ comme étant deux sous-surfaces, respectivement de $S_{1,j}$ et $S_{2,j-1}$ de valeurs numériques égales, représentées de la manière suivante :

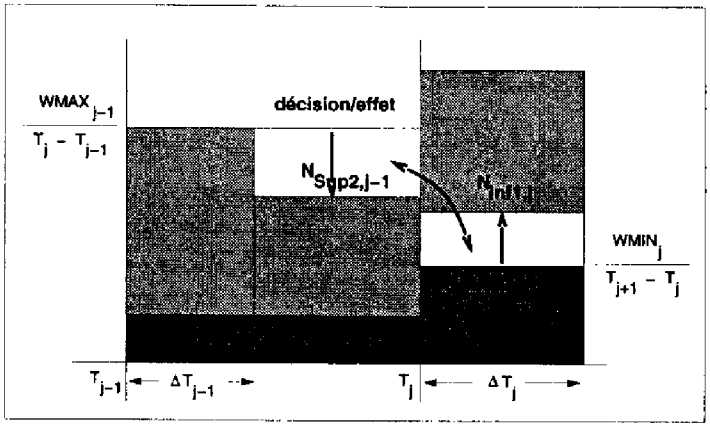


où $WMAX_{droite,j-1}$ peut être considérée comme une partie de la charge maximale de $[T_{j-1}, T_j]$ échangée, ou transférée sur $[T_j, T_{j+1}]$, et augmentant la charge minimale de ce dernier.

Ces deux sous-surfaces sont une partie des marges de charge disponibles sur $[T_j, T_{j+1}]$ et respectivement $[T_{j-1}, T_j]$, ainsi utilisées, ou consommées sur l'un et l'autre de ces deux intervalles, et ayant pour effets simultanés d'augmenter la charge minimale de $[T_j, T_{j+1}]$ et de diminuer la charge maximale de $[T_{j-1}, T_j]$.

Un tel processus permet, avant même d'avoir augmenté les dates de début au plus tôt, c'est-à-dire, en amont des décisions détaillées portant sur les fenêtres, d'effectuer des raisonnements agrégés portant sur l'échange, ou le transfert de $WMAX_{droite,j-1}$ et $WMIN_{gauche,j}$.

Sur le plan graphique, le fait de diminuer un sous-niveau du type $N_{Sup_2,j-1}$ (respectivement augmenter un sous-niveau du type $N_{inf_1,j}$), conformément à la figure suivante, aura pour effet automatique dit de vases communicants

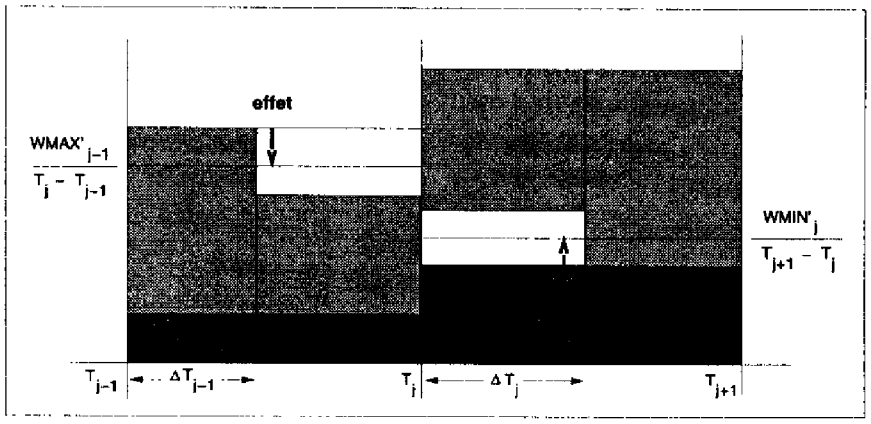


d'augmenter le sous-niveau correspondant du type $N_{inf_1,j}$ (respectivement diminuer le sous-niveau correspondant du type $N_{Sup_2,j}$) :

où :

$N_{inf_1,j}\Delta T_j = WMIN_{gauche,j} = N_{Sup_2,j-1}(T_j - T_{j-1} - \Delta T_{j-1}) = WMAX_{droite,j-1}$

Les conséquences automatiques au niveau des charges globales des précédentes modifications de sous-niveaux, sont alors les suivantes :



où :

$$\begin{aligned} WMAX'_{j-1} &= WMAX_{j-1} - WMAX_{droite,j-1} \\ WMIN'_j &= WMIN_j + WMIN_{gauche,j} \end{aligned}$$

2. Diminution de la charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$ et augmentation de la charge minimale de $[T_{j-1}, T_j]$

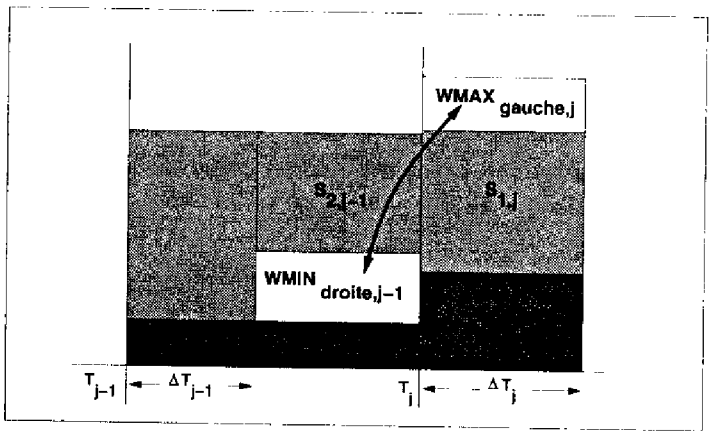
Les diminutions de certaines dates de fin au plus tard de fenêtres d'opérations de Ω_j au niveau détaillé des opérations vont avoir pour effet, au niveau agrégé des charges, et par les réactualisations de leurs contributions respectives :

- de diminuer la charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$, et
- d'augmenter la charge minimale de $[T_{j-1}, T_j]$,

d'une valeur égale, notée :

$WMAX_{gauche,j} = WMIN_{droite,j-1} =$
$\sum_{\omega_i \in \Omega_j} \Delta CTB(\omega_i, max, j) = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} \Delta CTB(\omega_i, min, j-1)$

Sur le plan graphique, on peut considérer $WMAX_{gauche,j}$ et $WMIN_{droite,j-1}$ comme étant deux sous-surfaces, respectivement de $S_{1,j}$ et $S_{2,j-1}$ de valeurs numériques égales, représentées de la manière suivante :

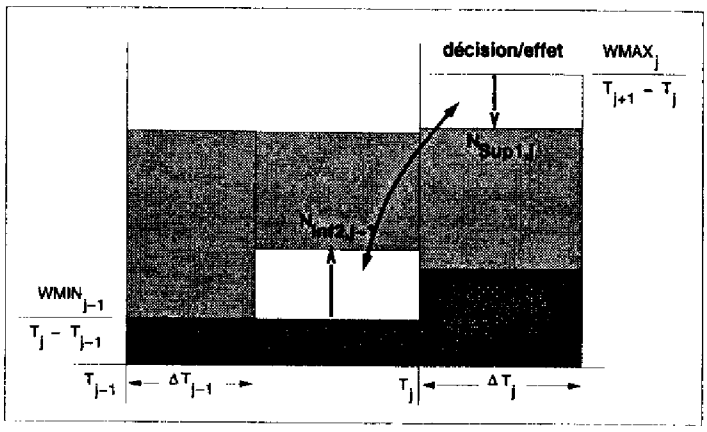


où $WMIN_{droite,j-1}$ peut être considérée comme une partie de la charge minimale de $[T_{j-1}, T_j]$ transférée sur $[T_j, T_{j+1}]$, et diminuant la charge maximale de ce dernier.

Ces deux sous-surfaces sont une partie des marges de charge disponibles sur $[T_j, T_{j+1}]$ et respectivement $[T_{j-1}, T_j]$, consommées sur l'un et l'autre de ces deux intervalles, et ayant pour effets simultanés de diminuer la charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$ et d'augmenter la charge minimale de $[T_{j-1}, T_j]$.

De la même manière que précédemment, et avant même d'avoir diminué les dates de fin au plus tard, c'est-à-dire, en amont des décisions détaillées portant sur les fenêtres, il est possible d'effectuer des raisonnements agrégés portant sur l'échange, ou le transfert de $WMAX_{gauche,j}$ et $WMIN_{droite,j-1}$.

Sur le plan graphique, le fait de diminuer un sous-niveau du type $N_{Sup_1,j}$ (respectivement augmenter un sous-niveau du type $N_{inf_2,j-1}$), aura pour effet automatique de vases communicants d'augmenter le sous-niveau correspondant

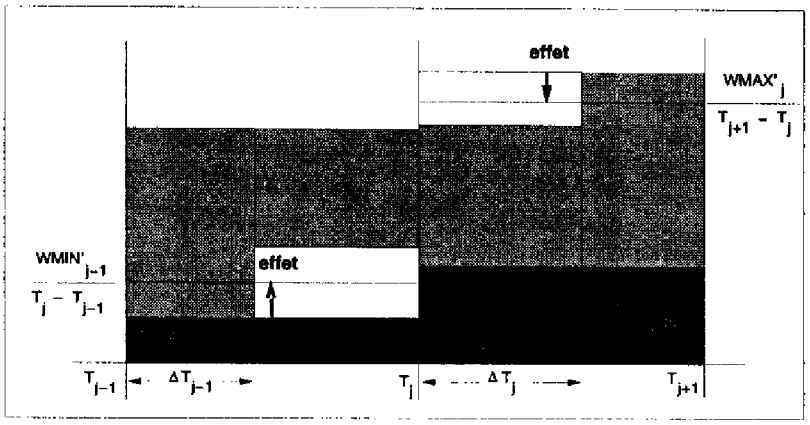


du type $N_{inf_2,j-1}$ (respectivement diminuer le sous-niveau correspondant du type $N_{Sup_1,j}$) :

où :

$N_{Sup_1,j}\Delta T_j = WMAX_{gauche,j} = N_{inf_2,j-1}(T_j - T_{j-1} - \Delta T_{j-1}) = WMIN_{droite,j-1}$

Les conséquences automatiques au niveau des charges globales des précédentes modifications de sous-niveaux, sont alors les suivantes :

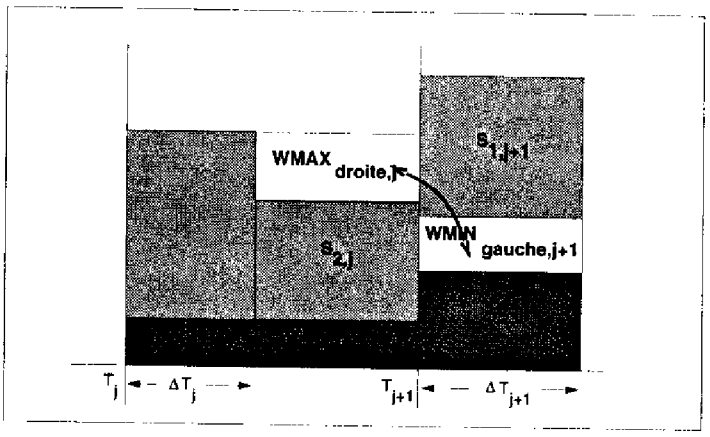


où :

$$\begin{aligned} WMAX'_j &= WMAX_j - WMAX_{gauche,j} \\ WMIN'_{j-1} &= WMIN_{j-1} + WMIN_{droite,j-1} \end{aligned}$$

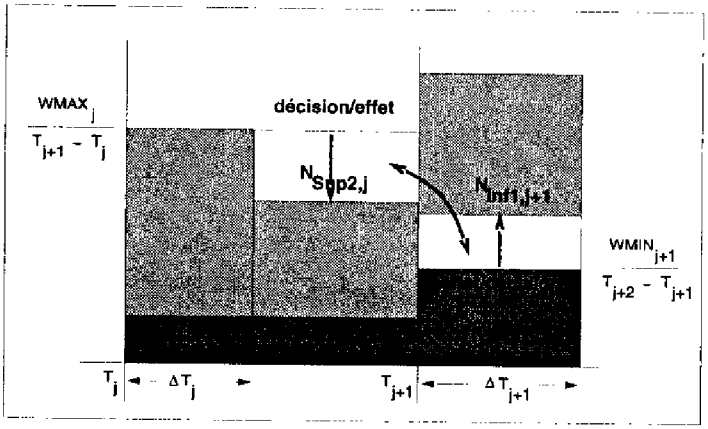
3. Diminution de la charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$ et augmentation de la charge minimale de $[T_{j+1}, T_{j+2}]$

De manière identique au cas 1, et par augmentations de certaines dates de début au plus tôt de fenêtres d'opérations de Ω_{j+1} au niveau détaillé des opérations, on peut dégager le mécanisme de vases communicants suivant :



où $WMIN_{gauche,j+1}$ peut être considérée comme une partie de la charge minimale de $[T_{j+1}, T_{j+2}]$ échangée, ou exactement transférée sur $[T_j, T_{j+1}]$, et diminuant la charge maximale de ce dernier.

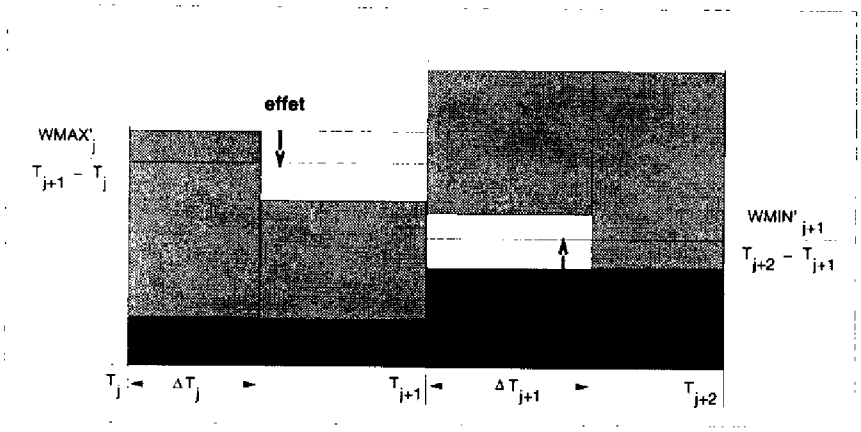
Les effets graphiques sont représentés dans la figure suivante :



où :

$$N_{inf_1,j}\Delta T_{j+1} = WMIN_{gauche,j+1} = N_{Sup_2,j}(T_{j+1} - T_j - \Delta T_j) = WMAX_{droite,j}$$

Les conséquences automatiques au niveau des charges globales des précédentes modifications de sous-niveaux, sont alors les suivantes :

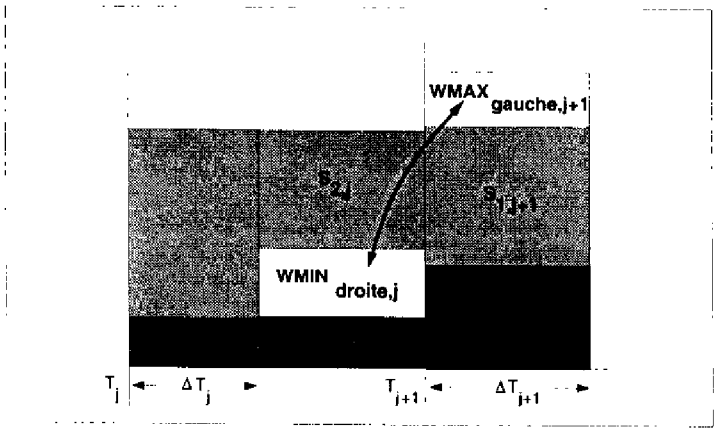


où :

$$\begin{aligned} WMAX'_j &= WMAX_j - WMAX_{droite,j} \\ WMIN'_{j+1} &= WMIN_{j+1} + WMIN_{gauche,j+1} \end{aligned}$$

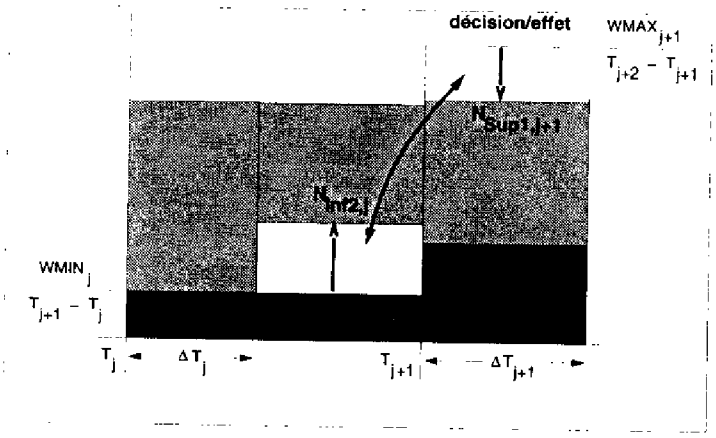
4. Augmentation de la charge minimale de $[T_j, T_{j+1}]$ et diminution de la charge maximale de $[T_{j+1}, T_{j+2}]$

   De manière identique au cas 2, et par diminutions de certaines dates de fin au plus tard de fenêtres d'opérations de Ω_{j+1} au niveau détaillé des opérations, on peut dégager le mécanisme de vases communicants suivant :



   où $WMAX_{gauche,j+1}$ peut être considérée comme une partie de la charge maximale de $[T_{j+1}, T_{j+2}]$ <u>échangée</u>, ou exactement <u>transférée</u> sur $[T_j, T_{j+1}]$, et augmentant la charge minimale de ce dernier.

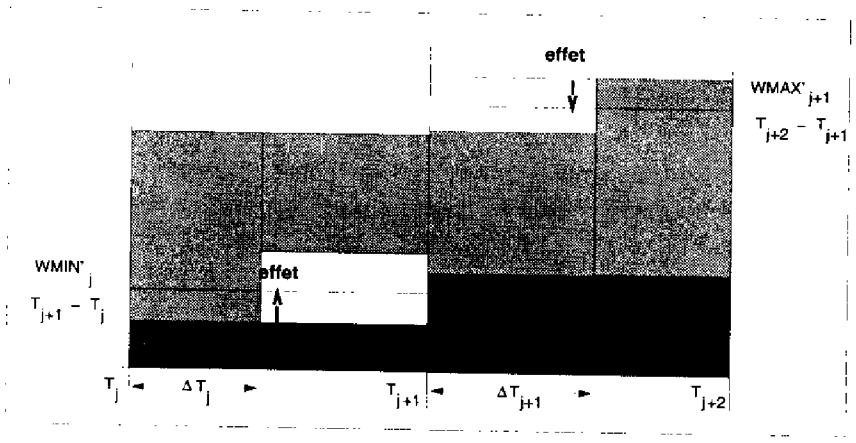
   Les effets graphiques sont représentés dans la figure suivante :



où :

$N_{Sup_1,j+1}\Delta T_{j+1} = WMAX_{gauche,j+1} = N_{inf_2,j}(T_{j+1}-T_j-\Delta T_j) = WMIN_{droite,j}$

Les conséquences automatiques au niveau des charges globales des précédentes modifications de sous-niveaux, sont alors les suivantes :



où :

$$\begin{aligned} WMAX'_{j+1} &= WMAX_{j+1} - WMAX_{gauche,j+1} \\ WMIN'_j &= WMIN_j + WMIN_{droite,j} \end{aligned}$$

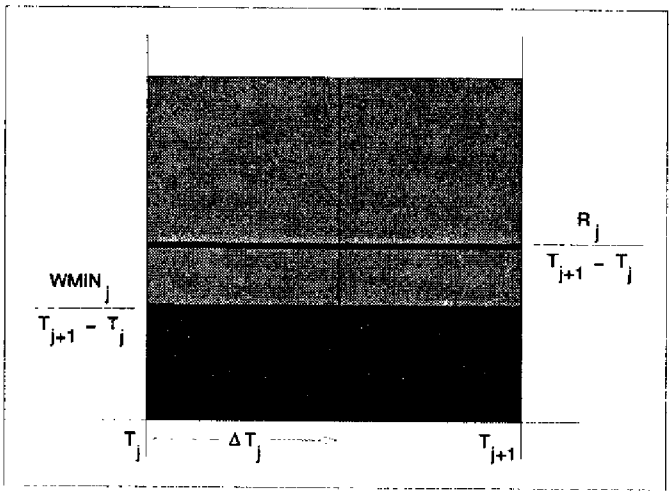
II.6.2 Synthèse des décisions agrégées

Dans les deux cas éventuels de risques de surcharge et/ou sous-charge pour un intervalle donné $[T_j, T_{j+1}]$, nous pouvons résumer les types de décisions à prendre, leurs "manipulations graphiques" associées au plan graphique, ainsi que leurs conséquences sur les intervalles voisins.

1. Cas de risque de sous charge
   Lorsque

$$\frac{WMIN_j}{T_{j+1} - T_j} < \frac{R_j}{T_{j+1} - T_j}$$

il est nécessaire d'augmenter le niveau global de charge minimale.



