50376
1990
281

N° d'ordre : 639

50376
1990
281

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE FLANDRES ARTOIS

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE
en
PRODUCTIQUE, AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

par

Pierre-Alain YVARS
Ingénieur I.D.N

BIBLIOTHEQUE INTERUNIVERSITAIRE
SECTION DE SCIENCES
LILLE

POSTE DE TRAVAIL DU ROBOTICIEN POUR L'ETUDE, LA SIMULATION ET LA RECONFIGURATION DES LIGNES DE PRODUCTION FLEXIBLES DANS L'INDUSTRIE MANUFACTURIERE.

APPLICATION AUX LIGNES D'ASSEMBLAGE ROBOTISEES D'UN GRAND GROUPE INDUSTRIEL

Soutenue le 28 Novembre 1990 devant la Commission d'Examen

Membres du jury:	M. DOMBRE	Rapporteur
	M. STAROSWIECKI	Rapporteur
	M. BORNE	Examinateur
	M. GENTINA	Examinateur, directeur de thèse
	M. HATON	Examinateur
	M. RAULT	Examinateur
	M.GIRARD	Invité
	M. VILLEMOT	Invité

030 030279 1

AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués à la Direction Informatique, Télecommunications et Automatismes (DITA) du groupe Peugeot SA (PSA), en collaboration avec le Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle (LAII) de l'Institut industriel Du Nord (IDN) dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE), sous la direction de Monsieur Jean-Claude GENTINA, professeur à l'IDN. Je tiens ici à le remercier du soutien, des conseils et des critiques dont il m'a fait bénéficier pendant ces travaux.

Je voudrais dès à présent remercier Monsieur Luc VILLEMOT, responsable du service Intelligence Artificielle de PSA.DITA pour les conseils éclairants qu'il a pu me fournir et pour la mise à ma disposition d'un ensemble de moyens informatiques qui ont permis la réalisation de ces travaux. Je lui sais particulièrement gré de l'autonomie qui m'a été laissée pendant ces trois années, gage du succès d'une entreprise de recherches.

Je tiens également à remercier

Monsieur DOMBRE, chargé de recherche au LAMM à Montpellier,
Monsieur STAROSWIECKI, professeur à l'Université des Sciences et Techniques de LILLE,

d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

et

Monsieur BORNE, professeur à l'IDN,
Monsieur HATON, professeur à l'Université de NANCY,
Monsieur RAULT, professeur au CNAM et chargé de mission Dynamique de l'expérience à PSA.DITA,

pour l'honneur qu'ils me font en participant à mon Jury de Thèse.

Je suis en outre très honoré par la présence à ce Jury de Monsieur GIRARD, directeur du département Technologies et Informatique Avancées (TIA) à PSA.DITA, et de Monsieur VILLEMOT déjà cité.

Je voudrais ici remercier tous les membres du département TIA de la DITA et plus particulièrement ceux du service intelligence artificielle dans lequel j'ai passé ces trois années ainsi que l'ensemble des chercheurs du laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de l'IDN.

Mes remerciements vont encore à toutes celles et ceux qui, à titres divers, ont participé à l'élaboration et à la réalisation de ce mémoire.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE 9

CHAPITRE I 12

CHAPITRE II 59

CHAPITRE III 190

CONCLUSION GENERALE 211

BIBLIOGRAPHIE 212

ANNEXES 223

CHAPITRE I

LA SIMULATION C.A.O ROBOTIQUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION FLEXIBLES

Introduction 12

I Problématique et contexte de l'étude 13

I.1 Le monde industriel et son évolution 13
I.2 Le système de production et son évolution 14
I.2.1 Automatisation 14
I.2.2 Intégration 17
I.2.3 Flexibilité 18
I.2.3.1 Généralités 18
I.2.3.2 Aspects de la flexibilité 19
I.2.3.3 Flexibilité et ateliers flexibles 20
I.3 Contexte industriel de nos travaux 21
I.3.1 Le contexte 21
I.3.2 Les tôleries polyvalentes 22
I.3.2.1 Généralités 22
I.3.2.2 Les produits 22
I.3.2.3 Structuration 23
I.3.2.4 Moyens de production 26
I.3.2.5 Flexibilité et outil de production 26

II La conception et la simulation des systèmes de production 28
II.1 Généralités 28
II.2 Méthodologie de conception 28
II.2.1 Spécificité des systèmes flexibles 28
II.2.2 Les facteurs clés d'une conception 29
II.2.3 Les phases de conception 30
II.3 Les étapes de conception d'une ligne de production 31
II.3.1 Les différentes étapes de la conception 31
II.3.2 Cas des lignes robotisées de ferrage 32
II.3.2.1 Etape préparatoire générale 33
II.3.2.2 Etape de détermination de la faisabilité des gammes 34
II.3.2.3 Etape d'habillage des gammes 36
II.4 La simulation des systèmes de production 36

III La simulation C.A.O Robotique 38
III.1 Modélisation 38
III.1.1 Généralités sur la modélisation C.A.O 38
III.1.2 Modélisation de l'environnement et de la périrobotique 39
III.1.3 Modélisation des robots 40

III.2 Simulation et outils asssociés 40
III.2.1 Objectifs 40
III.2.2 Création des tâches 41
III.2.3 Outils spécifiques 41
III.3 Génération hors-ligne d'un programme de commande 42
III.3.1 Principe 42
III.3.2 Problèmes inhérents à cette méthode 42
III.3.3 Comparaison avec une approche de type langage textuel 42
III.4 Exemples de systèmes industriels 43

IV Vers une simulation C.A.O Robotique des lignes de production robotisées 44
IV.1 Limites des systèmes actuels 44
IV.2 De la nécessité d'un outil de planification globale 44
IV.3 Apport des techniques d'intelligence artificielle 45
IV.3.1 Historique 45
IV.3.2 Les techniques de l'IA 46
IV.3.3 IA et Productique 51
IV.3.4 Les techniques d'IA dans le cadre de notre étude 56

Conclusion 58

CHAPITRE II

SARTRE
Système d'Aide à la Reconfiguration de Tôlerie RobotiséE

Introduction 59

I Description générale du système 60
I.1 Présentation générale du projet SARTRE 60
I.1.1 La problématique 60
I.1.2 Le domaine d'application 62
I.1.3 Les outils existants 67
I.2 Objectifs du projet 68
I.2.1 Objectifs technologiques 68
I.2.2 Conséquences économiques 69
I.3 Organisation du système 69
I.4 Fonctionnement général 71
I.4.1 De la conception à la programmation hors-ligne 71
I.4.1.1 Etude critique de la méthodologie classique de conception de gammes robot 71
I.4.1.2 Proposition de méthodologie 72
I.4.2 Mise en oeuvre de la méthodologie de conception 74
I.4.2.1 Phase de spécification 75
I.4.2.2 Filtrage inter-zone et analyse de formes 78
I.4.2.3 Simulation 79
I.4.2.4 Génération des pseudo-gammes et mise à jour des modèles C.A.O 79
I.4.2.5 Validation C.A.O locale 79
I.4.2.6 Analyse des résultats C.A.O 80
I.4.3 Outils informatiques 80
I.4.4 Architecture matérielle globale 82

II Modèle et aide à la modélisation 83
II.1 Représentation des connaissances statiques 83
II.1.1 Problématique et motivations 83
II.1.2 L'approche objet 83
II.1.3 Implémentation 86
II.2 Les bases de données et le modèle relationnel 86
II.2.1 Objectifs d'un SGBD 86
II.2.2 Modélisation de l'information 87
II.2.3 Le modèle relationnel 89
II.3 Les bases de données sous SARTRE 90
II.4 L'approche objet sous SARTRE 91
II.4.1 Généralités 91
II.4.2 Description du modèle 91

II.5 Communication couche objet / SGBD 92
II.5.1 Les limites du modèle relationnel 92
II.5.2 Perspectives en matière de bases de données 93
II.5.3 La solution retenue: le couplage faible 94
II.5.3.1 Le principe 94
II.5.3.2 L'interpréteur de requêtes SQL 95
II.5.3.3 Dialogue modèle objet, modèle relationnel 96
II.6 Spécification et aide à la modélisation: l'interface homme-machine 96
II.6.1 Généralités 96
II.6.2 Fonctionnalités 97
II.6.2.1 Menu "spécification" 97
II.6.2.2 Menu "base de données" 100
II.6.3 Implémentation 101

III Le moteur et le problème d'affectation 102
III.1 Problématique 102
III.2 Rappel des méthodes d'optimisation combinatoire 103
III.2.1 Théorie des graphes et allocation de ressources 103
III.2.2 La programmation dynamique 103
III.2.3 Les méthodes approximatives 103
III.2.4 La programmation par contraintes 104
III.2.5 Le connexionisme 105
III.3 L'approche proposée: dualité planificateur, moteur 105
III.3.1 Le concept 105
III.3.2 Le moteur 106
III.3.3 Implémentation 110

IV Le planificateur 112
IV.1 Raison d'être 112
IV.2 Prise en compte des contraintes de soudage 112
IV.2.1 Le soudage 113
IV.2.2 Le soudage par points 113
IV.2.3 La technologie des pinces-robot 114
IV.2.4 Dimension de l'espace des réglages 117
IV.2.5 Modélisation des assemblages 118
IV.2.6 Critères de choix et de compatibilité outil 119
IV.2.7 Critères de compatibilité d'assemblage 123
IV.2.8 Acquisition des paramètres d'assemblage 127
IV.2.9 Prise en compte d'un produit existant 127
IV.2.10 Niveau d'intégration 128
IV.3 Prise en compte des contraintes d'implantation robot 129
IV.3.1 La problèmatique 129
IV.3.2 Types de robots considérés 129
IV.3.3 Modèle géométrique direct 132
IV.3.4 Modèle géométrique inverse 132
IV.3.5 Les contraintes à satisfaire 134
IV.3.6 Dimension de l'espace des réglages 134
IV.3.7 Réglages liés 135
IV.3.8 Niveau d'intégration 137

IV.4 Prise en compte du temps de cycle et des contraintes d'équilibrage de ligne 138
IV.4.1 Problématique 138
IV.4.2 Instabilité du temps de cycle 139
IV.4.2.1 Temps de cycle et loi de mouvement 139
IV.4.2.2 Estimation du temps de cycle pour une gamme existante 141
IV.4.2.3 Estimation du temps de cycle pour une pseudo-gamme 141
IV.4.3 Tentative de minimisation 143
IV.4.3.1 Justification de l'approche 143
IV.4.3.2 Heuristiques mises en oeuvre 143
IV.4.4 Equilibrage de gammes 144
IV.4.4.1 La problématique 144
IV.4.4.2 SARTRE et l'équilibrage de gammes 145
IV.5 Intégration 145
IV.5.1 Cycle de fonctionnement d'une planification 145
IV.5.2 Initialisations 147
IV.5.2.1 Phase de préfiltrage robot 147
IV.5.2.2 Phase de préfiltrage effecteur 148
IV.5.2.3 Phase de compatibilité but-effecteur 148
IV.5.3 Génération des contraintes inter opérations 149
IV.5.4 Génération des transitions 149
IV.5.5 Règles heuristiques de résolution 150
IV.5.5.1 Généralités 150
IV.5.5.2 Analyse et synthèse de situation 152
IV.5.5.3 Heuristiques de choix de ressources 153
IV.5.5.4 Régime révocable 155
IV.6 Paramétrage du planificateur. Fonctionnement en mode simulation 156
IV.6.1 Généralités 156
IV.6.2 Fonctionnalités 157
IV.7 Métaplanification 158
IV.7.1 Intérêt 158
IV.7.2 Mise en oeuvre 158

V Une méthode de positionnement de robots manipulateurs en conception de systèmes flexibles de production 162
V.1 Introduction 162
V.2 Espace de travail et espace d'implantation: l'état de l'art 162
V.2.1 Espace de travail 163
V.2.2 Espace d'implantation 165
V.3 L'approche proposée 166
V.3.1 Le concept de base 166
V.3.2 Etude du porteur 168
V.3.3 Prise en compte des contraintes 169
V.3.3.1 Contraintes de débattements 170
V.3.3.2 Contraintes de boucles fermées 170
V.3.3.3 Contraintes de position de coude 171
V.3.3.4 Contraintes dues au poignet 172
V.3.4 Analyse du domaine obtenu 174

V.4 Exploitation et mise en oeuvre de l'approche 178
V.4.1 Implantation automatique de robots 178
V.4.2 Etude d'accessibilité 180
V.4.3 Intégration au sein de l'environnement SARTRE 181
V.4.3.1 Problématique 181
V.4.3.2 Accessibilité robot 182
V.4.3.3 Paramétrage de la réhausse d'outil 182
V.4.3.4 Paramétrage de la base du manipulateur 183
V.5 Tentative de généralisation et perspectives 185

Conclusion 189

CHAPITRE III

APPLICATION A UN EXEMPLE INDUSTRIEL ENSEIGNEMENTS ET PERSPECTIVES

Introduction 190

I Cycle de vie et validation 191

II Présentation de la ligne et des produits 193
II.1 Description de la ligne 193
II.2 Les produits 196

III Modélisation et spécification 198
III.1 Spécification ligne 198
III.2 Spécification véhicule 199

IV La simulation sous SARTRE 201
IV.1 Généralités 201
IV.2 Introduction d'un véhicule et reconfiguration de ligne préexistante 202

V Enseignements et perspectives 208

Conclusion 210

INTRODUCTION GENERALE

La flexibilité en matière de production, c'est à dire la capacité d'adapter le plus rapidement possible la fabrication à la demande, conduit à une automatisation de plus en plus poussée de l'outil de production.

Toutefois, jusqu'aux années 1970, les automatismes mis en place ne présentaient que peu de souplesse, tout changement dans la gamme de fabrication entrainant une reconception des outils, voire des ateliers.

Avec l'apparition des premiers robots industriels, l'appareil de production allait pouvoir gagner en flexibilité en posant toutefois aux techniciens de nouveaux problèmes quant à l'agencement de ces sites robotisés.

Ces systèmes de production flexible peuvent être grossièrement répartis suivant deux classes:

* les cellules flexibles robotisées, ensembles compacts composés de quelques robots, où la flexibilité ne s'exprime que localement du fait du caractère déterministe de l'affectation des opérations aux différentes ressources robots et cela dès le début de la conception des dites cellules.

* Les lignes flexibles robotisées, ensembles importants, composés d'un grand nombre de robots regroupés en postes; ces mêmes postes étant les composants de zônes agencées sous forme structurées, calquées sur le découpage naturel du ou des produits à fabriquer. Dans ce type de système, l'affectation des opérations à effectuer sur les différents robots de la ligne est souvent remise en cause au cours de la conception. Du fait des paramétrages des différentes ressources, les gammes associées à chacun des robots sont créées dynamiquement en cours d'étude.

Pour étudier tous ces systèmes, les techniques de simulation ont fait leur apparition à toutes les étapes du cycle de conception de l'appareil de production.

Parmi cette panoplie d'outils mis à la disposition des techniciens, nous retiendrons plus particulièrement les systèmes de simulation C.A.O Robotique qui allient la puissance de modélisation d'un système de C.A.O à la richesse de modules robotiques destinés à aider à l'étude des systèmes robotisés.

Si ces systèmes conviennent relativement bien à l'étude des cellules robotisées où les gammes robots sont connues dès le début de la conception, ils semblent insuffisants pour traiter une partie des problèmes posés par la conception et surtout la reconfiguration (dans le cas d'une production multi produits sur la même ligne) des lignes de production robotisées où un niveau décisionnel supplémentaire est nécessaire pour traiter les problèmes d'allocations de ressources sous contraintes sous-jacents à l'étude de ce type de système.

Dans ce contexte, les travaux présentés dans ce mémoire tentent d'apporter une contribution à l'étude de cette seconde classe de problèmes, en proposant un "poste de travail du roboticien pour l'étude, la conception et la reconfiguration de lignes de production robotisées dans l'industrie manufacturière". Cet environnement est basé sur l'ajout d'un niveau de planification aux systèmes de C.A.O Robotique existants.

Notre approche est appliquée au cas de l'industrie automobile, à travers l'étude de la reconfiguration des lignes d'assemblages robotisées du groupe P.S.A, dans le cadre de l'introduction d'un nouveau type de véhicule sur une ligne existante.

Ce mémoire comporte trois chapitres:

- Le premier chapitre, intitulé "LA SIMULATION C.A.O ROBOTIQUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION FLEXIBLES", se propose, après une brève présentation du problème et du contexte industriel de nos travaux, d'établir un état de l'art nécessairement succinct, dans les domaines de la conception et la simulation des systèmes de production flexibles en insistant tout particulièrement sur l'existant en matière de simulation C.A.O Robotique. L'étude critique de ces systèmes permettra d'en mesurer leurs limites, notamment lorsqu'il s'agit de simuler des lignes de production robotisées complètes, et d'introduire l'approche que nous proposons, basée sur l'ajout d'un niveau décisionnel de planification aux systèmes existants.

- Le chapitre suivant, intitulé "SARTRE: Système d'Aide à la Reconfiguration de Tôlerie RobotiséE", présente l'environnement d'étude, de simulation et de reconfiguration de lignes de production robotisées que nous avons développé. Après une description générale de notre système, destinée à fixer les idées sur une problématique d'étude suggérée dans la première partie de l'exposé, nous examinerons en détail les différents points clés de notre système.

- Quant au troisième et dernier chapitre, il présente les résultats obtenus lors d'une utilisation du système SARTRE en milieu industriel, sur un cas réel de reconfiguration d'une ligne d'assemblage robotisée du groupe P.S.A. Cet exemple de simulation, riche d'enseignements est suivi d'une synthèse des dits enseignements. Nous avons choisi d'intituler cette partie "APPLICATION A UN EXEMPLE INDUSTRIEL - ENSEIGNEMENTS ET PERSPECTIVES".

LA SIMULATION C.A.O ROBOTIQUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION FLEXIBLES

Introduction

Notre travail s'inscrit dans le cadre de l'étude des systèmes de production flexibles, plus particulièrement des lignes de production robotisées.

Le système que nous avons développé se veut une évolution des systèmes de simulation C.A.O Robotique appliquée aux lignes de production robotisées.

Ce chapitre se compose de quatre parties:

- La première, expose la problématique ainsi que le contexte de notre étude. Après un bref historique sur l'évolution du monde industriel, nous proposons d'examiner l'évolution du système de production à travers les axes automatisation, intégration et flexibilité. Ces rappels étant faits, nous terminerons par l'exposé du contexte industriel de nos travaux.

- La seconde, rend compte de la démarche de conception utilisée dans le domaine des systèmes de production flexibles à travers les aspects méthodologiques et dresse un bref tableau des techniques de simulation employées par le technicien dans son cheminement.

- La troisième, s'intéresse aux techniques de la simulation C.A.O Robotique depuis la modélisation jusqu'à la programmation hors-ligne des sites et propose quelques exemples de systèmes industriels couramment utilisés.

- Enfin, la quatrième et dernière partie met l'accent sur certaines limites des systèmes C.A.O Robotique actuels dans le cadre des lignes de production robotisées et propose d'examiner l'apport des techniques d'intelligence artificielle dans l'effort de mise en oeuvre d'un niveau décisionnel de planification adapté. Il introduit ainsi le système que nous avons développé qui sera examiné en détails dans le chapitre suivant.

I Problématique et contexte de l'étude

I.1 Le monde industriel et son évolution

Entrée depuis 1974, date du premier choc pétrolier, dans un cycle de profonde mutation, la société voit son environnement économique et industriel se modifier.

Le vingtième siècle a vu le rôle économique et social de l'entreprise s'accroître jour après jour au rythme de l'expansion de sa production en volume mais également en diversité. Le "produire coûte que coûte" fut de rigueur, amplifié par l'après guerre et les fameuses "trentes glorieuses".

Dès 1970, deux phénomènes apparurent qui catalysèrent la "guerre économique":

- La montée en puissance du Japon et des pays en voie de développement venant détrôner la suprématie occidentale en matière d'industrialisation et de technologie.

- La fin de la période d'expansion galopante et l'entrée dans la récession avec la succession des différents chocs pétroliers.

En 1974, la "guerre économique" faisait suite à la guerre froide et le "produire pour survivre" était le leitmotiv entraînant avec lui un remaniement des anciennes structures de fabrication et de gestion des entreprises jugées inadaptées, obsolètes et beaucoup trop rigides.

En effet, le monde industriel actuel se caractérise par les facteurs suivants, justifiant son évolution:

- L'accentuation de la concurrence devenue mondiale et génératrice de contraintes fortes en termes de délais et de coûts de production.

- La multiplication des moyens et des techniques utilisables en matière de production liée à une complexification croissante de l'appareil.

Tous ces facteurs ont motivé les efforts de recherche entrepris dans le domaine des systèmes de production automatisés visant à proposer des ensembles souples et capables de fabriquer une grande diversité de produits avec une productivité maximale. Ainsi, automatisation, intégration, communication, flexibilité devinrent rapidement des termes phares caractéristiques des moyens retenus pour relever le défi de l'accélération de la compétition et de la complexification des processus et des problèmes à résoudre.

I.2 Le système de production et son évolution

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, l'évolution du monde industriel a impliqué une évolution non moins importante du système de production. Mais s'il est intéressant de tendre vers une automatisation et une flexibilité de production, nous allons voir qu'il convient de soigner tout particulièrement l'intégration de ces nouveaux concepts seul gage d'une automatisation réussie.

I.2.1 Automatisation

Concept éprouvé, l'automatisation fût considérée pendant longtemps comme la voie unique et royale de modernisation des moyens de production.

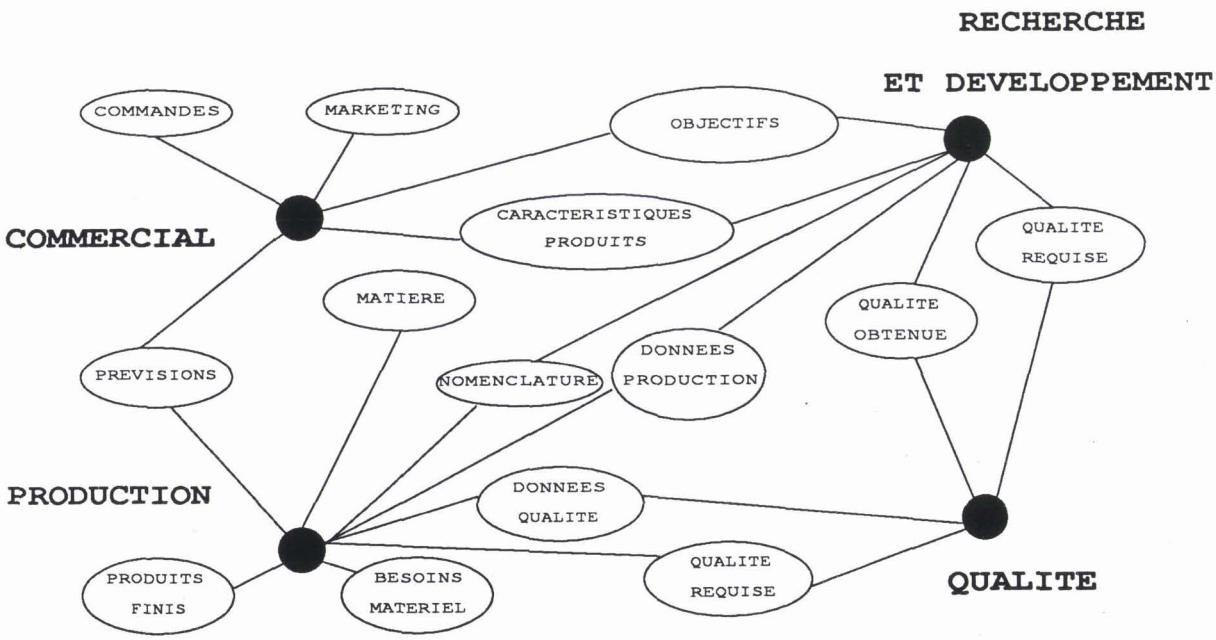


Figure I.1

Néanmoins, elle tend à envahir de nos jours l'ensemble des fonctions de l'entreprise (fig I.1) ainsi que la totalité des différentes étapes du cycle de vie d'un produit (fig I.2).

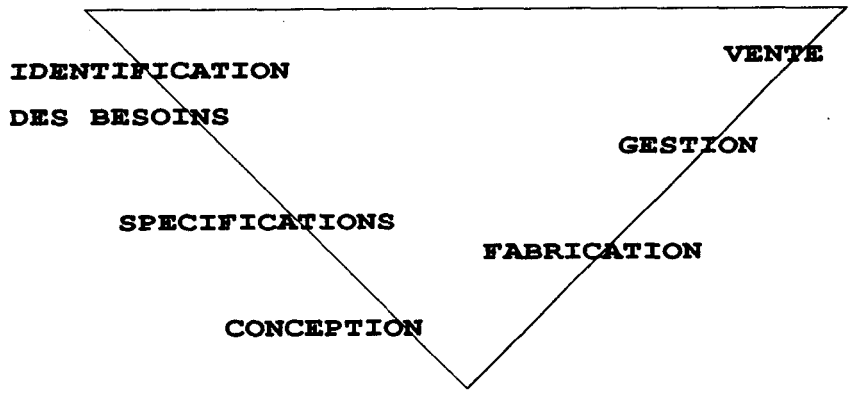


fig I.2

Cette tendance s'explique en grande partie par l'explosion des techniques de l'automatique et du traitement de l'information appliquées au monde industriel. Ces dernières peuvent être regroupée sous le terme générique de XAO pour signifier l'impact du traitement et du contrôle de l'information dans les processus de conception, production etc.

Face à la prolifération des sigles utilisant le suffixe A.O (Assisté par Ordinateur), un effort récapitulatif s'impose /AUM 87/. Selon le cas, les possibilités graphiques, calculatoires, transactionnelles ou conversationnelles des ordinateurs modernes seront plus ou moins mises en jeu, contribuant ainsi à rationaliser la production, pour tenter de maîtriser l'énorme accroissement de complexité de ces systèmes/AUM 87/.

Citons quelques unes des plus importantes techniques de X.A.O:

- CAO : Conception Assistée par Ordinateur.
- FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur.
- GPAO: Gestion de Production Assistée par Ordinateur.
- TGAO: Technologie de Groupe assistée par Ordinateur.
- MAO : Maintenance Assistée par Ordinateur.

Cette démarche d'automatisation a ainsi modifié le cadre conceptuel des systèmes de production quel que soit le niveau considéré.

Examinons ce changement à travers trois points de vue significatifs, les aspects matériels, l'atelier, le système de production.

Le matériel:

Avec l'évolution des différentes technologies, il est devenu de plus en plus complexe, dans le but de devenir le plus autonome possible. Cette autonomie est caractérisée par les points suivants:

* Des possibilités d'opérations multiples.
* Les commandes numériques et autres protocoles de communications.
* Les possibilités de programmation "hors-ligne" des matériels.
* Des possibilités de contrôle et mesure "en-ligne".

L'atelier:

Actuellement, il est de plus en plus structuré et les machines ne sont plus seulement regroupées physiquement au sein d'un même secteur. Des liens de coopération existent entre elles et les systèmes de gestion et de pilotage sont de plus en plus évolués avec l'inflation des moyens informatiques et vont jusqu'à prendre en compte des possibilités de gestion des modes dégradés de type aléas de production ou pannes de machines /GEN 87a,87b/.

Le système de gestion:

Son automatisation a permis de prendre en compte de plus en plus de fonctions parmi lesquelles:

* Gestion des données techniques.
* Gestion des stocks.
* Suivi de production.
* Planification décomposée en plan directeur de production, ordonnancement, lancement.

Diverses stratégies sont mises en oeuvre pour optimiser la production ou plutôt l'adaptation de l'offre à la demande, dans le sens le plus large de l'expression; ils portent des noms tels que "MRP", "JIT", "OPT".

I.2.2 Intégration

Point clé d'une automatisation réussie, l'intégration a pourtant été négligée dans de nombreux cas où l'on a aucunement cherché à apporter une cohérence globale au système conçu, ce qui s'est soldé par de graves désillusions quant aux gains de productivité escomptés.

En effet, une cellule flexible hautement automatisée n'augmentera pas le niveau de productivité de l'entreprise si elle n'est pas parfaitement intégrée à l'ensemble de l'appareil de production. Dans le cas contraire, les liens cellule appareil de production seront fortement compromis et sujets à problèmes.

L'approche intégrée de la production ou CIM (Computer Integrated Manufacturing) est un concept d'intégration de la production illustré symboliquement sur la figure I.3.

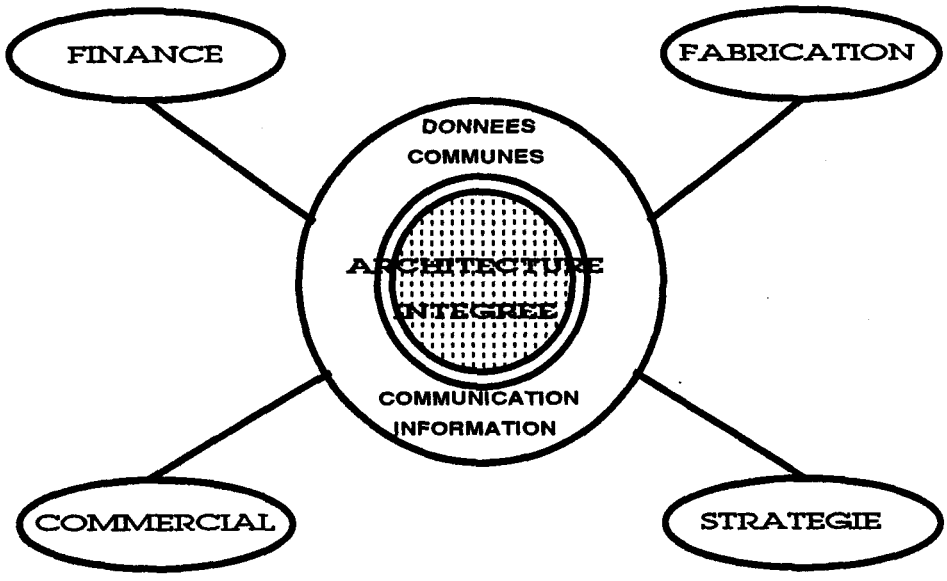


fig I.3

L'approche CIM, basée sur la notion de système postule que l'automatisation doit d'abord se faire en partant du centre avec le système d'information, pour ensuite connecter et intégrer l'ensemble des grandes fonctions de l'entreprise. Elle met l'accent sur la notion de communication et d'échanges au sein de l'entreprise, condition préliminaire à un meilleur fonctionnement d'ensemble et implique par la même une approche globale et hiérarchisée de la conception des processus d'automatisation.

Après une période consacrée à la spécialisation et la centralisation des fonctions et structures, le monde industriel s'oriente maintenant vers une approche systémique de la production caractérisée par une structuration et hiérarchisation de l'appareil ainsi que par des possibilités d'études globales.

L'approche CIM ouvre ainsi la porte aux concepts d'adaptabilité et de flexibilité sur lesquels nous allons maintenant nous étendre.

I.2.3 Flexibilité

I.2.3.1 Généralités

Comme nous l'avons vu au chapitre consacré au monde industriel, l'évolution économique a amené les entreprises à adapter leur production aux besoins du marché.

Le terme de flexibilité, à l'origine synonyme d'adaptabilité est très vite devenu à la mode et par la même sujet à certains abus de langage.

Tout devient flexible dès à présent, les cellules, les machines, les ateliers et même les usines de demain !

Pour tenter de voir plus clair dans cette "pléthore de flexibilité", nous allons tenter de lever certaines confusions.

Notons tout d'abord la contradiction entre "flexibilité" et "productivité accrue". En effet, une machine capable d'effectuer une multitude d'opérations différentes est en général peu productive.

D'autre part, "flexibilité" ne signifie pas forcément "haut degré d'automatisation". Il suffit de prendre le contre exemple d'une machine spéciale très automatisée mais très peu flexible.

Néanmoins, le degré ou niveau d'automatisation de la structure est prépondérant dans le choix du type de flexibilité désiré.

En effet, concept hétérogène par excellence, la flexibilité recouvre un grand nombre d'aspects que nous allons maintenant nous attacher à examiner.