Pour cela, deux possibilités se présentent :

(a) Conformément au cas 1, échanger une quantité $WMIN_{gauche,j}$ de $S_{1,j}$ avec $[T_{j-1}, T_j]$, en augmentant le sous-niveau $N_{inf_1,j}$:

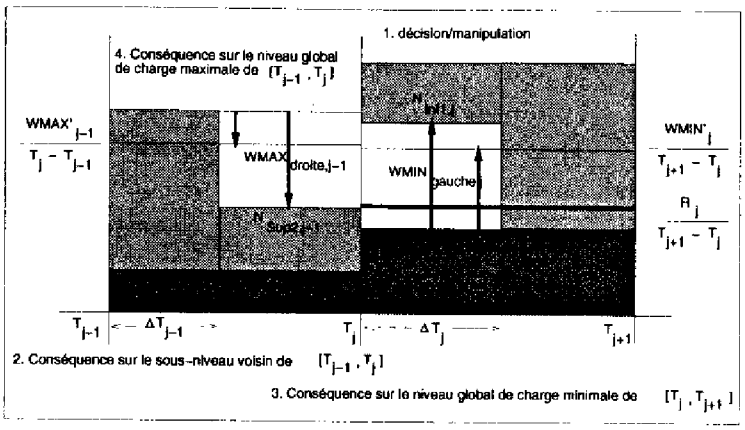
Les conséquences d'une telle décision (ou manipulation) sont :

- retrouver sur $[T_{j-1}, T_j]$ la quantité de $S_{2,j-1}$ $WMAX_{droite,j-1} = WMIN_{gauche,j}$, qui est associée à la diminution du sous-niveau $N_{Sup_2,j-1}$,
- une augmentation du niveau global de charge minimale de $[T_j, T_{j+1}]$:

$$WMIN'_j = WMIN_j + WMIN_{gauche,j}$$

- une diminution du niveau global de charge maximale de $[T_{j-1}, T_j]$:

$$WMAX'_{j-1} = WMAX_{j-1} - WMAX_{droite,j-1}$$



(b) Conformément au cas 3, échanger une quantité $WMIN_{droite,j}$ de $S_{2,j}$ avec $[T_{j+1}, T_{j+2}]$, en augmentant le sous-niveau $N_{inf_2,j}$:

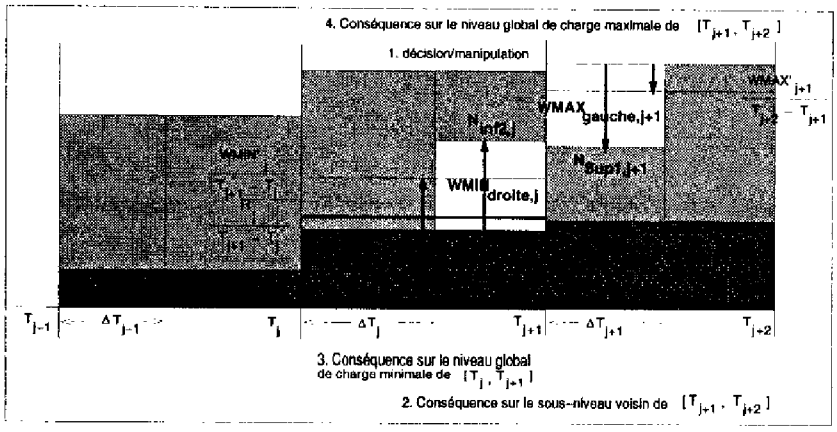
Les conséquences d'une telle décision (ou manipulation) sont :

- retrouver sur $[T_{j+1}, T_{j+2}]$ la quantité de $S_{1,j+1}$, $WMAX_{gauche,j+1} = WMIN_{droite,j}$, qui est associée à la diminution du sous-niveau $N_{Sup_1,j+1}$,
- une augmentation du niveau global de charge minimale de $[T_j, T_{j+1}]$:

$$WMIN'_j = WMIN_j + WMIN_{droite,j}$$

- une diminution du niveau global de charge maximale de $[T_{j+1}, T_{j+2}]$:

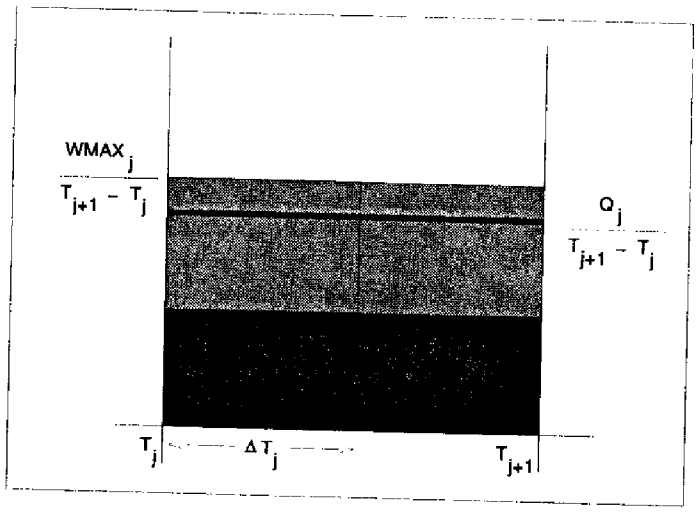
$$WMAX'_{j+1} = WMAX_{j+1} - WMAX_{gauche,j+1}$$



2. Cas de risque de surcharge
Lorsque

$$\frac{WMAX_j}{T_{j+1} - T_j} > \frac{Q_j}{T_{j+1} - T_j}$$

il est nécessaire de diminuer le niveau global de charge maximale.



Pour cela, et conformément aux sous cas 2 et 4 précédents, deux possibilités se présentent :

(a) Conformément au cas 2, échanger une quantité $WMAX_{gauche,j}$ de $S_{1,j}$ avec $[T_{j-1}, T_j]$, en diminuant le sous-niveau $N_{Sup_1,j}$:

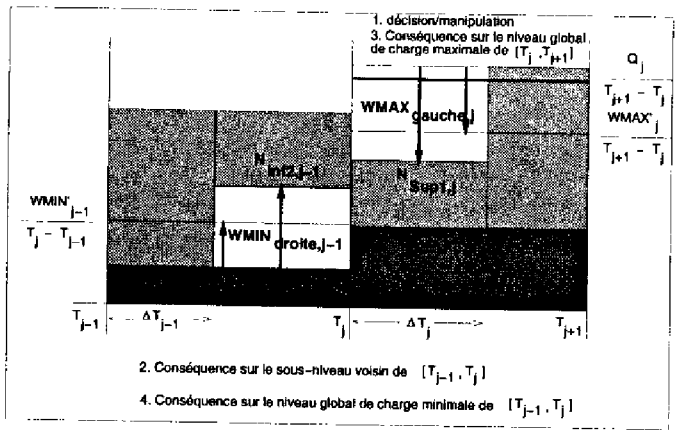
Les conséquences d'une telle décision (ou manipulation) sont :

- retrouver sur $[T_{j-1}, T_j]$ la quantité de $S_{2,j-1}$ $WMIN_{droite,j-1} = WMAX_{gauche,j}$, qui est associée à l'augmentation du sous-niveau $N_{inf_2,j-1}$
- une diminution du niveau global de charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$:

$$WMAX'_j = WMAX_j - WMAX_{gauche,j}$$

- une augmentation du niveau global de charge minimale de $[T_{j-1}, T_j]$:

$$WMIN'_{j-1} = WMIN_{j-1} + WMIN_{droite,j-1}$$



(b) Conformément au cas 4, échanger une quantité $WMAX_{droite,j}$ de $S_{2,j}$ avec $[T_{j+1}, T_{j+2}]$, en diminuant le sous-niveau $N_{Sup_2,j}$:

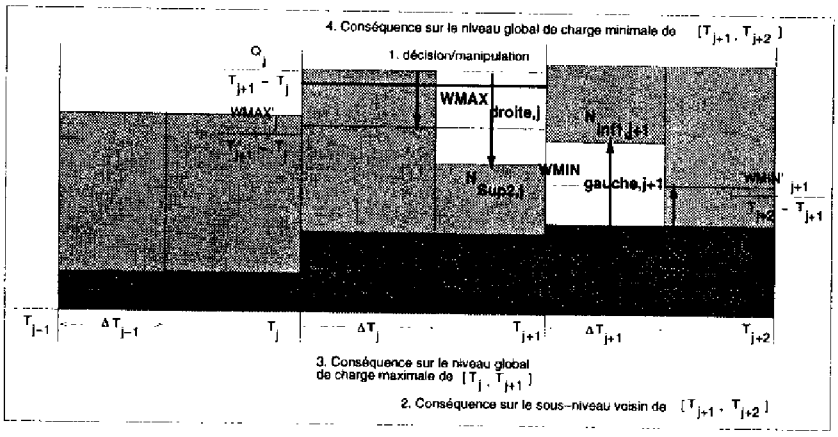
Les conséquences d'une telle décision (ou manipulation) sont :

- retrouver sur $[T_{j+1}, T_{j+2}]$ la quantité de $S_{1,j+1}$, $WMIN_{gauche,j+1} = WMAX_{droite,j}$, qui est associée à l'augmentation du sous-niveau $N_{inf_1,j+1}$
- une diminution du niveau global de charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$:

$$WMAX'_j = WMAX_j - WMAX_{droite,j}$$

- une augmentation du niveau global de charge minimale de $[T_{j+1}, T_{j+2}]$:

$$WMIN'_{j+1} = WMIN_{j+1} + WMIN_{gauche,j+1}$$



II.7 Modélisations mathématiques

II.7.1 Position du problème

Nous avons vu que le problème de régulation de la charge de travail, consiste à diminuer certaines charges maximales $WMAX_j$ et/ou à augmenter d'autres charges minimales $WMIN_j$ sur les intervalles de l'horizon sur lesquels il existe un risque de surcharge et/ou de sous-charge. Cela peut être exprimé de la façon suivante :

$$\begin{gathered} R_j \leq WMIN'_j \\ WMAX'_j \leq Q_j \\ pour\ 0 \leq j \leq n-1\ , où \\ WMAX'_j = WMAX_j - (WMAX_{gauche,j} + WMAX_{droite,j}) \\ WMIN'_j = WMIN_j + (WMIN_{gauche,j} + WMIN_{droite,j}) \\ pour\ 1 \leq j \leq n-2 \end{gathered}$$

avec, concernant les premier et dernier intervalles de l'horizon :

$$\begin{aligned} WMAX'_0 &= WMAX_0 - WMAX_{droite,0} \\ WMIN'_0 &= WMIN_0 + WMIN_{droite,0} \\ WMAX'_{n-1} &= WMAX_{n-1} - WMAX_{gauche,n-1} \\ WMIN'_{n-1} &= WMIN_{n-1} + WMIN_{gauche,n-1} \end{aligned}$$

Le mécanisme de vases communicants est exprimé par l'ensemble des identités suivantes :

$$\begin{aligned} WMAX_{gauche,j} &= WMIN_{droite,j-1} \\ WMAX_{droite,j} &= WMIN_{gauche,j+1} \end{aligned}$$

qui correspondent aux échanges de charge entre intervalles adjacents.

Comme $S_{1,j}$ et $S_{2,j}$ ont été déterminées à partir des contraintes de dates limites, issues des décisions amont du Planning, les contraintes de cohérence vis-à-vis de l'amont doivent être respectées :

$$\begin{gathered} WMAX_{gauche,j} + WMIN_{gauche,j} \leq S_{1,j} \\ WMAX_{droite,j} + WMIN_{droite,j} \leq S_{2,j} \\ pour\ 1 \leq j \leq n-1 \\ et \\ WMAX_{droite,0} + WMIN_{droite,0} \leq S_{2,0} = WMAX_0 - WMIN_0 \\ WMAX_{gauche,n-1} + WMIN_{gauche,n-1} \leq S_{1,n-1} = WMAX_{n-1} - WMIN_{n-1} \end{gathered}$$

Le nombre de ces contraintes peut être diminué en prenant en compte les identités associées aux mécanismes des vases communicants : ainsi,

les contraintes :

$$
\begin{gathered}
WMAX_{droite,0} + WMIN_{droite,0} \leq S_{2,0} \\
WMIN_{gauche,1} + WMAX_{gauche,1} \leq S_{1,1} \\
WMAX_{gauche,n-1} + WMIN_{gauche,n-1} \leq S_{1,n-1} \\
WMAX_{droite,n-2} + WMIN_{droite,n-2} \leq S_{2,n-2} \\
et\ \forall\, j\ 1 \leq j \leq n-1 \\
WMAX_{gauche,j} + WMIN_{gauche,j} \leq S_{1,j} \\
WMAX_{droite,j-1} + WMIN_{droite,j-1} \leq S_{2,j-1}
\end{gathered}
$$

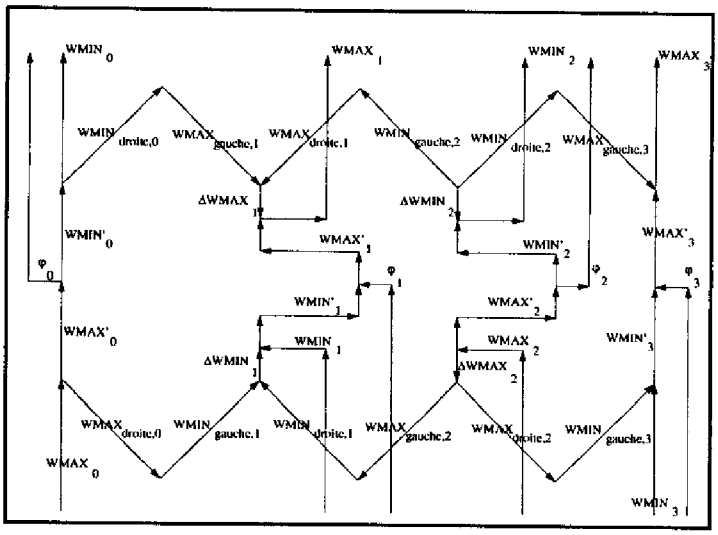
sont les mêmes.

II.7.2 Modèle de flot canalisé

On peut montrer que les variables de décision [THURIOT et AL. 94],

$$
\begin{gathered}
WMAX'_j, WMIN'_j\ pour\ 0 \leq j \leq n-1 \\
et\ WMAX_{gauche,j}, WMIN_{gauche,j}\ pour\ 1 \leq j \leq n-1
\end{gathered}
$$

peuvent être représentées comme un flot canalisé ayant la structure suivante :



II.7.2.1 Conditions nécessaires de cohérence : bornes des arcs

Dans les cas de risque de surcharge ou risque de sous-charge, les conditions nécessaires de **cohérence** des décisions agrégées vis-à-vis des dates planifiées C_i et F_i et des contraintes de capacité et rentabilité, sont assurées par le respect des bornes supérieures et inférieures associées aux arcs.

Les flots circulant sur les arcs de type $\Delta WMAX_j$, pour $1 \leq j \leq n-1$, représentent les quantités de charge agrégée qui sont déplacées à gauche et à droite de chaque intervalle concerné après toute diminution des niveaux de charge maximale. Ainsi : $\Delta WMAX_j = WMAX_{gauche,j} + WMAX_{droite,j}$, pour $1 \leq j \leq n-1$. Pour ces arcs, les flots circulant doivent être compris entre :

- borne inférieure $= max(0, WMAX_j - Q_j)$
- borne supérieure $= (WMAX_j - max(WMIN_j, R_j))$

De manière similaire, les flots circulant sur les arcs de type $\Delta WMIN_j$, $1 \leq j \leq n-1$, représentent les quantités de charge agrégée déplacées à gauche et à droite après chaque augmentation des niveaux de charge minimale. Pour ces arcs, le flot circulant doit être compris entre :

- borne inférieure $= max(0, (R_j - WMIN_j))$
- borne supérieure $= (min(WMAX_j, Q_j) - WMIN_j)$

Comme les arcs de type $WMAX_{gauche,j}$, pour $1 \leq j \leq n-1$, représentent la charge déplacée à gauche après chaque diminution du niveau de charge maximale sur l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$, ils supportent un flot compris entre :

- borne inférieure $= 0$
- borne supérieure $= S_{1,j}$

Les arcs de type $WMIN_{gauche,j}$, pour $1 \leq j \leq n-1$, représentent la charge déplacée à gauche après chaque augmentation du niveau de charge minimale sur l'intervalle $[T_j, T_{j+1}]$. Ces arc supportent un flot compris entre :

- borne inférieure $= 0$
- borne supérieure $= S_{1,j}$

Les arcs de type φ_j, pour $0 \leq j \leq n-1$, représentent la marge globale de charge résiduelle sur chaque intervalle $[T_j, T_{j+1}]$ une fois que les niveaux minimaux et maximaux ont été modifiés. Ils supportent des flots de borne inférieure nulle et

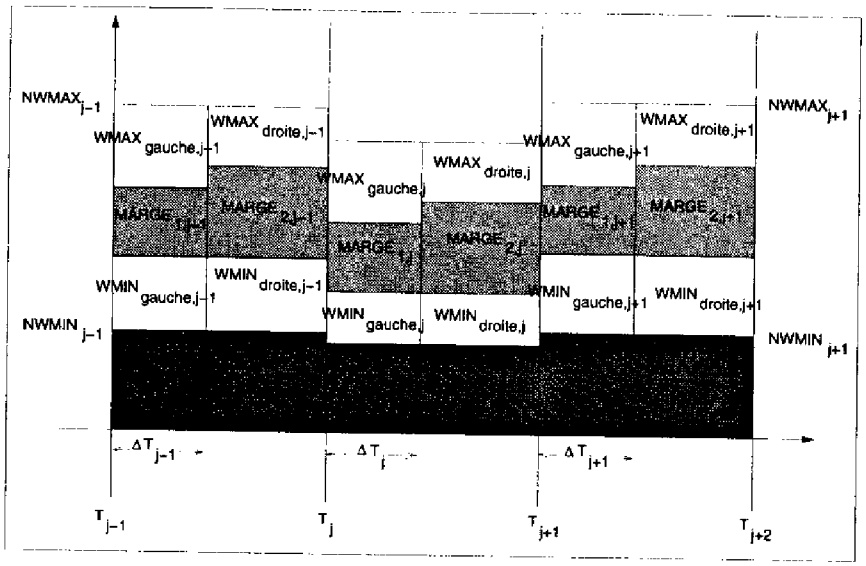


Figure II.9: Marges de manoeuvre disponibles

de borne supérieure égale à $WMAX_j - WMIN_j$ correspondant à la marge globale maximale disponible sur l'intervalle.

Ce modèle peut présenter un risque d'incohérence provenant du fait que les charges cumulées $WMAX_{gauche,j}$, $WMIN_{gauche,j}$ (ou $WMAX_{droite,j}$, $WMIN_{droite,j}$) peuvent se chevaucher.

Des conditions nécessaires supplémentaires de cohérence peuvent être exprimées par les équations suivantes :

$$S_{1,j} = WMAX_{gauche,j} + WMIN_{gauche,j} + MARGE_{1,j}$$
$$pour\ 1 \leq j \leq n-1$$
$$S_{2,j} = WMAX_{droite,j} + WMIN_{droite,j} + MARGE_{2,j}$$
$$pour\ 0 \leq j \leq n-2$$
$$S_{2,j} = S_{1,j+1}\ pour\ 0 \leq j \leq n-2$$
$$MARGE_{2,j} = MARGE_{1,j+1}\ pour\ 0 \leq j \leq n-2$$

Où $MARGE_{1,j}$ et $MARGE_{2,j}$ représentent des quantités non négatives.

Les Stratégies "Machine" présentées par la suite, et reposant sur ce modèle, devront comprendre la vérification de ces conditions.

II.7.3 Modèle de Programmation Linéaire

II.7.3.1 Le critère et les contraintes

Le problème de régulation de charge peut être exprimé comme un problème de programmation linéaire. On peut choisir par exemple un critère d'optimisation qui

maximise la marge de manoeuvre résiduelle globale.

Le problème se réduit à trouver les valeurs $WMAX'_j$, $WMIN'_j$, $WMAX_{gauche,j}$, $WMIN_{gauche,j}$, $WMAX_{droite,j}$, $WMIN_{droite,j}$ que maximisent le critère :

$$f = \sum_{j=0}^{n-1}(WMAX'_j - WMIN'_j)$$

sujet à :

1. **Des contraintes de transfert de charge :**

$$\begin{gathered} WMAX'_j = WMAX_j - (WMAX_{gauche,j} + WMAX_{droite,j}) \\ WMIN'_j = WMIN_j + (WMIN_{gauche,j} + WMIN_{droite,j}) \\ pour\ 1 \leq j \leq n-2\ et\ : \\ WMAX'_0 = WMAX_0 - WMAX_{droite,0} \\ WMIN'_0 = WMIN_0 + WMIN_{droite,0} \\ WMAX'_{n-1} = WMAX_{n-1} - WMAX_{gauche,n-1} \\ WMIN'_{n-1} = WMIN_{n-1} + WMIN_{gauche,n-1} \end{gathered}$$

2. **Des contraintes de marge de charge maximale :**

$$\begin{gathered} WMAX_{gauche,j} + WMIN_{gauche,j} \leq S_{1,j} \\ pour\ 1 \leq j \leq n-1 \end{gathered}$$

3. **Des contraintes de vases communicants :**

$$\begin{gathered} WMAX_{gauche,j} = WMIN_{droite,j-1} \\ WMIN_{gauche,j} = WMAX_{droite,j-1} \\ pour\ 1 \leq j \leq n-1 \end{gathered}$$

4. **Des contraintes de capacité et de rentabilité :**

$$\begin{gathered} R_j \leq WMIN'_j \\ WMAX'_j \leq Q_j \\ pour\ 0 \leq j \leq n-1 \end{gathered}$$

Les valeurs connues sont (données initiales) : $WMAX_j, WMIN_j$ *pour* $0 \leq j \leq n-1$ et $S_{1,j}$ *pour* $1 \leq j \leq n-1$.

Les valeurs à déterminer (inconnues) sont : $WMAX'_j, WMIN'_j$ *pour* $0 \leq j \leq n-1$ et $WMAX_{gauche,j}, WMIN_{gauche,j}$ *pour* $1 \leq j \leq n-1$.

II.7.3.2 Représentation matricielle

Le vecteur d'inconnues, et qui représente les variables de décisions pertinentes (nouveaux niveaux de charge, charges a déplacer pour la régulation agrégée), est :

$$\begin{pmatrix} WMAX'_0 \\ WMAX'_1 \\ \vdots \\ WMAX'_{n-1} \\ WMIN'_0 \\ WMIN'_1 \\ \vdots \\ WMIN'_{n-1} \\ WMAX_{gauche,1} \\ WMAX_{gauche,2} \\ \vdots \\ WMAX_{gauche,n-1} \\ WMIN_{gauche,1} \\ WMIN_{gauche,2} \\ \vdots \\ WMIN_{gauche,n-1} \end{pmatrix}$$

Nous avons considéré comme inutile la présence des variables $WMAX_{droite,j}$, $WMIN_{droite,j}$ pour $0 \leq j \leq n-2$, celles-ci étant égales aux inconnues $WMIN_{gauche,j+1}$, $WMAX_{gauche,j+1}$.

Pour obtenir une régulation **robuste** et qui laisse la plus grande marge de charge globale résiduelle, tout en respectant les contraintes de ressource, le problème doit se poser en termes de maximisation d'une fonction objectif du type :

$$f = \sum_{j=0}^{n-1} (WMAX'_j - WMIN'_j) =$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & -1 & -1 & \dots & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} WMAX'_0 \\ WMAX'_1 \\ \vdots \\ WMAX'_{n-1} \\ WMIN'_0 \\ WMIN'_1 \\ \vdots \\ WMIN'_{n-1} \end{pmatrix}$$

Les différentes contraintes présentées dans le paragraphe précédent, peuvent être exprimées en forme matricielle de la façon suivante :

Les contraintes de transfert de charge :

$$\mathbf{A}\begin{pmatrix} WMAX'_0 \\ WMAX'_1 \\ \vdots \\ WMAX'_{n-1} \\ WMIN'_0 \\ WMIN'_1 \\ \vdots \\ WMIN'_{n-1} \\ WMAX_{gauche,1} \\ WMAX_{gauche,2} \\ \vdots \\ WMAX_{gauche,n-1} \\ WMIN_{gauche,1} \\ WMIN_{gauche,2} \\ \vdots \\ WMIN_{gauche,n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} WMAX_0 \\ WMAX_1 \\ \vdots \\ WMAX_{n-1} \\ WMIN_0 \\ WMIN_1 \\ \vdots \\ WMIN_{n-1} \end{pmatrix}$$

où $\mathbf{A} =$

$\mathbf{I}_n$	$\mathbf{O}_{nxn}$	$\mathbf{O}_{1x(n-1)}$ / $\mathbf{I}_{n-1}$	$\mathbf{I}_{n-1}$ / $\mathbf{O}_{1x(n-1)}$
$\mathbf{O}_{nxn}$	$\mathbf{I}_n$	$-\mathbf{I}_{n-1}$ / $\mathbf{O}_{1x(n-1)}$	$\mathbf{O}_{1x(n-1)}$ / $-\mathbf{I}_{n-1}$

avec $\mathbf{I}_n$ la matrice identité d'ordre n, et $\mathbf{O}_{mxn}$ une matrice nulle de m lignes et n colonnes.