I.2.3.2 Aspects de la flexibilité

De nombreux auteurs ont tenté une approche de classification des types de flexibilité.

Parmi eux, /HUT 79/ propose quatre grandes classes de flexibilité:

* Flexibilité instantanée.
* Flexibilité à court terme.
* Flexibilité à moyen terme.
* Flexibilité à long terme.

Cette classification essentiellement basée sur le facteur temps permet de mesurer les capacités d'adaptabilité d'un ensemble flexible dans une période de temps nécessaire pour l'étude et la mise en place d'un nouveau système (long terme), dans une période de temps consacrée à l'ajustement des moyens disponibles aux besoins réels ou évalués (moyen terme) ou bien dans une période de temps sur laquelle on place les tâches en fonction des capacités du système de production (court terme).

D'autres chercheurs parmi lesquels /BRO 84/ ont eu, semble-t-il, une approche relativement complète du problème en proposant une classification en huit types de flexibilité:

* Flexibilité des machines: Elle rend compte des possibilités de réaction du système de production face à un type de produit pré-déterminé.

* Flexibilité des processus: Elle rend compte des facultés du système à réaliser une gamme de produits de plusieurs manières possibles. On parle de gammes flexibles.

* Flexibilité de produit: Elle mesure la capacité du système à produire un nouveau produit de la manière la plus rapide et la plus économique.

* Flexibilité de routage: Elle mesure la capacité de traitement des modes dégradés du système de production en cas de pannes de machines par exemple.

* Flexibilité de volume: Elle est significatrice des capacités de réaction du système face aux variations du volume de la production.

* Flexibilité d'expansion: Elle rend compte des possibilités d'expansion modulaire du système à partir d'une configuration donnée.

* Flexibilité des opérations: Elle mesure la capacité du système à modifier l'ordonnancement de la gamme opératoire d'un produit donné.

* Flexibilité de production: Elle mesure l'éventail des possibilités de production en terme de produit du système considéré.

I.2.3.2 Flexibilité et ateliers flexibles

Notre ambition n'est pas ici de dresser un panorama exhaustif de l'ensemble des formes d'ateliers flexibles existants et nous nous contenterons d'un bref aperçu tiré de /BON 87/ destiné à donner au lecteur une idée du sujet et des problèmes posés par chacune des formes.

On distingue:

* Les cellules flexibles: Caractérisées par la déconnexion de l'opérateur et de la machine, elles se présentent sous de multiples formes, de la cellule élémentaire à la cellule à centre d'usinage, toutes constituées d'une machine pluri-opératoire et de son système de chargement-stockage lui assurant une certaine autonomie.

* Les cellules à machines identiques: Plus complexes, elles sont constituées d'une ou plusieurs machines de même type munies d'une infrastructure à base de système de contrôle, de lavage ainsi que d'équipements spéciaux tels que des robots d'ébavurage ou autres. Elles imposent un système de gestion des pièces, des outils et des machines au niveau de la supervision.

* Les cellules à renouvellement automatique d'outils: Elles comprennent un magasin central d'outils associé à un bras manipulateur assurant le transfert des blocs d'outils vers le magasin machine et vice et versa.

* Les cellules à machines différentes: Elles sont utilisées lorsque le produit à réaliser nécessite des phases de production différentes ne pouvant être réalisées sur un type de matériel unique.

* Les lignes de transfert flexibles: Elles répondent aux besoins de flexibilité de la fabrication de grandes séries. En effet, dans les ateliers conventionnels, les équipements sont généralement des lignes de transfert ou des machines spéciales et les problèmes de limitations de séries et de type de produits à réaliser ont conduit au concept de lignes de production flexibles. Il est bien évident que les types de produits fabriqués seront très proche les uns des autres et que le degré de flexibilité obtenu sera inférieur à celui d'un centre d'usinage par exemple. Ainsi, dans le domaine de la construction automobile, de telles lignes sont utilisées pour l'assemblage des caisses de véhicules.

* Les ateliers flexibles: Ils répondent aux besoins de la petite et moyenne série et sont aux cellules ce que les grandes entreprises sont aux PMI. Habités par un même objectif, ils s'en différencient par la nécessité d'une intégration élevée.

I.3 Contexte industriel de nos travaux

I.3.1 Le contexte

Les travaux présentés dans ce mémoire se sont déroulés dans le cadre d'une convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) passée entre le Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle (LAII) de l'Institut industriel Du Nord (IDN) et la Direction Informatique Télécommunications et Automatismes (DITA) du groupe Peugeot SA (PSA).

La DITA représente la direction informatique du groupe P.S.A; a cet effet, elle regroupe un certain nombre de services chargés de définir la stratégie du groupe en matière de bureautique, base de données, systèmes d'information, télécommunications, ainsi que des services plus opérationnels ayant en charge les domaines de l'informatique avancée à savoir l'informatique industrielle, la C.A.O, la robotique, l'intelligence artificielle et le calcul scientifique. C'est au sein du service intelligence

artificielle où nous agissions en qualité d'ingénieurs conseil vis à vis des utilisateurs du groupe que j'ai réalisé les travaux présentés dans ce mémoire.

I.3.2 Les tôleries polyvalentes

I.3.2.1 Généralités

En ce qui concerne la production de grande série, le groupe PSA s'est doté d'un équipement particulièrement performant au niveau de ses ateliers d'assemblage par soudage par points de caisses de véhicules.

A l'origine, les opérations étaient déja automatisées. En effet, cela fait très longtemps que l'on sait réaliser des machines spéciales de soudure. La recherche est allée principalement vers la souplesse car la durée de vie d'un modèle d'automobile se réduit de plus en plus. La sortie d'un nouveau modèle reste un bon argument commercial. La machine spéciale représente alors un lourd handicap, car non seulement son prix très élevé ne permet pas son renouvellement avant la fin de son amortissement, mais en plus la mise en route et la montée en cadence représentent aussi un coût important. Les constucteurs se sont donc tournés vers des lignes flexibles de soudure dès que les robots ont représenté une fiabilité suffisante pour être intégrés dans des ensembles de production.

C'est ainsi qu'en 1972 les tôleries polyvalentes sont apparues dans le groupe PSA.

I.3.2.2 Les produits

Ces ateliers ont pour objectifs l'assemblage de caisses de voiture. Celles ci se composent de six éléments principaux: un plancher, un bloc avant (ensemble dans lequel se situe le moteur), une jupe arrière, un côté de caisse gauche, un côté de caisse droit et un pavillon. Pour un même modèle les différentes versions et les normes internationales font qu'il existe environ une centaine de combinaisons possibles. Pour assurer une charge régulière à une usine il faut pouvoir fabriquer deux ou trois modèles différents; une chaîne de production va donc devoir assembler deux ou trois cent types de caisses. Heureusement, la différence provient principalement des composants et non pas de l'opération elle-même. En fait un poste de travail doit pouvoir exécuter une vingtaine d'opérations différentes.

I.3.2.3 Structuration

Les lignes de production du groupe P.S.A sont structurées suivant deux dimensions; on distingue d'une part les parties spécifiques au véhicule et d'autre part, la partie polyvalente commune en théorie à tous les types de véhicules.

La partie polyvalente est décomposée sous la forme d'une arborescence de zones comme le montre la figure I.4. Chaque zone représente grossièrement un sous ensemble d'un véhicule et est caractérisée par le fait qu'en son sein, aucune tôle ou assemblage de tôles n'est amené. Les sous-ensembles à assembler sont convoyés jusqu'à l'entrée de la zone, ils sont assemblés ou partiellement assemblés au sein de la zone puis convoyés pour servir d'entrée à une zone avale. L'arborescence de zones suit donc la logique de remontage du véhicule.

Sur cette figure, les parties spécifiques de la ligne sont représentées par les feuilles de l'arbre, alors que tous les autres noeuds de l'arborescence représentent les différentes zones de la ligne de production.

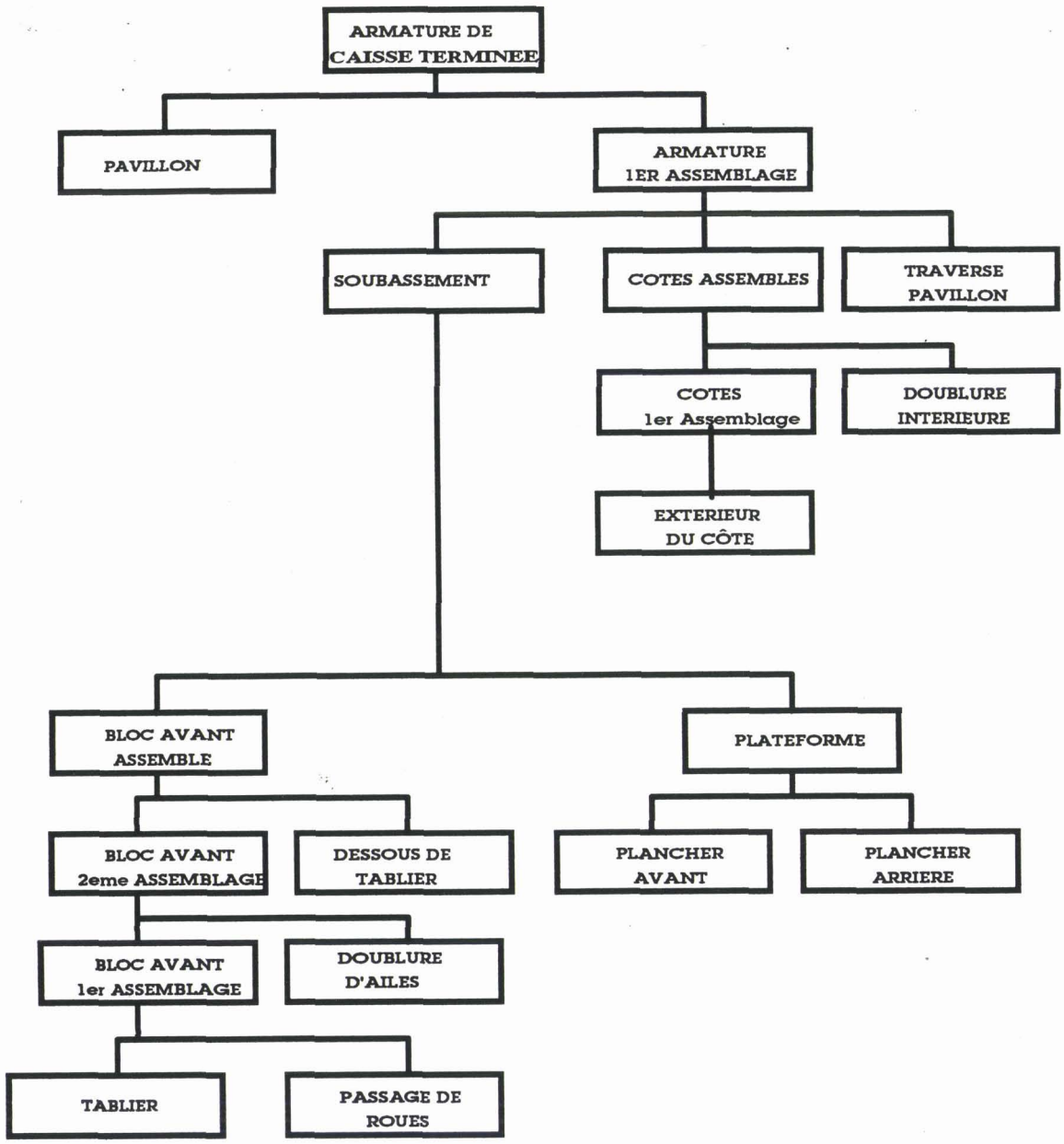


fig I.4

Chaque zone, outre les systèmes de convoyage et manutention est composée d'un poste dit "de conformation" et d'une suite de postes dits "de reprise".

Les postes de conformation permettent d'effectuer des points de soudure stratégiques destinés à assurer un maintien sommaire de la caisse en cours d'assemblage, le reste des points de soudure étant exécutés sur les postes de reprise.

Un poste de conformation (cf figure I.5) se compose d'un conformateur, machine destinée à serrer l'assemblage, et d'un ensemble de robots de soudage par points.

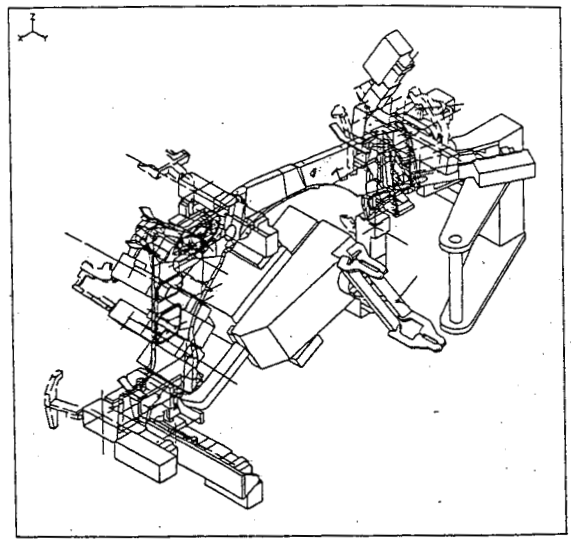


fig I.5

Un poste de reprise (cf figure I.6) quant à lui se compose d'un couple de robots de reprise en général symétrique par rapport à l'axe local de la ligne.

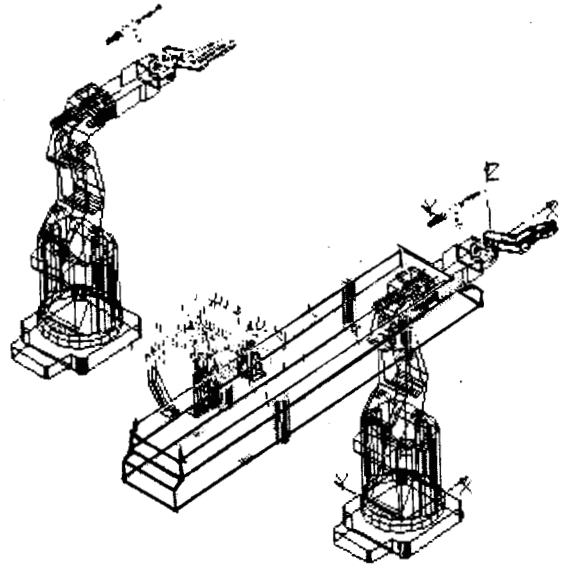


fig I.6

I.3.2.4 Moyens de production

Outre les systèmes de convoyage et de manutention, ils sont essentiellement composés de robots de soudage en soudure par points.

Chaque robot, est composé d'un manipulateur possédant généralement six articulations, muni d'un outil ou d'un préhenseur (figure I.7).

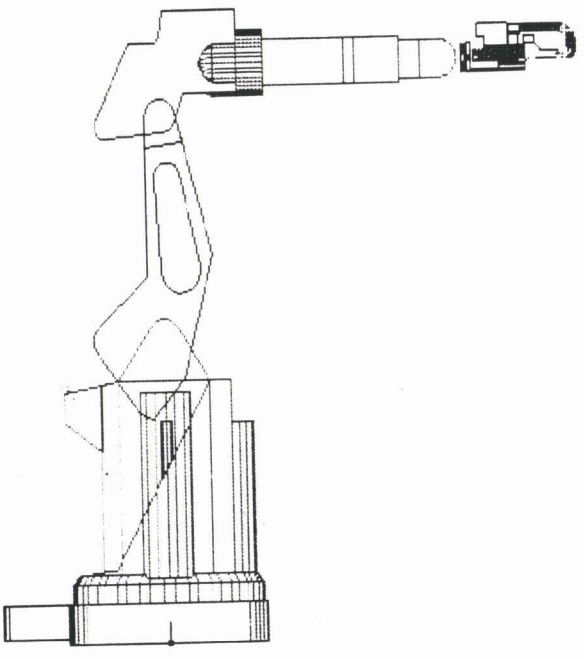


fig I.7

Les robots fonctionnent en boucle ouverte et leur efficacité dépend essentiellement du travail de création et de validation des gammes effectué au stade de la conception ainsi que des travaux de recalage exécutés sur site.

I.3.2.5 Flexibilité de l'outil de production

Elle tient essentiellement aux moyens d'assemblage utilisés; l'ensemble manipulateur + effecteur constitue l'unité de flexibilité caractérisée par un certain nombre de paramètres parmi lesquels les caractéristiques topologiques de l'effecteur, ses caractéristiques technologiques ainsi que les paramètres d'implantation du robot. Tout le problème de la configuration ou de la reconfiguration d'une ligne flexible va consister à ajuster ces paramètres, c'est à dire intervenir sur les degrés de liberté du

poste voire supprimer ou ajouter de nouvelles unités de flexibilité. Proposer un outil permettant de prendre en compte l'ensemble de la conception et de la reconfiguration de tels ensembles de production a constitué le thème principal de notre étude.

II La conception et la simulation des systèmes de production flexibles

II.1 Généralités

La création et la mise en route d'un système de production flexible reposent sur des principes de base spécifiques et globaux. L'installation des moyens de fabrication s'est effectuée, pendant très longtemps de façon empirique de par l'absence d'outils méthodologiques et de simulation. Partant de l'opération la plus élémentaire, le technicien méthodes ayant en charge la fabrication d'un produit cherchait la machine la mieux adaptée à son besoin. Si elle existait, il l'achetait, sinon il en concevait une.

La visite d'ateliers montre qu'il existe trop souvent un nombre important de machines qui n'ont la possibilité de ne réaliser qu'une seule pièce à une cadence fixe. Ce type de matériels ne correspond plus aux besoins actuels du marché.

Les systèmes flexibles représentent un moyen moderne et actuel de production. Néanmoins, leur conception doit être adaptée à l'entreprise en intégrant l'outil de production dans son environnement. Cette étape passe par une méthodologie de conception adaptée à l'étude des systèmes flexibles de production, étude constamment épaulée par l'utilisation d'outils de simulation apte à valider une démarche très tôt dans le cycle conception-fabrication.

II.2 Méthodologie de conception

II.2.1 Spécificité des systèmes flexibles

Les systèmes flexibles possèdent une particularité fondamentale: ils relèvent d'une méthode de conception globale /BON 87/.

Pour ce type d'atelier partir de l'analyse détaillée des pièces à produire pour aboutir à une définition de familles de machines ne suffit pas; en effet, il s'agit de rassembler la plus grande quantité d'informations possible, même si elles concernent des secteurs que l'on ne consulte généralement pas lors de l'achat d'une machine.

Une telle approche remet en cause le paradigme Cartésien selon lequel un problème complexe est décomposable en sous problèmes indépendants; en effet, l'optimum global n'est plus la somme des optima locaux.

Ainsi, une étude globale, cohérente et coordonnée, menée par un ensemble de spécialistes des divers services de l'entreprise s'avère nécessaire pour tendre vers une optimisation globale de la structure: le service technique n'a plus l'exclusivité de l'étude sous peine de ne plus rien optimiser du tout.

L'étude des moyens de production pris isolément peut en effet conduire à des optimisations locales, et par la même à des erreurs de conception globales telles que:

- acheter une machine avant d'étudier son intégration dans l'appareil de production.
- installer un système automatisé sans étudier ses interactions avec l'environnement.
- ne pas tenir compte des évolutions futures.

En conclusion, nous dirons que si l'entreprise veut effectuer des gains sur le prix de revient d'un produit, il lui faudra prendre en compte l'ensemble des facteurs de coût au sein d'une analyse complète de la totalité du cycle du produit de la conception à la distribution.

II.2.2 les facteurs clés d'une conception

L'étude globale d'un ensemble flexible implique la prise en compte d'un nombre de facteurs et de problèmes toujours croissant dus à l'évolution de la complexité des systèmes considérés.

Nous retiendrons toutefois les facteurs suivants dont la prise en compte nous semble vitale lors d'une conception de systèmes flexibles.

- Les produits: L'étude approfondie des différents produits à fabriquer est une des prémisses à la conception d'une structure flexible de production.

- Les machines: C'est un paramètre important du fait des solutions différentes proposées par les fournisseurs

- La structuration de l'atelier: Elle est essentielle quant à l'optimisation des flux de production ainsi qu'aux possibilités de coopération des différentes ressources de l'atelier.

- Le pilotage du système: Le procédé étant déterminé, il s'agit de lui associer une structure de commande adaptée /CRA 89/.

- Les aspects décisionnels: Pris en compte par un niveau de supervision, ils permettent une certaine autonomie de l'atelier (mise en oeuvre effective de la flexibilité).

- Les aléas de production: Bien qu'un ensemble flexible soit généralement étudié au sens de l'optimalité du fonctionnement de ses ressources, il est intéressant d'étudier ses réactions aux aléas de production en lui adjoignant des fonctionnalités de gestion des modes dégradés et de sureté de fonctionnement /CRA 89/.

II.2.3 Les phases de conception

Chaque étape de conception se décompose classiquement (cf figure I.8) de la manière suivante:

* Une phase de spécification
* Une phase de modélisation
* Une phase d'évaluation
* Une phase d'optimisation

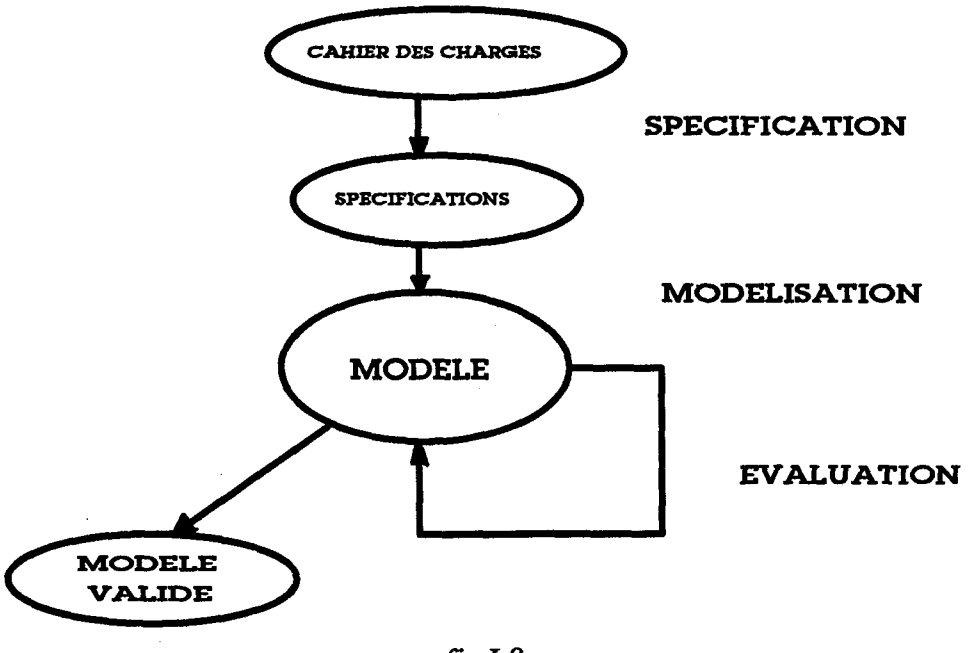


fig I.8

Notons la grande importance et l'absolue nécessité de la phase de modélisation qui permet de disposer d'un modèle de description et de comportement du système qui permettra ensuite évaluation et optimisation.

Dans tous les cas, la démarche est grandement facilitée si les ingénieurs chargés de la conception disposent d'outils adaptés aux spécificités des systèmes de production flexibles dans chacune des phases de conception.

Avant d'examiner rapidement ces outils, nous allons détailler les différentes étapes de conception d'un système flexible en insistant sur les spécificités propres aux lignes de production flexibles, cibles de notre étude.

II.3 Les étapes de conception d'une ligne de production

II.3.1 Les diférentes étapes de la conception

Un projet de conception d'un système flexible de production peut se décomposer de manière quelque peu grossière en quatre étapes /BEL 82/:

- Choix des produits:

Toute préétude d'automatisation et plus généralement tout processus de conception d'un atelier doit débuter par une analyse des gammes de fabrication sur le plan des pièces à traiter et de l'ensemble des opérations qu'elles auront à subir; En effet, même si vue sous l'angle du temps de cycle la gamme de fabrication donne entière satisfaction, l'analyse est nécessaire et souvent génératrice d'un découpage différent de la gamme lié à la capacité des moyens mis en oeuvre /BON 87/.

Ce type d'étude est classiquement mené en collaboration avec les services méthodes de l'entreprise et permet la définition d'un ensemble de gammes ou de sous-gammes types représentatives de la production qui sera effectuée dans l'atelier et de son évolution.

Notons que cette génération de gammes conditionne très fortement les étapes suivantes de choix des moyens de production, de l'architecture et de la conduite de l'atelier d'où l'importance du soin à lui apporter.

- Choix des moyens de production:

Etape déterminante quant au degré de performance de l'ensemble, elle réside essentiellement en un compromis entre le degré d'automatisation et le degré de flexibilité à accorder aux matériels.

- Choix de l'architecture et dimensionnement de la structure:

Il s'agit là de proposer des ensembles ouverts et modulaires pouvant se prêter à d'éventuelles évolutions incrémentales de type ajout de moyens ou accroissement des fonctionnalités de l'existant. /NOY 87/ insiste particulièrement sur ce concept de modularisation de l'outil de production, depuis le procédé jusqu'à sa commande.

Suite au choix de structure, le dimensionnement consistera à qualifier quantitativement celle ci par détermination du nombre de moyens, d'opérateurs, d'outils, nécessaires au fonctionnement du système.

- Etude de la conduite de l'atelier:

Problème excessivement varié, le pilotage de l'atelier recouvre énormément de domaines allant des automatismes à la gestion de production. On distingue néanmoins quatre axes d'efforts principaux:

* La commande de l'atelier et son niveau hiérarchique de supervision /CRA 89/.
* La gestion de l'injection et du lancement des pièces dans l'atelier.
* La gestion des moyens de manutention et de transport.
* La gestion des mouvements de pièces.

Ces directions de recherches sont bien évidemment à compléter par des réflexions concernant la gestion des décisions de sous-traitance, de politiques d'organisation des horaires ...

Notons que cette succession d'étapes n'est qu'apparente et qu'en réalité elles sont fortement corrélées. Une approche système permettant de synchroniser plusieurs études menées en parallèle devient alors indispensable au succés des projets.

II.3.2 Cas des lignes robotisées de ferrage

Nous détaillerons ici les différentes étapes suivies lors de la phase d'élaboration des gammes de soudage robotisées par les techniciens des services méthodes.

Cette phase peut se décomposer en trois étapes principales (figure I.9):

* Une étape préparatoire générale
* Une étape de détermination de la faisabilité des gammes
* Une étape d'habillage des gammes

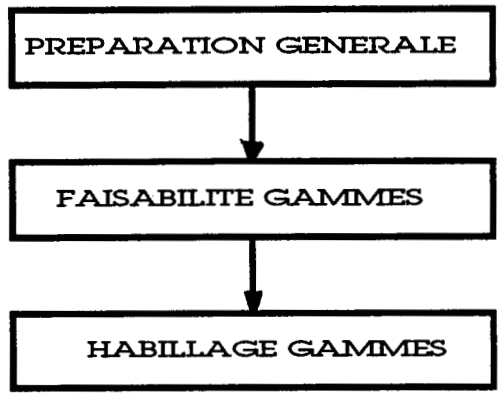


fig I.9

II.3.2.1 Etape préparatoire générale

Elle se décompose de la manière suivante (figure I.10):

* Etude et regroupement initial des opérations (points de soudure à effectuer) en différentes gammes de soudage.
* Attribution initiale des gammes aux différents robots de la ligne
* Attribution de gammes aux intervenants C.A.O.
* Génération d'un modèle C.A.O par poste contenant les valeurs ajoutées Etudes + Méthodes.

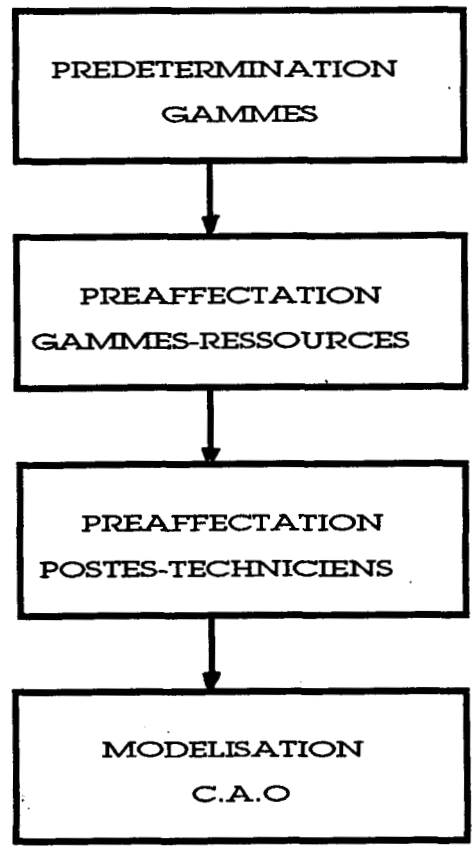


fig I.10

II.3.2.2 Etape de détermination de la faisabilité des gammes

Elle comprend les étapes suivantes (figure I.11):

* Assemblage des modèles de simulation
* Création des tâches robotiques
* Détermination de l'outillage
* Optimisation de l'implantation du robot
* Détermination des collisions
* Insertion des points de passage
* Etude du temps de cycle

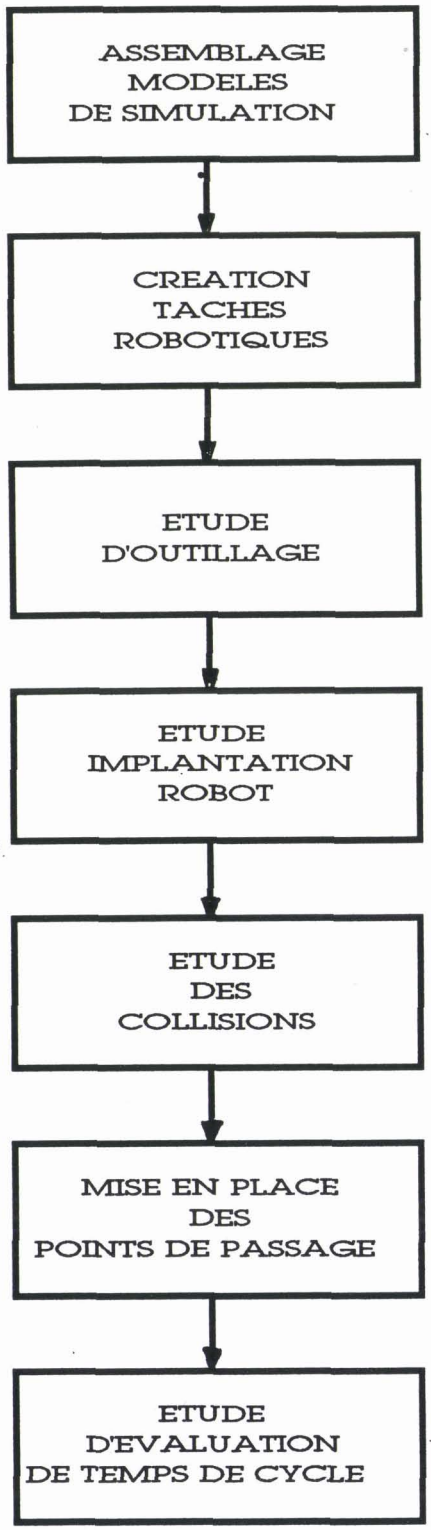

ASSEMBLAGE
MODELES
DE SIMULATION
CREATION
TACHES
ROBOTIQUES
ETUDE
D'OUTILLAGE
ETUDE
IMPLANTATION
ROBOT
ETUDE
DES
COLLISIONS
MISE EN PLACE
DES
POINTS DE PASSAGE
ETUDE
D'EVALUATION
DE TEMPS DE CYCLE

fig I.11

II.3.2.3 Etape d'habillage des gammes

Elle se compose de trois étapes (figure I.12):

* Enrichissement des gammes
* Téléchargement "off-line" (hors-ligne)
* Recalage éventuel

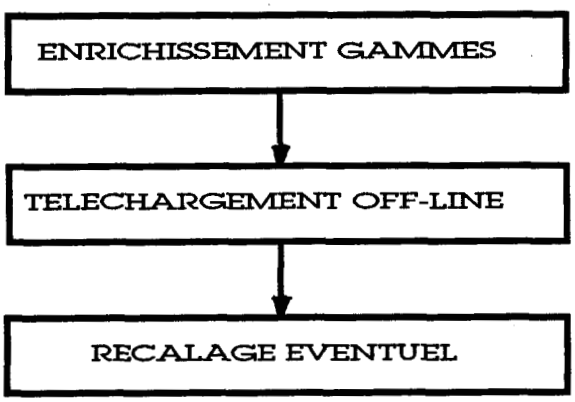


fig I.12

II.4 La simulation des systèmes de production

Nous avons vu au II.2 que chaque étape de conception comportait une évaluation des choix effectués (figure I.13).