Les contraintes de marge de charge maximale :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I}_{n-1} | \mathbf{I}_{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} WMAX_{gauche,1} \\ WMAX_{gauche,2} \\ \vdots \\ WMAX_{gauche,n-1} \\ WMIN_{gauche,1} \\ WMIN_{gauche,2} \\ \vdots \\ WMIN_{gauche,n-1} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} S_{1,1} \\ S_{1,2} \\ \vdots \\ S_{1,n-1} \end{pmatrix}$$

Les contraintes de capacité et rentabilité :

$$\mathbf{I}_n \begin{pmatrix} WMAX'_0 \\ WMAX'_1 \\ \vdots \\ WMAX'_{n-1} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} Q_0(T_1 - T_0) \\ Q_1(T_2 - T_1) \\ \vdots \\ Q_{n-1}(T_n - T_{n-1}) \end{pmatrix}$$

et

$$\mathbf{I}_n \begin{pmatrix} WMIN'_0 \\ WMIN'_1 \\ \vdots \\ WMIN'_{n-1} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} R_0(T_1 - T_0) \\ R_1(T_2 - T_1) \\ \vdots \\ R_{n-1}(T_n - T_{n-1}) \end{pmatrix}$$

Une telle modélisation représente un problème type de programmation linéaire, pouvant être supporté par les logiciels existants. Le choix de la fonction à optimiser dépend des préférences.

Nous pouvons aussi envisager les fonctions du type :

$$f = \sum_{j=0}^{n-1} c_j (WMAX'_j - WMIN'_j)$$

Où les coefficients c_j expriment le coût du transfert de charge entre intervalles voisins.

En choisissant $c_j = 1$, on assure que les transferts de charge seront équitables entre intervalles voisins. Dans ce cas de figure, la marge de manoeuvre de charge globale est optimisée. En utilisant différentes valeurs pour les coefficients c_j, certains transferts de charge entre intervalles peuvent être privilégiés, et d'autres évités ou minimisés.

II.7.3.3 Perspectives

Le modèle de Programmation Linéaire présenté ici a fait l'objet d'une mise en oeuvre avec l'aide du logiciel LINDO, programmable sur PC ; la cohérence des décisions est assurée directement par le respect des diverses contraintes linéaires. Le principal avantage de ce modèle par rapport à celui du flot canalisé est qu'il respecte certaines conditions de cohérence supplémentaires ou contraintes de marge de charge résiduelle, présentées au paragraphe précédent. Cependant, de nouveaux tests devront être réalisés sur le modèle pour pouvoir dégager ses limites et l'inclure comme une fonctionnalité dans le prototype actuel, et qui est présenté dans le paragraphe suivant.

II.8 Application : MARGE 1

II.8.1 Description générale de l'interface

Les éléments théoriques présentés jusqu'à maintenant ont servi de base pour le développement d'une interface graphique d'aide à la décision de régulation de la charge de travail. Pour sa réalisation, nous avons utilisé le générateur d'interface Aïda [ILOG 91] programmable en Le-Lisp autour d'un langage à objets de description d'images qui réduit la programmation de l'interface Utilisateur à l'assemblage de composants élémentaires (barres de défilement, menus, boutons, éditeurs de lignes, etc) dont il suffit de définir les réactions à différents événements (souris,clavier).

MARGE 1 : **M**odule d'**A**ide à la décision de **R**égulation de charge, **G**raphique et **E**rgonomique, propose un support graphique interactif pour aider les décisions agrégées de régulation de charge de travail, en fonction du carnet de commandes, et dans le but d'assurer la cohérence avec les contraintes de capacités minimale et maximale de la ressource agrégée considérée. Le module MARGE 1 permet à l'Utilisateur de raisonner et prendre des décisions directement sur le concept agrégé de charge, à travers des manipulations de marges et niveaux de charge. L'assistance de l'ordinateur réside essentiellement dans le maintien, en permanence, de la cohérence des décisions vis-à-vis de l'environnement et traduites à l'écran par des butées graphiques calculées en temps réel, et dans l'anticipation de certains effets, associés aux processus automatiques de glissements de charge, traduits pour l'Utilisateur par la métaphore des vases communicants.

Sur le plan conceptuel, MARGE 1 utilise essentiellement des objets graphiques affichés sur l'écran. Le langage à objets propre à Aïda permet d'associer à chaque objet plusieurs fonctionnalités (les méthodes) qui vont permettre définir ses comportements.

MARGE 1 est composé de 4 écrans :

L'écran 1 présente les données du problème de régulation de la charge sur une ressource donnée : un ensemble d'opérations distribuées dans le temps, et possédant des marges temporelles. Sur cet écran sont proposés plusieurs outils d'aide à l'élaboration de la Structure Adjacente ou décomposition temporelle du problème.

La présence d'un menu dénote l'existence de stratégies décisionnelles différentes, laissant plus ou moins de latitude décisionnelle à l'Utilisateur, donc à la machine.

L'écran 2 présente les courbes de charge maximale et minimale issues des données initiales : cet écran permet de visualiser la marge de charge révélée par la Structure Adjacente choisie à l'aide de l'écran 1.

L'écran 3 présente les courbes de ressource : capacités maximale et minimale (ou contraintes de ressource), constantes par intervalles compris entre les dates prévisionnelles de changement.

L'écran 4 présente une "superposition" des courbes de charge et de ressource, et propose des outils d'aide à la régulation agrégée, consistant à modifier les niveaux de charge de manière à les rendre cohérents (compatibles) avec les niveaux de ressource.

II.8.2 écran 1

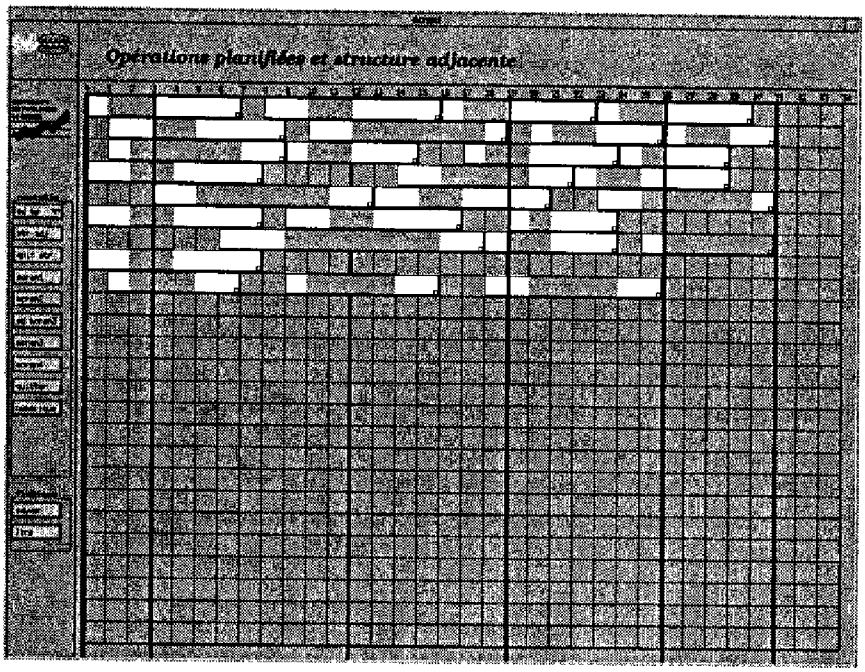


Figure II.10: écran 1

Il comporte différentes classes d'objets, caractérisées par des attributs et des comportements définis sur le prototype.

Les objets qui sont affichés sur l'écran 1 sont : l'axe temporel, les différentes opérations planifiées, les boutons menus qui gèrent le comportement dynamique de l'interface, la grille et les bornes temporelles qui représentent la Structure Adjacente choisie. En général, chaque classe d'objets présente un ensemble d'attributs géométriques qui vont faciliter leur affichage. Le comportement dynamique de l'interface est définie par les attributs associés à chaque objet : ce sont des fonctions qui permettent de répondre aux commandes des Utilisateurs.

II.8.2.1 Représentation des opérations et manipulations de l'Utilisateur

Chaque opération est identifiée par deux rectangles :

- un rectangle appelé "fenêtre" en blanc, et
- un rectangle déplaçable à l'intérieur, appelé "tâche" en bleu.

Pour la classe d'objets du type **opérations**, les attributs graphiques sont modifiables par le Décideur dans les limites ou contraintes de cohérence vis-à-vis de l'amont. Il s'agit donc de respecter les dates de début au plus tôt et fin au plus tard fixés par le Planning. Ainsi, les butées graphiques assurées par l'ordinateur consistent à interdire :

1. l'agrandissement, ou la translation d'une fenêtre,
2. la translation d'une tâche à l'extérieur de sa fenêtre.

II.8.2.2 Axe temporel, quadrillage, bornes temporelles

L'horizon temporel est représenté par un axe numéroté de la date 0 à la date 34. Un sous-menu permet de modifier le nombre de divisions de l'horizon.

Nous n'avons pas choisi de valeurs précises pour les unités de temps car nous voulions concevoir un prototype le plus ouvert possible sans nous contraindre sur les classifications techniques des calendriers, justifiables dans un logiciel "industrialisable" et non dans un prototype de laboratoire.

Un espace de travail quadrillé comportant des opérations planifiées dessinées, et des bornes temporelles de la Structure Adjacente (barres verticales noires), est utilisé par le Décideur pour décomposer l'axe temporel en Structure Adjacente.

II.8.2.3 Décomposition en Structure Adjacente

Trois stratégies proposées permettent construire une Structure temporelle Adjacente : une Stratégie Homme, une Stratégie Machine, et une Stratégie Hybride Homme-Machine.

- **Stratégie Homme :**
  Selon cette Stratégie, l'Utilisateur choisit, en cliquant sur un repère du quadrillage, la borne initiale T_0 de sa Structure Adjacente. Par la suite, et à chaque étape des décisions, la "machine" lui fournit des butées graphiques lui permettant de sélectionner de nouvelles bornes de type T_{-j} et T_j, tout en respectant la contrainte d'adjacence.

- **Stratégie Machine :**
  Dans ce cas, la Machine calcule la Structure Adjacente minimale, à partir du choix de l'Utilisateur d'une borne initiale, et conformément à la procédure présentée en II.4.2.

- **Stratégie Homme-Machine :**
  La Structure Adjacente minimale, calculée par la Machine conformément à la Stratégie présentée ci-dessus, peut être modifiée par l'Utilisateur, bénéficiant du calcul temps réel des butées graphiques lui assurant le respect de la contrainte d'adjacence.

II.8.3 écran 2

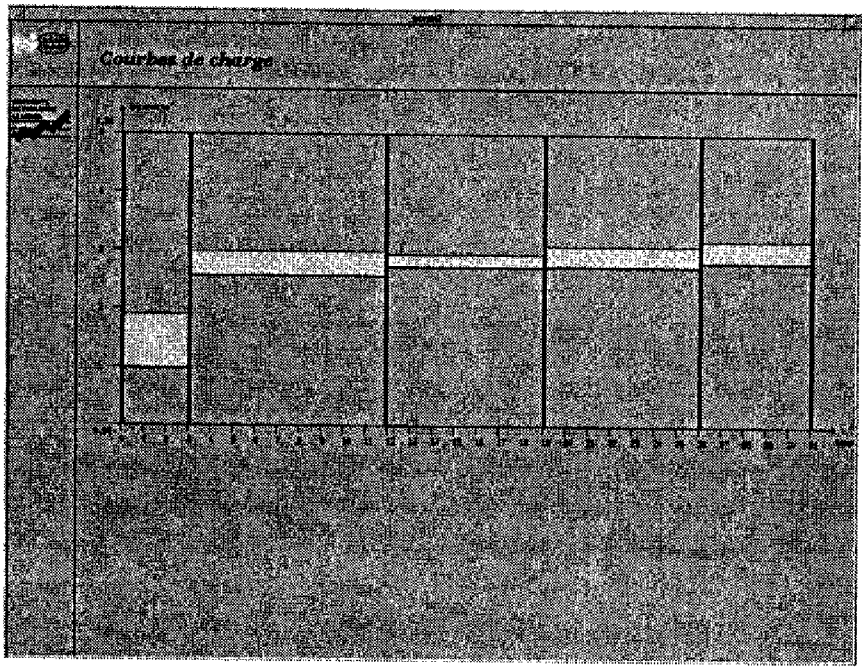


Figure II.11: écran 2

L'écran 2 fournit automatiquement les courbes de charge issues des données précédentes et référées selon la Structure temporelle Adjacente choisie par l'Utilisateur.

L'axe des abscisses (temps) représente l'horizon temporel sur lequel on retrouve les bornes temporelles de la Structure Adjacente et l'axe des ordonnées (travail) représente les niveaux moyens de charge. Pour chacun des intervalles de temps, deux quantités de travail (ou charges de travail associées aux intervalles) sont déterminées :

- La charge de travail minimale $WMIN$ (surface en bleu foncé).
- La charge de travail maximale $WMAX$ (sommes des surfaces bleues : foncé et clair)

La surface en bleu clair représente la marge de charge, c'est-à-dire, la marge de manoeuvre sur le travail dont on dispose sur un intervalle donné.

II.8.4 écran 3

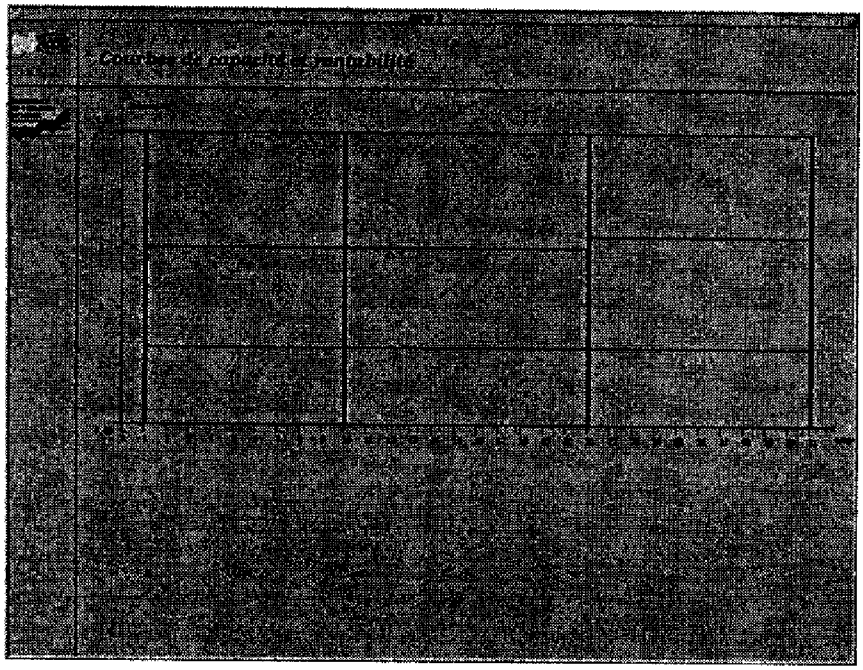


Figure II.12: écran 3

L'écran 3 représente les courbes de capacités maximale et minimale de la ressource agrégée considérée. MARGE 1 étant un prototype de laboratoire, cet écran est édité à partir des données entrées manuellement sur un tableau. Il permet de visualiser, en rouge, les courbes de ressources.

Comme ce travail concerne uniquement les décisions portant sur la charge, mais non, jusqu'à présent, sur les ressources, les courbes rouges sont considérées comme des contraintes à respecter : elles ne sont pas modifiables par la suite sur l'écran 4.

II.8.5 écran 4

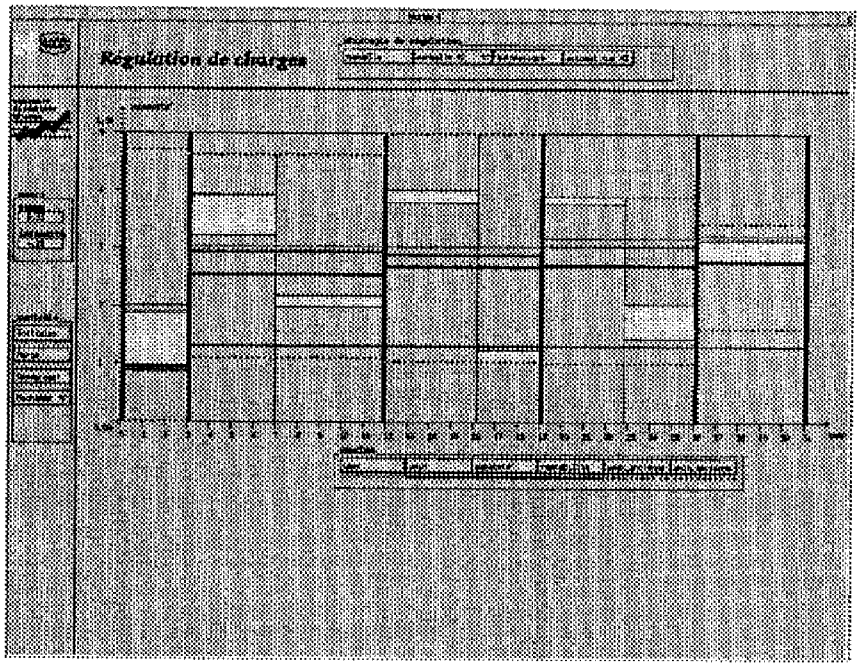


Figure II.13: écran 4

Sur l'écran 4 sont représentées :

1. les courbes de charge minimale et maximale, en bleu (calculées au niveau de l'écran 2), et

2. les courbes de contraintes de ressources de capacités maximale et minimale, en rouge (calculées au niveau de l'écran 3).

II.8.5.1 Représentation des charges et des capacités, et manipulations de l'Utilisateur

La superposition entre les courbes de charge et les courbes de capacités de ressource est effectuée automatiquement par l'ordinateur. Une modification du référentiel temporel des courbes de ressources est nécessaire de façon à obtenir un référentiel commun (la Structure Adjacente choisie) pour la charge et pour la ressource. Cette modification est réalisée par simple intégration numérique des courbes de capacités maximale et minimale sur chaque intervalle de la Structure Adjacente choisie.

Les charges présentées sur l'écran 4 sont des agrégations ou des cumuls faits sur les quantités de travail associées aux opérations de l'écran 1.

Conformément aux éléments théoriques présentés dans ce chapitre, les décisions de régulation vont se faire par abaissements et/ou élévations de sous-niveaux de charges.

La représentation graphique étant celle présentée jusqu'alors, l'Utilisateur peut choisir un mode d'interaction Homme-Machine, selon les trois types de Stratégies :

- Stratégies Homme

  1. Une première Stratégie Homme consiste à modifier directement les sous niveaux de charges, tout en bénéficiant des calculs en temps réel de la machine, en termes de :

     (a) transfert sur le sous-niveau voisin concerné,

     (b) conséquences sur le niveau global de l'intervalle considéré, ainsi que celui de son voisin.

  2. Une seconde Stratégie Homme permet à l'Utilisateur de modifier, en premier lieu, le niveau de charge global d'un intervalle, qu'il désire rendre cohérent vis-à-vis d'une contrainte de capacité. Lui est ensuite proposé un outil graphique lui permettant de choisir les parties "droite" (charge transférée sur l'intervalle précédent) et "gauche" (charge transférée sur l'intervalle suivant) constituant la marge de charge consommée.

- Stratégies Machine
  Selon laquelle l'ordinateur calcule une solution qui laisse la plus grande marge de charge résiduelle possible, à l'aide du calcul du flot maximum sur le graphe de flot canalisé présenté en II.7.2. Des décisions **robustes** de régulation agrégée sont ainsi obtenues.

- Stratégie Hybride Homme-Machine
  Permet à l'Utilisateur de modifier la solution calculée selon la Stratégie Ma-

chine, tout en bénéficiant des calculs de l'ordinateur utilisés dans la Stratégie Homme.

II.8.6 Validation ergonomique de MARGE 1

Une première étape de validation ergonomique de MARGE 1 en laboratoire a été effectuée dans le cadre d'une maîtrise en psychologie [DE BRITO et PIDOUX 93]. Il s'agissait de valider le principe de raisonner et faire de manipulations graphiques sur des marges de travail. Il ne s'agissait pas de valider l'interface intégralement, et, en particulier, de vérifier le respect de divers critères ergonomiques courants [SCAPIN 86]. Ainsi, par exemple, le choix des titres et codes, l'emplacement des menus, boutons, icones, ..., n'ont pas été étudiés. Cette expérience a consisté à soumettre à 12 étudiants, des problèmes de régulation de charge, avec et/ou sans l'aide du logiciel MARGE 1.

MARGE 1 a été conçue dans le but d'aider les Utilisateurs à réguler la charge de travail sur un horizon temporel découpé en intervalles de temps. Ce problème impose le respect de marges (de charge de travail et de temps des opérations planifiées) disponibles dans le cadre de décisions cohérentes avec celles prises en amont. Ainsi, au niveau agrégé, le logiciel interdit les actions visant à augmenter le niveau de travail maximum ou diminuer le niveau de travail minimum ou modifier les niveaux de capacités maximale et minimale. L'utilisation de l'interface suppose donc la compréhension des dimensions suivantes [VALAX et AL. 93] :

- les éléments constitutifs du problème : les différents niveaux et les marges correspondantes.
- le but : nouveaux niveaux de travail maximum et minimum à l'intérieur de l'espace délimité par les niveaux de capacités maximale et minimale.
- les moyens disponibles pour atteindre ce but : modifier des niveaux ou sous-niveaux de charges, en bénéficiant des mécanismes automatiques de vases communicants.
- des contraintes sur les moyens : ne pas augmenter le niveau de travail maximum, ne pas abaisser le niveau de travail minimum, ne pas agir sur les niveaux de capacités de ressource.

Les 12 sujets ont été répartis en deux groupes, devant résoudre successivement trois problèmes de complexité croissante : deux à l'aide de papier crayon (forme graphique et/ou textuelle) et un à l'aide de l'écran 4 de MARGE 1.

Groupes Passations	A		B	
1	Textuelle		Graphique	
2	Logiciel			
3	Textuelle	Graphique	Textuelle	Graphique

A l'aide d'une grille issue du modèle de traitement de l'information [PELISSIER], les données, verbalisations et actions ont été analysées sur chacun des 36 protocoles (les 12 étudiants devant résoudre chacun 3 problèmes différentes). Un analyse des erreurs commises, a permis d'étudier les questions liées :

- aux difficultés de raisonnement sur des marges.
- à la compatibilité entre forme graphique du problème et représentation interne des Décideurs.
- à la facilitation de l'apprentissage par l'interface (approche graphique, contraintes et butées graphiques liées aux diverses manipulations).