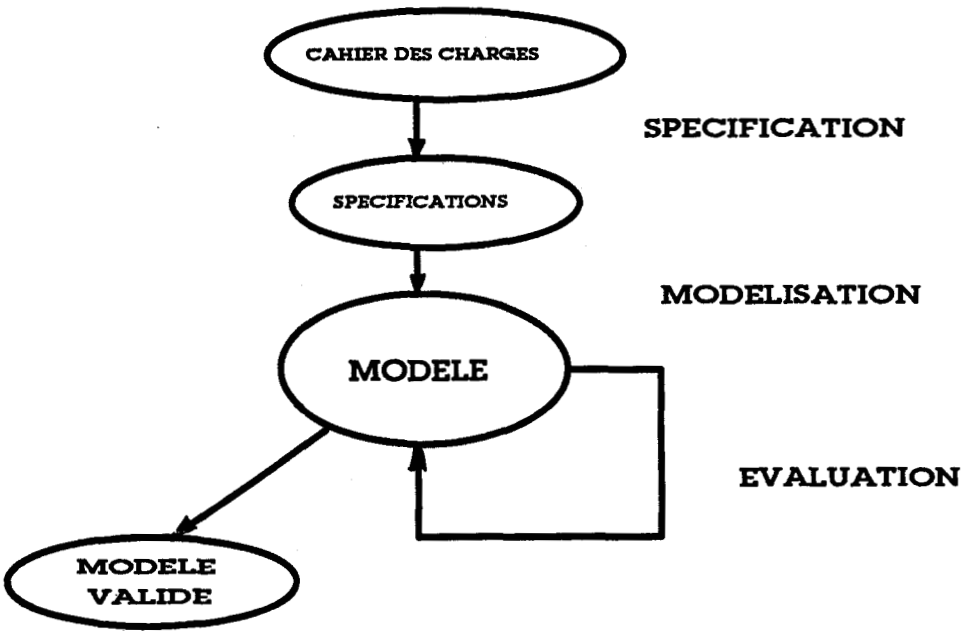


fig I.13

Cette évaluation du modèle élaboré peut se faire par deux voies distinctes:

- L'approche analytique:

Généralement exploitée dans les phases de préétude ou d'évaluation grossière d'une configuration, elle se décompose en deux étapes: la recherche d'un modèle mathématique du système puis, la résolution de ce modèle suivant des techniques issues de la recherche opérationnelle du type programmation linéaire, théorie des files d'attente, réseaux de Petri déterministes /BEL 85/.

L'approche analytique présente l'avantage d'assurer une analyse prévisionnelle des comportements du procédé (par la qualité des résultats qu'elle procure à l'utilisateur); néanmoins, elle n'est utilisable que lorsqu'une formulation mathématique du problème est envisageable, le plus souvent au prix d'une grande simplification. De plus, elle peut conduire à la mise en oeuvre de solutions algorithmiques non polynômiales à coût prohibitif.

- L'approche par simulation:

Souvent utilisée lorsqu'une vue détaillé d'un problème est nécessaire, la simulation fait aujourd'hui une percée massive dans le secteur industriel après avoir longtemps été l'apanage des bureaux d'études dans les secteurs de pointe /KIR 84/.

En ce qui concerne la simulation des systèmes de production flexibles, quantité de techniques de simulation peuvent être utilisées pour simuler les éléments du domaine allant de la commande au procédé /CAS 87/, /BOU 87/, /KAP 88/.

Dans le cadre de notre étude, relative aux systèmes de production flexibles robotisés dans l'industrie manufacturière, nous nous intéresserons plus particulièrement aux systèmes de simulation CAO robotique que nous allons à présent détailler.

III La simulation CAO robotique

Née dans les années 70, la C.A.O n'était alors qu'un outil secondant le créateur par sa fonction de dessin automatique en se substituant à la planche de dessinateur. Dans un second temps, la possibilité d'insertion de mouvements a facilité l'étude des chaînes cinématiques et ouvert la porte aux simulations. Elle est aujourd'hui présente au coeur de l'ensemble des circuits vitaux de l'entreprise moderne. C'est ainsi qu'elle participe grandement à l'accélération de l'automatisation des processus industriels robotisés en se couplant à des modules de simulation robotique pour en faire des systèmes de C.A.O robotique performants.

III.1 Modélisation

III.1.1 Généralités sur la modélisation C.A.O

Soucieux de proposer des logiciels de "haut niveau" basés sur une représentation géométrique la plus exacte possible, les concepteurs de systèmes de C.A.O se sont attachés à développer des modèles de représentation de plus en plus complexes. Ces propositions s'articulent autour de trois axes principaux:

- Approche filaire:

Basée sur des données mathématiques simples, elle ne connaît que les sommets et les arêtes. L'information stockée en base de données se résume à une suite de points et de segments de droites orientées. Cette représentation s'avère être d'une grande ambigüité quant à son interprétation par le technicien C.A.O et est insuffisante pour les industries traitant des surfaces complexes exigeant une modélisation plus riche /POI 89//GAR 83/.

- Approche surfacique:

L'étude est menée sur des surfaces parfois très complexes /CAS 85/ /BEZ 87/.Le problème majeur de cette représentation, du reste bien adaptée aux modélisations de carrosseries et autres surfaces complexes, est posé par la localisation de la matière par rapport à cette surface.

- Approche solide /GAR 86/:

Dans un tel modèle, le système connaît l'objet totalement, au sens où même la matière est représentée. Il s'agit là de la représentation la plus riche mais par là même la plus coûteuse en terme de temps de calcul de certaines opérations ou simulations. Toutefois, on peut considérer que les progrès en cours dans les domaines des stations de travail et des logiciels de C.A.O permettra une utilisation massive de ce type de représentation.

Elle utilise essentiellement quatre types de modèles:

- La représentation des bords (Boundary Representation) où seule la liste des faces représentant la peau de l'objet figure en base de données.
- Le modèle par arbre de construction (Constuctive Solid Geometry ou CSG) qui doit son nom à son organisation arborescente. En général, on trouve aux feuilles de l'arbre généré des volumes élémentaires (parallélépipèdes, cylindres ...) et aux noeuds des opérateurs Booléens (union, intersection, collage, différence) conservant ainsi l'historique de construction du modèle.
- La génération de solide par balayage (ou sweeping), dans lequel le solide résulte du suivi d'une trajectoire par un contour plan.
- L'énumération spatiale où le solide est représenté sur la liste des cellules qu'il occupe. La représentation par "octree" utilisée en 3D est un exemple.

III.1.2 Modélisation de l'environnement et de la périrobotique

Les constituants de la cellule sont représentés dans l'un des modes définis ci-dessus en fonction du modeleur géométrique disponible sur le système de C.A.O considéré.

L'environnement et la périrobotique (préhenseurs, outils) ont souvent avantage à être modélisés sous forme solide. En effet, ce type de représentation permet l'utilisation d'un grand nombre d'outils évolués du type détection de collision /DOU 90/.

III.1.3 Modélisation des robots

Cette étape se scinde en deux parties:

- **Dessin** du robot à l'aide des possibilités intrinsèques au modeleur du système de C.A.O utilisé.

- **Création** proprement dite du robot au sens cinématique du terme. Cette phase consiste à décrire en base de données via une interaction homme-machine /DOM 88a/:

* Les relations cinématiques entre les éléments de la géométrie du robot définie lors de la partie précédente: nombre de degrés de liberté, type de l'articulation (rotoïde, prismatique), des liaisons complexes ou boucles cinématiques simples (parallélogramme, pantographe ...).

* Les caractéristiques articulaires: débattements, accélération, vitesse maximale...

* Des éléments relatifs à la dynamique du système: masse, centre de masse, inertie.

Notons pour terminer la nécessité dans le cadre d'une simulation d'unités de production modernes d'ajouter à cette modélisation des repères de travail permettant de déterminer la position et les performances du robot au sein de la cellule ou du poste considéré.

III.2 Simulation et outils associés

III.2.1 Objectifs

La simulation constitue l'aspect essentiel de la C.A.O Robotique. En effet, une fois modélisée, la cellule sera simulée dans un but d'évaluation de ses performances au sens de certains critères associés à la tâche à effectuer. Cela implique de mettre à disposition du concepteur des outils de description de tâches ainsi que des modules spécifiques de choix d'implantation robot, de détection de collisions, de minimisation de temps de cycle ...

III.2.2 Création des tâches /DOM 88a/

Les outils de création de tâches doivent donner à l'ingénieur chargé de la conception d'une cellule la possibilité de représenter en base de données trois types d'informations:

- des points: Ils sont spécifiés par apprentissage; Le concepteur fait coïncider le repère associé à l'extrémité de l'effecteur avec le repère associé à la pose à atteindre.

- des mouvements: L'utilisateur spécifie la géométrie de la trajectoire; des systèmes plus évolués permettent de préciser des conditions de vitesses, de synchronisation et de mouvements fonctionnels de type compliants ou coopératifs /AND 85/, /BOU 86/, /CRO 87/; notons que ces derniers sont encore du domaine de la recherche.

- des interactions avec l'environnement: Opérations de saisie, de lâcher et d'assemblage d'objets.

III.2.3 Outils spécifiques

La "boite à outils" du simulateur doit offrir un certains nombre de facilités telles que:

- Aide à l'implantation d'un robot dans un environnement précis /DOU 90/.
- Aide à l'évaluation du temps de cycle nécessaire à un robot pour réaliser sa gamme.
- Aide au choix d'une configuration robot lorsque plusieurs sont possibles.
- Détection de collisions éventuelles robot-environnement-périrobotique /TOU 88/.
- Optimisation d'une tâche et minimisation du temps de cycle /TON 84/.

III.3 Génération hors-ligne d'un programme de commande

III.3.1 Principe

Une fois réalisées les deux étapes précédentes, l'ensemble de la cellule robotique est modélisée dans sa configuration optimale. Il semble alors naturel d'utiliser les résultats obtenus par la simulation graphique de la tâche pour piloter le robot réel en-ligne en téléchargeant dans son armoire de commande un fichier directement utilisable. A cet effet, la tâche C.A.O est mise en forme suivant trois types d'approche:

- Génération d'un fichier intermédiaire traitable par le post-processeur du robot.
- Génération d'un fichier de valeurs codeurs.
- Traduction du programme C.A.O dans le langage textuel du robot à commander; ce qui nécessite le développement d'interfaces propres à chacun des langages utilisés.

III.3.2 Problèmes inhérents à cette méthode

Ils sont essentiellement liés à la différence existante entre la description C.A.O des constituants de la cellule et de la réalité. En effet, il s'avère que:

- La modélisation des robots ne tient pas compte des éventuels jeux mécaniques, frottements ...inhérents à toute chaîne cinématique.
- Les transformateurs de coordonnées ainsi que les lois de commandes de l'armoire de commande sont généralement imparfaitement connus.
- La modélisation de l'environnement et de la périrobotique est en générale très approchée.

Toutes ces erreurs impliquent une retouche des trajectoires C.A.O téléchargées (recalage et calibrage).

III.3.3 Comparaison avec une approche de type langage textuel

La programmation par C.A.O et la programmation textuelle /DOM 86/ s'avèrent être en réalité deux approches complémentaires /DOM 87/ et l'on tend à l'heure actuelle vers le développement de systèmes de C.A.O dédiés à la robotique /DOM 87/.

III.4 Exemples de systèmes industriels

La figure I.15 représente les caractéristiques d'un certain nombre de systèmes de C.A.O Robotique du marché /MER 85/.

Fournisseur	*Produit*	*Caractéristiques*	*Matériel*
COMPUTERVISION Tour Galiéni 2 36, av. Galiéni 93175 BAGNOLET Tél. : 43.60.01.57	ROBOGRAPHIX	Modules spécifiques ROBOT KINEMATIC MODEL et OUTPUT PROCESSOR. Représentation filaire.	Stations CDS 4000 et Designer V-X
DASSAULT-SYSTEMES 40, bd H.-Sellier 92150 SURESNES Tél. : 47.28.00.44	CATIA ROBOTICS	Fonctions ROBOT, TASK et CATTASK pour programmation hors-ligne (voir texte).	Calculateurs IBM 33XX, 43XX Poste graphique IBM 5080
GENERAL ELECTRIC/CALMA 31, bd des Bouvets 92000 NANTERRE Tél. : 47.76.33.31	ROBOT-SIM	Version industrielle de GRASP /14/, /15/. Modèles dynamiques	Familles Appollo et Vax
INTERGRAPH 101, rue des Solets SILIC 578 94653 RUNGIS CEDEX Tél. : 45.87.15.62	INTERGRAPH ROBOT PROGRAMMING	Bibliothèque de trois robots. Pas de chronométrage sur l'image.	Vax et Micro-Vax Intergraph
Mc DONNEL DOUGLAS 106, Bureaux de la colline 92213 ST-CLOUD Tél. : 46.02.31.01	4 Modules : BUILD, PLACE, COMMAND, ADJUST	Représentation filaire. Interfaces avec UNIGRAPHICS ou d'autres systèmes de CAO via IGES. Modélisation des boucles 3 D. Temps de cycle donnés à 3 %.	Gamme DEC. Station de Travail Evans et Sutherland HP
SILMA 2111 Grant road LOS ALTOS, CA. 94022, USA Tél. : 415.967.5878	ROBOCAM ROBOFACTS	Représentation filaire. Interface IGES. Animation coordonnée de robots. AUTOPLACE pour implanter des sites. Parallélisme.	Famille Appollo
TECNOMATIX Herentalsebaan 55 B. 2100 ANTWERPEN (DEURNE), Belgique Tél. : 3.332.38.90	ROBCAD	Recherche automatique de trajectoires optimales en temps. Parallélisme. Détection de collinisme.	Stations ROBCAD 50 et ROBCAD 100

fig I.14

Le groupe P.S.A quant à lui, utilise le système de C.A.O CATIA /DAS 89/ avec son module de robotique ainsi que le système de C.A.O CADDS4X de Computer Vision, couplé au système dédié de la société SILMA.

IV Vers une simulation CAO robotique des lignes de production robotisées

IV.1 Limites des systèmes actuels

L'étude précédente montre la relativement bonne adaptation des logiciels C.A.O robotique du marché aux problèmes posés par la conception et la simulation des cellules de production où l'étude de la flexibilité n'est que locale au poste, les problèmes globaux étant reportés au niveau de la modélisation de la partie commande (problèmes de routage ou de synchronisation de processus).

Par contre, dans le cadre d'une conception de ligne de production où l'étude des possibilités d'affectation des tâches aux différents postes est essentielle, il convient de pouvoir mixer approche globale et vue locale lors des études de conception C.A.O pour mener à bien la résolution des problèmes de répartition des opérations, choix de la périrobotique et équilibrage de lignes, problèmes pour lesquels les systèmes actuels ne sont pas adaptés.

IV.2 De la nécessité d'un outil de planification globale

Une surcouche décisionnelle aux systèmes de C.A.O robotique doit permettre de prendre en compte les problèmes posés par la flexibilité des installations le plus en amont dans le cycle de conception-fabrication, c'est à dire lors des simulations.

Le problème est encore plus complexe dans le cas d'une reconfiguration de ligne, en particulier lorsque l'on désire introduire un nouveau type de produit en conservant la (les) gamme(s) précédente(s) sur une installation flexible existante et bien évidemment à coût minimal.

En effet, dans ce cas, il convient de reprendre l'étude de préaffectation de gammes mais en tenant compte des contraintes imposées par l'existant (ancien produit + ligne) dès cette étape de façon à limiter les retours arrière des simulations C.A.O robotique classiques /YVA 90a/.

Cette démarche nécessite l'extension des systèmes C.A.O robotique vers les directions suivantes:

- Mise en place d'une base de données projet modélisant les données nécessaires à l'étude, la simulation et la gestion du projet.

- Mise en place d'une structure symbolique apte à prendre en compte dans la définition des gammes les contraintes ci dessous:

* Implantation des moyens robotiques.
* Equilibrage de lignes.
* Expertise "métier" (La soudure par points par exemple avec la technologie des pinces-robots).
* Expertise de préparation de type heuristique utilisée lors du regroupement des opérations en gammes.

L'étude de ce problème d'affectation de ressources fortement contraint nous a conduit à évaluer l'apport des techniques d'intelligence artificielle (IA) pour sa résolution.

IV.3 Apport des techniques d'IA

IV.3.1 Historique /DOM 88b/

Le désir humain de réaliser par les soins de son industrie des machines qui reproduisent ses facultés est vieux, sinon comme le monde du moins pratiquement comme la pensée dès qu'on en a la trace. Outre la machine de Pascal, les automates et la cybernétique, Babbage et sa machine à calculer les fonctions en 1834 puis Turing et son fameux "Can a machine think ?" en 1950 furent les précurseurs de l'automatisation des processus cérébraux.

La tâche est poursuivie dès 1956, date où J. Mc Carthy propose le terme "intelligence artificielle" ainsi que la définition du langage LISP opérationnel dès 1958, basé sur les listes et le lambda calcul /McC 78/.

Les recherches s'orientent alors vers les techniques de résolution de problème avec General Problem Solver (GPS) en 1959 /ERN 69/ puis vers les programmes de jeu de stratégie en 1968 /PIT 77/.

La décennie 1970 est celle de l'émergence des "systèmes experts" avec DENDRAL en 1969 /LIN 80/ puis MYCIN en 1976 /SHO 76/. A la suite de ces deux pionniers, de très nombreuses réalisations voient le jour, sur différents thèmes d'applications et la décennie 1980 marque l'étape de début d'industrialisation.

L'intelligence artificielle ou informatique symbolique (en anglais "symbolic processing") met en oeuvre certains mécanismes et outils que nous allons tenter de présenter.

IV.3.2 Les techniques d'intelligence artificielle

Elles peuvent être grossièrement décomposées suivant quatre voies très fortement imbriquées:

- Modélisation et représentation des connaissances:

Contrairement à la programmation "classique", les systèmes d'IA nécessitent une structuration de la connaissance à travers un modèle de représentation exprimant le lien entre le monde réel et le système symbolique.

Pour mener à bien cette représentation, deux approches souvent mixées sont utilisées:

* Les règles de production: Une règle est une "unité de savoir faire" et est, le plus souvent, de la forme:

SI conditions ALORS conclusions

L'ensemble des règles indique quelles conséquences tirer lorsqu'une situation est établie et quelles actions accomplir pour établir une situation.

Les règles s'appliquent sur des faits Booléens (ordre 0 et 0+) ou avec variables (ordre 1).

Le moteur d'inférences est le programme qui exploite la base de faits et la base de règles. Il peut fonctionner en chaînage avant en déclenchant les règles dont la partie conditions ou prémisses est satisfaite pour tenter d'aboutir au but à satisfaire, ou en chaînage arrière en déclenchant les règles dont la partie conclusion ou conséquent prouve le but recherché, les parties conditions non valides étant prises comme nouveaux sous-buts à prouver.

Classiquement, le cycle de base d'un moteur d'inférence se présente de la manière suivante (fig I.15) /FAR 87/:

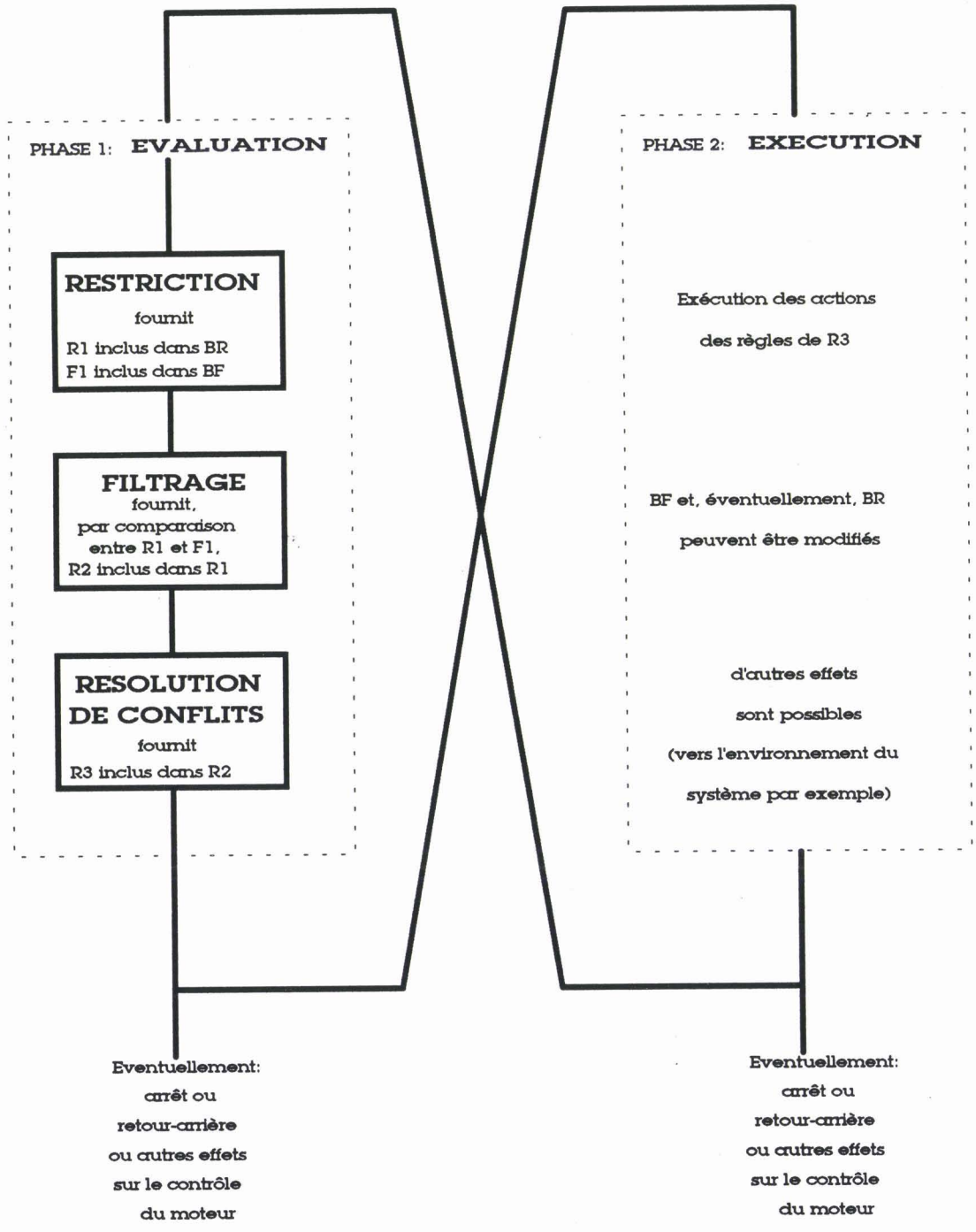


fig I.15

Les systèmes peuvent être monotones et fonctionner par ajout de connaissances ou non monotones et fonctionner par ajout, modification et suppression de connaissances.

L'approche base de règles permet une relative simplicité d'écriture, une homogénéité de la syntaxe ainsi qu'une certaine modularité avec le concept de méta-règle. Néanmoins, les systèmes à règles de production présentent une limitation importante: ils n'implémentent pas complètement la logique sous-jacente de cette dernière (prédicats, propositions). Ainsi, les règles utilisent uniquement le "modus ponens", ne prennent en compte ni la contraposée ni le "modus tollens", ne traitent pas le "ou" en conclusion (explosion combinatoire) et ne se prêtent pas simplement aux traitements des exceptions. Enfin, l'ordre des règles s'avèrent être d'une extrême importance compte tenu du déroulement du cycle de fonctionnement du moteur, ce qui est contraire à la logique pure.

Une solution possible à ces problèmes (dans le cas de la logique des propositions) est de transformer chaque règle en une expression logiquement équivalente puis à travailler directement sur les tables de vérités; ainsi (A et B --> C) deviendrait ((non C) ou (A et B)).

* Les réseaux sémantiques, frames et autres objets: Leur étude sera approfondie dans la seconde partie de ce mémoire au II, traitant de l'aide à la modélisation dans SARTRE.

Notons que de plus en plus la tendance est à proposer des systèmes hybrides, mixant règles de production et frames ou objets permettant de représenter à la fois des connaissances déductives et des connaissances descriptives.

- Systèmes et langages "adaptés" à l'IA:

Certains langages sont particulièrement adaptés à l'informatique symbolique.

En effet, mises à part des capacités d'expression de types de données divers, de programmation modulaire à l'aide de structures de contrôles facilitant la récursivité, une bonne interactivité et la production d'un code efficace, qualités nécessaires à tout bon langage.

Le développement de systèmes d'IA requiert des capacités telles que la manipulation de listes, une mémoire allouée dynamiquement, des dispositifs de pattern-matching, la possibilité de construire des structures complexes, de disposer de mécanismes de stockage et d'exploitation de règles ...

Aujourd'hui, aucun langage ne peut fournir l'ensemble de ces caractéristiques. Nous présenterons succinctement les deux approches principales en matière de langage dits d'IA:

* LISP /McC 60/: Comme son nom l'indique LISP (LISt Processing), a comme structure de données et de programmes des listes; c'est un langage récursif, la mémoire est allouée dynamiquement au fur et à mesure des besoins, il possède de rares capacités d'interactivité par le simple fait que tout l'environnement est accessible à n'importe quel instant au développeur. LISP est basé sur le Lambda Calcul et a donné naissance à de nombreux dialectes parmi lesquels Common-Lisp /STE 84/ et Le-Lisp /CHA 89/ pour ne citer que les plus connus.

* PROLOG /WAR 77/: PROLOG pour PROgrammation LOGique est un langage basé sur la logique des prédicats du premier ordre. Plus précisément, PROLOG manipule les clauses de Horn, et un programme se présente sous la forme d'un bloc de faits et d'un bloc de règles. Ce programme est soumis lors de son exécution à l'interprète PROLOG mettant en oeuvre le principe de résolution détaillé figure I.16.

1- RESOUDRE CHACUN DES BUTS POSES

GAUCHE --> DROITE

2- CHERCHER UNE CLAUSE DONT LA TETE PUISSE S'ASSOCIER AU BUT --> UNIFICATION

3- SI CLAUSE=FAIT

. Le but est résolu

. Passer à la résolution du but suivant
(Si but=vide, fin de la résolution)

SI CLAUSE=REGLE

. Alors la queue de la clause remplace le but courant à résoudre

SI AUCUNE CLAUSE TROUVEE

. Recherche s'il existe d'autres manières de résoudre les buts --> **Backtrack**

fig I.16

- Stratégies heuristiques:

La plupart des problèmes traités à l'aide des techniques d'intelligence artificielle entraîne une certaine explosion combinatoire sous jacente, généralement due au fait que la quantité d'opérations à effectuer pour aboutir à la solution du problème est très largement supérieure aux capacités de calcul, pourtant très importantes des machines actuelles. Les stratégies heuristiques sont nées pour permettre de restreindre dans une mesure raisonnable l'explosion combinatoire. Devant l'impossibilité de générer toutes les chemins possibles pour tenter de trouver la solution à un problème donné, l'idée est venue d'appliquer certaines règles dites heuristiques limitant l'éventail des choix possibles et devant ainsi permettre de converger plus vite vers une solution /BAR 81/. Même si ces "heuristiques" ne sont pas toujours bonnes, il suffit qu'elles soient performantes en moyenne. En effet, quand bien même leur application pourrait éventuellement écarter LA meilleure solution, UNE solution acceptable au problème serait malgré tout déterminée.

- Résolutions de problèmes:

Ces techniques sont basées essentiellement sur la théorie des graphes /GON 85/ agrémentée de stratégies heuristiques.

Les systèmes avancés de résolution de problèmes font quant à eux appel aux techniques de génération de plan /FAR 87/.

Ces techniques s'appliquent dans les domaines de prédilection suivants:

- Jeux.
- Traitement de l'information avec les thèmes actuels des bases de données déductives et objets.
- Langage naturel.
- Aides à l'ingénieur.
- Reconnaissance des formes, lorsqu'un niveau symbolique de raisonnement est nécessaire en aval des outils d'acquisition et de mise en forme /HAT 89/.
- Démonstration automatique.
- Vérification et synthèse de programmes.
- Robotique et planification, notamment en robotique mobile lorsqu'un robot doit planifier sa trajectoire dans un environnement plus ou moins contraint.

IV.3.3 IA et productique

Effet de mode ou contagion, la plupart des domaines de l'activité humaine se trouvent être concernés par l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle; le monde de la production avec la multiplicité de ses besoins s'avère être une cible particulièrement bien choisie.

De nombreux auteurs parmi lesquels /KEM 85/ et /RAY 85/ tentent de dresser un premier bilan de la pénétration de ces techniques dans l'industrie manufacturière. En effet, l'immersion de systèmes de production de plus en plus complexes au sein d'un environnement en perpétuelle évolution pose le problème essentiel de la maîtrise de cet univers et rend nécessaire l'utilisation d'outils d'analyse et d'aide à la décision "flexibles".

Les techniques d'intelligence artificielle sont ainsi utilisées dans le domaine de la productique pour aider à la résolution des trois grands types de problèmes suivants:

- Diagnostic et maintenance:

La maintenance représente le principal domaine d'application des systèmes experts en termes de développements (environ 44% de la masse d'après /CEG 89/). Ce succès est dû plus précisément au diagnostic de pannes, domaine où les applications sont de taille raisonnable et reposent sur des systèmes fermés, autonomes et bien identifiés. L'intérêt des systèmes-experts en maintenance et diagnostic de pannes est de permettre des interventions plus rapides et de gérer par exception les appels aux experts. L'ampleur des sommes en jeu en cas de problèmes ou d'arrêts dans les processus de production fait que la rentabilité de ces systèmes est très rapide.

Citons comme exemple de systèmes ACE pour les cables téléphoniques /VES 83/, DART pour les ordinateurs IBM /GEN 83/ ou PDS /FOX 83/ pour les turbines de générateurs de vapeurs.

La tendance générale est à tenter d'élargir le plus possible le champ d'application des développements par passage du simple diagnostic de pannes à la maintenance curative et prédictive, passage des composants aux systèmes complexes, intégration à d'autres fonctions comme la conduite des systèmes où le système connecté au process agit comme une aide à la supervision du procédé.

Citons comme exemple de ce dernier type de système PICON /MOO 85/ et PILOTEX /HUS 85/.

- Planification, ordonnancement /BEN 87/:

Le problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps un ensemble de tâches en cherchant à satisfaire un ou plusieurs objectifs. Un ensemble de ressources de type différent est disponible pour assurer la réalisation de ces tâches. La difficulté du problème réside dans l'expression et la prise en compte des contraintes intervenant dans la définition du problème. Ces contraintes peuvent porter sur les tâches (succession ...) ou bien sur les ressources (conditions d'utilisation, usure ...). Classiquement, on les regroupe en deux grandes classes: les contraintes potentielles permettant d'écrire des relations temporelles entre certains instants particuliers de l'exécution des tâches et les contraintes cumulatives portant sur la limitation des quantités instantanées de ressource consommée. Le problème d'ordonnancement peut être décomposé en deux sous-problèmes:

* Le premier concerne le choix des ressources à affecter à chacune des tâches pour permettre sa réalisation (problème dit d'affectation).

* Le second consiste à trouver l'ordre dans lequel les tâches vont être exécutées (problème dit de séquencement).

La résolution de certains problèmes particuliers peut mettre en jeu d'autres types de décision: on peut par exemple décider de la composition de certains regroupements de tâches dans le cas où une ressource fonctionne en "fournée".

Les contraintes mises en jeu ne sont pas toutes de même importance; on peut distinguer par exemple les contraintes impératives, qui doivent absolument être satisfaites (comme le partage d'une ressource par exemple ou le respect d'une gamme opératoire), les contraintes relaxables que l'on cherche à satisfaire excepté si aucune solution n'est possible: on admet alors de les relaxer (par exemple une date de livraison). On trouve également dans la définition du problème des préférences. Il s'agit là d'éléments de décision moins forts, destinés plutôt à améliorer les solutions en permettant la prise en compte de critères de confort, de sécurité ou bien encore technologique. La distinction entre préférence, contrainte et objectif n'est pas absolue. Selon les cas, tel aspect peut être représenté soit comme une contrainte soit comme un objectif à atteindre. De même, une contrainte peut devenir une préférence si on y attache moins d'importance.

La résolution d'un problème d'ordonnancement consiste donc à décider d'un certain nombre de choix parmi un ensemble de possibilités. Généralement, la combinatoire de ces problèmes est très élevée et les méthodes de résolution tentent de la limiter.

Dans le domaine de l'ordonnancement, deux grandes approches sont possibles:

* L'approche temps-réel où le système décisionnel pilote l'atelier sur événements. Les décisions sont immédiatement appliquées durant l'activité du système. Cette approche qualifiée d'ordonnancement réactif permet de s'affranchir des problèmes combinatoires et de réagir correctement aux perturbations éventuelles. Par contre, il est impossible de prévoir les conséquences des décisions prises et le système agit en aveugle.

* L'approche planifiée ou ordonnancement prévisionnel consiste à poser le problème dans l'optique d'une planification. On cherche à bâtir une solution qui sera appliquée par la suite. La prévision est alors aisée mais la combinatoire reste entière et la prise en compte des aléas plus délicate.

Les problèmes d'ordonnancement ont pendant longtemps constitué un des thèmes phares de la Recherche Opérationnelle en tant que problème d'optimisation. Malgré tout, la rigidité des modèles utilisés en optimisation, la spécificité des heuristiques mises en jeu ainsi que la relative difficulté d'analyse des résultats de simulation ont conduit à utiliser les techniques d'intelligence artificielle pour "flexibiliser" les systèmes.

Ces techniques peuvent être utilisées suivant trois axes:

* Pour configurer un logiciel classique: on fait figurer dans un système expert, les connaissances que l'on peut posséder sur l'adéquation entre certaines stratégies et certaines caractéristiques du problème d'ordonnacement dans le cadre d'un logiciel d'ordonnancement classique. Lorsqu'un problème se pose, le système expert choisi la meilleure heuristique.

* Pour planifier: dans ce cas, on utilise toutes les connaissances que l'on a pour résoudre le problème d'ordonnacement prévisionnel.

* Pour piloter: cette fois ci, le système est connecté au processus et fonctionne en temps réel. Il ne peut prendre qu'une seule décision à la fois. Ces décisions sont prises en ne tenant compte que de l'état de l'atelier au moment de cette prise de décision. Il n'y a donc pas construction d'un plan qui permettrait de respecter des contraintes ou critères globaux.

Notons pour conclure, le faible taux de réalisations opérationnelles dans le domaine dû à deux principales causes:

* L'IA permet de réaliser rapidement des maquettes mais le passage au produit industriel demande du temps.

* La taille des problèmes industriels multiplie la combinatoire et l'implantation demande un effort important de connexions aux systèmes d'informations existants.

- Conception: Le terme conception sera ici considéré suivant deux axes, celui de la conception des systèmes de production et celui de la conception des produits et gammes de fabrication. Cette décomposition peut paraître grossière compte tenu du fait que produit et système de production sont souvent interdépendants mais elle permet malgré tout de cerner des besoins distincts.

La conception des produits:

Tâche courante dans une industrie manufacturière, la conception des produits a bénéficié d'un effort de recherche tendant à son accélération ainsi qu'à son automatisation. Des prototypes de systèmes d'aide à la conception intégrant des concepts de l'IA ont alors vu le jour.

Cette opération de conception est généralement décomposée en deux parties: la conception du produit proprement dite et la conception de sa gamme de fabrication.

Conception du produit:

Citons parmi la liste déja très bien fournie des systèmes développés les applications suivantes:

* ALADIN en métallurgie pour l'aide à la définition de nouveaux alliages à base d'aluminium (/FAR 87b/).

* PEARL en électronique pour l'aide à l'implantation des composants électroniques pour la conception de cartes d'alimentation (/DEJ 85/).

* R1 en informatique ex XCON, pour l'aide à la conception de configurations d'ordinateurs VAX (/MAC 82/).

Citons également dans le domaine de la C.A.O mécanique, le système ICAD /WAG 90/ intégrant un modeleur donnant la possibilité à l'ingénieur concepteur de spécifier ses contraintes à l'aide d'un langage orienté objet.

Conception de la gamme de fabrication:

Problème délicat, l'aide à la conception de gammes de fabrication requiert une grande part d'expertise humaine.

A partir de la définition des produits à fabriquer et des moyens de production disponibles, les techniciens des services méthodes sont tenus de dresser la marche à suivre pour élaborer le produit.

Citons le système GARI /DES 85/ permettant, à partir de la définition géométrique extraite de la description géométrique de la pièce à concevoir, de générer sa gamme de fabrication.

La conception des systèmes de fabrication:

Le domaine de la conception et/ou de la modification de systèmes de fabrication s'avère être une tâche relativement peu fréquente mais excessivement complexe; en effet, il s'agit de prendre en compte plusieurs aspects du problème parmi lesquels les aspects économiques techniques et sociaux.

Quelques réalisations ont vu le jour dans le domaine de la conception de sous-ensembles de systèmes de fabrication; Citons:

- Système de conception de colonnes à distiller /BRO 87/.
- HEATEX dans le domaine des échangeurs de chaleur /RYC 83/.

IV.3.4 Les techniques d'IA dans le cadre de notre étude

Dans le cadre de notre problème, l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle est justifiée selon quatre arguments principaux:

- Modélisation et aide à la modélisation, avec la définition et le développement d'une couche orientée objet permettant une expression aisée des connaissances statiques du domaine étudié.

- Utilisation du langage Le-Lisp /CHA 89/ comme outil de développement bien adapté aux manipulations symboliques, à la simulation et au prototypage. Par ailleurs, Le-Lisp peut être interfacé avec des programmes écrits en langage C et SQL, le langage d'interrogation de BD relationnelles. De plus, diverses extensions graphiques /AID 89/ permettent d'accroître les possibilités d'intégration et de convivialité de l'outil.

- Mise en oeuvre de techniques de résolutions de problèmes pour la génération de gammes sous contraintes.

- Intégration des connaissances métiers ou heuristiques de conceptions par l'utilisation de techniques d'inférences.

Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre, à travers l'examen des différentes étapes mises en oeuvre lors d'une conception de ligne de production robotisée flexible, l'insuffisance des logiciels de simulation C.A.O Robotique, du fait de leur incapacité à traiter les problèmes sous-jacents d'allocation de ressources sous contraintes.

L'apport dans ce domaine des techniques d'intelligence artificielle est démontré et nous allons à présent nous appliquer à décrire un niveau de planification permettant de pallier certaines limites des systèmes C.A.O Robotique classiques en matière de simulation de lignes de production flexibles dans l'industrie manufacturière.

SARTRE
Système d'Aide à la Reconfiguration de Tolerie RobotiséE

Introduction

Proposer un système donnant la possibilité aux techniciens des services méthodes d'étudier, de simuler et de reconfigurer leurs lignes de production robotisées flexibles a constitué pour nous la ligne directrice qui a donné naissance au système SARTRE appliqué à l'industrie automobile.

Ce second chapitre décrit l'ensemble des développements de notre travail; il se compose de cinq parties:

- La partie I, dans laquelle nous entamons une description générale de SARTRE, en détaillant la problématique, les objectifs du projet, l'organisation du système et son fonctionnement général.

- Nous détaillons ensuite en partie II, les aspects ayant trait à la modélisation des connaisssances statiques du domaine et leur intégration au sein d'un système dual couche-objet / SGBD relationnelles.

- Dans la troisième partie, nous examinerons les spécifications et l'implémentation du moteur chargé de la résolution du problème générique d'allocation de ressources sous contraintes inhérant à notre problème, non sans avoir fait au préalable un bref rappel sur l'ensemble des techniques classiques d'optimisation combinatoire.

- La quatrième partie est consacrée à la description du planificateur en tant qu'application du moteur au problème du soudage robotisé par points. La prise en compte des différentes contraintes du domaine précité y est détaillée ainsi que leur intégration, principalement sous forme de paquets de règles heuristiques greffées sur notre mécanisme de résolution.

- Nous terminerons par un exposé du problème de l'implantation des robots manipulateurs au sein d'une cellule flexible. Nous avons développé une approche originale de ce problème, se différenciant des techniques classiques d'inversion de coordonnées, du fait de l'insuffisance de ces dernières à pouvoir être intégrées au sein de l'environnement SARTRE.

I Description générale du système

I.1 Présentation générale du projet SARTRE

Préoccupation majeure des milieux industriels ces dernières années, la flexibilité de l'appareil de production, c'est à dire la capacité d'adapter l'offre à la demande pose dans le domaine des moyens de production de grande série et plus précisément des lignes flexibles robotisées un certain nombre de problèmes vitaux pour l'entreprise.

Nous proposons ici de débattre des problèmes ayant trait à l'étude, la conception et la reconfiguration des lignes de production flexibles et de proposer une solution aidant à l'émergence d'une solution convenable.

I.1.1 La problématique

En matière de conception de lignes flexibles robotisées, le problème essentiel qui est posé est celui de la répartition des opérations à effectuer sur les différents moyens de l'installation. Plusieurs cas de figures peuvent se présenter:

- Etude prospective dans le cadre d'une définition de ligne nouvelle:

Il s'agit à partir d'un ensemble d'opérations à effectuer pour obtenir un certain produit et d'un ensemble de contraintes sur ces opérations de proposer un dimensionnement d'une architecture d'atelier ainsi que les gammes à effectuer sur chaque ressource. Autrement dit, nous aurons:

{opérations} ⟶ {architecture}

{Copérations} ⟶ {Gammes}

avec:

{opérations}: Ensemble des opérations à effectuer sur le produit.
{Copérations}: Ensemble des contraintes inter opérations.
{architecture}: Architecture d'atelier proposée, ressources paramétrées.
{Gammes}: Proposition de gammes par ressources.

- Fabrication d'un nouveau produit sur une installation préexistante:

On dispose pour ce type de problème d'un ensemble d'opérations à effectuer sur un certain nombre de ressources paramétrables. Chaque ressource peut être configurée d'une certaine manière et autoriser ou interdire ainsi l'affectation d'un sous ensemble d'opérations. Les opérations et les ressources sont par ailleurs assujetties au respect d'un ensemble de contraintes plus ou moins relaxables. Sous ces conditions, il s'agit de paramétrer l'atelier existant de manière à générer une répartition des opérations sur les différentes ressources en tenant compte d'un certain équilibre entre les charges des différentes ressources et à un coût raisonnable. Ainsi, on aura:

avec:

{opérations}: Ensemble des opérations à effectuer sur le produit.
{Copérations}: Contraintes inter opérations.
{ressources}: Ensemble des ressources de la ligne.
{Cressources}: Contraintes sur les ressources.
{Gammes}: Gammes générées.

- Fabrication de plusieurs produits distincts sur une installation préexistante:

Problème similaire au précédent, il se caractérise toutefois par l'ajout d'un ensemble de contraintes dû aux types de produits initiaux qui viennent sensiblement réduire les domaines de définition des vecteurs de paramétrage de chaque ressource. Ce qui donnera:

avec:

{opérations}: Ensemble des opérations à effectuer sur le produit.
{Copérations}: Contraintes inter opérations.
{ressources}: Ensemble des ressources de la ligne.
{Cressources}: Contraintes sur les ressources.
{oldGammes}: Gammes de l'ancien véhicule.
{Gammes}: Gammes générées pour le nouveau produit.
{dRessources}: Paramétrage des différentes ressources de la ligne.

I.1.2 Le domaine d'application

SARTRE offre des solutions pour résoudre les différents cas de figure précités et est adapté aux spécificités des lignes d'assemblage robotisées du groupe P.S.A.

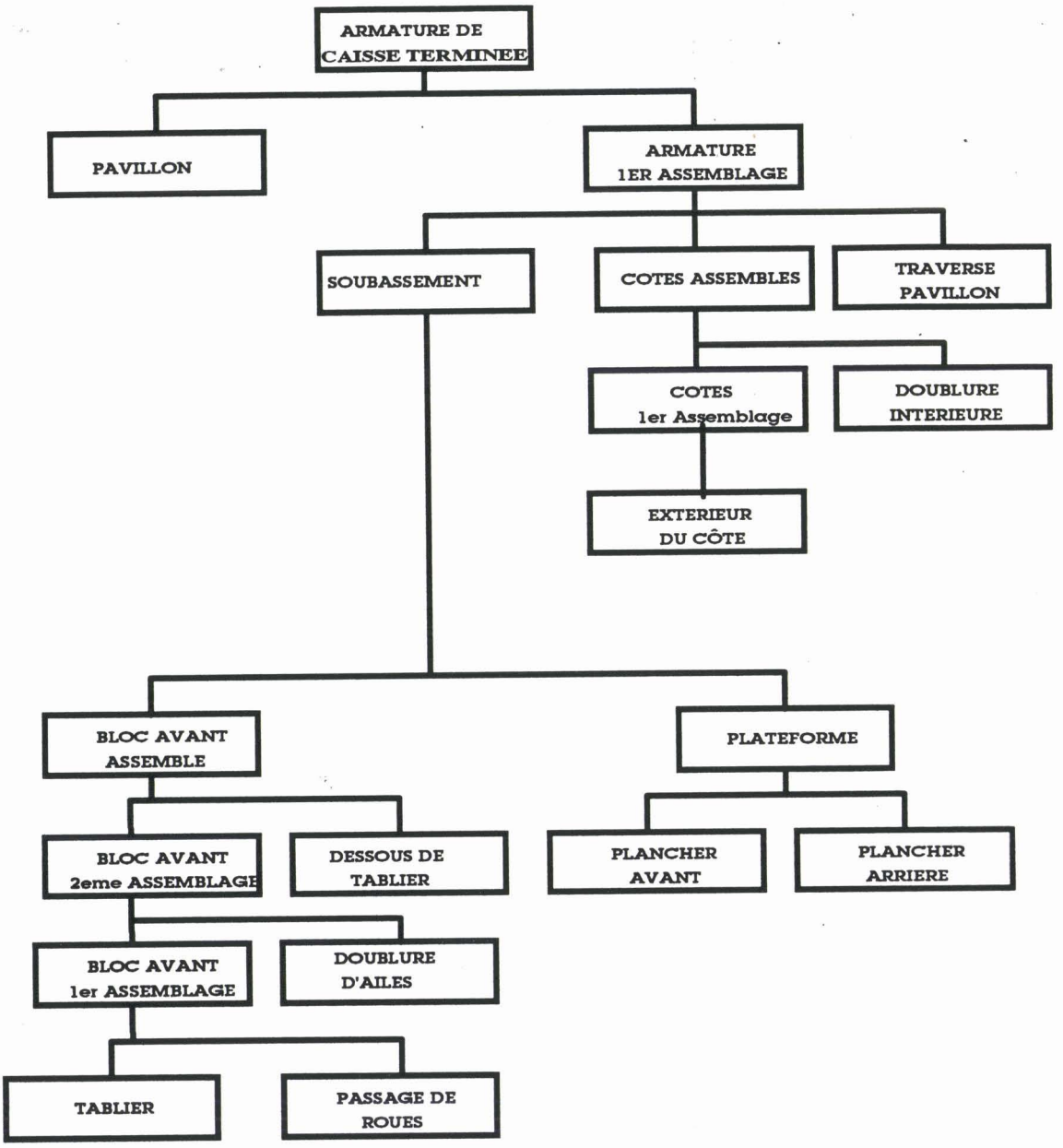


fig II.1

La figure II.1 rappelle l'architecture d'une ligne polyvalente P.S.A et permet de souligner les points suivants relatifs aux différentes ressources regroupées en postes:

* Les ressources brutes sont constituées par des robots manipulateurs de soudure par points (figure II.2).

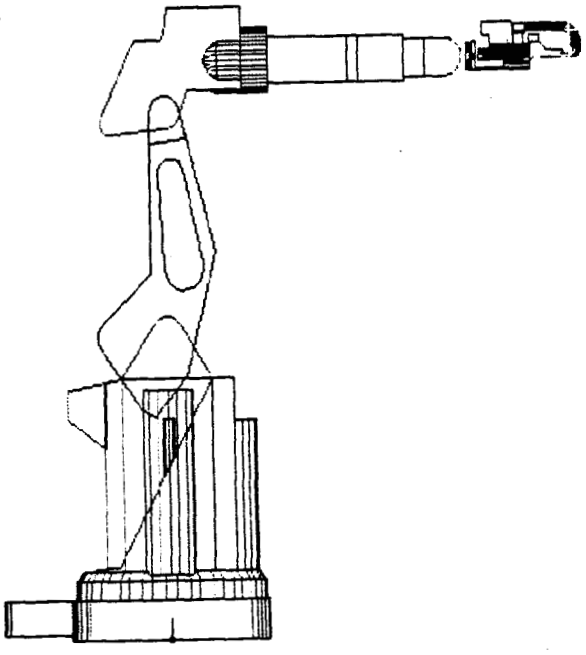


fig II.2

* Les robots sont regroupés en postes et les postes en zones; la ligne étant constituée d'une arborescence de zones (figure II.1).

* Deux types essentiels d'ensembles de ressources sont à considérer: les postes de conformation et les postes de reprise.

* Au sein d'une zone, le poste de conformation unique a pour fonction d'effectuer le minimum d'opérations nécessaires pour assurer au véhicule en cours d'assemblage une certaine rigidité. Ces types de postes sont caractérisés par:

- Un environnement excessivement encombré dû aux machines de serrage (figure II.3).

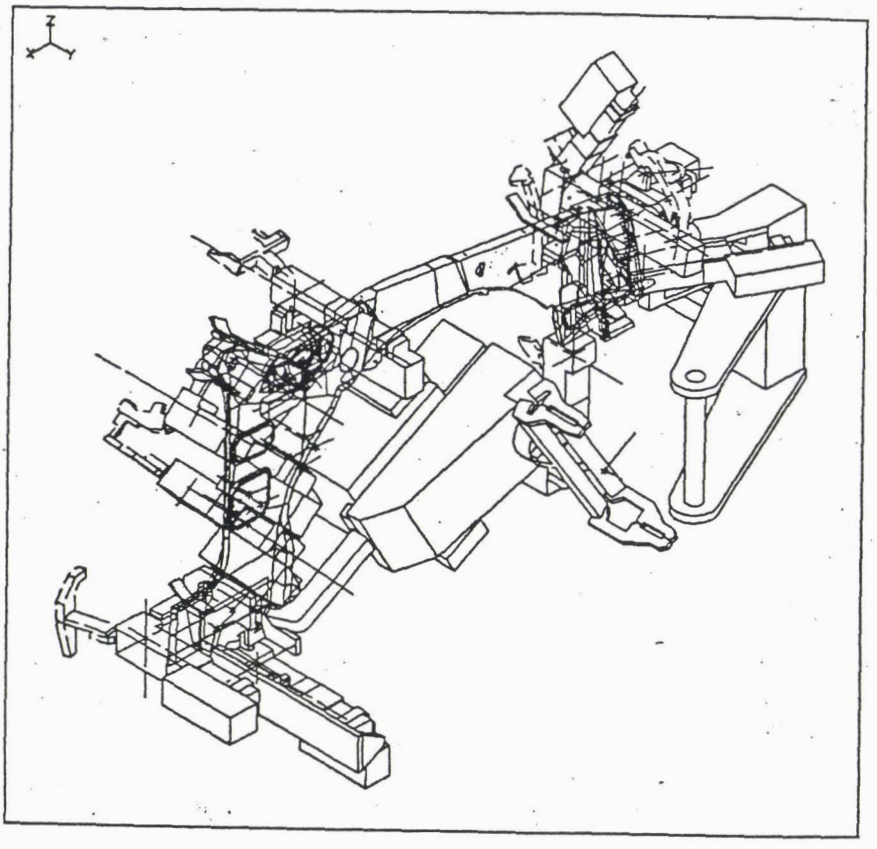


fig II.3

- L'absence de liberté d'affectation des points de soudage de conformation. En effet, ces points servent à équilibrer la caisse et il y a généralement unicité de la solution (pas de variante).

- Des ensembles robots fortement immergés dans l'environnement ce qui suppose de s'affranchir, dans une optique conception, d'un certain nombre de problèmes de collisions nécessitant des outils de C.A.O 3D /DOU 90/, de problèmes de détermination d'implantation de robots manipulateurs et de définition d'outils de soudure.

* En ce qui concerne les postes de reprise, destinés à assurer la finition partielle ou totale du sous-ensemble considéré, ils sont caractérisés par:

- Un environnement assez peu encombré (figure II.4) réduisant les collisions possibles aux interférences outils-véhicule, les robots étant beaucoup plus excentrés par rapport aux obstacles éventuels (figure II.4).

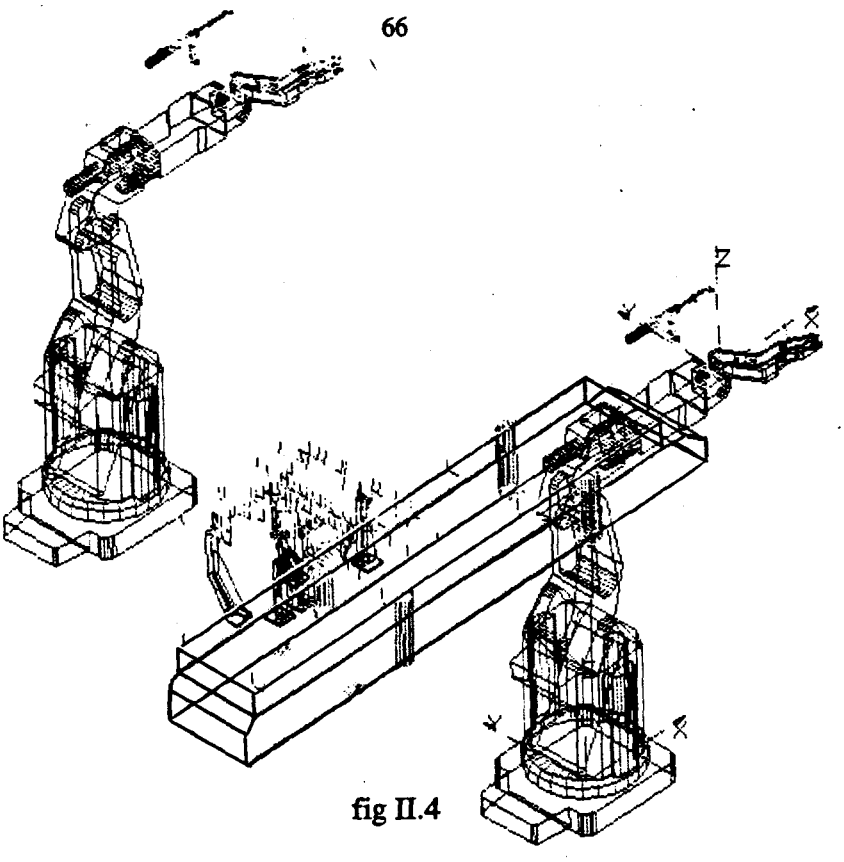


fig II.4

- Une liberté importante d'affectation des opérations (points de soudure à effectuer) sur les différents postes de reprise.

- La nécessité d'effectuer des choix ou modification d'outils et de positionnement robots adaptés aux différentes opérations à effectuer.

Paramétrage des ressources:

Le vecteur de paramétrage de chaque ressource robot comprend des composantes prenant en compte les libertés suivantes:

- Les paramètres caractérisant la géométrie des outils, variables en fonction des collisions outil-véhicule éventuelles et de la soudabilité des tôles.

- Les paramètres technologiques et électriques des outils attestant de leur capacité de soudage.

- Les paramètres relatifs à l'implantation des robots, ajustables suivant les possibilités d'accessibilité sans interférence des différents points de soudure.

Il conviendra de prendre en compte en cours d'étude les contraintes intrinsèques au produit de type incompatibilité d'opérations au sein d'une gamme potentielle.

D'autre part, les affectations devront se faire avec un souci d'équilibrage des charges de ressources avec respect d'un temps de cycle fixé.

Enfin, certaines heuristiques de métier seront à considérer pour faciliter la génération des gammes.

Dans le cadre d'une reconfiguration de ligne existante, des critères de coût relatifs aux modifications éventuelles de l'installation conduiront à établir des priorités dans celles-ci.

I.1.3 Les outils existants

Les seuls outils mis à la disposition des techniciens méthodes à la veille de cette étude étaient représentés par le système de C.A.O C.A.T.I.A (Conception Assistée Tridimensionnelle InterActive) muni de son module robotique.

C.A.T.I.A /DAS 89/, développé par la société DASSAULT-SYSTEMES, dispose des fonctionnalités attribuées classiquement à tout logiciel de CAO. Autour des éléments de base (base de données, modeleur), gravite un ensemble de modules spécialisés (figure II.5) dont un qui permet d'effectuer des applications robotiques allant de la modélisation des robots à leur programmation /DOM 84/.

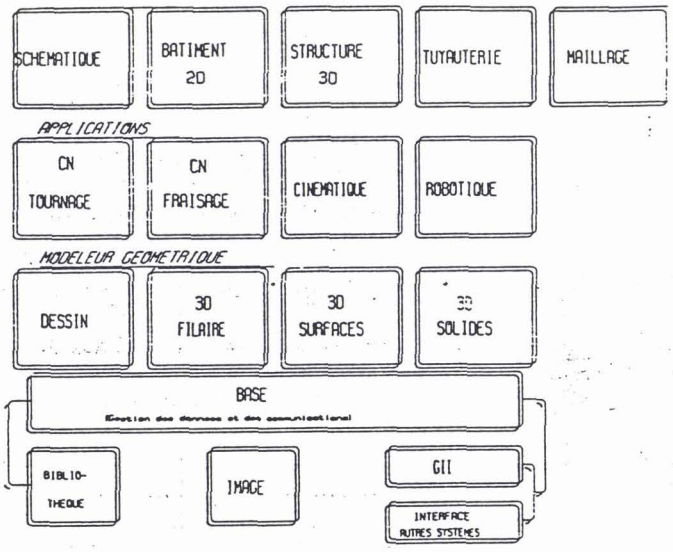


fig II.5

Deux modules marquent nettement l'ouverture du logiciel au développement d'applications spécifiques. Ce sont les modules I.U.A (Interactive User Access) et G.I.I (Graphic Interactive Interface) /DAS 89/.

Ces modules ont permis d'enrichir le module robotique de spécificités d'étude d'implantation de robots manipulateurs /DOU 90/, d'estimation de temps de cycle, de modélisation de capteurs /VER 89/ ...

Néanmoins, ainsi que nous l'avons spécifié antérieurement, le principal inconvénient de ce type de fonctionnement est son inadaptation aux problèmes de l'étude de lignes flexibles.

C'est sur cette base que le projet SARTRE fut élaboré, le système de C.A.O étant considéré comme un outil d'acquisition de données et son module robotique comme une fonction de validation de simulation de gammes. Les gammes sont générées par le coeur de l'application et sont l'objet de cette étude. Les résultats de la validation peuvent être analysés et pris en compte en tant que contraintes rétroactives au sein de SARTRE dans le but d'affiner les déductions.

I.2 Objectifs du projet

I.2.1 Objectifs technologiques

Ils se sont développés suivant trois axes:

- Un axe modélisation et spécification:

Mise en place d'un outil de spécification interactif permettant de spécifier et de modéliser l'ensemble des connaissances statiques du domaine étudié supporté par une couche orientée objet. La persistance de ces données est assurée au travers d'une interface connectant en ligne le modèle objet à un système de gestion de bases de données relationnelles.

- Un axe planification simulation:

Intégré dans l'environnement objet, il est aussi le coeur du système puisque c'est lui qui permet de résoudre le problème d'allocation de ressources sous contraintes. Il intègre un fonctionnement de type simulation permettant des paramétrages et des relances de scénarios.

- Un axe intégration et méthodologie:

Les outils mis à la disposition de l'utilisateur forment un ensemble cohérent et intégré aux outils locaux (CAO robotique) existants et son utilisation aboutit à la définition d'une démarche méthodologique d'utilisation.

I.2.2 Conséquences économiques

Les conséquences économiques attendues se révèlent bien entendu au niveau des temps de conception.

En effet, en proposant un outil intégré de spécification, de gestion de données et de planification-simulation, permettant de diminuer les allers et retours de la démarche de conception en prenant en compte au plus tôt les différentes contraintes du domaine, de rejouer des scénarios de simulation et de simuler des modes dégradés, nous abaissons logiquement les coûts en raison des gains importants réalisés sur les temps d'études.

I.3 Organisation du système

Elle est illustrée par la figure II.6.

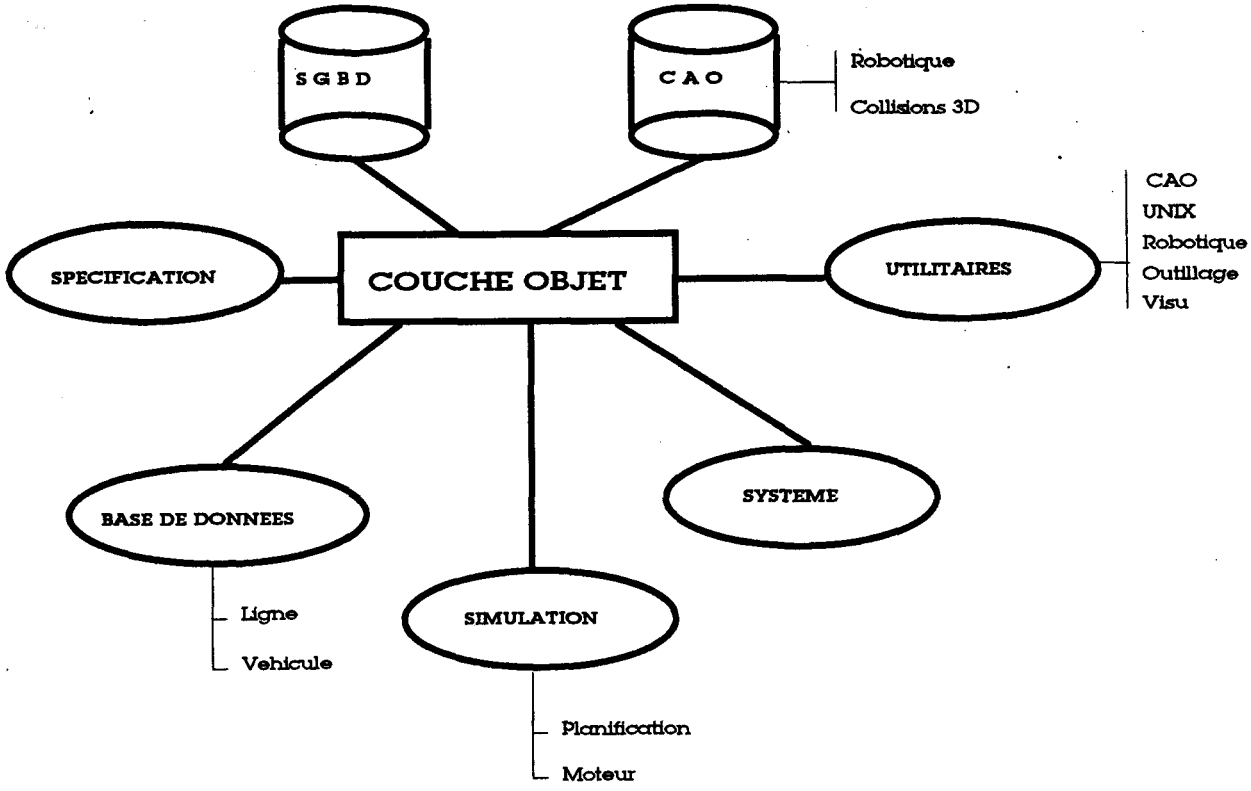


fig II.6

L'environnement SARTRE est supporté par une couche orientée objet autour de laquelle gravitent les modules décrits ci après:

* **Spécification:** Il permet une aide à la modélisation des différentes connaissances statiques du domaine étudié, intégrant les moyens de production et les produits à fabriquer.