Relativement aux trois questions posées, les résultats montrent que :

1. Difficultés du problème :
   les sujets raisonnent sur les niveaux minimaux et maximaux de charge sur l'ensemble des intervalles, plutôt que sur la marge de charge disponible sur chaque intervalle. Ce raisonnement permet de trouver une solution au problème d'élaboration d'un plan de charge, mais moins rapidement qu'en raisonnant sur chaque intervalle.

2. Forme graphique vs textuelle :
   confronté au texte, les sujets construisent spontanément le problème sous forme de tableau ; après passage sur le logiciel, l'usage du graphique se généralise. La résolution par niveaux est plus fréquente avec la présentation textuelle. La transformation de la marge de charge en niveau moyen (moyenne entre niveaux minimal et maximal de charge), est plus fréquente avec la représentation textuelle.

3. Apprentissage :
   Les possibilités et contraintes de manipulations offertes par le logiciel favorisent la compréhension du problème, le raisonnement par niveaux baissant progressivement au profit d'un nouveau (et plus efficace) raisonnement par marges.

Les résultats concernant la **performance**, et les **erreurs de compréhension** du problème de régulation de charge ont été quantifiées [VALAX et AL. 93] par

rapport aux éléments constitutifs du problème, le but, les moyens, et les contraintes sur les moyens.

69,7% des problèmes ont été résolus avec succès, mais seulement 11,1% n'ont donné lieu à aucune erreur sur l'une ou l'autre des dimensions. L'apprentissage est rapide, et le passage sur le logiciel le favorise : premier problème, 16,7% de réussite ; deuxième problème, 91,7% ; troisième problème, 100%.

Les erreurs de compréhension les plus fréquentes concernent :

- les éléments du problème : Définition de la "quantité de travail" (16,7% des protocoles) et de la "quantité de ressource" (16,7%) ; mais essentiellement sur le problème 2.

- le but : "La charge maximale doit être égale à la capacité" (36,1%) ; essentiellement sur les problèmes 1 et 2.

- les moyens : "Transfert inégal sur les intervalles adjacents" (61,1%) ; "Transfert sur le même niveau" (47,7% -i.e., baisser le niveau de travail maximal sur un intervalle et transférer la charge correspondante sur le niveau de travail maximal des intervalles adjacents) ; "Transfert dans le même sens" (30,6% -i.e., enlever de la charge sur le deuxième intervalle parce qu'on l'a fait sur le premier). Ces erreurs diminuent du premier au troisième problème, mais augmentent ou restent stables du premier au deuxième.

- les contraintes sur les moyens : "Augmenter la charge maximale" (52,8%) et "Diminuer la charge minimale" (22,2 %). Si l'erreur sur la charge minimale diminue régulièrement du problème 1 (25%) au problème 3 (16,7%), l'erreur sur la charge maximale est plus fréquente sur le problème 2 (66,7%) que sur le problème 1 (41,7%) et baisse relativement peu sur le problème 3 (50%).

II.9 Conclusion

L'approche proposée et illustrée par le logiciel MARGE 1 semble "conceptuellement faisable" : certains mécanismes et représentations graphiques portant sur les divers types de marges ont été analysés, et ont fait l'objet d'un premier ensemble de réalisations informatiques. De plus, les différences entre représentations mentales et représentations logicielles ne semblent pas faire l'objet de conflits ou blocages importants, et s'avèrent prometteuses dans le cadre de l'apprentissage d'une façon nouvelle, et supposée plus efficace, d'aborder les décisions agrégées de régulation de charge sous l'angle de la gestion d'une autonomie limitée mais explicite. Cependant, il s'agit encore de résultats et d'un produit de laboratoire, les plus génériques et ouverts possible.

La validation sur site réel devra donc se faire dans le cadre d'une méthodologie claire, faisant intervenir conjointement les approches psychologiques, ergonomiques, automatiques et informatiques, et prévoyant une étape d'Analyse de

l'Existant pour dégager les besoins spécifiques au site, une étape de Conception d'un logiciel adapté, sur la base des concepts, mécanismes, fonctionnalités présentés par MARGE 1, et une étape d'Intégration, posant les problèmes particuliers d'évolutivité, d'appropriation, de formation. Concernant le seul niveau agrégé des décisions du type plan de charge, le prototype existant doit faire l'objet d'une étude de faisabilité (tant sur le plan automatique et informatique que sur celui de la psychologie du travail et de l'ergonomie) pour son intégration dans le progiciel ORDO [LE GALL 89], installé sur une quarantaine de sites. Une étude de ce type a été réalisée avec le cabinet VILLAUMIE commercialisant ORDO, dans le cadre d'un DESS de Sciences Cognitives et d'Interactions Hommes-Machines [AVALLONE 94]. Cette étude, complétée d'une analyse rigoureuse sur le plan informatique, a confirmé :

- d'une part, la faisabilité d'une telle intégration,
- d'autre part, la pertinence des différents concepts et outils graphiques associés, vis-à-vis des besoins réels des Utilisateurs d'ORDO.

Elle devrait déboucher sur un ensemble de spécifications, précisant en autre :

- une, ou plusieurs instanciations des structures adjacentes choisies, adaptées aux cas les plus courants, et prévoyant quelques spécificités si nécessaire.
- les cas non étudies dans notre travail, mais plus courants et "faciles" à gérer, de surcharge et/ou sous-charge inévitables.

Les résultats concernant notre travail autour de certains aspects des processus décisionnels de désagrégations entre l'étape agrégée d'élaboration d'un plan de charge et l'étape détaillée sur le plan d'opérations associé, sont présentés dans le chapitre suivant.

Bibliographie

[ALLEN 81] **J.F. ALLEN**
"An interval based representation of temporal knowledge ". 7th IJCAI, Vancouver, 1981.

[ALLEN 83] **J.F. ALLEN**
"Maintening knowledge about temporal intervals". Communications of the ACM, 1983.

[AVALLONE 94] **M. AVALLONE**
"Contribution à l'Intégration du prototype de Régulation de Charge MARGE dans le progiciel d'ordonnancement ORDO". DESS de Sciences cognitives et d'Interactions Hommes-Machines. Université Toulouse Le Mirail. 1994.

[BECHTE 88] **W. BECHTE**
"Theory and practice of load-oriented manufacturing control". Int. J. Prod. Res., 1988, Vol. 26, No. 3, 375-395.

[BECHTE 94] **W. BECHTE**
"Load-oriented manufacturing control just-in-time production for job shops". Production Planning and Control, 1994, Vol. 5. No. 3, 292-307.

[BERTRAND 83] **J.W.M. BERTRAND**
"The effect of workload dependent due-dates on job-shop performance ". Management Science. Vol. 29, No. 7, 1983.

[BERTRAND 81] **J.W.M. BERTRAND**
"Production control and information systems for Component manufacturing shops". Elsevier. 1981.

[CELLIER et AL.] **J.M. CELLIER, M.F. VALAX, J. ERSCHLER, C. THURIOT**
"Rapport préliminaire sur une analyse des fonctions planification-ordonnancement de la Division Systèmes de l'ATS".

[DE BRITO et PIDOUX 93] **G. DE BRITO, C. PIDOUX**
"Contribution à la validation d'une interface d'aide à l'Organisation du Travail

dans les Ateliers : Problème de lissage de charge ". Maîtrise de Psychologie. Université Toulouse Le Mirail. 1993

[HUGUET 94] **M.J. HUGUET**
"Approche par contraintes pour l'aide à la décision et à la coopération en Gestion de Production". Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse. Informatique Industrielle. 1994.

[ILOG 91] **ILOG**
"Aïda, Guide de Programmation". Version 1.65.

[LE GALL 89] **A. LE GALL**
"Un système interactif d'aide à la décision pour l'ordonnancement et le pilotage en temps réel d'atelier". Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1989.

[LOMPRE et AL. 94] **N. LOMPRE, C. THURIOT, F. TORRES**
"MARGE : Module d'Aide à la Régulation de Charge Graphique et Ergonomique ". Rapport LAAS No. 94032. 1994.

[LOPEZ 91] **P. LOPEZ**
"Approche énergétique pour l'ordonnancement de tâches sous contraintes de temps et de ressources". Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1991.

[PELISSIER] **J. PELISSIER**
"Utilisation des statistiques en psychologie ". Privat.

[PORTMANN 88] **M. PORTMANN**
"Méthodes de décomposition spatiales et temporelles en ordonnancement de la production". RAIRO-APII. Vol 22, 1988, 439-451.

[SCAPIN 86] **D. SCAPIN**
"Guide ergonomique de conception des interfaces homme-machine ". Rapport de recherche INRIA, No. 77. 1986.

[THURIOT et AL. 94] **C. THURIOT, F. TORRES, M.F. VALAX**
"A new approach for Computer Assisted Human Diagnosis and Decisions in Manufacturing Workshops". 1994.

[THURIOT et TORRES 92] **C. THURIOT, F. TORRES**
"Interface graphique pour l'aide à la décision de répartition de charges de travail". ERGO-IA. 1992.

[THURIOT et VALAX 93] **C. THURIOT, M.F. VALAX**
"Aides Logicielles à l'Organisation du Travail dans les Ateliers de Productions Discrètes et Diversifiées". 1993

[VALAX 86] **M.F. VALAX**
"Cadre temporel et planification des tâches quotidiennes". Thèse de Doctorat Psychologie du travail. Université Toulouse Le Mirail. 1986.

[VALAX et AL. 93] **M.F. VALAX, N. LOMPRE, C. THURIOT, E. TREMBLAY**
"Approche Traitement de l'Information pour la Validation d'une Interface d'Aide à la Régulation de la Charge". 1993

Chapitre III

Régulation Détaillée de la Charge

III.1 Introduction

L'approche présentée consiste donc à modifier les charges au niveau agrégé de façon à respecter les contraintes de capacités de ressource ; au niveau détaillé des opérations, ces décisions doivent être mises en oeuvre par des modifications de leurs fenêtres de manière à correspondre aux nouvelles charges. Il s'agit des décisions de re-planification des opérations.

De telles décisions peuvent simplement porter sur la réactualisation de certaines dates (de début au plus tôt, et/ou de fin au plus tard). Elles peuvent aussi, pour certaines opérations, ou même leur ensemble, être accompagnées de décisions d'affectation et de séquencement aux divers exemplaires de la ressource considérée, pouvant aller jusqu'à l'ordonnancement.

Ce choix du niveau de précision des décisions est laissé à l'Utilisateur en fonction de sa pertinence vis-à-vis de la situation.

De telles décisions, encore appelées de désagrégation des décisions sur les charges, s'apparentant aux problèmes d'ordonnancement, nous présenterons les approches courantes de ces derniers.

Nous expliciterons ensuite les relations entre les décisions agrégées sur les charges, et les décisions détaillées sur les opérations, proposant entre autre quelques exemples d'heuristiques concernant les Stratégies Machine pour la réactualisation des dates.

Nous verrons alors quelques éléments concernant les décisions complémentaires d'affection et de séquencement, puis nous présenterons notre application MARGE 2, de cette partie détaillée du problème de régulation.

III.2 Problèmes d'ordonnancement

III.2.1 Définition et concepts généraux

Les travaux qui portent sur l'ordonnancement sont nombreux, et donnent lieu en permanence à des nouvelles méthodes, nouveaux résultats, nouvelles publications. Les synthèses sont elles mêmes fréquentes et toujours réactualisées ; représentant un travail énorme, elles se font souvent dans le cadre d'un groupe de réflexion [GOTHA 93]. Nous nous contentons ici de proposer une présentation générale et non exhaustive, largement inspirée de la classification de [LOPEZ 91]. Ne prétendant pas dresser une liste complète et détaillée, nous rappellerons cependant quelques concepts, principes et approches utilisés dans la littérature.

Un problème d'ordonnancement se pose lorsqu'il s'agit d'organiser l'exécution de diverses **tâches** soumises à des **contraintes**, auxquelles sont attribuées des **ressources**, pour réaliser un objectif donné. Cette définition est générique : les caractéristiques du problème d'ordonnancement vont dépendre du contexte dans lequel il se pose.

III.2.1.1 Les tâches

Une tâche est un travail élémentaire, dont la réalisation nécessite un certain nombre d'unités de temps (sa durée) et d'unités de chaque ressource (par exemple : un opérateur, une machine, un outil spécifiques). Elle peut être morcelable, ou préemptive, lorsqu'elle peut être exécutée par morceaux, ou interrompue, ou bien non morcelable ou non préemptive, lorsqu'elle doit être exécutée sans interruption.

III.2.1.2 Les ressources

Une ressource est un moyen, technique ou humain, dont la disponibilité limitée ou non est connue à priori.

On distingue trois types de ressources :

- Les ressources renouvelables
- Les ressources consommables
- Les ressources doublement contraintes

Une ressource est **renouvelable** si après avoir été allouée à une tâche, elle redevient disponible pour les autres. Les ressources renouvelables usuelles sont les machines, les processeurs, les fichiers, le personnel, etc.

Une ressource est **consommable** si, après avoir été allouée à une tâche, elle n'est plus disponible pour les tâches restant à exécuter. C'est le cas du budget financier attribué, des matières premières, etc.

Une ressource est **doublement contrainte** si elle est consommable et non renouvelable.

On peut distinguer aussi deux types de ressources selon leur utilisation par les tâches :

- Les ressources **disjonctives**, qui sont utilisables par une seule à la fois.
- Les ressources **cumulatives** qui, elles, sont utilisables par plusieurs tâches simultanément.

III.2.1.3 Les contraintes

Les contraintes spécifiques aux problèmes d'ordonnancement ou de décisions sur le plan d'opérations, sont généralement les suivantes :

1. **Les contraintes de disponibilité instantanée des ressources** concernent les limites sur le nombre de ressources disponibles à un instant donné, compte tenu [LE GALL 89] :
   - du parc des ressources et de leurs plages de fonctionnement respectives.
   - des affectations prévues ou actuelles (ressources en cours de fonctionnement).
   - des pannes et arrêts divers.
   - des temps de préparations, etc.
2. **Les contraintes temporelles relatives aux tâches.** Ce sont par exemple :
   - des contraintes de dates de début au plus tôt et fin au plus tard, issues du centre de décision du Planning, à partir d'un calcul de besoins (du type MRP), en jalonnant dans le temps les gammes de fabrication, et en tenant compte des délais des commandes et de différentes marges temporelles (marge par lancement, de transport, d'attente, etc), et donnant lieu au concept d'opération : constituée de la tâche et de sa fenêtre temporelle (chapitre II).
   - des contraintes de positionnements relatifs les unes par rapport aux autres : par exemple, contraintes de gamme.

Traditionnellement, si l'on note t_i la date réelle de début d'exécution de la tâche i, la contrainte de position temporelle la plus générale entre i et j, est appelée **contrainte potentielle**, et s'écrit sous la forme $t_j - t_i \geq a_{ij}$, où a_{ij} est le plus souvent associée aux durées de i et j.

Pour un ensemble de tâches à ordonnancer, le problème pourra alors être représenté selon un ensemble d'inégalités de potentiels, modélisé généralement par un graphe potentiels-tâches [ROY 70].

Certaines contraintes liées à la limitation des ressources nécessitent, pour leur formulation, l'introduction d'un choix sur un ensemble d'inégalités de potentiels. Ce choix représente la résolution d'un conflit pour l'utilisation des ressources renouvelables. Dans ce cas, on distingue deux types de contraintes :

- Les **contraintes conjonctives (ET)** qui représentent un ensemble d'inégalités de potentiels devant être vérifiées conjointement.
- Les **contraintes non conjonctives (OU)** qui représentent un ensemble d'inégalités de potentiels dont une au moins doit être vérifiée.

Parmi les contraintes non conjonctives on distingue :

- Les **contraintes disjonctives** qui représentent la réalisation non simultanée d'une paire de tâches.
- Les **contraintes cumulatives** qui représentent le fait qu'une tâche utilise un certain nombre de moyens ou ressources qui sont disponibles en une certaine quantité.

III.2.2 Typologies des problèmes d'ordonnancement

On distingue deux types de problèmes d'ordonnancement, selon la nature des tâches :

- Les problèmes **préemptifs**, qui se posent lorsque l'interruption des tâches est permise.
- Les problèmes **non préemtifs**, qui se posent lorsque l'interruption des tâches est interdite. L'exécution d'une tâche étant déterminée par :
  - sa date de début t
  - sa durée D
  - la nature et la quantité des ressources utilisées,

On peut distinguer plusieurs types problèmes non préemtifs. Parmi eux, citons :

1. Les problèmes de type t, où seules les dates de début des tâches sont inconnues : ces problèmes sont dits d'ordonnancement pur. Ils peuvent :
   - ne pas prendre en compte les contraintes de ressource (problèmes d'ordonnancement à capacité infinie),
   - ou bien, les prendre en compte (problèmes généraux d'ordonnancement).
2. Les problèmes où seules les caractéristiques concernant les ressources sont inconnues, sont les problèmes d'affectation.

III.2.3 Les problèmes d'atelier

Les problèmes d'ordonnancement à ressources renouvelables et disjonctives sont généralement présentés dans la littérature en tant que **problèmes d'atelier**. Parmi eux :

- Les problèmes du type **flow-shop** concernant les ateliers à cheminement unique, où la séquence des machines sur laquelle doit passer un produit est identique pour tous les produits (chaîne de fabrication).
- Les problèmes du type **job-shop** concernant les ateliers à cheminements multiples, où chaque produit ou famille de produits possède une gamme spécifique.
- Les problèmes du type **open-shop** concernant les ateliers à cheminements quelconques où l'ordre d'exécution des tâches pour la réalisation des produits n'est pas fixée.

III.2.4 Approches existantes

Les méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement sont généralement issues de deux types d'approches, ou domaines :

- La **Recherche Opérationnelle (R.O.)** cherche à élaborer automatiquement une solution optimale ou la meilleure possible vis-à-vis d'un critère donné.
- L'**Intelligence Artificielle (I.A.)** utilise des systèmes à base de connaissances pour aborder le problème d'ordonnancement, tout en laissant une certaine flexibilité décisionnelle.

III.2.4.1 Recherche Opérationnelle

Les méthodes issues de la Recherche Opérationnelle utilisent des techniques d'optimisation, ou des heuristiques. Elles peuvent être classées en quatre catégories générales :

- Les méthodes par **construction progressive** [NAWAZ et AL. 83] qui sont itératives et au cours desquelles, à chaque itération, une solution partielle est complétée.
- Les méthodes dites par **voisinage** [DANNENBRING 77] qui travaillent sur des solutions complètes : chaque itération d'une méthode par voisinage ayant pour objectif (pas toujours atteint) de passer d'une solution complète à une autre solution complète, meilleure relativement au critère considéré.
- Les méthodes par **décomposition** qui, elles mêmes, sont de plusieurs types :

- Les décompositions **"hiérarchiques"** basées sur des désagrégations successives du problème global [AXSATER 84], [BITRAN et AL. 83], [MERCE 87].
- Les décompositions **"structurelles"** [ROY 70] qui prévoient la résolution du problème sans prise en compte des contraintes de ressource lors d'une première étape, et qui abordent ensuite le problème d'affectation, en prenant en compte les données temporelles obtenues précédemment.
- Les décompositions dites **"de l'ensemble des solutions du problème"** [LENSTRA 77] et qui conduisent aux classiques procédures par séparation et évaluation progressive (**"Branch and Bound"**).
- Les décompositions **"temporelles"** [PORTMANN 88], qui se situent dans une approche dynamique utilisant des techniques d'horizon glissant et selon lesquelles le problème global est décomposé en sous-problèmes portant sur la première période de l'horizon.
- Les décompositions **"spatiales"** [PORTMANN 88], qui tendent à associer des familles de ressources qui sont regroupées de manière à minimiser les transports. Les méthodes de **technologie de groupe** s'inscrivent dans ces approches.

• Les méthodes dites par **modification des contraintes** [FISHER 73], font intervenir des mécanismes de relaxation des contraintes du problème : elles peuvent conduire à des solutions non réalisables, mais fournissant des évaluations par défaut, utilisables dans les méthodes par séparation et évaluation par exemple.

III.2.4.2 Intelligence Artificielle

Dans cette approche, plus récente que la précédente, les techniques de représentations des connaissances et de résolutions de problèmes (moteurs d'inférences, processus de propagation de contraintes, etc) sont utilisées pour aborder le problème d'ordonnancement.

De nombreux travaux ont été réalisés dans ce cadre. Parmi eux, des systèmes experts utilisent des processus de propagation des contraintes, associés à une base de connaissances contenant en général des méthodes d'optimisation, ou des règles heuristiques issues de la R.O. D'autres sont basés sur des modes particuliers de représentation du temps et des règles et raisonnements temporels [ALLEN 81].

III.2.4.3 Le rôle du Décideur

Les deux approches génériques que nous venons de présenter brièvement, consistent à générer une solution d'ordonnancement. Elles laissent très peu, voire pas du tout d'initiative au "Décideur" qui est le plus souvent confronté à la difficulté

d'assurer l'articulation entre la solution calculée et la réalité complexe et perturbée de l'environnement sur lequel il a à agir.

Le plus souvent de nature **prescriptive**, l'ordonnancement laisse trop peu de marge d'autonomie décisionnelle, qui serait pourtant nécessaire pour gérer les aléas, prendre en compte les aspects non modélisables, etc.

Une autre façon d'aborder les problèmes d'ordonnancement a été proposée dans [ERSCHLER 76], puis développée par la suite [ESQUIROL 86], [LOPEZ 91]. Elle consiste à **caractériser l'ensemble** de toutes les solutions possibles, ou admissibles, compte tenu d'un ensemble de contraintes temporelles et/ou de ressources pesant sur le centre de décision considéré. Cette approche est plus **descriptive** et **analytique**. Elle ne tend pas à construire une solution optimale ou la meilleure solution vis-à-vis d'un critère donné, mais plutôt à décrire certaines caractéristiques communes à toutes les solutions. Il s'agit de l'**Analyse Sous Contraintes**, qui est un processus automatique et objectif au cours duquel l'activation d'une base de règles de séquencement et l'actualisation de dates limites modifient une base de faits initiale. Les règles s'appuient sur des déductions logiques issues de la coexistence des contraintes initiales, dont certaines seront décrites plus précisément par la suite.

Dans cette approche, le rôle décisionnel est restitué à l'Homme qui est informé sur l'ensemble des choix possibles, et sur l'autonomie disponible, sans que pour autant, son choix soit réalisé à sa place par l'ordinateur.

Le travail présenté ici, et portant sur les décisions concernant le plan d'opérations, s'appuie largement sur cette approche.