* **Base de données:** Ce module permet de consulter l'ensemble des données concernant le procédé ainsi que les différents résultats de simulation.

* **Simulation:** C'est le coeur du système; il est chargé de résoudre le problème d'affectation sous contraintes et offre d'importantes possibilités de paramétrages.

* **Système:** Il permet d'administrer l'ensemble de l'application.

* **Utilitaires:** Ce menu permet d'utiliser SARTRE sous la forme d'une boîte à outils aidant à la résolution de problèmes ponctuels: Etude d'outillage, étude ponctuelle de robotique etc. Il offre également un accès au système d'exploitation ainsi que des possibilités variées d'édition de la base.

L'ensemble de l'application est connecté via la couche objet à un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) relationnelles permettant la sauvegarde et la gestion des différentes données du problème.

Un lien faible est assuré avec le logiciel de C.A.O robotique utilisé de manière à pouvoir mener des études ponctuelles de collisions 3D.

I.4 Fonctionnement général

I.4.1 De la conception à la programmation hors-ligne

I.4.1.1 Etude critique de la méthodologie classique de conception de gammes robot

Nous reprendrons ici, la méthodologie de création de gammes robot exposée dans la première partie de ce mémoire pour en souligner certaines faiblesses et en proposer une refonte plus conforme à nos objectifs.

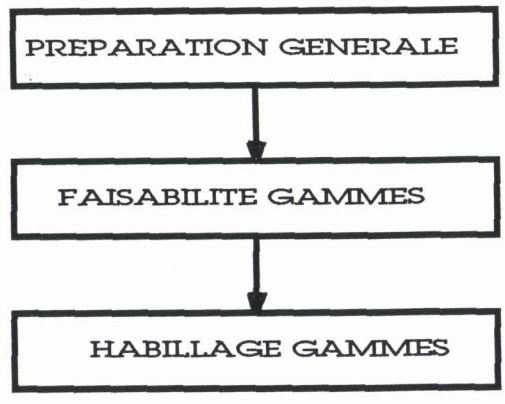


fig II.7

La figure II.7 qui présente la démarche méthodologique utilisée lors de la création de gammes robot inspire les remarques suivantes:

- Notons tout d'abord, la très nette séparation entre la première étape de préparation générale, étape essentiellement globale et le reste de la démarche essentiellement local.

- Cette séparation implique des allers et retours fréquents entre les études globales et les études locales; en effet, une fois la préaffectation des gammes effectuée, chaque technicien va tenter sur un poste qui lui est dédié de valider la gamme qui lui est confiée; que se passe-t-il en cas d'échec de validation? un autre technicien doit

prendre en charge les parties de gammes non validables ce qui va engendrer une réaction en chaîne difficile à gérer.

- La solution consiste à prendre en compte dès la prédéfinition des gammes l'ensemble des contraintes liées aux postes ce qui permettra de limiter considérablement les opérations de retour arrière.

- En cas d'impossibilité de valider une gamme, il convient de pouvoir prendre en compte ce fait en tant que contrainte rétroactive au sein de l'étape de prédéfinition des gammes qui devient ainsi une étape de redéfinition de gammes.

- De plus, la démarche doit prendre en compte la différence de problématique existante entre les postes de conformation et les postes de reprise comme nous l'avons montré au I.1 ainsi que l'architecture arborescente d'une ligne de production flexible.

L'ensemble de ces constatations nous a conduit à proposer un modèle refondu de méthodologie que nous allons à présent détailler.

I.4.1.2 Proposition de méthodologie

La méthodologie suivante permet de remédier aux inconvénients recensés ci-dessus et sert de base à une session de travail sous SARTRE (fig II.8).

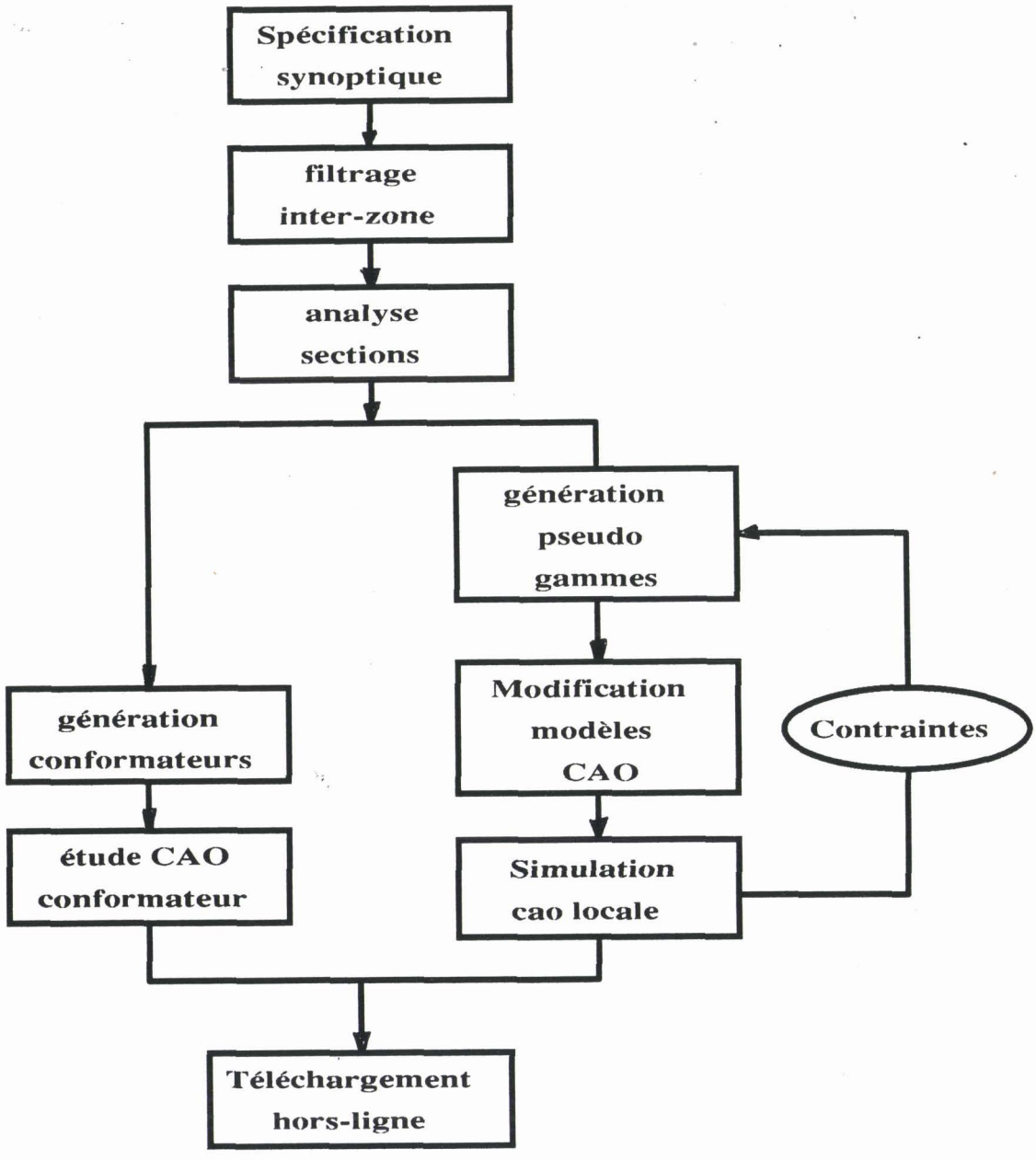


fig II.8

Elle comprend les stades suivants:

* Spécification des synoptiques.
* Filtrage inter-zone.
* Analyse des sections.
* Génération des modèles C.A.O des postes de conformation.
* Etude C.A.O des conformateurs et sauvegarde des résultats.
* Génération des pseudo-gammes par simulation globale.
* Modification en conséquence des différents modèles C.A.O de postes.

* Simulation C.A.O en local aux postes par ajout des points de passage et validation de temps de gamme.
* SI problème: Contraindre l'étude globale.
  SINON: Enrichissement des gammes.
* Téléchargement hors-ligne et recalage.

L'environnement de simulation prend en compte l'ensemble de la démarche et permet ainsi de disposer au sein d'un modèle unique de la totalité des paramètres du problème de conception et de reconfiguration de lignes de production robotisées dans l'industrie manufacturière.

I.4.2 Mise en oeuvre de la méthodologie de conception

La méthodologie détaillée précédemment et dont le synoptique est représenté figure II.9 est supportée par SARTRE à travers un ensemble de menus illustré par la figure II.10.

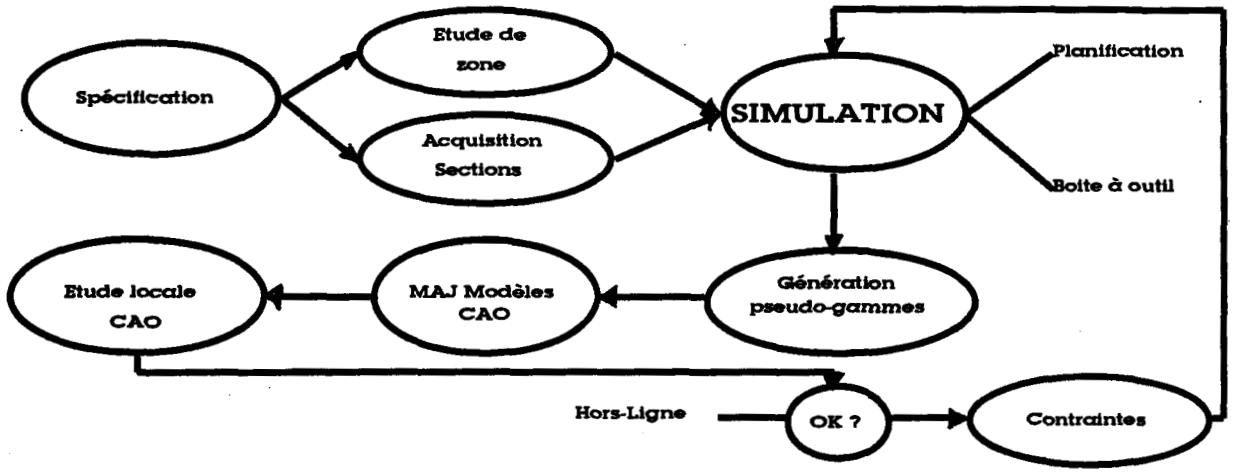


fig II.9

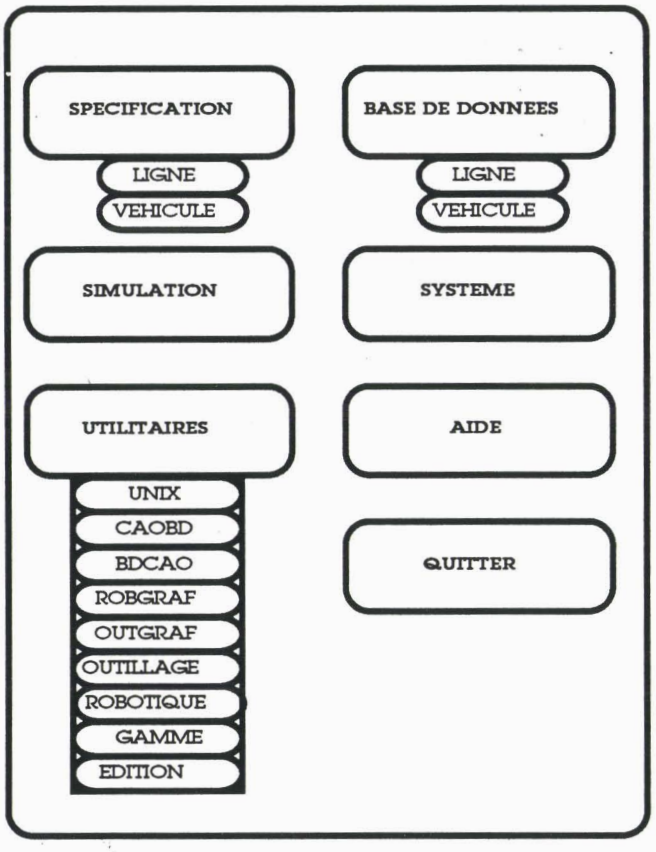


fig II.10

I.4.2.1 Phase de spécification

La spécification des synoptiques ligne et véhicules est réalisée à l'aide de l'ensemble de menus de spécification permettant une description et une édition complète de la structure et des moyens de la ligne à étudier.

Cette spécification peut se faire soit en interactif, soit par exploitation d'un fichier de données.

La figure II.11 représente un exemple de spécification de ligne sous SARTRE.

L'ensemble de menus base de données permet de consulter les synoptiques des différentes lignes robotisées et des différents véhicules présents en mémoire centrale ou en base de données. Les figures II.12 et II.13 illustrent ces possibilités.

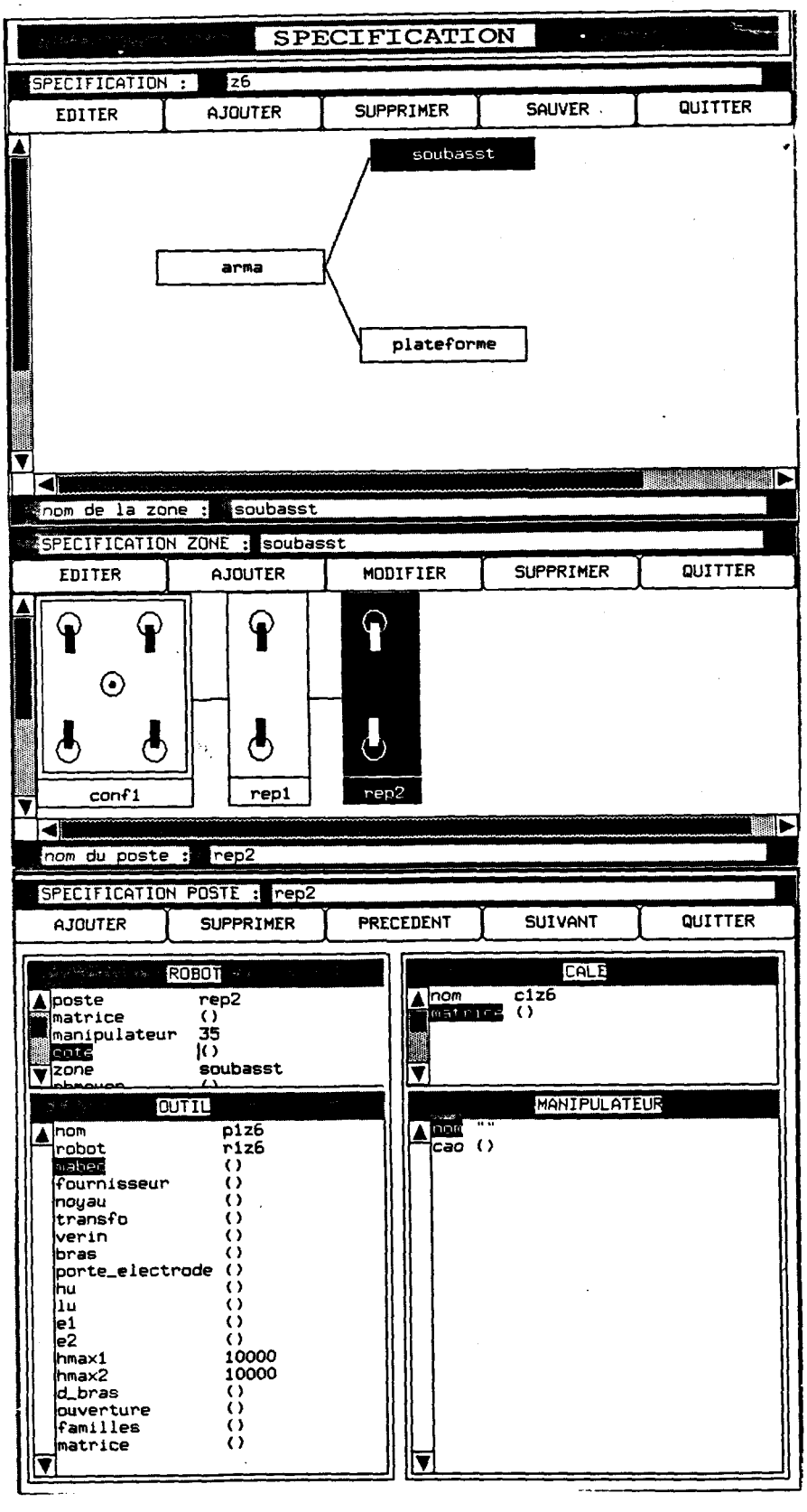

SPECIFICATION
SPECIFICATION : z6
EDITER
AJOUTER
SUPPRIMER
SAUVER
QUITTER
soubasst
arma
plateforme
nom de la zone : soubasst
SPECIFICATION ZONE : soubasst
EDITER
AJOUTER
MODIFIER
SUPPRIMER
QUITTER
conf1
rep1
rep2
nom du poste : rep2
SPECIFICATION POSTE : rep2
AJOUTER
SUPPRIMER
PRECEDENT
SUIVANT
QUITTER
ROBOT
poste rep2
matrice ()
manipulateur 35
cots ()
zone soubasst
CALB
nom c1z6
matrice ()
OUTIL
nom p1z6
robot r1z6
mabec ()
fournisseur ()
noyau ()
transfo ()
verin ()
bras ()
porte_electrode ()
hu ()
lu ()
e1 ()
e2 ()
hmax1 10000
hmax2 10000
d_bras ()
ouverture ()
familles ()
matrice ()
MANIPULATEUR
nom ""
cao ()

fig II.11

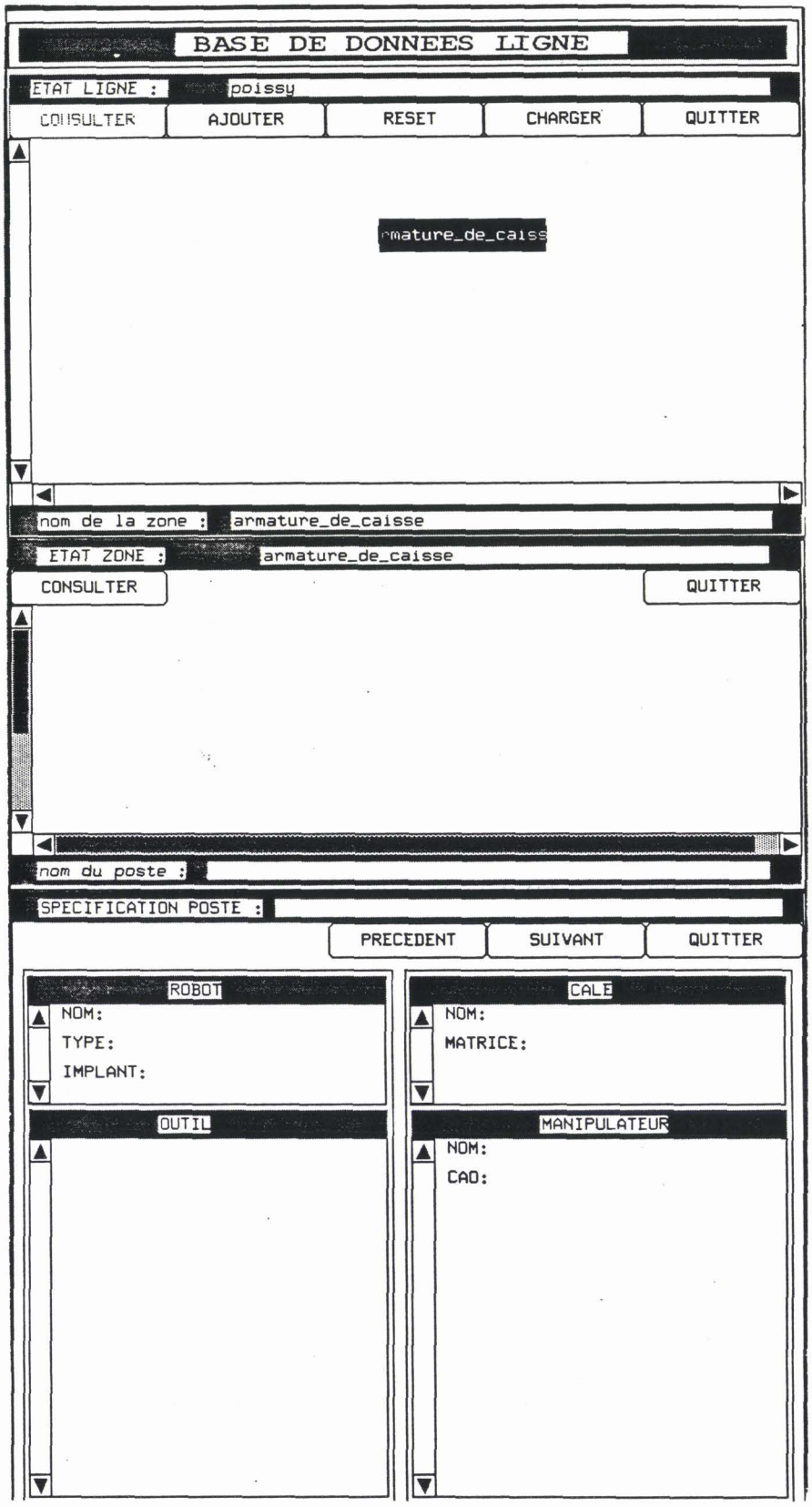

BASE DE DONNEES LIGNE
ETAT LIGNE :
poissy
CONSULTER
AJOUTER
RESET
CHARGER
QUITTER
rmature_de_caiss
nom de la zone :
armature_de_caisse
ETAT ZONE :
armature_de_caisse
CONSULTER
QUITTER
nom du poste :
SPECIFICATION POSTE :
PRECEDENT
SUIVANT
QUITTER
ROBOT
NOM:
TYPE:
IMPLANT:
CALE
NOM:
MATRICE:
OUTIL
MANIPULATEUR
NOM:
CAO:

fig II.12

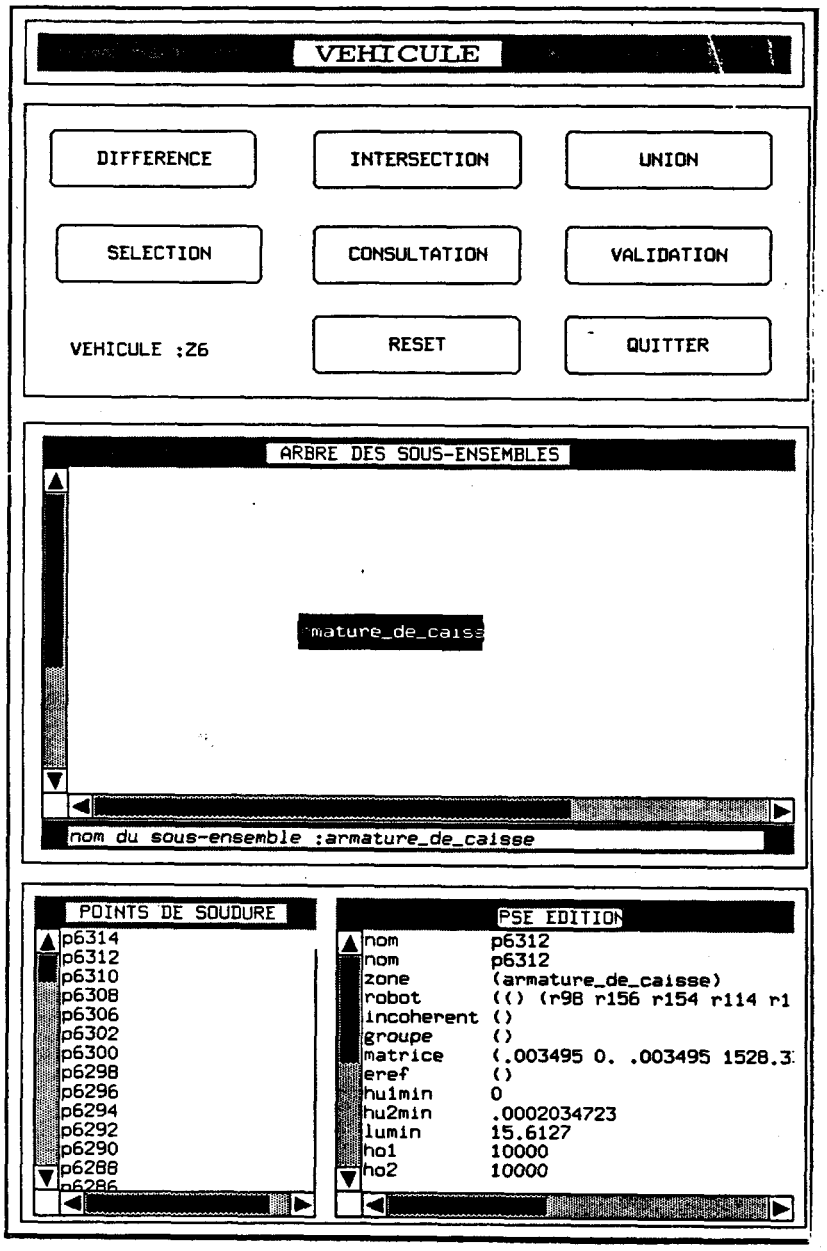


fig II.13

I.4.2.2 Filtrage inter zone et analyse de formes

Ces étapes sont réalisées en C.A.O à l'aide de routines développées en FORTRAN 77 et génèrent un fichier représentant le synoptique véhicule qui sera

chargé en base de données SARTRE à l'aide de l'article véhicule du menu spécification (cf figure II.10).

Les paramètres significatifs liés aux points de soudure (dimensions des tôles ...) sont rapatriés après analyse interactive du modèle.

A ce stade de la démarche, le système possède l'ensemble des connaissances statiques du domaine à étudier en base de données et une planification va pouvoir être lancée.

I.4.2.3 Simulation

La répartition des différents points de soudure sur les différentes ressources de la ligne est supportée par le menu simulation de notre environnement.

Il permet un paramétrage de la simulation, un suivi de la simulation, une interruption / reprise de la planification, avec ou sans sauvegarde des résultats etc.

Les différentes possibilités de ce module seront examinées en détail dans le chapitre consacré à la description de notre planificateur, clé de voûte de notre environnement de simulation.

I.4.2.4 Génération des pseudo gammes et mise à jour des modèles C.A.O

Cette étape résulte de l'étape de planification. L'utilitaire "bdcao" génére des fichiers qui vont permettre la mise à jour des différents modèles C.A.O des postes robotisés de notre ligne.

I.4.2.5 Validation locale CAO

Cette étape va permettre d'évaluer les solutions proposées par SARTRE et s'effectue poste par poste à l'aide des logiciels C.A.O robotique classiques.

A cet effet, les techniciens vont procéder à l'enrichissement des pseudo gammes résultant de la planification, notamment par la mise en place des différents points de passage nécessaires aux éventuels contournement d'obstacles.

Ces opérations permettront, par l'utilisation d'cutils algorithmiques locaux de calculs de temps de cycle, d'évaluer plus finement les temps d'exécution des différentes gammes proposées.

Cette étape de validation permettra en outre de s'affranchir de certaines contraintes d'environnement difficiles à prendre en compte au niveau de la planification.

I.4.2.6 Analyse des résultats CAO

A l'issue de l'étape de validation C.A.O, deux cas de figure peuvent se présenter:

- L'ensemble des gammes est validé: nous pouvons donc passer à la génération des programmes de commandes des différents robots de la ligne.

- Certaines gammes posent des problèmes du fait de la mauvaise affectation de certains points: Les contraintes déduites de l'analyse des résultats de simulation C.A.O seront introduites dans notre planificateur qui se chargera de régénérer de nouvelles pseudo gammes sur les postes critiques.

Nous voyons que l'ensemble de la démarche méthodologique allant de la conception à la programmation hors-ligne de systèmes de production robotisés est supportée par notre environnement.

I.4.3 Outils informatiques

SARTRE a été développé sur station de travail SUN sous UNIX et met en oeuvre les différents outils logiciels suivants (figure II.14):

- Le SGBD relationnelles ORACLE héberge les différents modules de données nécessaires à une utilisation correcte de l'ensemble de l'outil.

- SARTRE est supporté par le langage Le-Lisp /CHA 89/ et sa couche orientée objet que nous avons enrichie pour les besoins de l'étude. Le-Lisp prend en compte la totalité des outils de modélisation ainsi que le noyau de simulation organisé autour du couple (planificateur, moteur).

- AIDA /AID 89/, boîte à outils de conception d'interfaces graphiques bâtie autour de la couche objet de Le-Lisp /CHA 89/. AIDA a été utilisé pour la génération de l'interface utilisateur de SARTRE et permet de mettre à la disposition du technicien méthode un outil relativement convivial lui permettant de travailler dans de bonnes conditions.

- ASQUELL /ASQ 89 /, autre produit d'ILOG, permettant de lancer des requêtes SQL sous Le-Lisp a été adopté pour l'interface ORACLE Le-Lisp.

- Le langage C a été utilisé dans le développement des routines d'implantation robot ainsi que pour divers utilitaires.

- Les développements et liens CAO ayant pour cible le logiciel de CAO CATIA /DAS 89/ de Dassault Système ont été effectué en FORTRAN77 associé a l'outil de développement d'interfaces propre à CATIA GII.

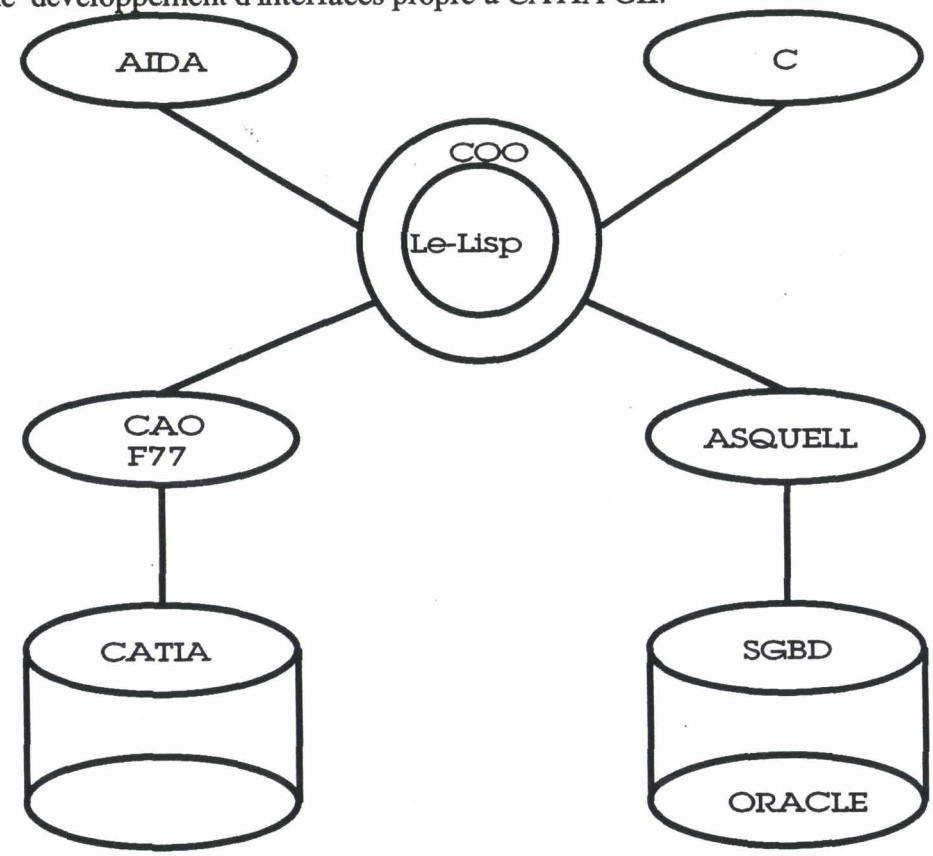


fig II.14

I.4.4 Architecture informatique globale d'implantation de SARTRE

Elle est représentée figure II.15.

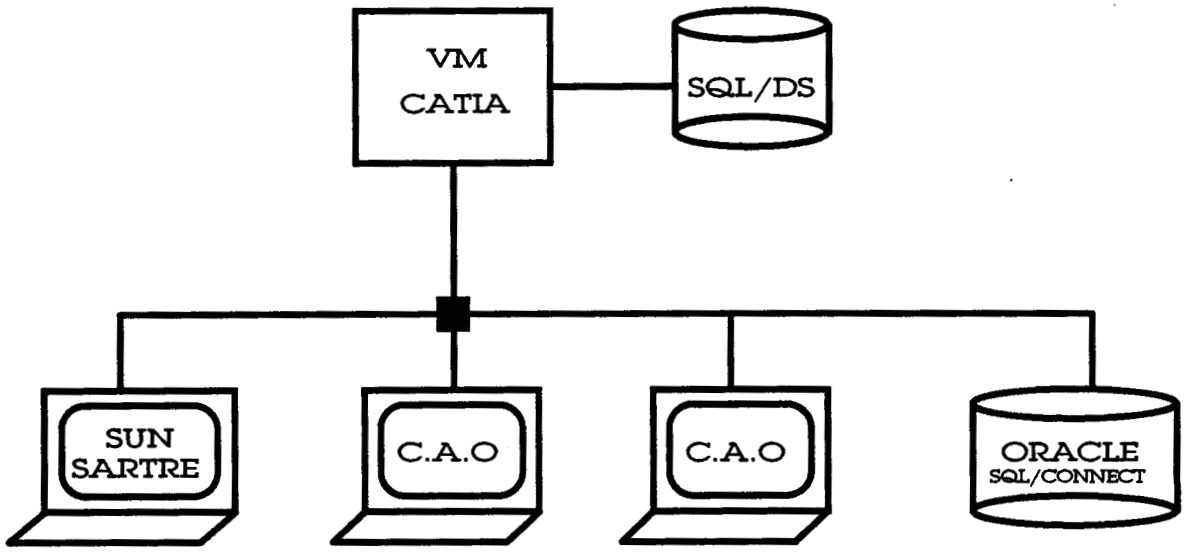


fig II.15

II Modèle et aide à la modélisation

II.1 Représentation des connaissances statiques

II.1.1 Problématique et motivations

Nous proposons de décrire dans cette partie le squelette de l'environnement de simulation SARTRE bâti sur une couche orientée objet interconnectée à un système de gestion de base de données relationnelle.

La dualité couche objet-SGBD permet de modéliser aisément l'ensemble des connaissances statiques du domaine à savoir l'ensemble des connaissances structurelles relatives au système de production flexible considéré et aux produits.

En effet, les bases de données CAO sous CATIA étant essentiellement géométriques, elles ne couvrent pas l'ensemble des besoins de l'étude pour la plupart beaucoup plus structurels et fonctionnels que géométriques.

Ces quelques réflexions nous ont conduit à proposer un outil de modélisation du système et des produits intégrés à l'environnement SARTRE, outil disposant d'une souplesse d'utilisation et d'une complète interactivité.

L'ensemble planificateur-moteur constituant le noyau de simulation de SARTRE, fonctionnera alors en parfaite intégration avec le modèle du système au travers de la couche objet commune.

Pour assister le technicien méthode dans l'étape de modélisation, laquelle débute toute session de travail sous SARTRE, des outils d'aide à la modélisation, utilisant la pleine puissance du langage Le-Lisp et de son extension graphique AIDA, permettant la description et la gestion des modèles ont été développés.

II.1.2 L'approche objet

Nous proposons de rappeler quelques unes des principales caractéristiques des langages objets.

Avec le langage SIMULA, dédié à la simulation, apparaissait en 1967 les concepts d'objet et d'héritage.

Mais c'est en 1972 au centre de recherche de Xerox à Palo Alto, qu' Alan Kay, désireux de créer un ordinateur réellement convivial basé sur les concepts de SIMULA, donna naissance à SMALLTALK /COI 82/. SMALLTALK intégrait les concepts d'objets, d'instanciation, d'héritage et de communication par messages.

Un objet représente ainsi un savoir déclaratif associé à un savoir procédural. Le savoir déclaratif de l'objet constitue l'aspect statique et est modélisé dans les champs ou propriétés de celui-ci.

Quant au savoir procédural, il représente les spécificités à caractère dynamique de l'objet ; Il est modélisé sous forme de méthodes.

L'objet est donc une "boite noire" à laquelle on accède uniquement par l'activation des procédures ou méthodes qui lui sont associées (cf figure II.16).

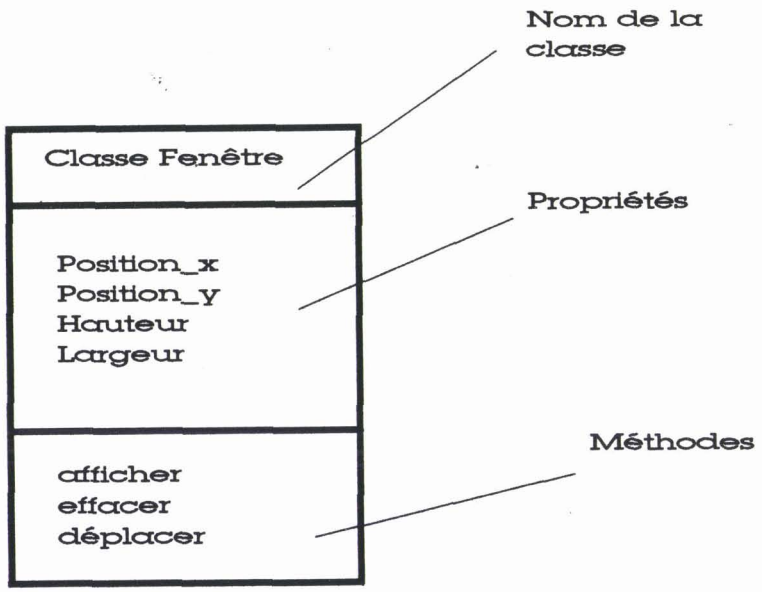


fig II.16

Les classes constituent le moule commun à un ensemble d'objets où sont déclarés propriétés et méthodes dites "de classe".

La création d'un objet consiste alors en la création d'une instance de la classe à laquelle l'objet doit appartenir (cf figure II.17).

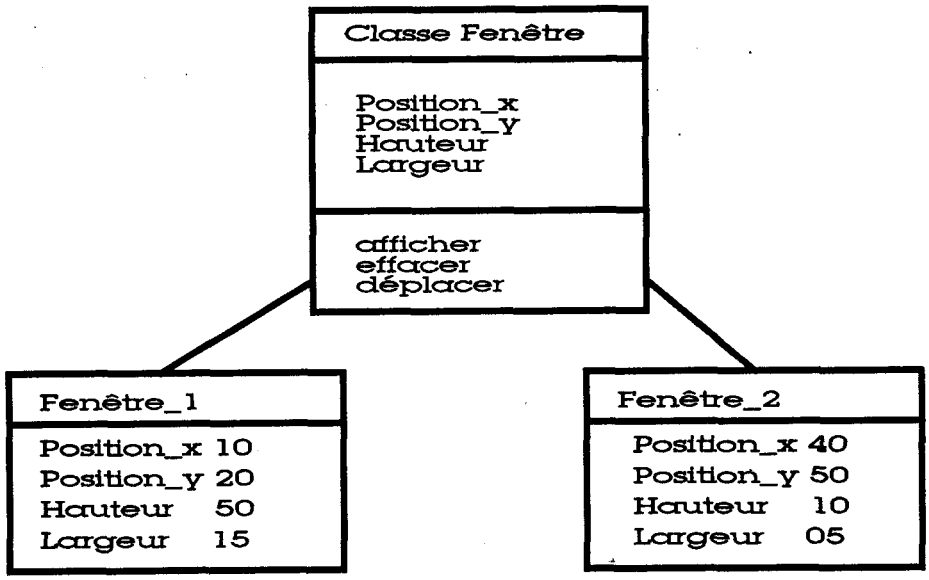


fig II.17

Les classes peuvent être organisées hiérarchiquement et liées par des liens de spécialisation. Ainsi, une sous-classe hérite des propriétés et méthodes de sa surclasse. L'héritage peut être simple ou multiple avec tous les problèmes de conflits que ce dernier pose.

Nous retiendrons des langages orientés objets qu'ils apportent:

- Facilité de modélisation de par la similitude entre le modèle et le monde réel.

- Intelligibilité grâce à l'envoi de message seul et unique moyen de communication inter-objets.

- Intégrité grâce au cloisonnement des objets: un objet est le seul à pouvoir modifier sa représentation interne.

- Réutilisation du logiciel par instanciation des classes existantes et par héritage de classes.

Par contre, les LOO (langages orientés objets) sont limités par la nécessité de gérer la mémoire lors des créations/destructions d'objets ainsi que par des temps d'exécution parfois prohibitifs.

II.1.3 Implémentation

Elle s'articule autour de trois grandes directions:

- Utilisation d'un système de gestion de base de données relationnelles.

- Utilisation d'une couche orientée objet au niveau symbolique.

- Communication inter-couches.

Avant de détailler chacun de ses trois axes, il nous a paru intéressant de présenter quelque peu le concept de SGBD relationnelles et d'en dégager les avantages principaux ainsi que certaines limitations dans le cadre du travail présenté ici.

II.2 Les bases de données et le modèle relationnel

II.2.1 Objectifs d'un SGBD

/DEL 82/ définit une base de données en tant "qu'ensemble structuré de données enregistrées sur support accessible par l'ordinateur pour satisfaire simultanément plusieurs utilisateurs de façon sélective et en un temps opportun".

Le Système de Gestion de Base de Données (SGBD) quant à lui est l'ensemble des logiciels qui réalisent les accès physiques à la base de données.

Il doit être capable d'assurer les tâches suivantes /CHR 87/:

* Définition et description des données.
* Utilisation et manipulation des données.
* Centraliser l'information.
* Assurer l'indépendance données traitements.
* Permettre des liaisons entre ensembles de données.

Avec comme corollaires:

* Intégrité des données.
* Sécurité de fonctionnement.
* Confidentialité.

* Partage des données par gestion des accès concurrents.

II.2.2 Modélisation de l'information

Point de départ de toute conception, la phase de modélisation du monde réel répond à la dénomination "modélisation de l'information" dans le cadre de la conception d'un système d'information.

On décrira dans un premier temps les données nécessaires ainsi que les interactions intervenant entre les divers groupes de données dans le but de constituer une description logique de la structure de données à utiliser.

Puis, on passera à la phase d'utilisation du SGBD proprement dite en définissant les différents schémas de cette base. L'ensemble de la démarche est synthétisé sur la figure II.18.

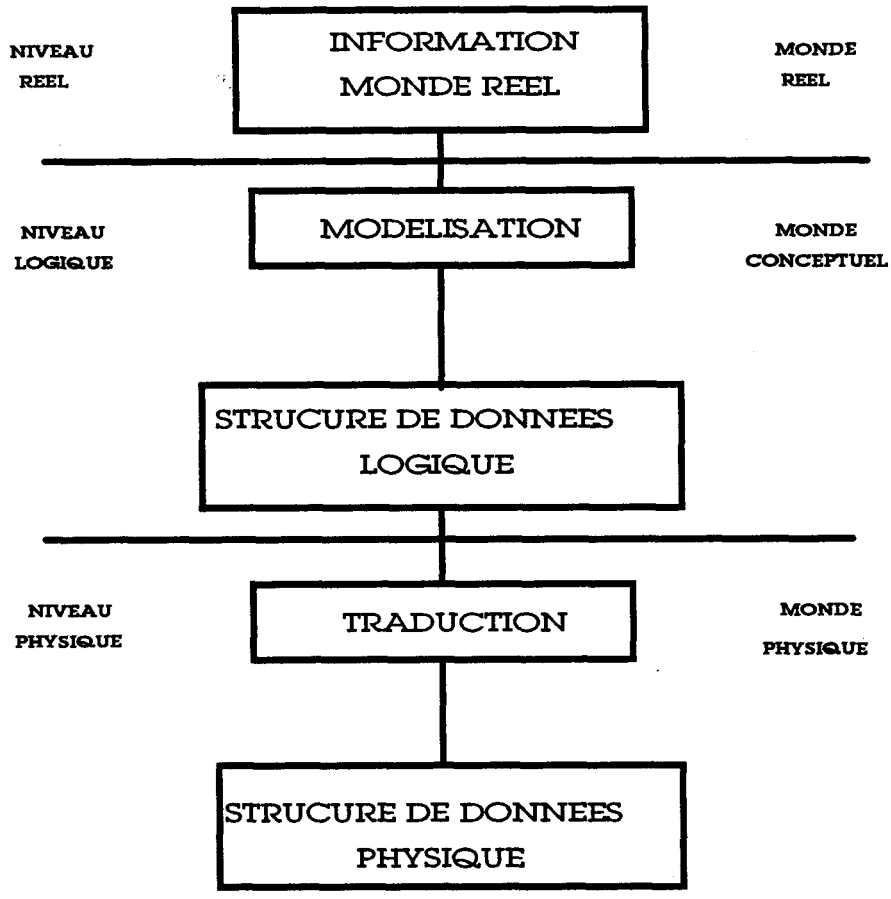


fig II.18

Les niveaux de représentation:

La description d'une base de données se fait sur trois niveaux de représentation: le niveau externe, le niveau conceptuel et le niveau interne, chacun de ces niveaux étant associé à son propre schéma (figure II.19).

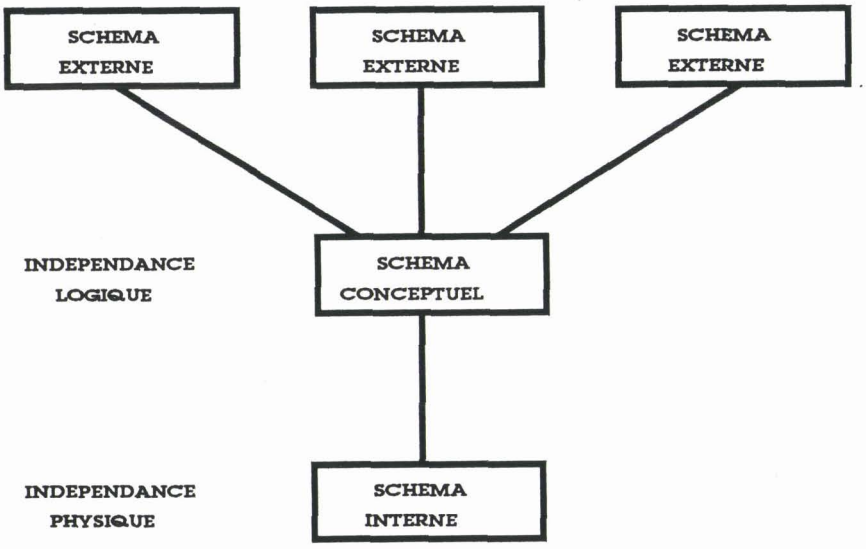


fig II.19

* Niveau interne: Il décrit l'organisation physique des données sur les divers organes périphériques de masse.

* Niveau externe: Il est propre à chaque utilisateur et représente la vue que celui-ci peut avoir du schéma conceptuel.

* Niveau conceptuel: le schéma conceptuel et le schéma fondamental de la base. Il décrit à un certain niveau d'abstraction la réalité d'une organisation et de ses processus de gestion.

Les modèles conceptuels:

On distingue trois types de modèles conceptuels;

* **Le modèle hiérarchique:** historiquement le plus ancien, il obéit à la structure d'arbre où chaque noeud représente une classe d'entités, chaque arc représentant quant-à-lui une association entre classes.

* **Le modèle réseau:** ou modèle CODASYL; son schéma peut se visualiser sous la forme d'un graphe. Le modèle hiérarchique est ainsi une spécialisation du modèle réseau, ce dernier étant beaucoup plus vaste.

* **Le modèle relationnel:** il est basé sur la notion de relation, une relation étant un ensemble de n-uplets et se représente sous la forme d'une table.

II.2.3 Le modèle relationnel

Inventé par T.CODD de l'école IBM SAN-JOSE en 1970, le modèle relationnel est basé sur la notion mathématique de domaines et de relations /COD 70/. En théorie des ensembles, un domaine est un ensemble de valeurs. Une relation apparaît alors comme un sous-ensemble du produit cartésien d'une liste de domaines.

Plus simplement, une relation est visualisée sous la forme d'un tableau à deux dimensions. Une ligne est appelée un tuple et chaque colonne représente un domaine. Les colonnes portent le nom d'attributs et ainsi, un attribut prend ses valeurs dans un domaine.

Toute relation possède au moins une clé constituée par un groupe d'attributs minimum déterminant un tuple unique au sein de la relation.

L'intention de chaque relation est décrite par un schéma et le schéma de la base est constitué de l'ensemble des schémas des relations composantes.

Les opérations réalisables sur les différentes relations sont celles de l'algèbre relationnelle /CHR 87/. Outre le stockage et la destruction d'un enregistrement on distingue généralement les opérations de projection, sélections, produit (jointure), somme, union, intersection, complément et différence. En fait, les opérations d'union, différence, projection, restriction, jointure suffisent à rendre l'algèbre relationnelle complète.

Les langages de manipulation de données intègrent l'ensemble de ces opérations. Citons la norme SQL et le langage du même nom qui permet la manipulation, la définition des données et la définition des contrôles /CHR 87/.

II.3 Les bases de données sous SARTRE

- Base de données ligne:

Elle gère la structure de la partie polyvalente de la ligne; sa décomposition en zones, postes, robots, périrobotique permet de tenir à jour un état des lieux évolutif lors des simulations (ajout/ retraits/modification des moyens).

- Base de données produit:

Encore appelée base de données véhicule, elle est issue des données études situant les différents points de soudure assemblant différentes tôles ainsi que divers attributs technologiques. Par rapport aux bases "études", elle prend en compte les notions de sous-ensemble ainsi que d'autres attributs.

- Base de données gammes:

Elle gère les pseudo-gammes générées par SARTRE et destinées à être enrichies et validées en C.A.O puis téléchargées en hors-ligne sur les baies de commande des robots de la ligne simulée.

- Base de données manipulateur:

Elle contient des informations sur les caractéristiques des différents manipulateurs, leurs performances, leur équipement, leur degré de complexité ...

- Base de données outils:

Les caractéristiques des différentes pinces y sont gérées; une bibliothèque de composants permet des raisonnements consécutifs à une modification ou une redéfinition d'outil.

- Base de données C.A.O:

Base de données géométriques hébergée par le système de C.A.O utilisé, elle contient les définitions des tôles, assemblages, outils, robots permettant la simulation C.A.O Robotique.

II.4 L'aproche objet sous SARTRE

II.4.1 Généralités

SARTRE a été entièrement construit autour d'une couche orientée objet facilitant à la fois son développement et son utilisation.

L'implémentation de notre approche est basée sur l'enrichissement de la couche objet standard du langage Le-Lisp /CHA 89/ permettant de satisfaire nos besoins.

C'est cet environnement orienté objet que nous nous proposons d'examiner dans la suite de ce paragraphe.

II.4.2 Description du modèle

La couche orientée objet de base du langage Le-Lisp propose une implémentation efficace basée sur la notion de "package" /CHA 89/.

Elle propose une boîte à outil permettant de construire un ensemble de classes.

Chaque classe comprend un ensemble de champs ainsi qu'un ensemble de méthodes; les propriétés peuvent être constituées de n'importe quel objet Le-Lisp et les méthodes sont en fait des fonctions Lisp.

Les classes peuvent être liées par la relation de spécialisation réduite au seul monohéritage.

Cette couche de base a été essentiellement enrichie par une gestion d'objets permettant d'avoir accès à l'ensemble des instances d'une classe et donc d'effectuer des sélections dans ce dernier.

D'autre part, les attachements procéduraux ont été simulés en redéfinissant les méthodes d'accès aux instances des différentes classes.

Toutes ces possibilités sont regroupées dans la "superclasse" objet et l'arborescence de classes de SARTRE s'organise suivant un schéma détaillé figure II.20.

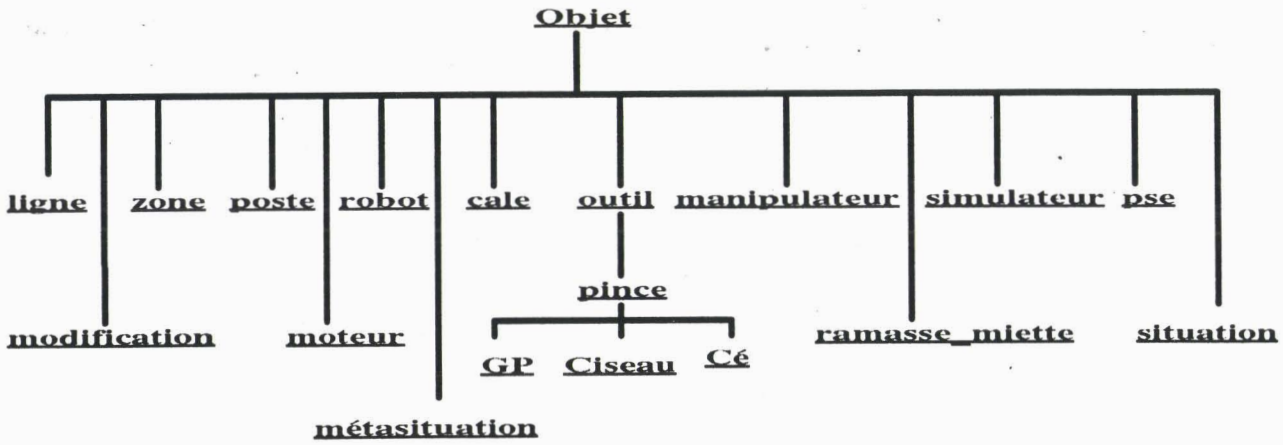


fig II.20

On peut alors observer que sous SARTRE, tout est objet qu'il s'agisse du robot ou de la ligne; le simulateur est lui même un objet de la classe simulateur. Cette approche permet de grandes facilités de manipulation et de génération par instanciation.

II.5 Communication couche-objet / SGBD

II.5.1 Les limites du modèle relationnel

Malgré ses indiscutables possibilités, le modèle relationnel reste limité par les points suivants:

* Pauvreté sémantique: Le modèle relationnel ne gère pas les types abstraits et l'on a des difficultés à gérer des objets tels que les listes.

* Les possibilités d'accès à une base relationnelle sont nécessairement doubles; un langage de manipulation de données (SQL) et un langage de programmation (C, Cobol, PL/1, F77, ...).

* Un système relationnel est figé et non extensible ce qui rend impossible toute transaction de type conception.

* Les problèmes de concurrence ne sont pas gérés à part les opérations de type débit/crédit.

* Il n'y a pas de gestion de version.

* Il est impossible de répondre aux nouveaux besoins de type stockage d'images, graphisme son et texte.

II.5.2 Perspectives en matière de base de données

Deux axes de recherche se sont développés ces derniers temps: l'approche base de données déductive et l'approche base de données objet.

Dans le domaine des SGBD déductifs (figure II.21), l'objectif est de donner la possibilité d'inférer de nouvelles informations à partir des données de la base et de règles de connaissances /DEM 86/. Ce thème est actuellement un sujet de recherche où les développements à long terme (plus de cinq ans) semblent prometteurs. L'utilisation de tels modèles peut être envisagée dans les domaines de la robotique (modélisation de l'environnement en génération de plans par exemple), de la productique, des systèmes experts à grand volume de données comme la médecine etc.

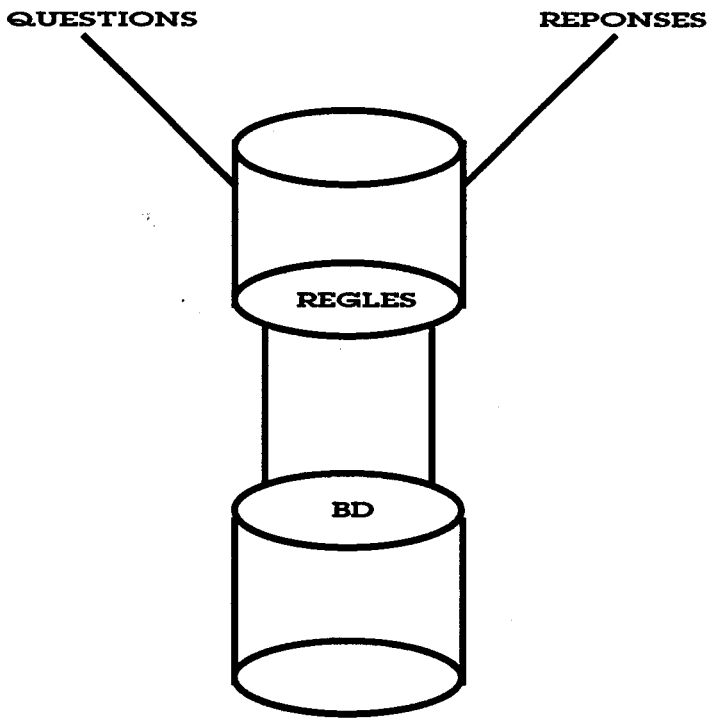


fig II.21

En ce qui concerne le thème des bases de données objets, il est motivé par le fait que les SGBD relationnelles restent alphanumériques (tabulaires à champs réduits, non structurés) et ne permettent pas le stockage intelligent, la mise en forme et l'évolution d'objets complexes.

Issus de l'intelligence artificielle, les concepts utilisés découlent des réseaux sémantiques et des langages orientés objets et permettent de modéliser des objets complexes.

Ces concepts peuvent être utilisés suivant deux voies d'approfondissement:

- La première, celle des extensions objet du relationnel, se propose d'étendre les domaines /COD 70,79/ (ensemble de valeurs) de variation des attributs de manière à autoriser la multivaluation, la gestion des collections et par là même la gestion d'objets complexes /OSB 86/.

- Quant à la seconde approche, celle du couplage d'un langage objet et d'un SGBD (noyau gérant d'objets), différant des langages objet par le fait que la base n'est pas en mémoire vive mais sur disque, elle se heurte à certains problèmes de performance /TSU 84/.

En ce qui concerne le marché, citons GEMSTONE, premier vrai sgbd orienté objet, écrit en smalltalk et distribué par Serviologic depuis 1988, Vbase, mis sur le marché par Ontologic en 1988 et retiré en 1989 pour des problèmes de performances, Ontos, son successeur écrit en C++ et O2 produit du GIP Altaïr actuellement à l'état de prototype.

Les sgbd orientés objets, apparaissent comme une solution alliant une sémantique riche et une capacité de modélisation d'objets complexes, associés à une prise en compte des aspects dynamique de conception. Cependant des efforts restent à faire dans les domaines de l'optimisation des performances des systèmes.

II.5.3 La solution retenue: le couplage faible

II.5.3.1 Le principe

Dans le cadre de notre étude, la solution retenue pour pouvoir assurer une communication entre la couche objet et le SGBD relationnel a été celle du couplage faible.

A cet effet, la représentation objet des différents composants du modèle dialogue avec le niveau relationnel par l'intermédiaire du langage d'interrogation SQL.

II.5.3.2 L'interpréteur de requêtes SQL

Sous Le-Lisp, des requêtes SQL peuvent être générées et retournent des résultats d'interrogation sous forme de listes, aisément manipulables sous un top-level Lisp.

L'implémentation de cet interpréteur de commandes a été faite à l'origine via des appels système UNIX permettant de synchroniser la tâche d'interrogation/retour et la tâche d'interprétation de commandes SQL. La figure II.22 représente le détail des processus décrit à l'aide du formalisme Réseaux de Pétri /BRA 83a, 83b/.

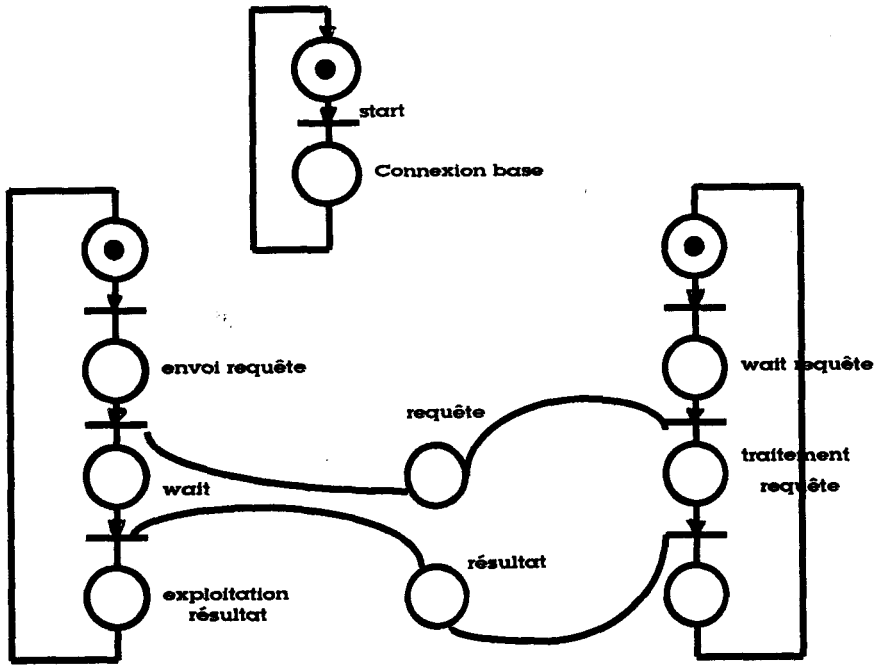


fig II.22

Par la suite, nous avons choisi d'utiliser le produit ASQUELL /ASQ 89/ de la société ILOG, permettant de lancer des requêtes SQL sous Le-Lisp et d'en récupérer le résultat sous le top-level. Ainsi, les applications développées à l'aide d'ASQUELL permettent:

* Une gestion des données à partir de Le-Lisp, en SQL grâce aux fonctions SELECT, INSERT, UPDATE et DELETE.
* Une gestion des droits d'accès des utilisateurs par les requêtes GRANT et REVOKE.
* Un contrôle de la validation des transactions par l'intermédiaire des requêtes COMMIT et ROLLBACK.

* Une mise à jour du schéma et du dictionnaire de données avec les requêtes CREATE TABLE, ALTER TABLE, CREATE INDEX ...

II.5.3.3 Dialogue modèle objet, modèle relationnel

Il est implémenté sous forme d'attachements procéduraux.

A chaque champ critique d'objet est associé un certain nombre de méthodes Lisp se déclenchant lors de la consultation du champ ou lors de l'écriture d'une information dans le champ.

Ces méthodes contiennent les différentes requêtes SQL que l'on veut voir exécuter par le système lors d'une consultation ou d'un renseignement du champ considéré et permettent ainsi une disponibilité "à la demande" des informations persistantes en bases de données.

Malgré tout, cette implémentation reste spécifique à notre problème et nous signalerons des recherches en cours à l'INRIA, visant à proposer une couche-objet virtuelle persistante permettant d'appréhender, dans un même formalisme objet choisi, aussi bien l'information contenue dans les bases relationnelles que la connaissance d'un système de haut niveau de type générateur de systèmes experts /LEB 90/.

II.6 Spécification et aide à la modélisation: l'interface homme-machine

II.6.1 Généralités

Le modèle couche objet / SGBD que nous avons implémenté afin d'accueillir les différentes connaissances statiques du domaine de l'étude est accessible à l'utilisateur au travers des menus "spécification" et "base de données" de la page d'accueil de SARTRE (figure II.23).