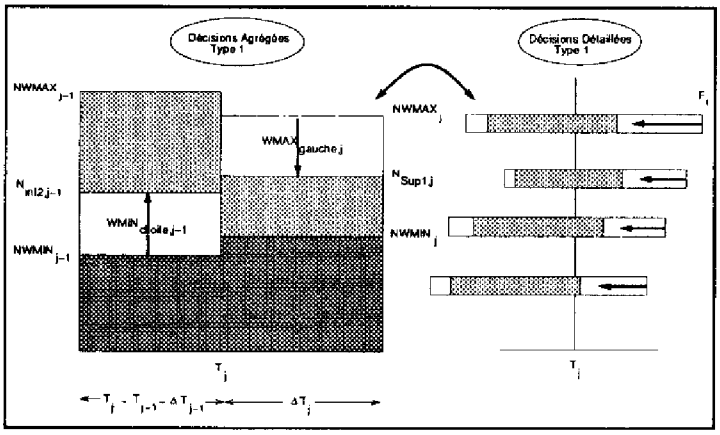
III.3 Relation entre les décisions agrégées sur les charges, et les décisions détaillées sur les opérations

Nous avons vu dans le chapitreII que sur chaque intervalle $[T_j, T_{j+1}]$ de la Structure Adjacente de l'horizon temporel, le plan agrégé de charge consiste pour le Décideur à modifier les niveaux de charge maximal et minimal de façon à éviter les risques de surcharge et de sous-charge tout en demeurant cohérents par rapport au décisions prises par le Planning. Les nouveaux niveaux de charge ainsi rectifiés sur chaque intervalle, constituent alors un nouveau plan de charge, objectif pour l'étape suivante, qui consistera en élaborer un nouveau **plan d'opérations** devant demeurer cohérent, dans la mesure où le plan de charge réactualisé est faisable, aux contraintes établies au niveau du Planning. Nous verrons par la suite, que ce nouveau plan d'opérations est obtenu en modifiant les fenêtres rencontrant les repères de la Structure Adjacente (c'est-à-dire, en augmentant les dates de début au plus tôt, ou en diminuant les dates de fin au plus tard) de façon à ce que les cumuls effectués à partir des positionnements extrêmes des tâches à l'intérieur des nouvelles fenêtres correspondent bien aux nouveaux niveaux de charge.

Ainsi, il s'agit, sur le plan d'opérations, de manipuler des **marges de temps**. De plus, les décisions peuvent, à cette étape, prendre en compte une contrainte plus détaillée sur la ressource, du type quantité instantanée maximale limitée : par exemple, nombre de machines disponibles dans le parc considéré, ou nombre d'opérateurs présents dans l'équipe, et utiliser les mécanismes de déduction et propagation automatique de l'Analyse Sous Contraintes. Pouvant ainsi modifier la longueur des fenêtres, déplacer les tâches sur différentes espaces représentant les plages de disponibilité des divers exemplaires de ressource (opérateurs, machines, ...), ou encore faire glisser les tâches à l'intérieur de leurs fenêtres respectives, le Décideur pourra alors manipuler directement les diverses **marges de temps, d'affectations, et d'ordres** dont il dispose effectivement sur l'ensemble des décisions admissibles du type "plan d'opérations", compte tenu de l'ensemble des contraintes temporelles ou de ressource à respecter.

Nous avons vu dans le chapitre précédent, que les décisions agrégées de régulation de charge autour d'un repère temporel T_j sont de deux types :

- **Les décisions agrégées de type 1** consistant à diminuer la valeur $NWMAX_j$ (niveau de charge maximale de $[T_j, T_{j+1}]$) (ou à augmenter la valeur $NWMIN_{j-1}$: niveau de charge minimale de $[T_{j-1}, T_j]$).



Les décisions agrégées de type 1 autour du repère T_j correspondent au niveau détaillé à une réactualisation des dates de fin au plus tard des fenêtres de Ω_j "rencontrant" T_j. Cette correspondance au niveau détaillé constitue une désagrégation de la décision de régulation de charge, de telle façon que la surface

$$WMAX_{gauche,j} = (NWMAX_j - N_{Sup_1,j})\Delta T_j$$

qui est une marge de charge consommée simultanément sur $[T_j, T_{j+1}]$ et $[T_{j-1}, T_j]$, identique par conséquent à :

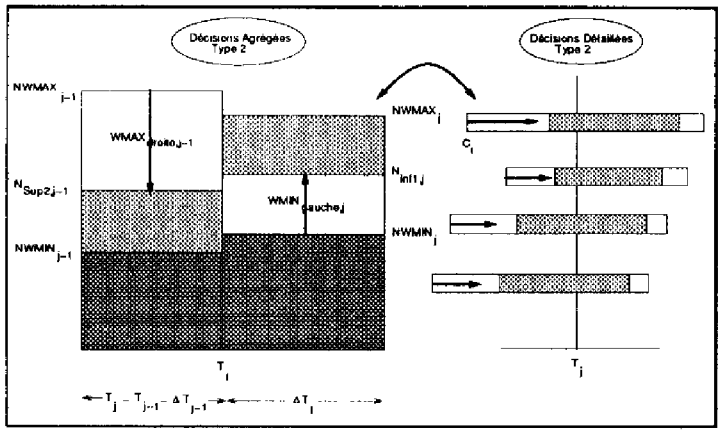
$$WMIN_{droite,j-1} = (N_{inf_2,j-1} - NWMIN_{j-1})(T_j - T_{j-1} - \Delta T_{j-1}),$$

corresponde effectivement au cumul des marges consommées sur les opérations dont les fenêtres auront été ainsi "rétrécies". Pour cela, il suffit donc que :

$$(NWMAX_j - N_{Sup_1,j})\Delta T_j = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} [min(D_i, F_i - T_j) - min(D_i, F'_i - T_j)]$$

Où F'_i correspond à la date de fin au plus tard réactualisée pour l'opération i.

- **Les décisions agrégées de type 2** consistant à augmenter la valeur $NWMIN_j$ (niveau de charge minimale de $[T_j, T_{j+1}]$) (ou à diminuer la valeur $NWMAX_{j-1}$: niveau de charge maximale de $[T_{j-1}, T_j]$).



La désagrégation des décision de type 2 consiste à réactualiser les valeurs des dates de début au plus tôt de certaines fenêtres ω_i de Ω_j, de telle façon que la surface

$$WMIN_{gauche,j} = (N_{inf_1,j} - NWMIN_j)\Delta T_j$$

qui est une marge de charge consommée simultanément sur $[T_j, T_{j+1}]$ et $[T_{j-1}, T_j]$, identique par conséquent à :

$$WMAX_{droite,j-1} = (NWMAX_{j-1} - N_{Sup_2,j-1})(T_j - T_{j-1} - \Delta T_{j-1}),$$

corresponde effectivement au cumul des marges consommées sur les opérations dont les fenêtres auront été ainsi "rétrécies". Pour cela, il suffit donc que :

$$(N_{inf_1,j} - NWMIN_j)\Delta T_j = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} [max(0, C'_i + D_i - T_j) - max(0, C_i + D_i - T_j)]$$

Où C'_i correspond à la date de début au plus tôt réactualisée pour l'opération i.

En considérant le problème sous l'angle de la programmation linéaire, il consiste à :

Trouver x_i, $i = 0, ..., n$ tel que :

$$\sum_{i=0}^{n} max(x_i + a_i, 0) = \sum_{i=0}^{n} max(d_i + a_i, 0) + c$$

où $d_i \leq x_i \leq e_i$, $i = 0, ..., n$

et a_i, e_i *et* d_i, $i = 0, ..., n$ et c sont valeurs connues telles que :

$$0 \leq c \leq \sum_{i=0}^{n} max(e_i + a_i, 0) - \sum_{i=1}^{n} max(d_i + a_i, 0)$$

avec :

$$\begin{aligned} x_i &= C'_i \\ a_i &= D_i - T_j \\ d_i &= C_i \\ e_i &= (F_i - D_i) \\ c &= (N_{inf_1,j} - NWMIN_j)\Delta T_j \end{aligned}$$

Remarque

Il existe toujours une solution car la fonction

$$f(x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{i=0}^{n} max(x_i + a_i, 0)$$

est continue sur $d_i \leq x_i \leq e_i$, i = 0,1, ...,n .

Ce résultat permet déduire qu'il est **toujours** possible de trouver des dates pertinentes de début au plus tôt et de fin au plus tard des certaines fenêtres correspondant aux nouvelles charges déterminées par les décisions agrégées de type 1 et/ou 2. Dans notre approche, la désagrégation est réalisée par le Décideur assisté par l'ordinateur. Le rôle de la "Machine" consiste donc en aider l'Homme à trouver des dates, en lui montrant les conséquences de ses choix et en lui interdisant certains d'entre eux pour assurer la cohérence de ses décisions. Nous allons présenter par la suite, quelques propositions de Stratégies ou heuristiques automatiques, dites "Stratégies Machine" de désagrégation.

III.4 Premier exemple d'heuristique, ou de Stratégie Machine de désagrégation

Nous proposons ici une première heuristique, ou Stratégie "Machine" permettant d'obtenir une désagrégation de la décision agrégée de régulation de charge autour d'un repère T_j, c'est-à-dire, un ensemble de décisions :

- de diminutions de dates de fin au plus tard F_i (pour le type 1),
- d'augmentations de dates de début au plus tôt C_i (pour le type 2),

portant sur les opérations dont les fenêtres rencontrent T_j.

Pour chacun des deux types de décisions présentés dans le paragraphe précédent, l'heuristique proposée utilise deux grandeurs :

1. **Charge agrégée** représente la marge de charge consommée, encore appelée, par abus de langage, la charge échangée entre $[T_{j-1}, T_j]$ et $[T_j, T_{j+1}]$, égale à $WMAX_{gauche,j} = WMIN_{droite,j-1}$ dans le cas de décisions de type 1, et égale à $WMIN_{gauche,j} = WMAX_{droite,j-1}$ dans le cas de décisions de type 2.

   Cette valeur constitue un objectif ou but à atteindre par les diverses décisions détaillées portant sur les dates extrêmes, ou encore sur les fenêtres des opérations concernées.

2. **Charge** est une variable qui représente à chaque étape du processus décisionnel détaillé, c'est-à-dire, à chaque diminution d'une date de fin au plus tard dans le cas de décisions de type 1, ou bien à chaque augmentation d'une date de début au plus tôt correspondant aux décisions de type 2, le cumul des marges de charge ainsi consommées, ou encore des quantités de travail échangées entre $[T_{j-1}, T_j]$ et $[T_j, T_{j+1}]$.

Ainsi, et pour chacun des deux types de décisions agrégées autour de T_j,

- à l'étape initiale du processus décisionnel de désagrégation, **Charge** est égale à 0.
- l'objectif à atteindre est qu'elle devienne égale à la valeur **Charge agrégée**.

Si l'on convient que les opérations dont les fenêtres rencontrent T_j sont indexées d'une valeur $i = 1, 2, ..., n$, la structure générale du processus automatique présenté ici, sera, pour ce qui concerne par exemple la désagrégation d'une décision de type 1 autour de T_j, le suivant :

```
i ⟵ 0
Charge ⟵ 0
Tant que (i ≤ n et Charge Agrégée > Charge)
        Pour la fenêtre i, réactualiser la date de fin au plus tard
        F_i pour augmenter la valeur Charge le plus possible.
        i ⟵ i + 1
Fin Tant que
```

III.4.1 Désagrégation d'une décision agrégée de type 1

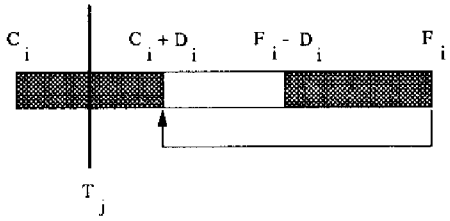
Dans ce cas, Charge Agrégée = $WMAX_{gauche,j} = WMIN_{droite,j-1}$.

Chacune des opérations concernées étant traitées en fonction de son ordre d'indice, la diminution de sa date de fin au plus tard sera réalisée de manière à être la plus efficace possible vis-à-vis de l'atteinte de l'objectif **Charge Agrégée** pour la valeur **Charge**, tout en consommant une marge de temps minimale.

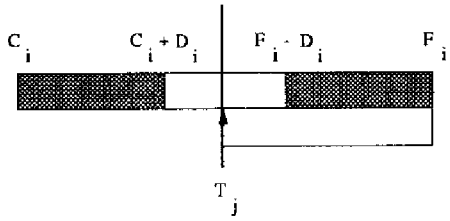
Dans ce premier cas, une telle Stratégie consistera donc à diminuer F_i de manière à "repousser" le plus possible la tâche correspondante à l'extérieur de $[T_j, T_{j+1}]$, lorsque celle-ci est calée au plus tard dans sa nouvelle fenêtre.

Six cas sont à considérer :

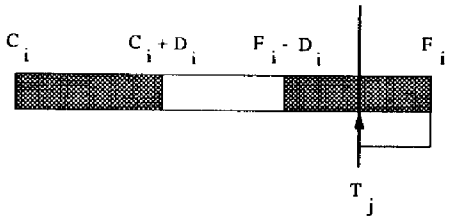
1. **cas 1** : $C_i + D_i \leq F_i - D_i$ et $C_i \leq T_j \leq C_i + D_i$; la date de fin au plus tard est réactualisée à la valeur $C_i + D_i$ et la **charge** est augmentée par la quantité $T_j - C_i$.



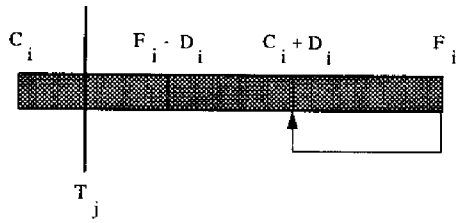
2. **cas 2** : $C_i + D_i \leq F_i - D_i$ et $C_i + D_i \leq T_j \leq F_i - D_i$; la date de fin au plus tard est réactualisée à la valeur T_j et la **charge** est augmentée par la quantité D_i.



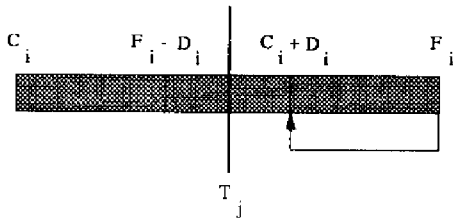
3. **cas 3** : $C_i + D_i \leq F_i - D_i$ et $F_i - D_i \leq T_j \leq F_i$; la date de fin au plus tard est réactualisée à la valeur T_j et la **charge** est augmentée par la quantité $F_i - T_j$.



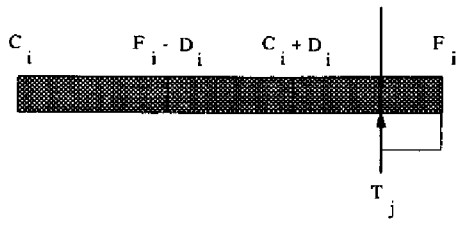
4. **cas 4** : $F_i - D_i \leq C_i + D_i$ et $C_i \leq T_j \leq F_i - D_i$; la date de fin au plus tard est réactualisée à la valeur $C_i + D_i$ et la **charge** est augmentée par la quantité $T_j - C_i$.



5. **cas 5** : $F_i - D_i \leq C_i + D_i$ et $F_i - D_i \leq T_j \leq C_i + D_i$; la date de fin au plus tard est réactualisée à la valeur $C_i + D_i$ et la **charge** est augmentée par la quantité $F_i - (C_i + D_i)$.



6. **cas 6** : $F_i - D_i \leq C_i + D_i$ et $C_i + D_i \leq T_j \leq F_i$; la date de fin au plus tard est réactualisée à la valeur T_j et la **charge** est augmentée par la quantité $F_i - T_j$.



III.4.2 Désagrégation d'une décision agrégée de type 2

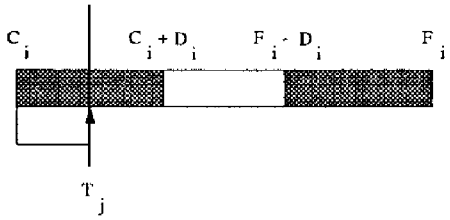
Dans ce cas, Charge Agrégée $= WMIN_{gauche,j} = WMAX_{droite,j-1}$.

Chacune des opérations concernées étant traitées en fonction de son ordre d'indice, l'augmentation de sa date de début au plus tôt sera réalisée de manière à être la plus efficace possible vis-à-vis de l'atteinte de l'objectif **Charge Agrégée** pour la valeur **Charge**, tout en consommant une marge de temps minimale.

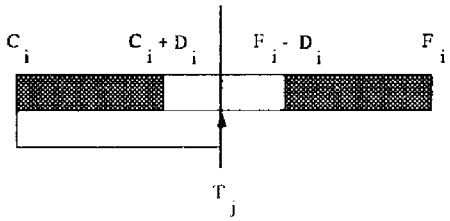
Dans ce cas, une telle Stratégie consistera donc à augmenter C_i de manière à "pousser" le plus possible la tâche correspondante à l'intérieur de $[T_j, T_{j+1}]$, lorsque celle-ci est calée au plus tôt dans sa nouvelle fenêtre.

6 cas sont alors à considérer :

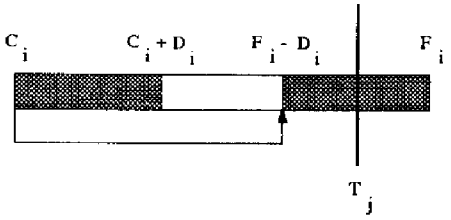
1. **cas 1** : $C_i + D_i \leq F_i - D_i$ et $C_i \leq T_j \leq C_i + D_i$; la date de début au plus tôt est réactualisée à la valeur T_j et la **charge** est augmentée par la quantité $T_j - C_i$.



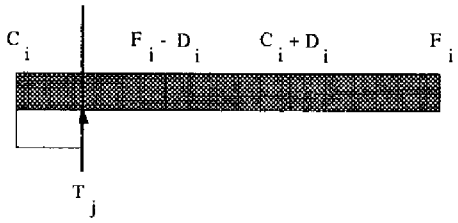
2. **cas 2** : $C_i + D_i \leq F_i - D_i$ et $C_i + D_i \leq T_j \leq F_i - D_i$; la date de début au plus tôt est réactualisée à la valeur T_j et la **charge** est augmentée par la quantité D_i.



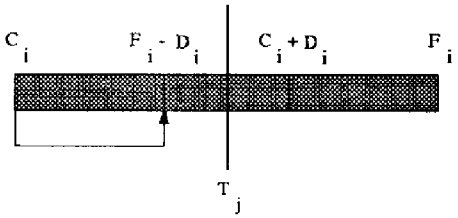
3. **cas 3** : $C_i + D_i \leq F_i - D_i$ et $F_i - D_i \leq T_j \leq F_i$; la date de début au plus tôt est réactualisée à la valeur $F_i - D_i$ et la **charge** est augmentée par la quantité $F_i - T_j$.



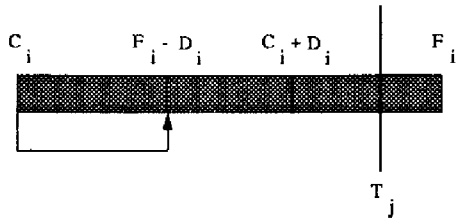
4. **cas 4** : $F_i - D_i \leq C_i + D_i$ et $C_i \leq T_j \leq F_i - D_i$; la date de début au plus tôt est réactualisée à la valeur T_j et la **charge** est augmentée par la quantité $T_j - C_i$.



5. **cas 5** : $F_i - D_i \leq C_i + D_i$ et $F_i - D_i \leq T_j \leq C_i + D_i$; la date de début au plus tôt est réactualisée à la valeur $F_i - D_i$ et la **charge** est augmentée par la quantité $F_i - (C_i + D_i)$.



6. **cas 6** : $F_i - D_i \leq C_i + D_i$ et $C_i + D_i \leq T_j \leq F_i$; la date de début au plus tôt est réactualisée à la valeur $F_i - D_i$ et la **charge** est augmentée par la quantité $F_i - T_j$.



III.4.3 Conclusion

Une telle heuristique est évidemment très simple et limitée. Le principe utilisé, consiste à "rétrécir" les fenêtres, de façon à atteindre l'objectif **charge agrégée** en agissant sur le moins d'opérations possible. Mais le résultat final autour d'un repère T_j, dépend :

1. du choix laissé au Décideur de l'ordre entre la désagrégation de la décision de type 1 d'une part, et celle de la décision de type 2 d'autre part,
2. de l'ordre, pour chacun des deux cas, dans lequel les opérations sont prises en compte : c'est-à-dire leur numéro d'indice, qui est tout à fait arbitraire.

Par ailleurs, certaines opérations n'ont plus aucune marge de temps, ce qui est contradictoire avec la recherche de robustesse, très souvent souhaitable, des décisions détaillées de régulation de charge, vis-à-vis des décisions aval d'ordonnancement.

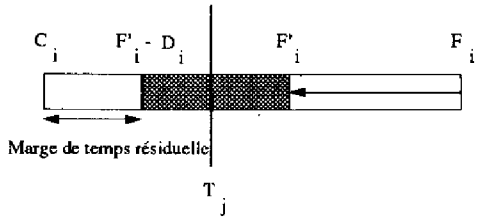
Un telle remarque induit la notion de marge de temps résiduelle qui va être présentée dans le paragraphe suivant.

III.5 Second exemple : Stratégie Machine robuste

III.5.1 Notion de marge de temps résiduelle

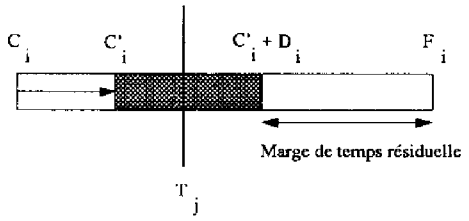
1. La marge de temps résiduelle d'une décision détaillée consistant en diminuer la date de fin au plus tard F_i d'une opération $\omega_i \in \Omega_j$, à la valeur F_i' est :

$$\textit{marge de temps résiduelle} = \mu(\omega_i, F_i \longrightarrow F_i') = F_i' - (C_i + D_i)$$



2. La marge de temps résiduelle d'une décision détaillée cohérente consistant en augmenter la date de début au plus tôt C_i d'une opération $\omega_i \in \Omega_j$, à la valeur C'_i est :

$$marge\ de\ temps\ résiduelle = \mu(\omega_i, C_i \longrightarrow C'_i) = F_i - (C'_i + D_i)$$



Par la suite, nous allons présenter une autre Stratégie de désagrégation qui consiste en optimiser la somme des marges de temps résiduelles correspondantes aux décisions détaillées de rétrécissement des fenêtres. Le choix d'un tel critère se justifie vis-à-vis de la recherche d'une plus grande robustesse possible des décisions prises à ce niveau, de façon à laisser une marge de manoeuvre maximale pour le niveau d'ordonnancement.