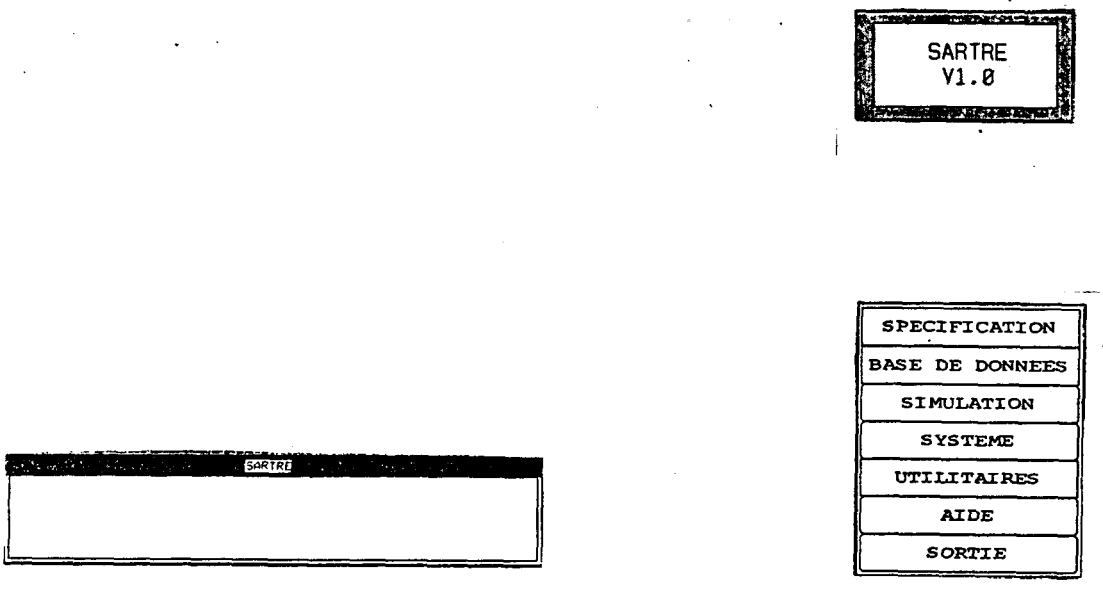


fig II.23

Ces menus permettent la spécification des différentes lignes et véhicules à étudier (menu "spécification") ainsi que leur consultation (menu "base de données").

Nous allons dans cette partie nous attacher à décrire les fonctionnalités de l'interface de spécification et nous dirons quelques mots sur l'accès en consultation de nos bases.

II.6.2 Fonctionnalités

II.6.2.1 Menu "spécification"

La spécification des véhicules se fait de manière automatique par l'exploitation de fichiers de données issus de la CAO, résultats de l'étude de zone.

Quant à la spécification des lignes, elle peut se faire en automatique ou en interactif.

La spécification interactive des lignes s'effectue à travers l'interface conviviale de la figure II.24.

Elle se compose de trois niveaux, obéissant au découpage hiérarchique ligne-zone-poste-ressource.

Cette spécification débute par l'établissement de l'arborescence de zones composant la ligne de production en question; Les articles "éditer", "ajouter", "supprimer", "sauver" facilitent son édition.

Par la suite, le concepteur descend à l'intérieur de chacune des zones et les spécifient en y faisant figurer les différents postes qui la composent à l'aide des articles "éditer", "ajouter", "modifier", "supprimer", du second niveau.

Enfin, l'utilisateur décrit chaque poste en y disposant les différentes ressources qui le composent à l'aide des articles "ajouter", "supprimer", "précédent", "suivant" et des différents éditeurs du troisième et dernier niveau, liés aux robot, cale, manipulateur et outil.

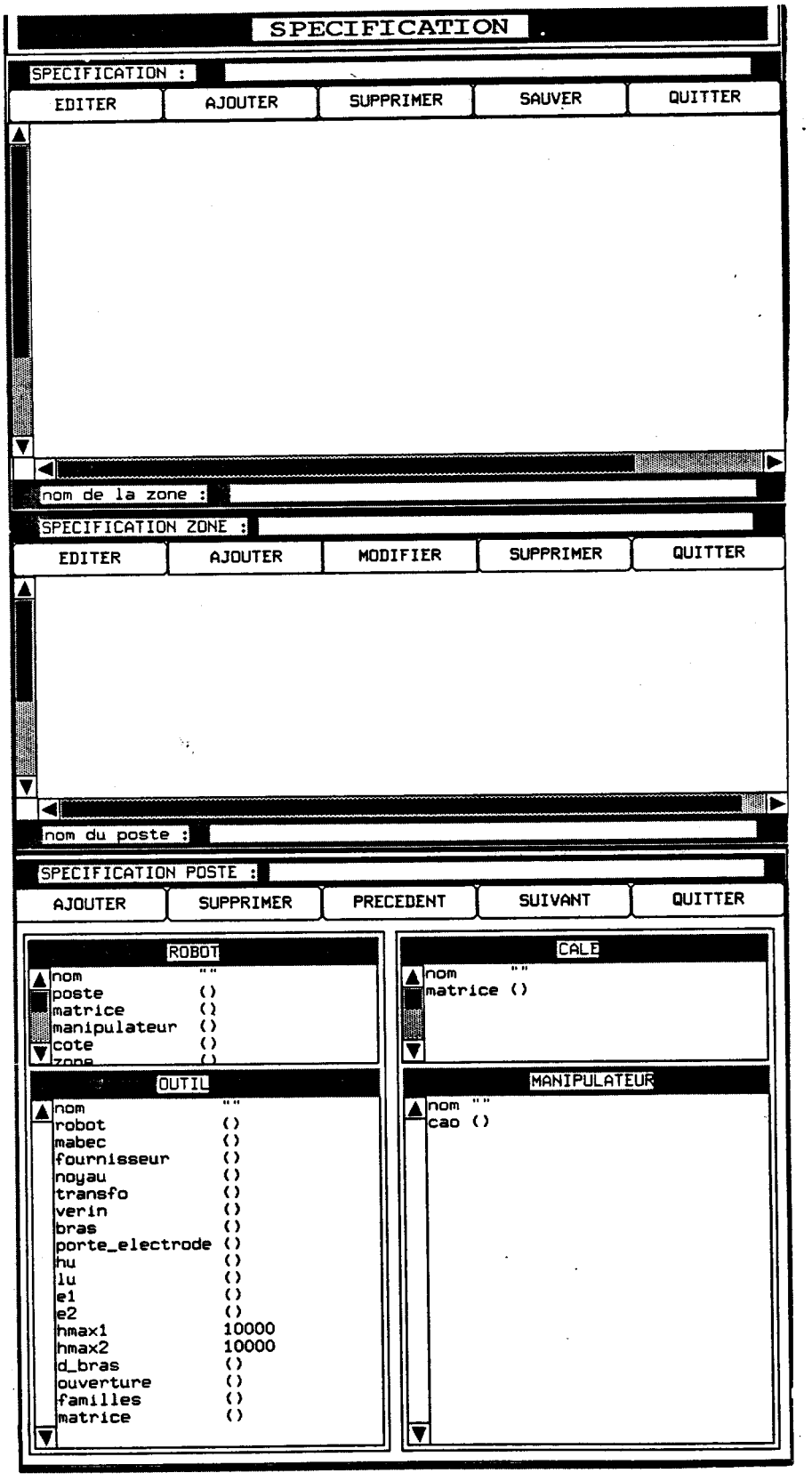


fig II.24

BU LILLE

II.6.2.2 Menu "base de données"

Cette classe de menus, permet de consulter les différentes lignes et véhicules présents en mémoire centrale ou sauvés en base de données.

Le menu de "base de données ligne", permet d'accéder en lecture aux différents composants de la ligne (figure II.25).

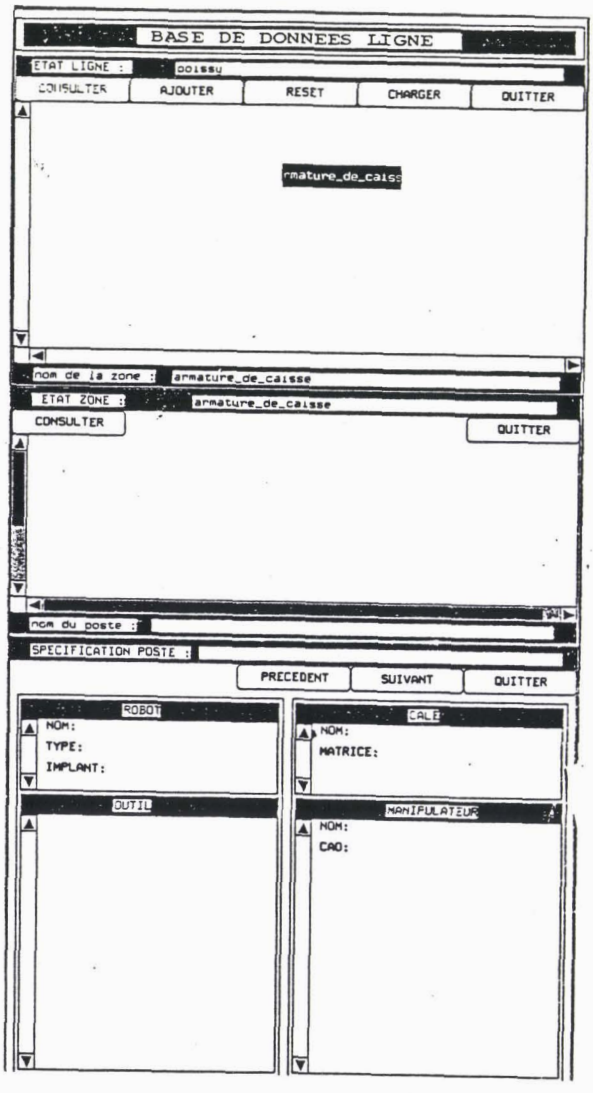


fig II.25

Quant au menu de "base de données véhicule", il permet de consulter les résultats de l'étude de zone en termes d'attributs liés aux points de soudure et de potentialité d'affectation par zones (figure II.26).

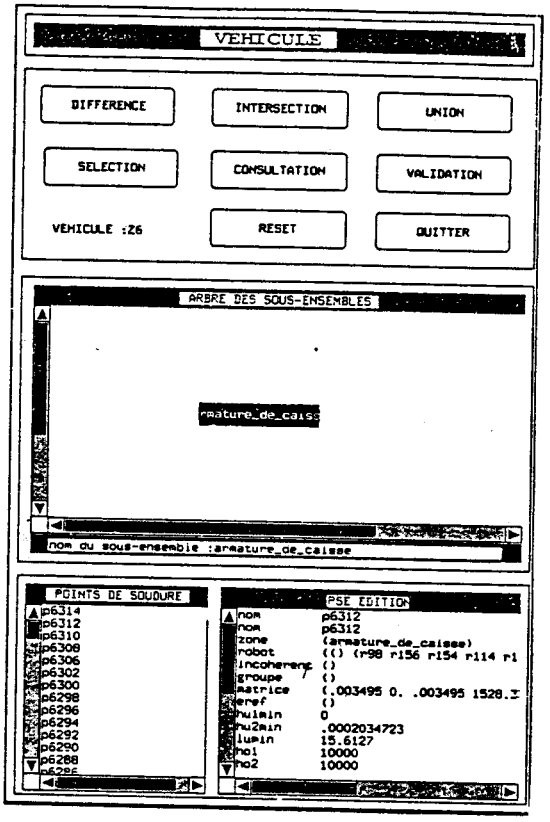


fig II.26

II.6.3 Implémentation

L'implémentation de notre interface homme machine s'est effectuée en AIDA /AID 89/, bibliothèque d'objets graphiques autour de Le-Lisp /CHA 89/, à l'aide de l'outil de développement interactif d'interfaces graphiques MASAI /MAS 89/.

Cet ensemble de menus, fournit à l'utilisateur un aide à la spécification conviviale et facile d'accès.

III Le moteur et le problème d'affectation

III.1 Problématique

Nous avons vu que le problème de fond posé par la conception et la reconfiguration d'une ligne de production robotisée est celui de la détermination d'un paramétrage de l'ensemble des ressources de la ligne, satisfaisant un ensemble de contraintes et permettant de réaliser l'ensemble des opérations prévues.

Plus précisément, il s'agit de prendre en compte le problème suivant:

Etant données n ressources Ri, $i \in \{1...n\}$, possédant p possibilités de paramétrage Pij, $j \in \{1...p\}$ et chargées d'exécuter q tâches Tk, $k \in \{1...q\}$, paramétrer les ressources de telle manière que l'ensemble des tâches {Tk} soit affecté à une ressource au moins.

Dans l'exemple d'une ligne de production robotisée en soudage par points, nous aurions l'énoncé suivant:

Etant donnés n robots Ri, $i \in \{1...n\}$, possédant chacun p possibilités de paramétrages Pij (pour Ri), $j \in \{1...p\}$ et devant exécuter globalement un ensemble de q points de soudage Tk, $k \in \{1...q\}$, on propose de rechercher une solution de paramétrage permettant d'affecter les q points de soudage sur les ressources robots Ri.

Cette affectation, dans le cas d'une ligne robotisée doit satisfaire des contraintes d'équilibrage de la ligne ainsi qu'un temps de cycle par gamme donné associé à un critère de coût lié aux modifications de la configuration physique des ressources de l'atelier. En effet, les ressources d'une ligne de production doivent exécuter les tâches qui leur sont allouées en un temps quasiment identique (problème de lissage) et dans tous les cas inférieur au temps moyen de gamme fixé par le rythme de la production.

Les ressources Ri induisent du fait de leur paramétrage une certaine flexibilité permettant ainsi une adaptation de la production.

Pij représente le degré de liberté j de la ressource Ri; il peut s'agir soit de degré de liberté spécifique à la ressource au niveau automatisme ou informatique soit encore de modifications physiques plus ou moins importantes (changement ou modification d'outil, déplacement d'un robot manipulateur, ajustage de réhausse ...).

modifications physiques plus ou moins importantes (changement ou modification d'outil, déplacement d'un robot manipulateur, ajustage de réhausse ...).

Après avoir examiné les différentes voies de recherches posssibles pour aider à la résolution d'un tel problème, nous détaillerons l'approche retenue dans SARTRE, basée sur un planificateur mettant en oeuvre un certain nombre d'heuristiques greffées sur un mécanisme générique de résolution que nous appellerons le "moteur".

III.2 Rappel des méthodes d'optimisation combinatoire

III.2.1 Théorie des graphes et allocation de ressources

Les problèmes d'allocation de ressources classiques (affectation de q tâches à p machines sous contraintes de coûts éventuelles) sont résolus en recherche opérationnellle à partir d'une modélisation du problème sous forme de flots ou de couplage /GON 85/.

Néanmoins, cette approche ne prend pas en compte la possibilité d'ajouts supplémentaires au problème (les paramétrages), qui induit une explosion combinatoire difficile à gérer en pratique /SAK 84b/.

III.2.2 La programmation dynamique

Elle se caractérise par l'application du principe d'optimalité qui peut se formuler de la manière suivante: "Dans une séquence optimale de décisions, quelle que soit la première décision prise, les décisions subséquentes forment une sous-séquence optimale, compte tenu des résultats de la première décision" /SAK 84/.

Elle s'apparente d'un point de vue "intelligence artificielle" à un raisonnement par chaînage arrière avec évaluation d'une fonction de coût.

C'est une méthode d'optimisation récursive qui permet de résoudre de nombreux problèmes moyennant un temps de calcul incertain.

III.2.3 Les méthodes approximatives

Elles sont très souvent spécifiques des problèmes à résoudre.

- Les heuristiques gloutonnes:

Les algorithmes qui les mettent en oeuvre se caractérisent par une absence de retour-arrière (backtrack). En pratique il existe une grande variété d'approximations gloutonnes. Leur complexité est polynomiale mais si on réitère le procédé en changeant les paramètres, on peut rapidement arriver à une complexité exponentielle.

- L'algorithme AO*:

Il permet une recherche guidée dans les graphes en estimant le coût des futurs développements à l'aide d'une heuristique bien choisie. La recherche se fait en profondeur mais prend également en compte les noeuds non développés. Dès que le coût courant devient important, il y a possibilité de commuter sur un ouvert /NIL 82/.

- Les algorithmes par exploration locale:

Le principe de ces méthodes est très simple. A partir d'une solution réalisable s du problème d'optimisation combinatoire considéré, on définit un voisinage V(s) inclus dans S de cette solution et on cherche s'il existe s' appartenant à V(s) tel que:

$f(s') < f(s)$ (f est ici un critère d'optimisation)

Si c'est le cas, on remplace s par s' et on réitère; sinon, on a obtenu un optimum local.

Des améliorations ont été proposées pour tenter de franchir les éventuelles barrières de potentiel; une des méthodes les plus prometteuse, celle du recuit simulé s'inspire des résultats de la physique statistique /BON 88/. Malgré tout, des problèmes sérieux se posent quant à l'initialisation des paramètres de l'algorithme /BEZ 89/.

Dans ces deux derniers cas, le choix du critère d'estimation ou d'optimisation est des plus délicat notamment si la dimension du problème est importante.

III.2.4 La programmation par contraintes

Les langages de programmation par contraintes mettent à la disposition de l'utilisateur une sémantique et des mécanismes apte à modéliser et à résoudre un grand

Deux approches sont à remarquer en matière de langage de programmation de contraintes: Celle du groupe BULL avec le langage CHARME /OPL 89/, exploitant un mécanisme de propagation de contraintes associé à une technique de résolution de systèmes d'équations sur les entiers et celle d'Alain Colmerauer avec PROLOG III /COL 90/, extension de PROLOG au sens du remplacement de la notion d'unification par celle de résolution de contraintes (utilisation de rationnels à la place d'entiers).

III.2.5 Le connexionisme

Les réseaux de neurones formels ont eux aussi été utilisés pour supporter la résolution de problèmes combinatoires /PER 88/.

Néanmoins cette approche reste encore du domaine de la recherche et très peu d'applications industrielles sont à l'heure actuelle opérationnelles.

III.3 L'approche proposée: dualité planificateur moteur

III.3.1 Le concept

Compte tenu de la dimension du problème, nous n'avons pas eu la prétention de tenter de proposer une recherche de la solution optimale du problème mais plutôt une solution acceptable vérifiant les différentes contraintes du problème.

Notre approche consiste à proposer un système s'articulant autour de deux axes principaux:

- Le moteur:

Il s'agit d'un module générique permettant à partir des transitions (ou règles de déduction) de la forme

SI la ressource Ri est paramétrée selon le vecteur de réglage Pil

ALORS elle pourra réaliser la tâche Til.

que nous noterons symboliquement:

Ri et Pil --> Til

avec Ri: ressource Ri

Pil: paramétrage l de Ri

Til: Tâches possibles pour Ri paramétré suivant le vecteur Pil

de générer un recouvrement des tâches (Tk) par l'ensemble des ressources (Ri) paramétrées.

Dans le cadre de notre application, les ressources seront identifiées aux robots (manipulateur + outil), les paramétrages seront associés aux possibilitées de modifications géométriques et technologiques des outils de soudage ainsi que de variations d'implantation des manipulateurs et les tâches, aux points de soudage à réaliser.

- Le planificateur:

Il paramètre et pilote le moteur à partir d'une modélisation des contraintes du domaine étudié (contrainte d'équilibrage de lignes, contraintes métier ...).

Le but recherché consiste à tenter d'affecter les tâches (Tk) aux ressources (Ri) munies d'un paramétrage (Pij).

Nous allons, dans les paragraphes suivants exposer la structure, le fonctionnement et l'implémentation de notre moteur dans son aspect générique.

L'adaptation de notre moteur au problème de la conception et la reconfiguration des lignes de production robotisées sera abordé dans le chapitre IV relatif au niveau de planification.

III.3.2 Le moteur

A partir d'un ensemble de transitions, il va tenter de satisfaire les buts qui lui sont proposés. Ces derniers étant en fait représentés par une liste de tâches à réaliser.

Son cycle de fonctionnement est illustré figure II.27.

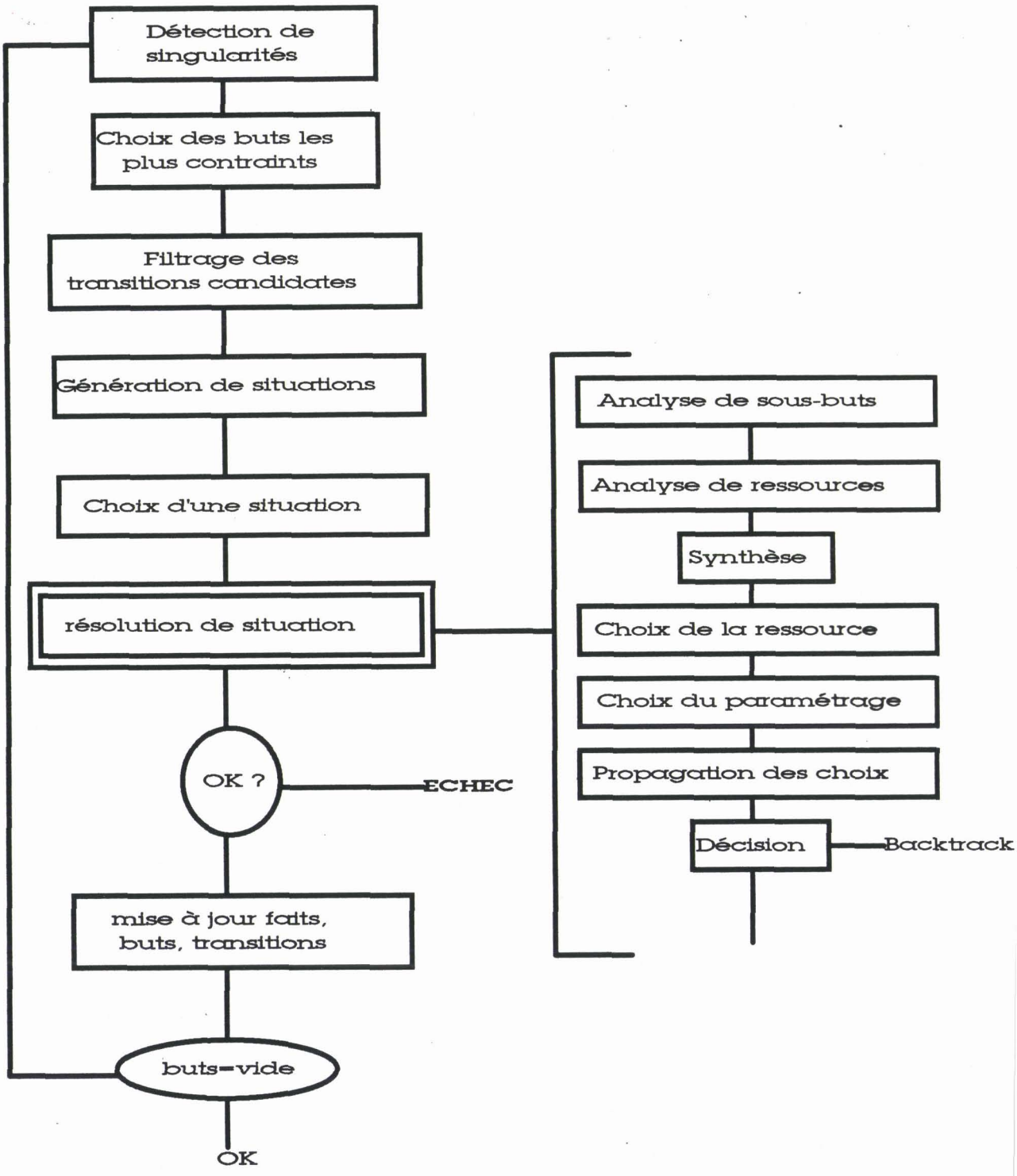


fig II.27

On distingue les étapes suivantes:

- Détection de singularités:

Cette étape permet de détecter les sous-buts qui ne sont affectables que sur une seule ressource et dans des familles de modification incompatibles. Un choix exclusif devra être effectué par l'utilisateur, notamment dans le cas où cette situation se produirait dès le début du raisonnement.

Par exemple, dans le cas d'une ressource possédant deux familles de modifications m1 et m2 telles que:

m1 permet d'effectuer les points pse1, pse2, pse3.
m2 permet d'effectuer les points pse1, pse2, pse4.

Le module de "détection de singularités" déduira un cas de concurrence fatale entre (pse3) et (pse4).

La "main" sera alors donnée à l'utilisateur qui décidera:

* La poursuite du raisonnement dans le cas ou la profondeur de la recherche est non nulle.

* La relaxation d'une des contraintes qui se traduira dans notre cas par l'effacement du but (pse3) ou l'effacement de (pse4).

- Choix des tâches les plus contraintes:

Ce module filtre parmi l'ensemble des buts à satisfaire ceux qui sont a priori affectables sur un ensemble restreint de ressources. Pour de tels buts (liste de pse), il n'existera qu'un nombre faible (minimum) de robots et un paramétrage limité (minimum) de ces mêmes robots (contrainte limitative). Un premier filtrage est effectué sur la recherche d'un nombre minimum de robots possibles par tâche. Sur le résultat de ce premier tri est appliqué un second filtre qui sélectionne les sous-buts affectables sur les ressources ayant un "minimum de degrés de liberté de paramétrages possibles". Les sous-buts solutions représentent alors les tâches (points de soudage dans notre exemple) à placer en priorité.

- Filtrage des transitions candidates:

Cette étape retourne l'ensemble des transitions dont la partie "conséquent" pointe sur les sous-buts précédemment filtrés (chaînage arrière sur les transitions (ou implications) de la forme Ri et Pil -> Til).

- Génération des situations envisageables:

Une situation est définie comme un couple ({tâches}, {ressources}) de telle manière que chaque tâche ne soit affectable que sur l'ensemble {ressources} et lui seul.

- Choix heuristique d'une situation:

Ce module permet de choisir parmi l'ensemble des situations générées celle que l'on va tenter de résoudre.

- Résolution de la situation:

Une fois la situation choisie, il convient de satisfaire l'ensemble des sous-buts s'y rapportant d'où l'intérêt de cette macro étape qui se décompose de la manière suivante (figure II.27):

* Analyse des sous-buts: Les sous-buts à effacer seront analysés et classés suivant certains critères qui seront détaillés au IV.5.5.

* Analyse de l'état des ressources: Les ressources caractéristiques de la situation à résoudre, seront analysées et classées elles aussi suivant certains critères explicités au IV.5.5.

* Synthèse et hiérarchisation des sous-buts: Cette étape résulte de la mise en correspondance des deux précédentes et propose une liste de sous-buts ainsi qu'une liste de ressources à examiner en priorité.

* Choix de la ressource à paramétrer au sein de la situation: Ce choix s'effectue en fonction de règles heuristiques et de critères de coûts détaillés en IV.5.5. Notons que ce choix est révocable.

* Choix d'un sous-ensemble de paramétrages possibles: Dans la mesure du possible, on tentera de respecter les préférences de regroupement de tâches sur une même ressource exprimée par l'utilisateur permettant de prendre en compte la contrainte temps de cycle robot et détaillées dans le chapitre concernant le planificateur. D'autre part, le choix se fera en tenant compte de la complexité des

réglages et en privilégiant pour des questions de coûts les modifications mineures par rapport aux autres sauf si ce choix entraîne un blocage prédictif au sens ou il empêcherait l'affectation de certains buts à satisfaire (prise en compte ici d'un "coût futur" de la résolution).

* Propagation des choix et décision; si échec, retour-arrière inter-situation par retour sur les choix antérieurs révocables (choix de paramétrages, choix de ressources).

Le processus se poursuit jusqu'à un échec de la résolution, du fait d'une interruption utilisateur par échappement ou bien d'une pile de buts vide.

Les divers paquets de règles heuristiques nécessaires sont souvent spécifiques au problème traité et leur étude sera différée au chapitre IV relatif au fonctionnement du planificateur mis en oeuvre dans SARTRE.

III.3.3 Implémentation

L'implémentation de notre moteur s'effectue sur la base de la structure de données suivante:

- **L'univers:** C'est l'ensemble des robots disponibles; il comprend:

* Une **pile de buts** qui mémorise les buts restant à satisfaire, c'est à dire les points de soudure à affecter.

* Une **pile de situations** sauvegardant la succession des situations examinées au cours de la recherche.

- **Les opérations:** Une opération est un but satisfait ou à satisfaire, c'est à dire un point de soudure affecté ou à affecter auquel est associée une pile de ressources recensant les possibilités d'affectation de l'opération. Une tâche est constituée d'une suite d'opérations.

- **Les ressources:** Ce sont les robots de la ligne auxquels sont associées les structures de données suivantes:

* La **pile des gammes:** Elle mémorise la succession des ensembles d'opérations affectées dynamiquement à la ressource.

* La **pile de base** qui sauvegarde le triplet (paramétrages, transitions, opérations_encore_réalisables); une analogie avec des inférences classiques assimilerait les paramétrages à la base de faits, les transitions à la base de règles et les opérations aux buts, fournissant un exemple de non-monotonie dans un système d'IA (ceci conduit notamment à réduire progressivement au cours de la résolution la base de règles considérée).

Notre moteur est implémenté en Le-Lisp /CHA 89/, langage fonctionnel se prêtant bien aux manipulations symboliques.

IV Le planificateur

IV.1 Raison d'être

Le planificateur permet d'adapter le moteur aux spécificités du problème à traiter.

En effet, nous avons vu dans le chapitre précédent, détaillant la structure de notre moteur dans le sens de sa généricité, apparaître un certain nombre de noeuds décisionnels nécessitant l'application de paquets de règles heuristiques destinés à orienter la recherche d'une solution.

D'autre part, notre moteur nécessite une initialisation et une paramétrisation adaptée au problème à traiter.

Le niveau de planification constitue donc un sur-ensemble du moteur adaptant le fonctionnement de ce dernier aux contraintes du problème des lignes robotisées de soudage par la mise en oeuvre d'heuristiques diverses ainsi que par l'ajout de modules nécessaires aux différentes initialisations préalables à tout début de recherche de solution.

Rappelons que l'objectif de ce type d'approche n'est pas de fournir la meilleure solution au problème mais une solution acceptable au sens de la satisfaction des différentes contraintes prises en compte.

Dans le cadre d'une étude de ligne flexible robotisée en soudure par points, trois principaux types de contraintes sont à considérer:

* Les contraintes de soudage
* Les contraintes d'implantation robot
* Les contraintes d'équilibrage de lignes et de temps de cycle

Nous allons nous attacher à décrire chacune de ces catégories de contraintes ainsi que leur prise en compte au sein de l'environnement de simulation. Leur intégration à l'ensemble de la démarche de planification sera finalement présentée.

IV.2 Prise en compte des contraintes de soudage

IV.2.1 Le soudage

L'assemblage mécanique par soudage, très largement répandu dans l'industrie, consiste à rendre solidaires des pièces métalliques par fusion localisée des métaux à assembler.

On distingue classiquement deux catégories de techniques de soudage /ENG 89/: le brasage, qui fait appel à un eutectique métallique destiné à unir les pièces et la soudure autogène n'utilisant pas de matériaux d'apport.

La première technique trouve son application dans les procédés de soudage à l'arc, qui créent un cordon de soudure continu le long du chemin de raccordement des pièces que l'on soude.

La seconde, correspond aux opérations de soudure par points, procédé discontinu utilisé dans le cas des lignes robotisées de ferrage que nous allons à présent quelque peu détailler.

IV.2.2 Le soudage par points

Dans ce type de procédé, les deux pièces à unir sont mises en contact au point où l'on désire réaliser une soudure; on fait passer localement, au moyen d'une pince à deux électrodes, une impulsion de courant alternatif I de l'ordre de 1000 Ampères, pendant un laps de temps très court t, tandis que les électrodes exercent une certaine pression sur les pièces au contact. La résistance de contact R transforme en chaleur l'énergie électrique q qui y est localisée de telle sorte que:

$$dq = R(t)I^2dt$$

Ainsi, une partie de l'énergie thermique dissipée par effet Joule crée localement une fusion relativement contrôlée des pièces à assembler. Un "collage" s'ensuit lorsque le métal se refroidit, toujours sous la pression des électrodes, alors que le courant est interrompu.

Cette soudure dépend technologiquement des paramètres suivants:

* L'intensité du courant électrique
* La pression maintenue par les électrodes

* La durée de l'impulsion électrique de soudage
* L'épaisseur et la nature des métaux d'assemblage

Les robots utilisés doivent être capables de manipuler la pince, les câbles d'alimentation et les canalisations de refroidissement parfois nécessaires vu les intensités de courant développées.

IV.2.3 La technologie des pinces-robot

Les outils de soudure par points embarqués sur les robots manipulateurs ou pinces-robot se composent habituellement de quatre parties (figure II.28):

- Les électrodes: directement en contact avec l'assemblage, elles lui communiquent les trains de courant de soudage délivrés par le transformateur de soudage et son électronique de puissance.

- Les porte électrodes: comme leur nom l'indique, ils servent à recevoir les électrodes et facilitent ainsi les opérations de maintenance notamment en cas d'usure d'électrodes.

- Les bras: ils composent avec les deux parties précédentes la partie travaillante, conçue pour avaler les tôles des divers assemblages de la gamme.