III.5.2 Désagrégations robustes

Une Stratégie plus **robuste** de désagrégation consiste à trouver les nouvelles dates de fin au plus tard F'_i ou de début au plus tôt C'_i qui maximisent la somme des marges de temps résiduelles.

Le problème est alors posé de la façon suivante :

1. Pour désagréger les décisions de type 1, sur toutes les fenêtres $\omega_i \in \Omega_j$, il s'agit de chercher les nouvelles valeurs F'_i qui maximisent la fonction :

$$f_1 = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} (F'_i - (C_i + D_i))$$

telles que :

$$C_i + D_i \leq F'_i \leq F_i$$

et qui satisfont l'identité :

$$(NWMAX_j - N_{Sup_1,j})\Delta T_j = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} [min(D_i, F_i - T_j) - min(D_i, F'_i - T_j)]$$

2. D'une façon similaire, pour désagréger les décisions de type 2, sur toutes les fenêtres $\omega_i \in \Omega_j$, il s'agit de chercher les valeurs C'_i qui maximisent la fonction :

$$f_2 = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} (F_i - (C'_i + D_i))$$

telles que :

$$C_i \leq C'_i \leq F_i - D_i$$

et qui satisfont l'identité :

$$(N_{inf_1,j} - NWMIN_j)\Delta T_j = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} [max(C'_i + D_i - T_j, 0) - max(C_i + D_i - T_j, 0)]$$

Remarque

Ces deux problèmes ont toujours une solution car la fonction à optimiser est linéaire sur un ensemble non-vide de valeurs F'_i ou C'_i pour $\omega_i \in \Omega_j$, et les contraintes sont linéaires par morceaux [MINOUX 83] ; nous pouvons noter que la dernière contrainte peut être décomposée en un ensemble de $2^{|\Omega_j|}$ sous-ensembles linéaires, avec $|\Omega_j|$ la cardinalité de l'ensemble Ω_j, car :

$$min(D_i, F'_i - T_j) = \begin{cases} D_i \; si \; D_i \leq F'_i - T_j \\ F'_i - T_j \; si \; D_i \geq F'_i - T_j \end{cases}$$

et :

$$max(C'_i + D_i - T_j, 0) = \begin{cases} C'_i + D_i - T_j \; si \; C'_i + D_i - T_j \geq 0 \\ 0 \; si \; C'_i + D_i - T_j \leq 0 \end{cases}$$

Nous devons signaler que cette heuristique n'a pas donné lieu à une application particulière.

III.5.3 Conclusion

Nous avons présenté jusqu'à maintenant différentes Stratégies visant à élaborer des plans d'opérations cohérents avec les plans de charge proposées par le niveau agrégé de régulation, sans prendre en compte des contraintes plus détaillées sur la ressource. Par la suite, nous allons présenter une modélisation du problème de désagrégation des décisions agrégées de régulation de charge prenant en compte ce type de contraintes.

III.6 Prise en compte des contraintes détaillées de ressource

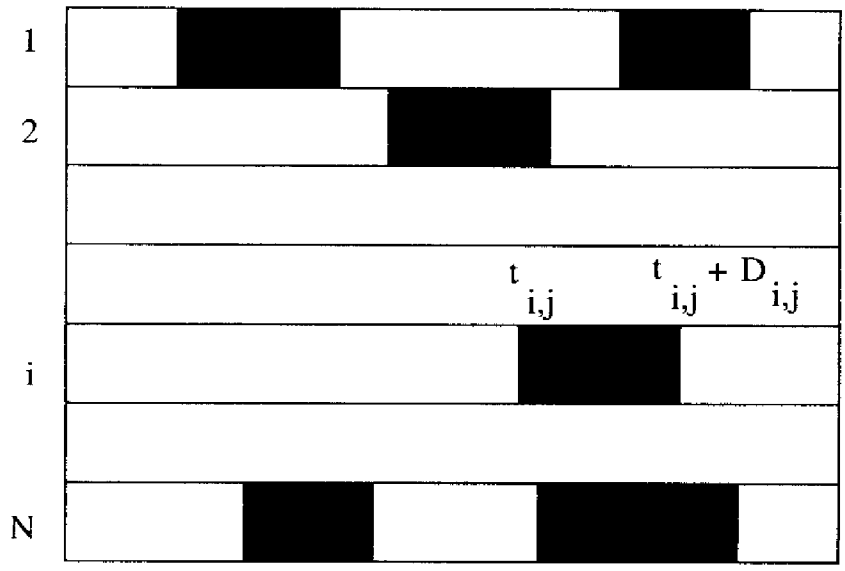
III.6.1 Présentation du problème

Dans certains cas, il peut s'avérer plus utile et efficace de prendre en compte les contraintes détaillées de ressource, dès ce niveau de désagrégation du plan de charge.

Nous avons considéré, pour cela, la ressource agrégée comme étant constituée de N exemplaires identiques (N opérateurs, N machines, ...), possédant chacun des plages de fonctionnement et plages d'arrêt, du type "opérations fictives" dont :

- les dates de début $t_{i,j}$ sont les dates d'arrêt (j-ième date d'arrêt pour l'exemplaire i)
- les durées $D_{i,j}$ sont celles, le plus souvent prévisionnelles, pendant lesquelles les exemplaires sont hors fonctionnement (ce sont par exemple, des arrêts pour maintenance, congé, panne, chômage technique, ...)

La représentation graphique utilise la métaphore du tableau de Gantt : ce tableau mural, existant encore dans certaines entreprises, représentant les plages de fonctionnement des exemplaires ou lignes de charges sur lesquelles sont positionnées, au fil du temps, les opérations réalisées ou à réaliser :



Le problème se posant pour le plan d'opérations, consiste alors à obtenir :

1. Un rétrécissement de certaines fenêtres réalisant la désagrégation des décisions agrégées du plan de charge.

2. Une affectation de certaines opérations aux plages de fonctionnement des exemplaires de la ressource.

3. Un séquencement entre les opérations affectées au même exemplaire.

Il est important de préciser ici que 2. et 3. sont des décisions possibles, mais non obligatoires, et pouvant être laissées aux centres de décision plus en aval.

Ainsi, peuvent elles être prises sur l'ensemble des opérations, ou seulement certaines d'entre elles, ou encore aucune.

Au niveau conceptuel, de telles décisions peuvent être formalisées de la façon suivante :

1. Si $\Omega_j = \{\omega_0, ..., \omega_k, ..., \omega_n\}$, est l'ensemble de fenêtres qui chevauchent le repère temporel T_j, il s'agit de trouver les nouvelles dates C'_i et F'_i pour $0 \leq i \leq n$, telles que le "rétrécissement" des fenêtres réalise la désagrégation des décisions agrégées du plan de charge, autour de chaque repère T_j :

   (a) Cohérence vis-à-vis du Planning :

   $$C_i + D_i \leq F'_i \leq F_i$$
   $$C_i \leq C'_i \leq F_i - D_i$$

   (b) Cohérence vis-à-vis des décisions agrégées du plan de charge :

   $$(NWMAX_j - N_{Sup_1,j})\Delta T_j = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} [min(D_i, F_i - T_j) - min(D_i, F'_i - T_j)]$$

   et

   $$(N_{inf_1,j} - NWMIN_j)\Delta T_j = \sum_{\omega_i \in \Omega_j} [max(C'_i + D_i - T_j, 0) - max(C_i + D_i - T_j, 0)]$$

2. Les opérations affectées respectent les plages de fonctionnement des exemplaires de la ressource :

   Si **OA** est l'ensemble d'opérations qui sont affectées, il existe une fonction **A** :

   $$\begin{aligned} \mathbf{A} : \mathbf{OA} &\longrightarrow \{1, ..., N\} \\ \omega_k &\longmapsto \mathbf{A}(\omega_k) = \textit{indice de l'exemplaire auquel } \omega_k \textit{ est affectée} \end{aligned}$$

   Soit alors $\mathbf{Af}_m$ le sous-ensemble des opérations affectées à l'exemplaire m, $1 \leq m \leq N$:

   $$\mathbf{Af}_m = \{\omega_k / \mathbf{A}(\omega_k) = m\} = \{\omega_{m,1}, \omega_{m,2}, ..., \omega_{m,o_m}\}$$

   où o_m le nombre d'opérations affectées à m.

Le respect des plages de fonctionnement s'écrit alors :

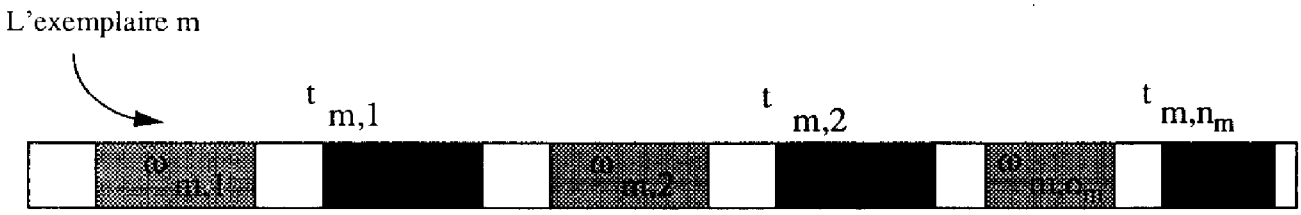
$$\forall \omega_{m,k} \in \mathbf{Af}_m, \exists l,$$
$$t_{m,l} + D_{m,l} \leq C'_{m,k}, et$$
$$F'_{m,k} \leq t_{m,l+1}$$

où $C'_{m,k}$ et $F'_{m,k}$ sont les dates de début au plus tôt et fin au plus tard éventuellement réactualisées de $\omega_{m,k}$.

3. Les opérations affectées à un exemplaire donné, sont toutes ordonnées ou séquencées entre elles :

$$\omega_{m,1} \prec \omega_{m,2} \prec \ldots \prec \omega_{m,o_m}$$

(où $\omega_{m,i} \prec \omega_{m,j}$ signifie : $F'_{m,i} \leq C'_{m,j}$)
le choix du second indice représentant l'ordre d'affectation de l'opération considérée.



L'approche proposée ici, se situe toujours dans le cadre d'une aide à la décision :
Au niveau perceptuel, l'Utilisateur ou Décideur doit donc rétrécir certaines fenêtres de manière à réaliser la désagrégation des décisions de régulation de charge, mais en demeurant cohérent vis-à-vis des dates extrêmes initiales contraignant les opérations.

Ce faisant, il a aussi la possibilité d'affecter certaines opérations aux différents exemplaires, en ordonnant entre elles celles qui ont la même affectation, tout en respectant les plages de fonctionnement.

Ses marges de manoeuvre sont :

- les marges de temps des opérations,
- dans notre cas, et pour des raisons de simplification, l'identité des exemplaires sur le plan technique (et non temporel, à cause des plages de fonctionnement), pouvant accueillir n'importe quelle opération, et correspondant à une certaine marge d'affectation.

Ces décisions étant prises par étapes successives, nous considérons chacune d'entre elles comme reposant sur un ensemble d'hypothèses initiales, issues des étapes précédentes :

1. Certaines fenêtres sont déjà rétrécies.
2. Parmi les opérations correspondantes, certaines sont déjà affectées. Et toutes celles qui sont affectées au même exemplaire sont ordonnées entre elles.

Chaque étape décisionnelle consiste alors, pour toute opération :

1. rétrécir sa fenêtre,
2. éventuellement, l'affecter à un exemplaire et choisir son ordre, compte tenu des affectations déjà réalisées sur ce même exemplaire. Ou bien,
3. la désaffecter (pour la réaffecter ailleurs par exemple).

La "Machine", supportant le modèle mathématique déjà cité et certaines règles simples de l'A.S.C., va alors :

1. fournir une information concernant l'admissibilité des décisions, assurant le respect de certaines contraintes telles que celles de dates extrêmes pour les opérations, plages de fonctionnement pour les exemplaires de la ressource, séquences admissibles entre opérations affectées à un même exemplaire.
2. fournir une information sur les conséquences objectives (automatiques) des décisions envisagées, concernant d'une part l'atteinte des décisions agrégées sur le plan de charge, et d'autre part le rétrécissement automatique de certaines fenêtres, conformément aux processus élémentaires de déduction et de propagation de l'A.S.C.

Donc, et avant de poursuivre la présentation plus détaillé de notre travail, il convient ici de présenter les règles et mécanismes simples utilisés dans l'Analyse Sous Contraintes.

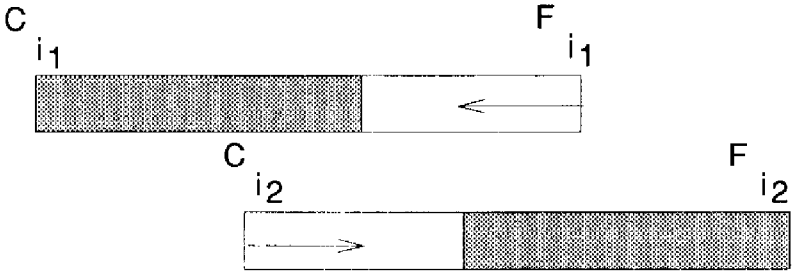
III.6.2 Règles élémentaires de l'A.S.C., concernant des paires d'opérations, dans le cas disjonctif :

Reprenant le contexte dans lequel se situe chaque étape du processus décisionnel présenté dans le paragraphe précédent, nous allons présenter les règles de l'A.S.C. que nous avons prises en compte :

1. Règle 1 : basée sur la consommation du temps
   S'il n'y a pas assez de temps pour réaliser une opération i_2 avant i_1, dans la limite de leurs dates admissibles (début au plus tôt et fin au plus tard), alors i_2 ne précède pas i_1.

   C'est-à-dire :

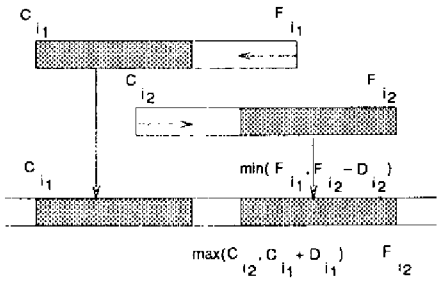
   Si $C_{i_2} + D_{i_2} > F_{i_1} - D_{i_1}$, alors $i_2 \not\prec i_1$.



2. Règle 2 : basée sur la consommation instantanée de ressource
   Dans le cas d'une ressource disjonctive du type exemplaire, toutes paires d'opérations doivent être ordonnées entre elles :

   i_1 précède i_2, ou i_2 précède i_1.

3. Processus de déduction par l'application des règles 1 et 2 précédentes
   Soient i_1 et i_2 sont deux opérations affectées au même exemplaire m :



Où $C_{i_1}, F_{i_1}, C_{i_2}, F_{i_2}$ sont les dates de début au plus tôt et fin au plus tard éventuellement réactualisées de i_1 et i_2.

Nous pouvons déduire à partir de :

(a) Si $C_{i_2} + D_{i_2} > F_{i_1} - D_{i_1}$, alors $i_2 \not\prec i_1$, et comme de plus,

(b) $i_2 \prec i_1$, ou $i_1 \prec i_2$,

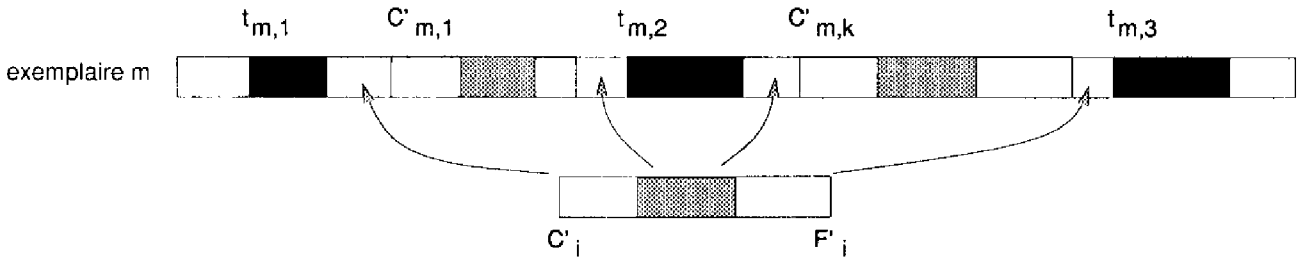
alors : $i_1 \prec i_2$.

dans ce cas, les dates de fin au plus tard de i_1 et la date de début au plus tôt de i_2, doivent automatiquement être actualisées aux valeurs :

$$\begin{aligned} F'_{i_1} &= min(F_{i_2} - D_{i_2}, F_{i_1}) \\ C'_{i_2} &= max(C_{i_1} + D_{i_1}, C_{i_2}) \end{aligned}$$

III.6.3 Application à une décision d'affectation et de séquencement sur un exemplaire de ressource :

L'étape décisionnelle d'affectation et de séquencement d'une opération i à un exemplaire m va donc consister à choisir pour elle un ordre admissible vis-à-vis des opérations déjà affectées à m, et de ses plages de fonctionnement. Les plages d'arrêt étant considérées comme étant des opérations fictives, sans marge temporelle :



Tout choix envisagé doit être testé par l'application des règles 1 et 2 précédentes et donner lieu, dans le cas de faisabilité, aux processus de déductions et propagations éventuels, de manière automatique.

Ainsi, l'affectation et le séquencement de i sur l'exemplaire m, sont-ils susceptibles de :

- diminuer la date de fin au plus tard d'opérations qui la précèdent, et/ou
- augmenter la date de début au plus tôt d'opérations qui la suivent, et/ou
- rétrécir sa propre fenêtre

Bien évidemment, le choix de "désaffectation" d'une opération, doit donner lieu à la relaxation des éventuelles déductions et propagations précédentes.

III.7 Application : MARGE 2

Les éléments théoriques précédents ont donné lieu à la conception et la réalisation d'un nouveau module MARGE 2, connecté au module MARGE 1 présenté dans le chapitre II :

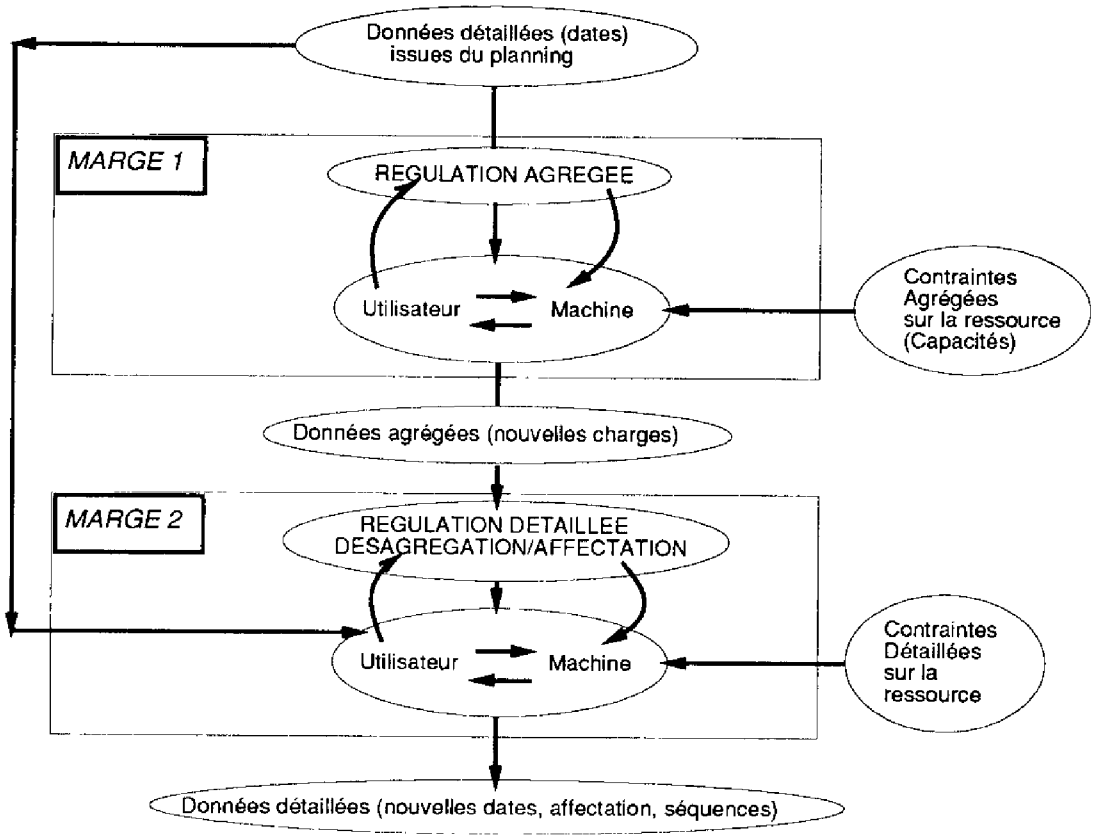


Figure III.1: MARGE 1 et MARGE 2

MARGE 2 est un support d'aide à la désagrégation des décisions agrégées de régulation de charge : le Décideur, potentiel Utilisateur, et conformément aux différents types de décisions qu'il peut prendre à ce niveau, peut bénéficier des représentations graphiques et de leurs manipulations associées, des mécanismes automatiques de déductions et de propagations lui permettant d'anticiper certains effets objectifs de ses décisions.

MARGE 2 est constitué de quatre écrans graphiques pouvant être affichés et superposés à la guise de l'Utilisateur.

III.7.1 Ecran 1 : lignes de charge

Cet écran permet la détermination du nombre d'exemplaires de la ressource considérée, et de leurs plages de fonctionnement et d'arrêt respectives :

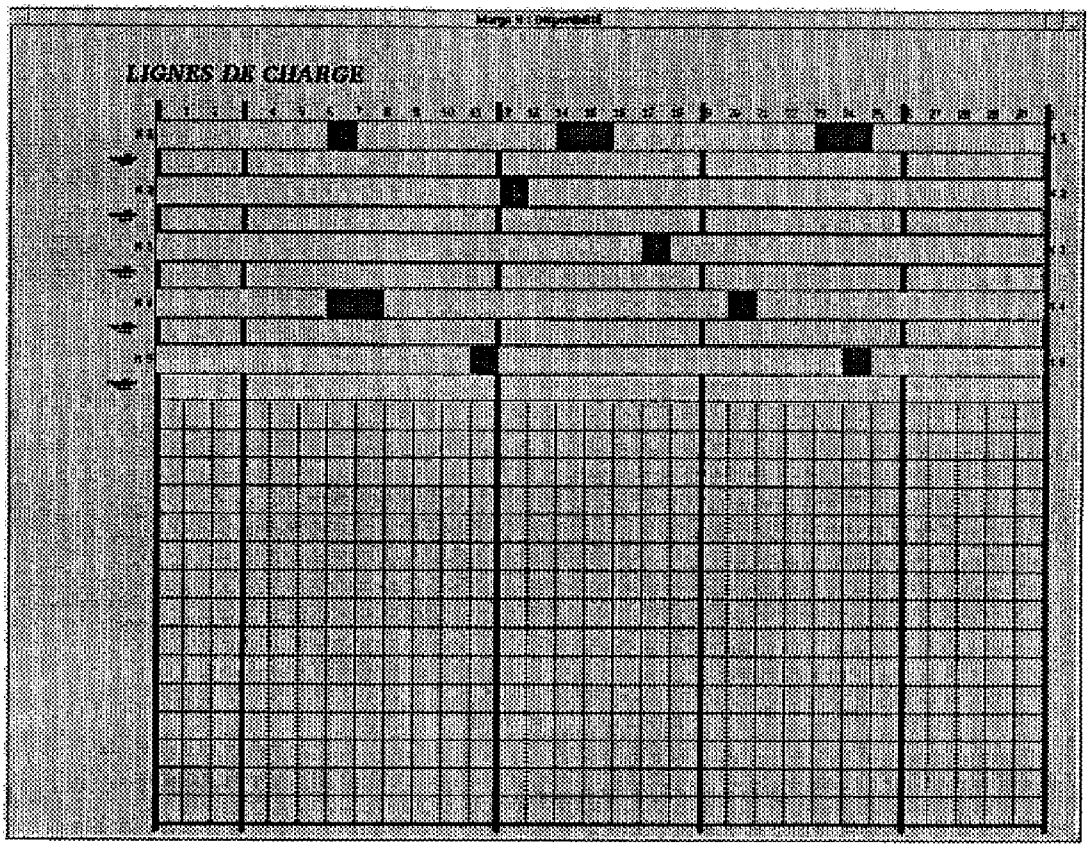


Figure III.2: L'écran de plages de fonctionnement

Sur cet écran, figure la Structure Adjacente issue des décisions agrégées prises à l'aide de l'écran 1 de MARGE 1.

En situation réelle, cet écran pourra être simplement consulté, les données y figurant étant considérées comme issues de décisions prises en amont, ou bien modifié, selon l'autonomie décisionnelle dont on disposera au niveau de l'atelier sur les ressources.

Concernant ce prototype de laboratoire, tous les intervalles d'arrêt des exemplaires-machines peuvent être définis à l'aide de rectangles glissants et modifiables représentant des tâches-fictives qui peuvent être déplacées sur toute la longueur de l'horizon de planification.

Les intervalles d'arrêt déterminent sur chaque intervalle de la Structure Adjacente, une **capacité maximale réelle** qui peut être calculée par l'ordinateur et comparée avec la capacité maximale définie sur l'écran 3 de MARGE 1. La cohérence entre ces deux valeurs de capacité peut alors être assurée par le Décideur en modifiant la durée des intervalles d'arrêt ou en les déplaçant sur l'horizon de planification.

III.7.2 Ecrans 2 et 3. Plans locaux

En sélectionnant sur l'écran 1 précédent, un repère de la Structure Adjacente, l'Utilisateur a la possibilité d'accéder à :

1. l'écran 2 : plan local d'opérations
   affichant les opérations concernées par les décisions de régulation "autour" du repère choisi, c'est-à-dire, celles dont les fenêtres le rencontrent.

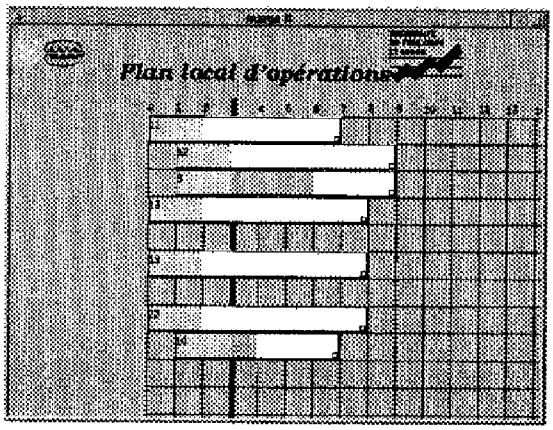


Figure III.3: L'écran d'opérations qui rencontrent la borne concernée

2. l'écran 3 : plan local de charges
   affichant les sous-niveaux initiaux et modifiés en amont lors des décisions de régulation agrégée autour du repère choisi.

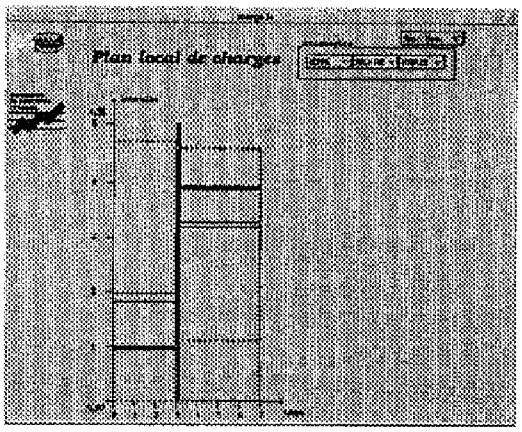


Figure III.4: L'écran des niveaux de charge voisins à la borne concernée

Par défaut, ces deux écrans sont affichés ensemble, l'un au-dessus de l'autre. Toutefois, leur différenciation permet d'effacer l'écran 3 qui peut dans certains cas, s'avérer momentanément inutile.

Les décisions de désagrégation consistant à modifier certaines dates de début au plus tôt et/ou fin au plus tard, celles-ci sont accessibles à l'Utilisateur par ses manipulations de rétrécissements des fenêtres sur l'écran 2. Les conséquences automatiques sur les sous-niveaux sont affichées sur l'écran 3, l'objectif à atteindre étant d'accéder aux nouveaux sous-niveaux décidés en amont.

Conformément à la classification des stratégies décisionnelles présentée dans le chapitre I, ces deux écrans proposent trois types de relations Homme-Machine :

1. Stratégie Homme
   Les décisions sont prises par les manipulations graphiques de l'Utilisateur sur les fenêtres des opérations. L'assistance de la Machine consiste à assurer les butées graphiques liées au critère de cohérence : agrandissement, translations des fenêtres impossibles, et à traduire chaque décision détaillée en termes de modifications de sous-niveaux de charge sur le plan agrégé autour du repère choisi.

   Par soucis de flexibilité et d'interactivité maximales, l'Utilisateur peut à tout moment, modifier ou revenir sur l'une ou plusieurs de ses décisions.

2. Stratégie Machine
   Cette stratégie automatique repose sur l'heuristique présentée en III.4. L'Utilisateur peut décider de l'ordre des calculs entre les décisions de type 1 (diminution de dates de fin au plus tard), et les décisions de type 2 (augmentation de dates de début au plus tôt), selon leur faisabilité vis-à-vis de l'environnement.

3. Stratégie Hybride Homme-Machine
   Selon laquelle l'Utilisateur a la possibilité de modifier "manuellement", c'est-à-dire conformément à la Stratégie Homme, les solutions calculées par la Stratégie Machine.

L'Utilisateur a donc la possibilité de désagréger les décisions de régulation de charge, autour d'un, plusieurs, ou tous les repères de la Structure Adjacente. Ce choix laissé entièrement libre en situation de laboratoire, pourra être orienté, ou limité en situations réelles : une telle démarche devant bien évidemment être issue d'études spécifiques (à chaque site) de faisabilité et de pertinence sur les plans ergonomique et organisationnel.

Nous pourrions toutefois envisager une approche dynamique des décisions de régulation, utilisant des techniques d'horizons glissants : les décisions agrégées prises sur l'horizon de planification étant désagrégées au fil du temps et des événements, autour du, ou des premier(s) repère(s). Des décisions détaillées prises trop longtemps à l'avance pouvant s'avérer inutiles ou infaisables par la suite.

III.7.3 Ecran 4 : lignes de charge locales

Les décisions prises à l'aide des écrans 2 et 3 de MARGE 2 ne prennent pas en compte les données détaillées de la ressource. En effet, lorsque, par exemple, elles sont centralisées et prises par une seule personne, ou alors bien en amont de la fabrication, il peut être inutile ou non pertinent de prendre en compte des données trop précises, peu ou pas encore prévisibles. Mais dans d'autres cas ou situations, un soucis de faisabilité vis-à-vis de l'aval : ordonnancement et/ou pilotage de la fabrication en "temps réel", peut nécessiter leur présence dans la prise de décision sur les opérations. C'est ce que permet l'écran 4 de l'interface MARGE 2.

Cet écran inclut des informations appartenant aux trois écrans précédents :

1. le repère choisi,
2. les fenêtres temporelles qui le chevauchent,
3. les plages de fonctionnement des exemplaires avec leurs intervalles d'arrêt, et
4. un menu qui permet d'afficher d'autres écrans et revenir en arrière dans la prise des différentes décisions.

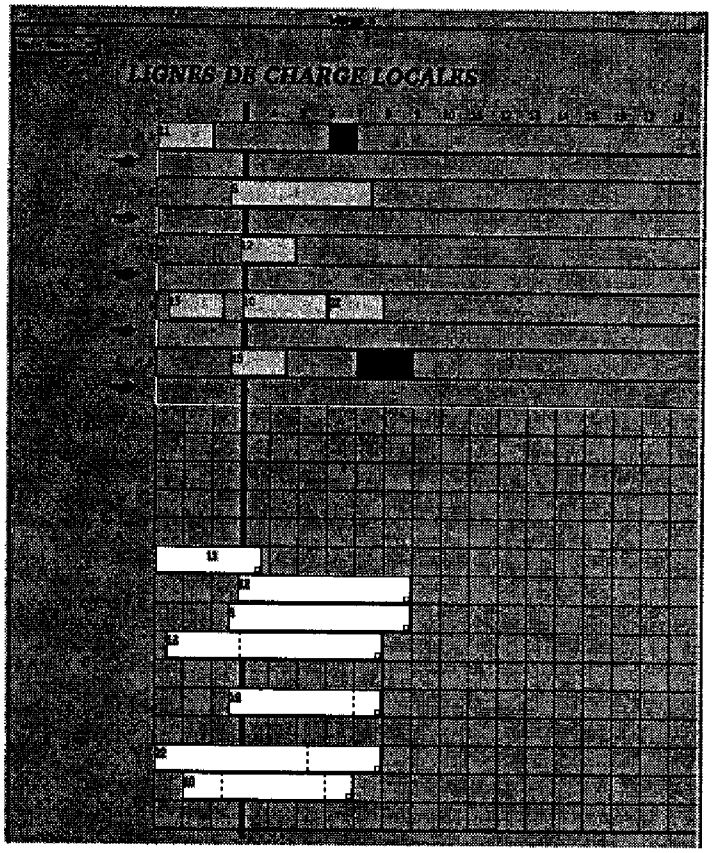
Deux types de décisions peuvent être alors considérées :

1. des décisions de rétrécissement des fenêtres temporelles, et
2. des décisions d'affectation et de séquencement des tâches sur les exemplaires disponibles.

Les opérations concernées sont affichées au dessous des lignes de charges. L'Utilisateur a la possibilité :

1. De rétrécir les fenêtres, conformément aux décisions vues précédemment avec les écrans 2 et 3.
2. De choisir des opérations pour les <u>affecter</u> et les <u>positionner</u> sur les différentes lignes de charge

Outre les aides fournies par la "Machine" et explicitées dans la description des écrans 2 et 3, celles supplémentaires liées aux décisions d'affectation et de positionnement des opérations aux plages de fonctionnement des exemplaires, concernent les mécanismes de déduction et de propagation explicités en III.6.3 et provenant des règles élémentaires de l'Analyse Sous Contraintes.


LIGNES DE CHARGE LOCALES

III.8 Conclusion

Notre étude des décisions de régulation au niveau détaillé des opérations, a donné lieu à la réalisation d'une nouvelle interface Homme-Machine MARGE 2, connecté au premier module MARGE 1. Les diverses stratégies "Homme", "Machine" et "Hybrides Homme-Machine" permettent à l'Utilisateur de réaliser une re-planification des opérations, cohérente avec les nouvelles courbes de charge régulées au niveau agrégé, en manipulant et raisonnant sur les marges de temps.

Si de plus, certaines contraintes détaillées de disponibilité des exemplaires de la ressource considérée sont prises en compte, la posibilité est offerte à l'Utilisateur de manipuler des marges d'affectations et de séquencements, tout en demeurant assisté par l'ordinateur assurant certains mécanismes de blocages, de déductions et de propagations issus de quelques règles simples de l'Analyse Sous Contraintes.

En l'état actuel d'avancement de nos travaux, les Stratégies "Machine" n'ont donné lieu qu'à une heuristique limitée pour la re-planification des opérations, sans prise en compte des contraintes détaillées de ressource. Celles-ci pourraient être abordées comme éventuelles extensions de ce travail, en fonction par exemple de chaque site particulier.

Concernant le module MARGE 2, une étape additionnelle de validation ergonomique reste à faire.

Bibliographie

[ALLEN 81] **J.F. ALLEN**
"An interval based representation of temporal knowledge ". 7th IJCAI, Vancouver, 1981.

[AXSATER 84] **S. AXSATER**
"Aggregation and Dissaggregation in Hierarchical Production Planning". EJOR. 1984, 17.

[BITRAN et AL. 83] **G.R. BITRAN, E.A. HAAS, A.C. HAX**
"Hierarchical Production Planning : a Two stage System". Opns. Res. 1983, 30.

[DANNENBRING 77] **D.G. DANNENBRING**
"A Evaluation of Flow-Shop Sequencing Heuristics". Management Sci. 1977. 23, 11.

[ERSCHLER 76] **J. ERSCHLER**
"Analyse sous contraintes et aide à la décision pour certains problèmes d'ordonnancement". Thèse de doctorat d'état, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1976.

[ESQUIROL 86] **P. ESQUIROL**
"Règles et processus d'inférence pour l'aide à l'ordonnancement de tâches en présence de contraintes". Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1986.

[FISHER 73] **M.L. FISHER**
"Optimal Solution for Scheduling Problems Using Lagrange Multipliers, part 1". Opns. Res. 1973, 21.

[GIARD 88] **V. GIARD**
"Gestion de la production". 2ème édition. Economica. Paris. 1988.

[GOTHA 93] **GOTHA**
"Les Problèmes d'Ordonnancement". Recherche Opérationnelle. Vol 27, No. 1, 1993, 77-150.

[IMBERT 86] **S. IMBERT**
"Interaction entre deux niveaux de décisions en planification de la production". Thèse de doctorat de 3éme cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1986.

[LE GALL 89] **A. LE GALL**
"Un système interactif d'aide à la décision pour l'ordonnancement et le pilotage en temps réel d'atelier". Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1989.

[LENSTRA 77] **J.K. LENSTRA**
"Sequencing by Enumerative Methods". Math. Cent. tracts 69. Centre for Mathematical and Computer Science. Amsterdam. 1977.

[LOPEZ 91] **P. LOPEZ**
"Approche énergétique pour l'ordonnancement de tâches sous contraintes de temps et de ressources". Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1991.

[MERCE 87] **C. MERCE**
"Cohérence des décisions en planification hiérarchisée". Thèse de doctorat d'état, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1987.

[MINOUX 83] **M. MINOUX**
"Programmation mathématique, théorie et algorithmes", tome 1. Dunod. Paris. 1983.

[NAWAZ et AL. 83] **M. NAWAZ, E. ENSCORE, I. HAM**
"A Heuristic Algorithm for the m Machine, n Job Flowshop Sequence Problem". Omega. 1983, 11, 1.

[PORTMANN 88] **M. PORTMANN**
"Méthodes de décomposition spatiales et temporelles en ordonnancement de la production". RAIRO-APII. Vol 22, 1988, 439-451.

[ROY 70] **B. ROY**
"Algèbre moderne et théorie des graphes", tomme II. Dunod. Paris. 1970.

[THURIOT et AL. 94] **C. THURIOT, N. LOMPRE, F. TORRES, E. TREMBLAY, M.F. VALAX**
"A graphical and ergonomic module for decision of workload regulation aid in systems of discrete and diversified productions : MARGE 1 and 2". IEEE-SMC. 1994.

[THURIOT et VALAX 94] **C. THURIOT, M.F. VALAX**
"Graphical Intelligent Interface for Hybrid Decisions in Manufacturing Workshops, An Alternative to Automatic Workload Curves and Scheduling". Advances in Agile Manufacturing. P.T. Kidd and W. Karwowski (Eds). IOS Press. 1994.

Conclusion Générale

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet pluridisciplinaire en collaboration avec des psychologues du travail et ergonomes. Il a porté sur l'étude des décisions de régulation des charges de travail sur une ressource agrégée de type Poste de Charge, dans les cas d'ateliers de fabrications discrètes et diversifiées (manufacturières), et a donné lieu à la réalisation de l'interface Homme-Machine **MARGE** : **M**odule d'**A**ide à la **R**égulation de charge, **G**raphique et **E**rgonomique.

Des études initiales, réalisées sur des sites réels et divers, ont constaté une incompatibilité des outils d'aide à la décision existant actuellement, avec les besoins réels de leurs Utilisateurs responsables de la fabrication. Elles ont abouti au constat d'un double besoin d'**Autonomie** et d'**Ergonomie**.

- Pour répondre au premier besoin d'Autonomie, l'approche adoptée est basée sur le principe de décomposition des structures décisionnelles en centres de décisions répartis, liés entre eux par des relations du type "amont-aval", chaque centre amont transmettant ses décisions en termes de contraintes à respecter par l'aval.

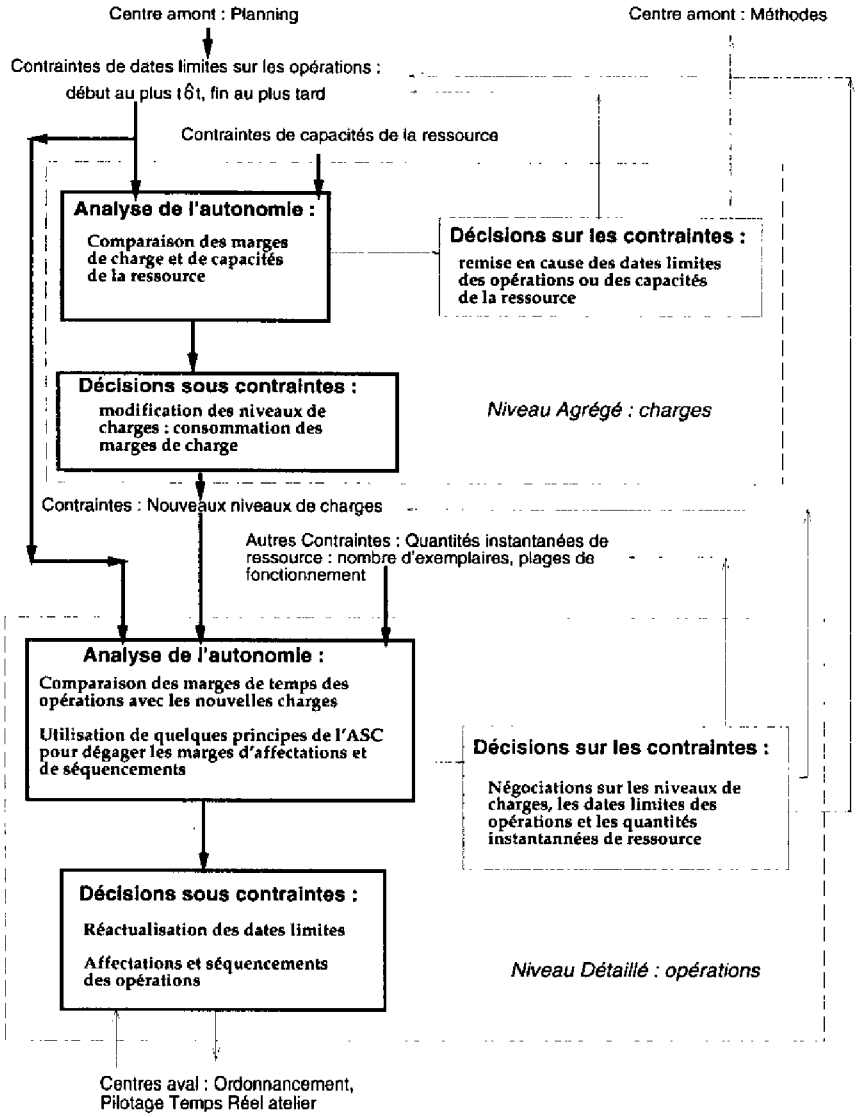
  Concernant le centre de décision de Régulation de Charge sur une ressource agrégée, celui-ci a été décomposé en deux sous-centres, correspondant à deux niveaux d'agrégation distincts :

  1. le centre de régulation agrégée, qui porte sur les charges proprement dites, et les capacités de la ressource, et
  2. le centre de régulation détaillé, qui porte sur les opérations et, éventuellement, les disponibilités des exemplaires de la ressource.

- Pour répondre au besoin d'Ergonomie, nos efforts ont porté sur :

  1. d'une part, la compatibilité entre les représentations mentales liées aux décisions de régulation, et les concepts et mécanismes associés de marges : marges de charges, de capacités, de temps, d'affectations, de séquencements, ...
  2. d'autre part, les représentations graphiques et manipulations associées de ces divers types de marges, utilisant, entre autre, la métaphore des vases communicants au niveau agrégé des charges, et celle du tableau de Gantt au niveau détaillé des opérations.

Reprenant le schéma simplifié du fonctionnement d'un centre de décision (présenté dans le chapitre I), nous pouvons synthétiser nos apports et réalisations, et présenter d'éventuelles perspectives :



Rappelons que chaque centre (ou sous-centre) est composé de trois "modules" ou phases :

1. phase d'analyse de l'autonomie,
2. phase de décision sous-contraintes, et
3. phase de décision sur les contraintes.

- Pour ce qui concerne le sous-centre de Régulation agrégée, nous proposons :

  1. pour la phase d'analyse de l'autonomie, une comparaison charges/capacités sur la base d'une représentation graphique de leurs marges respectives.
  2. pour la phase de décisions sous-contraintes, différents supports d'aide à la modification des niveaux de charges.

  La phase 3. de décision sur les contraintes n'as pas été abordée. Elle pourrait consister en une analyse des remises en cause des différentes décisions prises en amont :

  1. dates limites des opérations décidées par le Planning,
  2. capacités de la ressource, déterminées en général par les Méthodes.

- Pour le sous-centre de Régulation détaillée, nous proposons :

  1. pour la phase d'analyse de l'autonomie, une comparaison entre les marges de temps des opérations et les nouvelles charges. Dans le cas de prise en compte des contraintes détaillées de ressource, des représentations graphiques et manipulations associées des marges d'affectations et de séquencements.
  2. pour la phase de décisions sous-contraintes, différents supports d'aide à la réactualisation des dates limites, et à l'affectation et au séquencement des opérations.

  La phase 3. de décision sur les contraintes n'as pas, non plus, été abordée. Elle pourrait consister en une analyse des remises en cause des différentes décisions prises en amont :

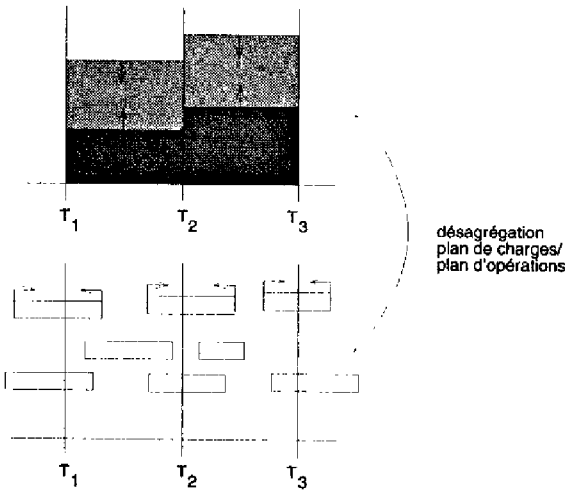
  1. nouveaux niveaux de charges décidés par le sous-centre de régulation agrégée,
  2. quantités instantanées de ressource décidées par les Méthodes,
  3. dates limites des opérations décidées par le Planning, ...

Ces phases 3. associées aux deux sous-centres considérées, pourront demander une étude approfondie des mécanismes automatiques de relaxation de contraintes et des processus plus socio-organisationnels de négociations de contraintes.

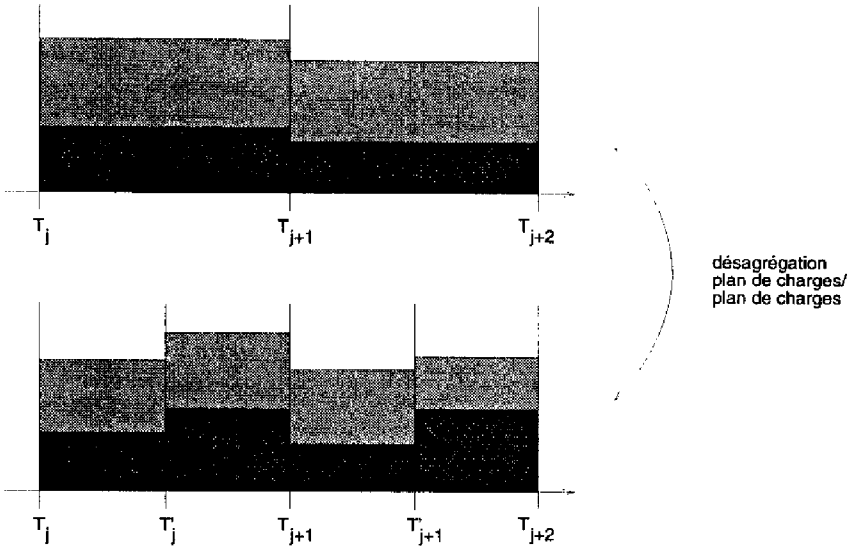
Par ailleurs, d'autres recherches doivent se poursuivre, concernant une approche dynamique des problèmes de Régulation, et utilisant une technique d'horizon glissant [MERCE 87].

Dans ce cadre, deux types de désagrégations peuvent être mis en jeu :

1. la première désagrégation étant, celle présentée dans ce mémoire, du passage du plan de charges au plan des opérations :



2. le second type de désagrégation concernant la décomposition d'une Structure Adjacente non minimale, en une Structure Adjacente plus détaillée [THURIOT], révélant ainsi des charges elles-mêmes désagrégées :

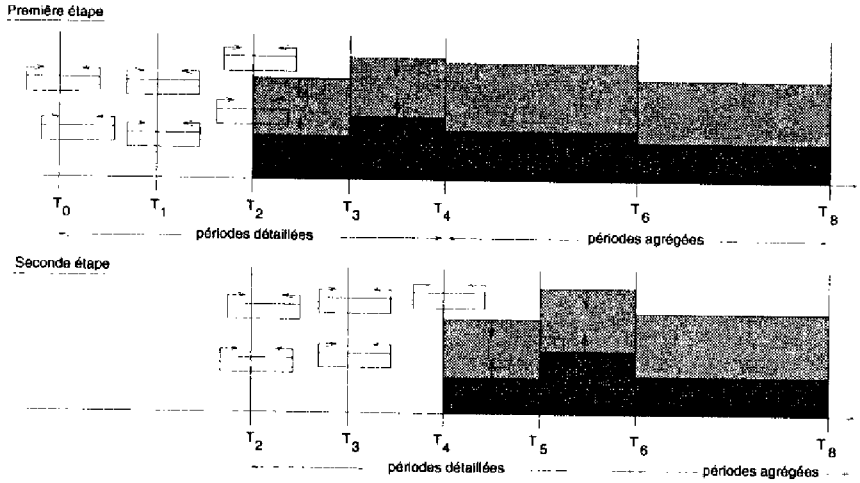


Un tel mécanisme étant entièrement (et facilement) automatisable, contrairement au précédent.

On peut alors imaginer une démarche itérative et progressive consistant, à chaque étape :

- sur la, ou les premières périodes détaillées de l'horizon, à réaliser le passage du plan de charge régulé lors de l'étape précédente, au plan d'opérations.

- sur la, ou les périodes détaillées suivantes, réaliser la régulation de la charge.
- laisser enfin le reste de l'horizon décomposé selon une Structure Adjacente initiale agrégée.



Une telle approche reviendrait à :

1. raisonner et prendre des décisions sur les opérations à court terme (par exemple, sur la journée).
2. raisonner et prendre des décisions sur des charges relativement détaillées à moyen terme (par exemple, sur chaque jour de la semaine).
3. consulter les charges agrégées à long terme (par exemple, sur chaque semaine du mois).

Et pourrait faire l'objet d'une validation ergonomique.

Enfin, et sur un plan plus pratique, une tentative d'intégration de tels outils d'aide, pourrait faire l'objet d'une étude plus approfondie des stratégies décisionnelles, instanciant ainsi le contenu des différents menus ouverts des stratégies "Homme", "Homme-Machine", et "Hybrides Homme-Machine" de notre prototype de laboratoire, en fonction de chaque site.

Ceci devrait, bien évidemment, conforter notre approche pluridisciplinaire d'automaticiens, informaticiens, psychologues du Travail, ergonomes, Utilisateurs, et s'inscrire dans une perspective plus large, prenant en compte, entre autre, les aspects socio-organisationnels, d'appropriation, de formation, etc., liés à l'intégration d'outils d'aide conçus sur la base d'une plus grande initiative de chacun dans les systèmes de production.

Bibliographie

[ALLEN 81] **J.F. ALLEN**
"An interval based representation of temporal knowledge ". 7th IJCAI, Vancouver, 1981.

[ALLEN 83] **J.F. ALLEN**
"Maintening knowledge about temporal intervals". Communications of the ACM, 1983.

[AXSATER 84] **S. AXSATER**
"Aggregation and Dissaggregation in Hierarchical Production Planning". EJOR. 1984, 17.

[ANTHONY 65] **R.N. ANTHONY**
"Planning and Control Systems : A Framework for Analysis". Harvard University Press. Cambridge, Mass. 1965.

[AVALLONE 94] **M. AVALLONE**
"Contribution à l'Intégration du prototype de Régulation de Charge MARGE dans le progiciel d'ordonnancement ORDO". DESS de Sciences cognitives et d'Interactions Hommes-Machines. Université Toulouse Le Mirail. 1994.

[BECHTE 88] **W. BECHTE**
"Theory and practice of load-oriented manufacturing control". Int. J. Prod. Res., 1988, Vol. 26, No. 3, 375-395.

[BECHTE 94] **W. BECHTE**
"Load-oriented manufacturing control just-in-time production for job shops". Production Planning and Control, 1994, Vol. 5. No. 3, 292-307.

[BERTRAND 83] **J.W.M. BERTRAND**
"The effect of workload dependent due-dates on job-shop performance ". Management Science. Vol. 29, No. 7, 1983.

[BERTRAND 81] **J.W.M. BERTRAND**
"Production control and information systems for Component manufacturing shops". Elsevier. 1981.

[BITRAN et AL. 83] **G.R. BITRAN, E.A. HAAS, A.C. HAX**
"Hierarchical Production Planning : a Two stage System". Opns. Res. 1983, 30.

[CELLIER et AL. 88] **J.M. CELLIER, M.F. VALAX, J. ERSCHLER, C.THURIOT**
"Une analyse des fonctions planification-ordonnancement de la division mécanique de l'A.T.S.". Rapport interne. 1988.

[CELLIER et AL.] **J.M. CELLIER, M.F. VALAX, J. ERSCHLER, C. THURIOT**
"Rapport préliminaire sur une analyse des fonctions planification-ordonnancement de la Division Systèmes de l'ATS".

[CIAIS 89] **B. CIAIS**
"Planification des données temporelles : Etude des plans et de leur utilisation dans la fonction ordonnancement d'un système de production". Mémoire de Maîtrise. Université Toulouse Le Mirail. 1989.

[COURTOIS et AL. 92] **A. COURTOIS, M. PILLET, C. MARTIN**
"Gestion de Production". Les Editions d'Organisation. 1992.

[DANNENBRING 77] **D.G. DANNENBRING**
"A Evaluation of Flow-Shop Sequencing Heuristics". Management Sci. 1977. 23, 11.

[DE BRITO et PIDOUX 93] **G. DE BRITO, C. PIDOUX**
"Contribution à la validation d'une interface d'aide à l'Organisation du Travail dans les Ateliers : Problème de lissage de charge ". Maîtrise de Psychologie. Université Toulouse Le Mirail. 1993

[DE TERSSAC et REYNAUD 92] **G. DE TERSSAC, J.D. REYNAUD**
"L'Organisation du Travail et Les Régulations Sociales", dans *"Les Nouvelles Rationalisations de la Production"*. Editions Cépaduès. 1992.

[DE TERSSAC 90] **G. DE TERSSAC**
Autonomie et Régulation dans le travail. 1990

[ERSCHLER et THURIOT 92] **J.ERSCHLER, C.THURIOT**
"Approche par Contraintes pour l'Aide aux décisions d'ordonnancement" dans *"Les Nouvelles Rationalisations de la Production"*. Editions Cépaduès. 1992.

[ERSCHLER 76] **J. ERSCHLER**
"Analyse sous contraintes et aide à la décision pour certains problèmes d'ordonnancement". Thèse de doctorat d'état, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1976.

[ESQUIROL 86] **P. ESQUIROL**
"Règles et processus d'inférence pour l'aide à l'ordonnancement de tâches en présence de contraintes". Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1986.

[FISHER 73] **M.L. FISHER**
"Optimal Solution for Scheduling Problems Using Lagrange Multipliers, part 1". Opns. Res. 1973, 21.

[GIARD 88] **V. GIARD**
"Gestion de la production". 2ème édition. Economica. Paris. 1988.

[GOLDRATT et COX 86] **M. GOLDRATT, J. COX**
"Le but, l'Excellence en Production". Afnor Gestion. 1986.

[GOTHA 93] **GOTHA**
"Les Problèmes d'Ordonnancement". Recherche Opérationnelle. Vol 27, No. 1, 1993, 77-150.

[GUILLEVIC 91] **C. GUILLEVIC**
"Psychologie du Travail". Editions Nathan. 1991.

[GUPTA et GHOST 88] **T. GUPTA, B. GHOSH**
"A Survey of Expert Systems in Manufacturing and Process Planning". Computer in Industry 11. (1988) 195-204.

[HAMICHI et KIEFFER 86] **S. HAMICHI, J.P. KIEFFER**
"Les progiciels de la Gestion de Production". Ed. de l'Usine Nouvelle. 1986.

[HUGUET 94] **M.J. HUGUET**
"Approche par contraintes pour l'aide à la décision et à la coopération en Gestion de Production". Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse. Informatique Industrielle. 1994.

[HUGUET et AL. 94] **M.J. HUGUET, G. DE TERSSAC, J. ERSCHLER**
"Autonomie et Cohérence dans un réseau de centres de décision : Contraintes et Négociations" dans *Actes des Journées de Rochebrune "Autonomie et Interactions Fonctionnelles"*. Janvier 1994.

[ILOG 91] **ILOG**
"Aïda, Guide de Programmation". Version 1.65.

[IMBERT 86] **S. IMBERT**
"Interaction entre deux niveaux de décisions en planification de la production". Thèse de doctorat de 3éme cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1986.

[INDUSTRIES ET TECHNIQUES 92] **INDUSTRIES ET TECHNIQUES**
"Guide d'Achat : Logiciels de Gestion des Flux de Production". Juin 1992.

[KING et FISCHER 89] **C.U. KING, E.L. FISCHER**
"BARBS : integrating simulation, optimization and knowledge-based techniques to identify and eliminate production bottlenecks". Int. J. Computer Integrated Manufacturing 2 (6). 1989. 317-328.

[KUSIAK et CHEN 87] **A. KUSIAK, M. CHEN**
"Expert systems for planning and scheduling manufacturing systems". Europ. J. Op. Res. 34. 1987. 113-130.

[LARSEN et ALTING 93] **N.E. LARSEN, L. ALTING**
"Criteria for selecting a production control philosophy". Production Planning and Control. 1993. Vol 4. No. 1. 54-68.

[LE GALL 89] **A. LE GALL**
"Un système interactif d'aide à la décision pour l'ordonnancement et le pilotage en temps réel d'atelier". Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1989.

[LENSTRA 77] **J.K. LENSTRA**
"Sequencing by Enumerative Methods". Math. Cent. tracts 69. Centre for Mathematical and Computer Science. Amsterdam. 1977.

[LOMPRE et AL. 94] **N. LOMPRE, C. THURIOT, F. TORRES**
"MARGE : Module d'Aide à la Régulation de Charge Graphique et Ergonomique ". Rapport LAAS No. 94032. 1994.

[LOPEZ 91] **P. LOPEZ**
"Approche énergétique pour l'ordonnancement de tâches sous contraintes de temps et de ressources". Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1991.

[MARTEL 93] **J. MARTEL**
"Le pilotage des flux". Revue française de Gestion Industrielle. No. 4. 1993.

[MEINADIER 91] **J.P. MEINADIER**
"L'Interface Utilisateur". Dunod 1991.

[MERCE 87] **C. MERCE**
"Cohérence des décisions en planification hiérarchisée ". Thèse de doctorat d'état, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1987.

[MINOUX 83] **M. MINOUX**
"Programmation mathématique, théorie et algorithmes", tome 1. Dunod. Paris. 1983.

[MULKENS 93] **H. MULKENS**
"Les nouvelles organisations productives". Revue française de Gestion Industrielle. No. 3. 1993.

[MUSTAFA 89] **M.A. MUSTAFA**
"An integrated hierarchical programming approach for industrial planning". Computers and Industrial Eng. 16 (4). 1989.

[NAWAZ et AL. 83] **M. NAWAZ, E. ENSCORE, I. HAM**
"A Heuristic Algorithm for the m Machine, n Job Flowshop Sequence Problem". Omega. 1983, 11, 1.

[NYEN 88] **P.A. NYEN**
"OPT-rules in discrete events simulation models. An algorithm for scheduling based on critical source identification". Proc. of 4th Int. Conf. Simulation in Manufacturing. 1988. 21-32.

[ORLICKY 75] **J. ORLICKY**
"Material Requirements Planning". 1975.

[PELISSIER] **J. PELISSIER**
"Utilisation des statistiques en psychologie ". Privat.

[PIRTTEM 88] **Programme PIRTTEM CNRS pour la année 1988**
"Planification et Contrôle de l'exécution des activités dans les systèmes de production".

[PLOSZAJSKI et AL. 93] **G. PLOSZAJSKI, M.G. SINGH, K.S. HINDI**
"An Overview of some computer-aided production management issues". Information and Decision Technologies 18. (1993) 405-413.

[PORTMANN 88] **M. PORTMANN**
"Méthodes de décomposition spatiales et temporelles en ordonnancement de la production". RAIRO-APII. Vol 22, 1988, 439-451.

[ROY 70] **B. ROY**
"Algèbre moderne et théorie des graphes", tomme II. Dunod. Paris. 1970.

[SCAPIN 86] **D. SCAPIN**
"Guide ergonomique de conception des interfaces homme-machine ". Rapport de recherche INRIA, No. 77. 1986.

[SCIENCES HUMAINES] **SCIENCES HUMAINES**
"L'Enigme de la décision". No. 2. Mai-Juin 1993.

[SHINGO 83] **S. SHINGO**
"Maîtrise de la Production et Méthode Kanban". Editions d'Organisation. 1983.

[SPALANZANI 93] **A. SPALANZANI**
"Précis de Gestion Industrielle et Production". Presses Universitaires de Grenoble. 1993.

[THURIOT et LOMPRE 93] **C. THURIOT, N. LOMPRE**
"Coopération entre automaticiens et Ergonomes dans la Conception de MARGE : Module d'Aide à la Régulation de charge, Graphique et Ergonomique" dans *"Ergonomie des Interfaces Homme-Machine"*. Rapport LAAS No. 93370. 1993.

[THURIOT et AL. 92] **C. THURIOT, F. TORRES, N. LOMPRE**
"MARGE : Module d'Aide à la Régulation de charge, Graphique et Ergonomique". Journée des Affiliés du LAAS-CNRS. Juin 92.

[THURIOT et TORRES 92] **C. THURIOT, F. TORRES**
"Interface graphique pour l'aide à la décision de répartition de charges de travail". ERGO-IA. 1992..

[THURIOT et VALAX 93] **C. THURIOT, M.F. VALAX**
"Aides Logicielles à l'Organisation du Travail dans les Ateliers de Productions Discrètes et Diversifiées". 1993

[THURIOT et AL. 94] **C. THURIOT, F. TORRES, M.F. VALAX**
"A new approach for Computer Assisted Human Diagnosis and Decisions in Manufacturing Workshops". 1994.

[THURIOT et AL. 94] **C. THURIOT, N. LOMPRE, F. TORRES, E. TREMBLAY, M.F. VALAX**
"A graphical and ergonomic module for decision of workload regulation aid in systems of discrete and diversified productions : MARGE 1 and 2". IEEE-SMC. 1994.

[THURIOT et VALAX 94] **C. THURIOT, M.F. VALAX**
"Graphical Intelligent Interface for Hybrid Decisions in Manufacturing Workshops, An Alternative to Automatic Workload Curves and Scheduling". Advances in Agile Manufacturing. P.T. Kidd and W. Karwowski (Eds). IOS Press. 1994.

[TORRES et AL. 94] **F. TORRES, C. THURIOT, M.F. VALAX**
"Conception et Validation d'une Interface d'Aide aux décisions hybrides d'Atelier". ERGO-IA. Biarritz. 1994.

[VALAX 86] **M.F. VALAX**
"Cadre temporel et planification des tâches quotidiennes". Thèse de Doctorat Psychologie du travail. Université Toulouse Le Mirail. 1986.

[VALAX et CELLIER 92] **M.F. VALAX, J. CELLIER**
"Aides à l'Organisation du Travail dans les Ateliers : problèmes du décalage entre prévision et réalisation", dans *"Les Nouvelles Rationalisations de la Production"*. Editions Cépaduès. 1992.

[VALAX et AL. 93] **M.F. VALAX, C. THURIOT, E. TREMBLAY, F. TORRES**
"Niveaux de planification dans une interface d'Aide Logicielle à l'Organisation de Travail dans les Ateliers", dans *Actes du Colloque de prospective Recherches pour l'Ergonomie*, Université de Toulouse- Le Mirail. Novembre 1993.

[VALAX et AL. 93] **M.F. VALAX, N. LOMPRE, C. THURIOT, E. TREMBLAY**
"Approche Traitement de l'Information pour la Validation d'une Interface d'Aide à la Régulation de la Charge". 1993

José Fidel Torres Delgado

Un système interactif d'aide à la décision pour la régulation de charges de travail dans les ateliers

Les décisions de régulation de charge sur une ressource agrégée comprenant plusieurs exemplaires du même type, sont abordées dans une perspective pluridisciplinaire, conciliant aspects Humains et Automatiques. La tentative est de répondre à un besoin double d'Autonomie décisionnelle et d'Ergonomie des outils d'aide proposés aux responsables de telles décisions.

Pour cela, l'approche présentée repose sur une décomposition du système décisionnel en centres liés entre eux par des relations du type "amont-aval", les décisions prises en amont étant traduites en termes de contraintes devant être respectées par l'aval. L'originalité réside alors dans l'analyse des raisonnements, représentations mentales et mécanismes automatiques liés aux diverses marges laissées par un jeu de contraintes (délais, dates, quantités de ressource, ...) pesant sur le centre de régulation :

• à un niveau agrégé des décisions, il s'agira de raisonner sur des marges de charge et de capacités de ressource, en exploitant certains mécanismes automatiques de glissements, dits de vases communicants. De telles marges sont révélées par une décomposition temporelle de l'horizon en Structure Adjacente, faisant elle-même l'objet d'une première étape décisionnelle.

• à un niveau plus détaillé et compte tenu du niveau précédent, ou amont, il s'agira de raisonner sur des marges de temps, et éventuellement de séquencements et d'affectations des opérations de fabrication, en exploitant certains mécanismes automatiques de déductions et de propagations issus de l'Analyse Sous Contraintes.

L'interface Homme-Machine **MARGE** : Module d'Aide à la décision de Régulation, Graphique et Ergonomique, constitue une application des éléments théoriques précédents, et s'inscrit dans une démarche itérative de conception/validations ergonomiques menée avec une équipe de recherche en Psychologie du Travail.

Mots clés: Aide à la décision, Centre de décisions, Autonomie, Ergonomie, Régulation de charges, Interface Homme-Machine, Marges, Contraintes.

Un interactive decision support system for workload regulation in workshops

The decisions of Workload Regulation on a given aggregated resource are considered by a pluridisciplinary approach, trying to conciliate Human and Automatic aspects. The Deciders's double need of decisional autonomy and Ergonomy of the proposed tool aids, is taken into account.

The approach proposed to support autonomy aspects, is based on a model of networks of centers of decision, communicating their decisions in terms of constraints to be respected by their lower centers. The originality of this work resides in the analysis of reasonings, mental representations and automatic mecanisms associated with different types of slacks, delimited by a set of constraints to be respected by a given center (slacks of time, capacity, work, ...).

• at a first aggregated level of decisions, one will have to reason and decide on slacks of workload and capacities of the resource, by the exploiting of automatic "communication vessels" mecanisms of workload transferts. Such slacks can be revealed by a temporal Adjacent Structuration or decomposition of the time horizon.

• at a second detailed level of decisions, taking into acount the constraints issued from the aggregated level, one will have to reason and decide on slacks of time, sequences and allocations of the operations on the detailed items of the resource, by the exploiting of some automatic propagation and deduction processes of the Constraints Based Analysis.

The Graphical Interface **MARGE** constitutes an application of the presented concepts results, and is subjected to iterative ergonomic validations.

Key words : Decision support, Center of decisions, Autonomy, Ergonomy, Workload Regulation, Graphical Man-Machine Interface, Slacks, Constraints.