- L'ensemble moteur: il comprend le noyau, le vérin de soudage et le transformateur de soudage. Le vérin est chargé de transmettre l'effort de soudage à travers la partie travaillante nécessaire à un pincement des tôles suffisant; le transformateur, dimensionné en fonction de l'impédance de la partie travaillante, permet de délivrer l'intensité nécessaire à un soudage correct de l'assemblage considéré.

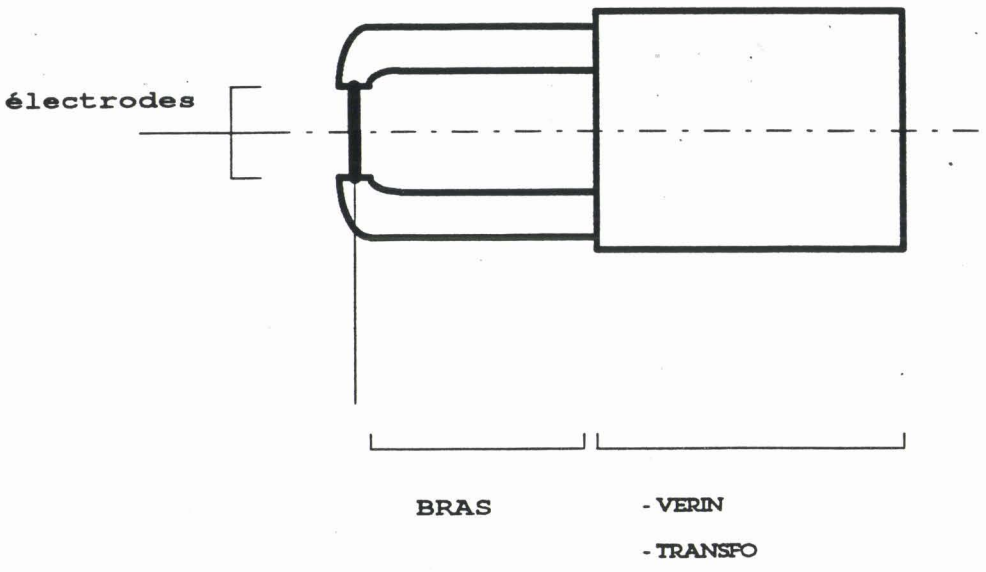


fig II.28

Ces pinces à souder peuvent être de types différents suivant les assemblages à souder; on distingue:

- La pince en Cé (figure II.29): dans ce type d'outil, une des électrodes est fixe et l'autre est mobile et décrit lors de l'accostage une trajectoire rectiligne, laissant ainsi fixes les bras de la partie travaillante.

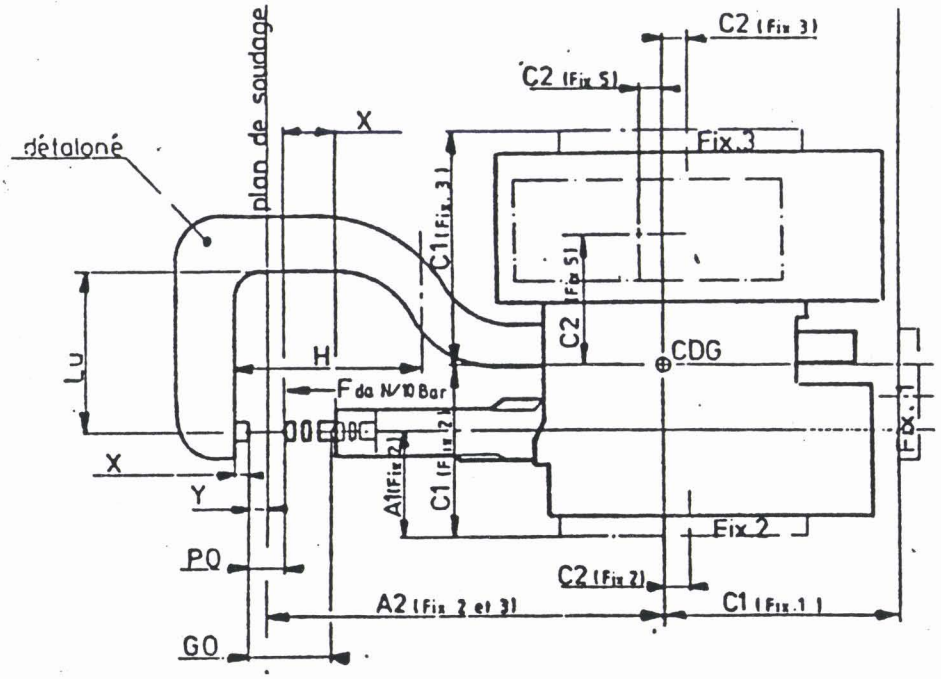


fig II.29

- La pince Ciseau (figure II.30): elle est caractérisée par une mobilité de ses deux bras, autour d'un axe de rotation, s'ouvrant et se fermant à la manière d'une paire de ciseaux.

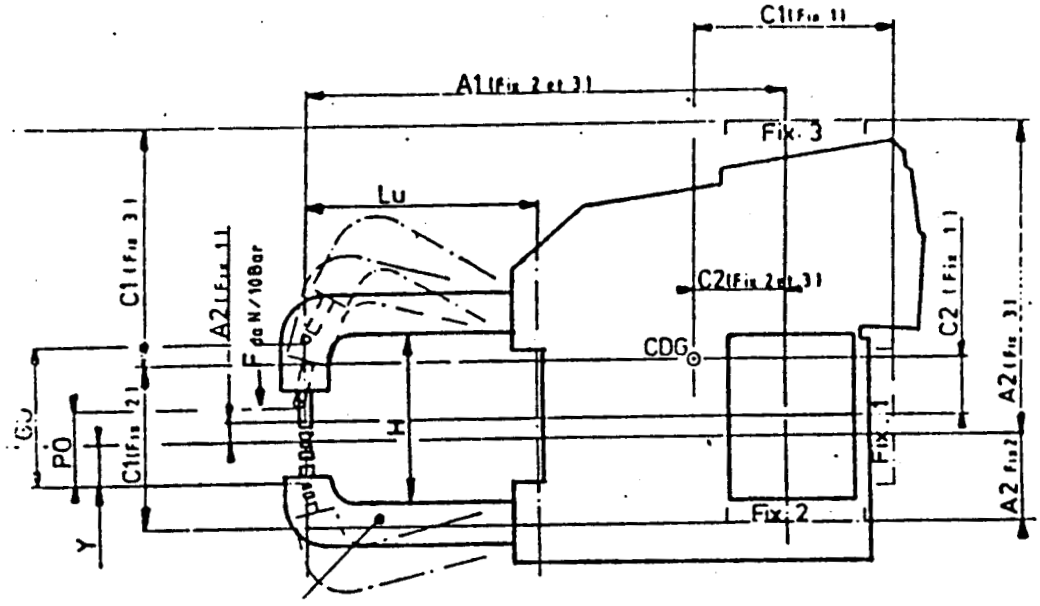


fig II.30

- La pince grande profondeur (figure II.31): d'encombrement important, elle n'est utilisée que pour l'assemblage des structures imposantes. Les bras sont fixes et seule un des deux porte électrodes est mobile selon une trajectoire circulaire.

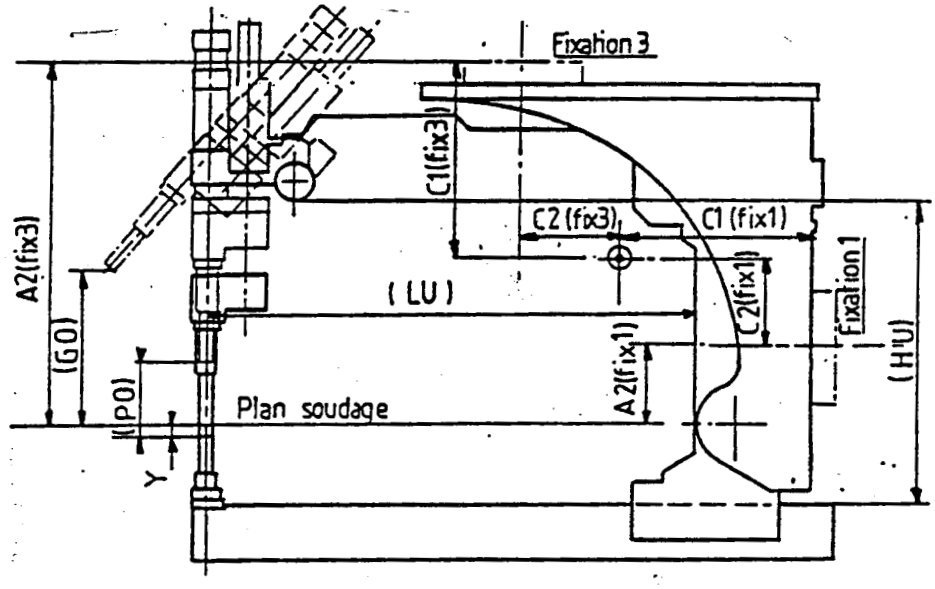


fig II.31

IV.2.4 Dimension de l'espace des réglages

Les paramètres caractéristiques d'un outil de soudage retenus pour notre étude sont de nature géométrique et technologique (figure II.32);

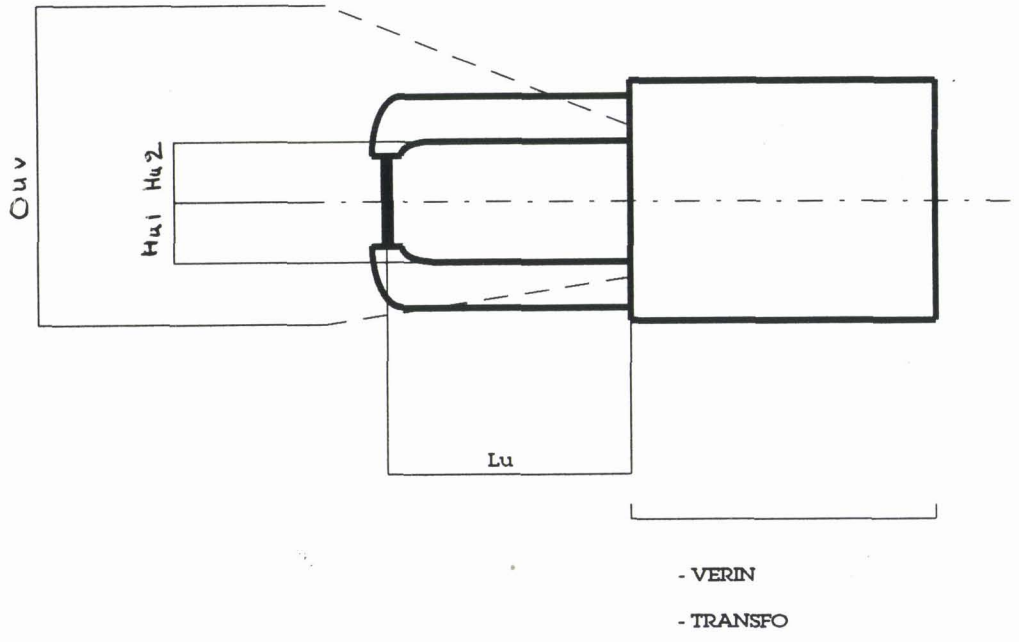


fig II.32

- Les paramètres géométriques: ils caractérisent l'encombrement de l'outil et se nomment:

* Orientation d'électrode
* Orientation de porte électrode
* Hu1 ou première demie hauteur utile
* Hu2 ou seconde demie hauteur utile
* Lu ou longueur utile
* Ouv ou ouverture maxi des bras de la pince

- Les paramètres technologiques: ils caractérisent les possibilités de soudage de l'outil au sens des efforts et intensités potentielles; on distinguera:

* Le type de vérin de soudage
* Le type de transformateur

Nous disposons ainsi d'un vecteur de paramétrage par outil de soudage dont la dimension caractérise les degrés de liberté de ce dernier. Ce vecteur devra être complété par la matrice outil, nécessaire pour la validation des contraintes d'accessibilité robot que nous étudierons au IV.3.

IV.2.5 Modélisation des assemblages

Après avoir spécifié le vecteur de paramétrage relatif aux outils de soudage, nous allons nous attacher à paramétrer nos assemblages de manière à pouvoir exprimer par la suite des critères de compatibilité inter-assemblages et (outil, {assemblage}).

Un assemblage est un groupe de tôles à souder que nous représenterons par une coupe dans le plan (ligne de pince, normale à la tôle) noté (Lp, N) caractéristique du point de soudure à réaliser (figure II.33).

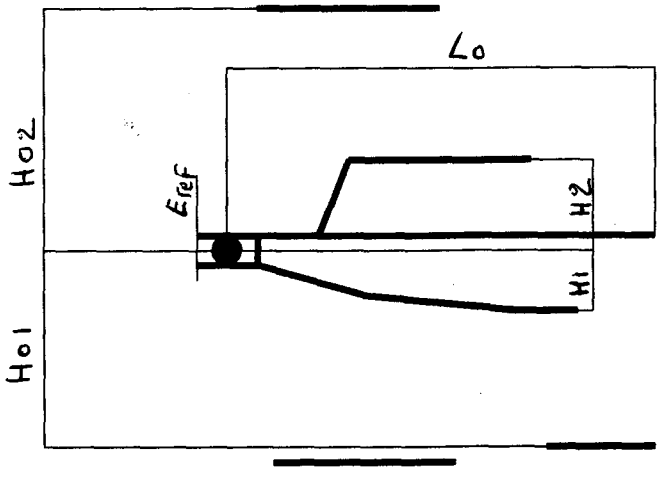


fig II.33

Cette coupe représente les tôles à assembler ainsi que l'environnement de cet assemblage et nous retiendrons pour cette étude les cotes significatives suivantes (figure II.33):

* Eref: Epaisseur de référence de l'assemblage à souder.
* L: Longueur utile de l'assemblage à souder.
* H1: Demie hauteur supérieure des tôles intérieures.
* H2: Demie hauteur inférieure des tôles intérieures.
* Lo: Distance séparant la normale à la tôle du plus proche obstacle longitudinal.

* Ho1: Distance séparant la ligne de pince du plus proche obstacle transversal supérieur.

* Ho2: Distance séparant la ligne de pince du plus proche obstacle transversal inférieur

* Nature des tôles en présence: Les tôles peuvent être électrozinguées ou galvanisées etc. Ce paramètre est intéressant pour la détermination des intensités de soudage et efforts nécessaires à la réalisation de l'assemblage.

Nous ajouterons à ce descriptif la matrice de passage du référentiel véhicule au référentiel de soudage (figure II.34) nécessaire pour la résolution des contraintes d'implantation robot que nous détaillerons dans un chapitre ultérieur (IV.3).

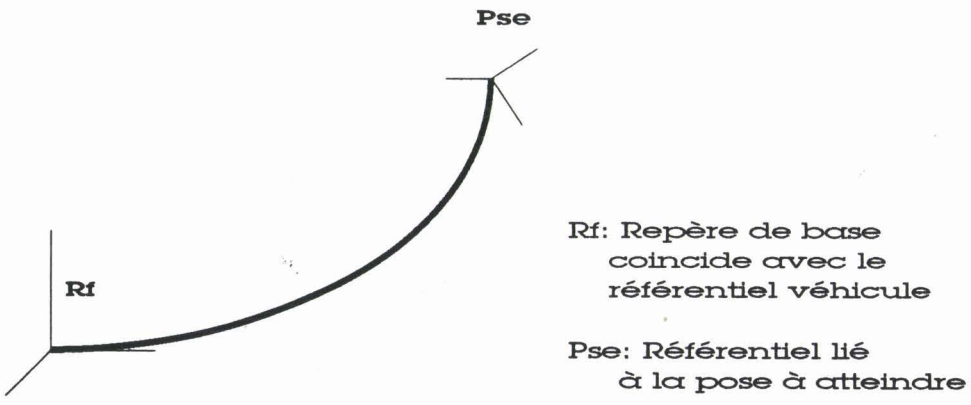


fig II.34

IV.2.6 Critères de choix et de compatibilité outil

Après avoir modélisé nos outils et nos assemblages, nous allons pouvoir élaborer des critères de test de compatibilité (outil, assemblage). Ces critères ont été implémentés sous forme de méthodes écrites en Le-Lisp, l'utilisation d'une couche orientée objet a permis une programmation judicieuse utilisant la pleine puissance de la relation de spécialisation.

Nous envisagerons dans la suite de ce paragraphe les trois classes d'outil de soudage: la pince ciseau, la pince en cé et la pince grande profondeur et détaillerons pour chacune d'elle les critères de compatibilité d'un assemblage avec le type d'outil considéré.

Pour chaque classe, la séquence habituelle de soudure par point comprend les opérations suivantes:

* "**Avaler**" l'assemblage, c'est à dire faire pénétrer l'outil de soudage jusqu'au niveau du point de soudure à réaliser.

* **Serrer** l'assemblage, c'est à dire fermer la pince de manière à mettre en contact les surfaces à assembler à l'aide des électrodes qui viennent exercer une force adéquate.

* **Souder**, c'est à dire délivrer un certain courant durant un temps donné appelé temps de soudage.

* **Tenir** l'assemblage durant un temps donné appelé temps de maintien pour que la soudure refroidisse.

* **Relâcher**, c'est à dire ouvrir la pince.

* **Sortir** éventuellement la pince de l'assemblage courant pour passer au suivant.

En conséquence, le test de compatibilité outil assemblage consistera à s'assurer de la faisabilité de l'ensemble des stades précités, pour un assemblage effectué à l'aide d'un outil donné, éventuellement modifié par le test.

Nous supposerons l'assemblage modélisé par le vecteur de composantes (Eref, Hu1, Hu2, Lo, Ho1s, Ho2s,Lus) et l'outil par (Ouv, Hu1p, Hu2p, Lup).

- <u>Classe des pinces ciseaux:</u> la figure II.35 représente une pince ciseau en position de serrage sur un assemblage.

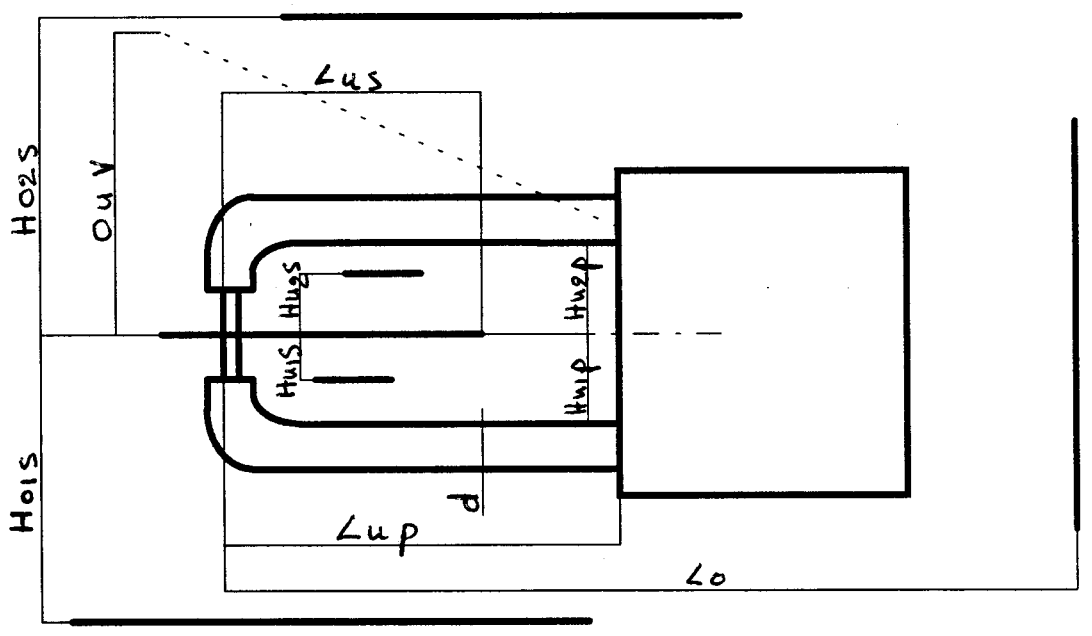


fig II.35

Les différentes contraintes géométriques à valider pour assurer la compatibilité géométrique sont les suivantes (fig II.35):

(1) Lo libre
(2) Lup > Lus
(3) Hols - Huls - d > Hulp > Huls
(4) Ho2s - Hu2s - d > Hu2p > Hu2s
(5) Ouv > Hul + Hu2 + Eref

L'espace des contraintes peut être complété par des contraintes linéaires relatives à l'orientation des électrodes et porte électrodes.

Les composantes Lup, Hulp, Hu2p devront être éventuellement adaptées en conséquence; si aucune adaptation n'est envisageable, l'assemblage sera décidé incompatible avec l'outil considéré.

- Classe des pinces en Cé: la figure II.36 représente une pince en Cé en position de serrage sur un assemblage.

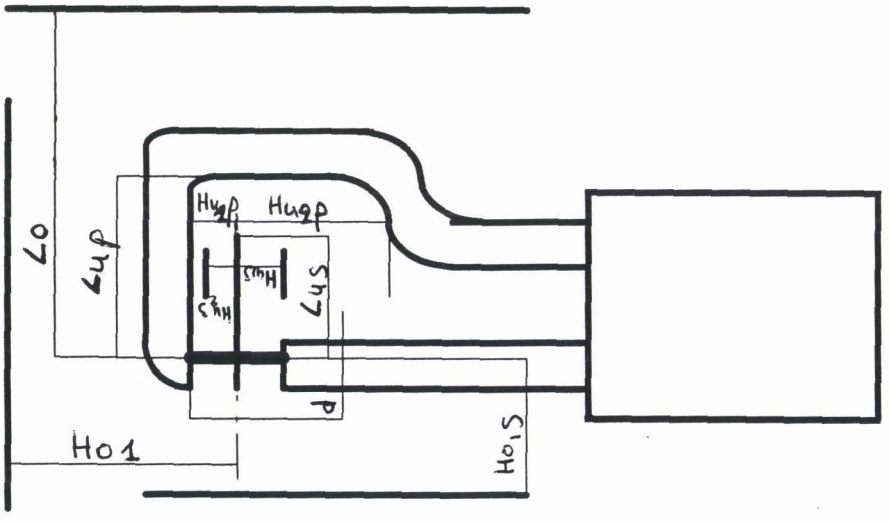


fig II.36

Là encore, exprimons les différentes contraintes géométriques dont la vérification assure la compatibilité d'un assemblage avec un outil donné ou modifié en conséquence. Ces relations sont les suivantes (fig II.36):

(1) Ho2 libre

(2) Lo - Lus - 2*d > Lup > Lus

(3) Ho1 - Hu1 - d > Hu1p > Hu1

(4) Hu2p > Hu2

(5) Ouv > Hu1 + Hu2 + Eref

- Classe des pinces grande profondeur: La figure II.37 représente une pince grande profondeur en position de serrage sur un assemblage.

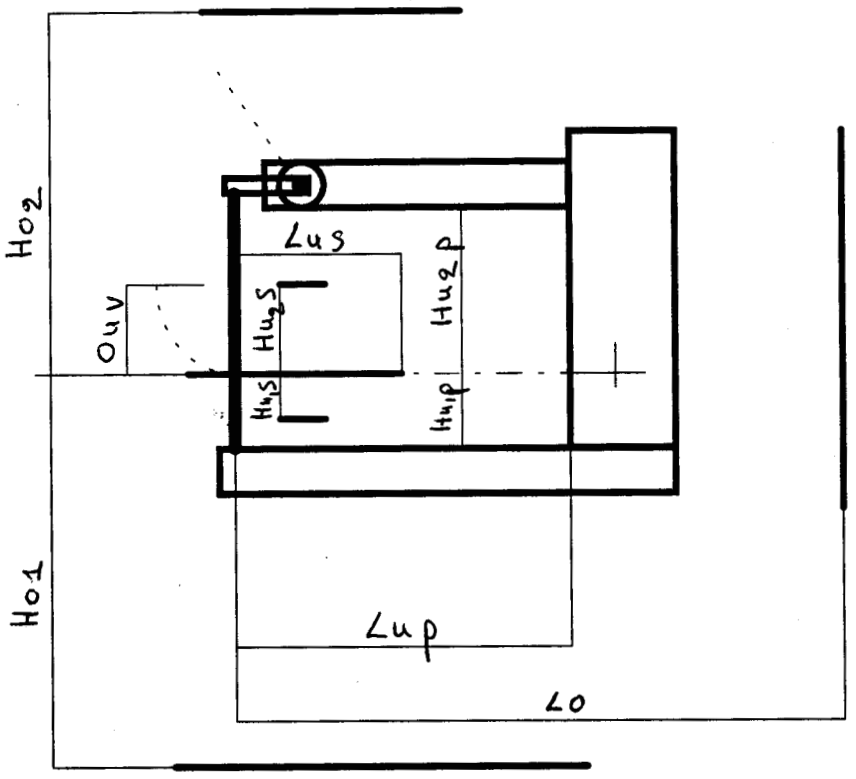


fig II.37

Les contraintes géométriques à valider seront les suivantes (fig II.37):

(1) Lo libre

(2) Lup > Lus

(3) Ho1 - Hu1 - d > Hu1p > Hu1

(4) Ho2 - Hu2 - d > Hu2p > Hu2

(5) Ouv > Hu1 + Hu2 + Eref

IV.2.7 Critères de compatibilité d'assemblage

A ce stade de l'étude, nous disposons des outils nécessaires pour pouvoir étudier la compatibilité d'un point de soudure et d'une pince de soudure éventuellement modifiée.

Néanmoins, ces outils sont insuffisants car ils ne prennent pas en compte les problèmes de conflits inter-opérations.

En effet, il se peut très bien qu'un point pse1 soit compatible avec une pince pi éventuellement modifiée m1, qu'un autre point pse2 soit compatible avec la même pince pi modifiée m2 mais qu'il n'existe aucune modification de la pince pi permettant le soudage conjoint de pse1 et pse2.

Ainsi, par outil pi, il va être nécessaire de générer des familles d'assemblages compatibles entre eux, ces points de soudure étant pris parmi les candidats à la compatibilité avec pi. La figure II.38 synthétise le résultat à obtenir, en notant Fi, i {1,2,3,4} les différentes familles de points de soudure, et en représentant ces derniers par des croix.

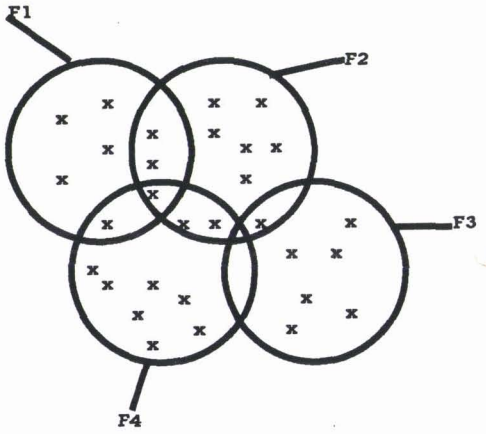


fig II.38

Considérons un outil pi et un ensemble d'assemblage A tels que:

En notant:

- compat(pi, pse, m) le prédicat à trois variables signifiant que le point de soudure pse est soudable sur la pince pi modifiée suivant le vecteur de paramétrage m,
- M l'ensemble des modifications possibles sur la pince pi,

nous aurons:

$\forall$ pse $\in$ A , $\exists$ m M, compat (p_i, pse, m)

Nous allons tenter de générer les familles de modifications Fi telles que:

$\forall$ $pse_i \in F_i$, $\exists$ $pse_j \in F_j$, j<>i, $\forall$ m $\in$ M, compat (p_i, pse_i, m_i),
compat (p_i, pse_i, m_j),
lcompat (p_i, {pse_i, pse_j}, m)

avec lcompat(pi, {pse}, m) représentant le prédicat à trois variables attestant de la faisabilité simultanée (au sein d'une même gamme) de l'ensemble des points de la liste {pse} sur l'outil pi modifié suivant le vecteur de paramétrage m.

Les algorithmes possibles pour résoudre ce type de problème dans le cas général ont un inconvénient majeur: leur complexité est au moins exponentielle.

Toutefois, en focalisant notre attention sur la forme des contraintes outil à vérifier, nous allons parvenir à réduire cette complexité.

En effet, il est possible d'établir une hiérarchie parmi les éléments d'un ensemble d'assemblages donné.

Prenons l'exemple des outils Ciseaux; les contraintes à satisfaire pour assurer la soudabilité sont les suivantes:

(1) Lo libre
(2) Lup > Lus
(3) Ho1s - Hu1s - d > Hu1p > Hu1s
(4) Ho2s - Hu2s - d > Hu2p > Hu2s
(5) Ouv > Hu1 + Hu2 + Eref

Les contraintes (1), (2), (5) ne posent aucun problème.

Examinons (3) et (4); ces contraintes peuvent être découplées et traitées séparément;

D'autre part, il est possible d'ordonner nos différents points de soudure suivant Hu1s croissant et suivant Ho1s croissant; De même pour Hu2s et Ho2s; De cette façon, les tests de génération des familles seront simplifiés.

IV.2.8 Acquisition des paramètres d'assemblage

Les différents paramètres d'assemblage (IV.2.5) nécessaires à l'étude sont extraits des modèles C.A.O des véhicules à traiter (figure II.39) .

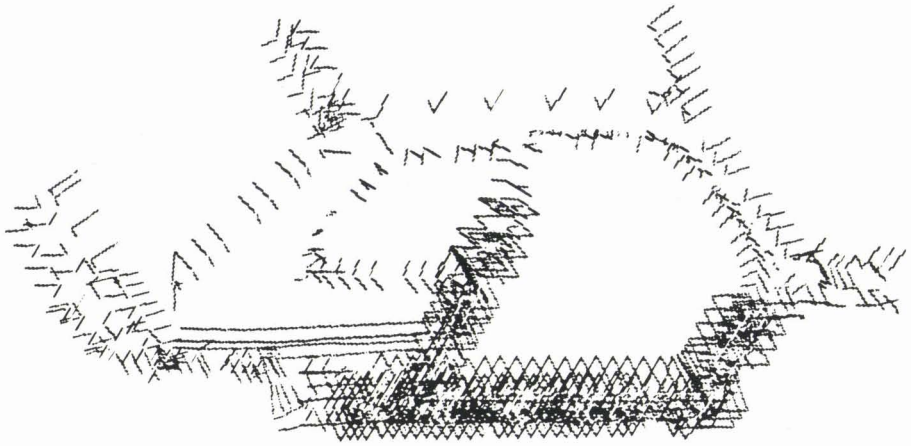


fig II.39

Ces routines interactives ont été développées sous le logiciel de C.A.O CATIA /DAS 89/ en FORTRAN77 (pour des raisons d'interfaçage avec les différents sous-programmes des bibliothèques mathématiques de Dassault Système), l'interface homme-machine étant implémentée en GII /DAS 89/.

IV.2.9 Prise en compte d'un produit existant

La reconfiguration d'une ligne d'assemblage robotisée, c'est à dire l'étude de l'introduction d'un second véhicule en présence du précédent sur une tôlerie existante, entraîne la prise en compte des contraintes induites par les différentes gammes du premier produit.

Les contraintes dues aux gammes existantes entraînent une réduction du domaine de définition des composantes du vecteur de paramétrage de chacun de nos outils de soudage.

En effet, sur chacun des robots de la ligne, les gammes du premier produit, c'est à dire les suites de points de soudure déjà affectés, entraînent, de par la forme des sections de tôles qui leur sont associées, une limitation dans les modifications possibles de l'outil du poste considéré. Ces limitations se traduisent par une diminution de l'intervalle des possibles pour une partie ou la totalité des composantes des vecteurs de paramétrage outils.

Ces restrictions sont prises en compte au sein de nos routines de tests et lors de l'étude d'un second véhicule sur une ligne en présence d'un autre véhicule déjà en ligne. Les composantes des vecteurs de paramétrage des différentes pinces à souder de la ligne ne sont plus laissées libres et des bornes à ne pas dépasser leur sont associées; les possibilités de modification des outils de la ligne se trouvent ainsi réduites.

IV.2.10 Niveau d'intégration

La figure II.40 rappelle, à travers une vue synthétique, les différentes étapes de planification.

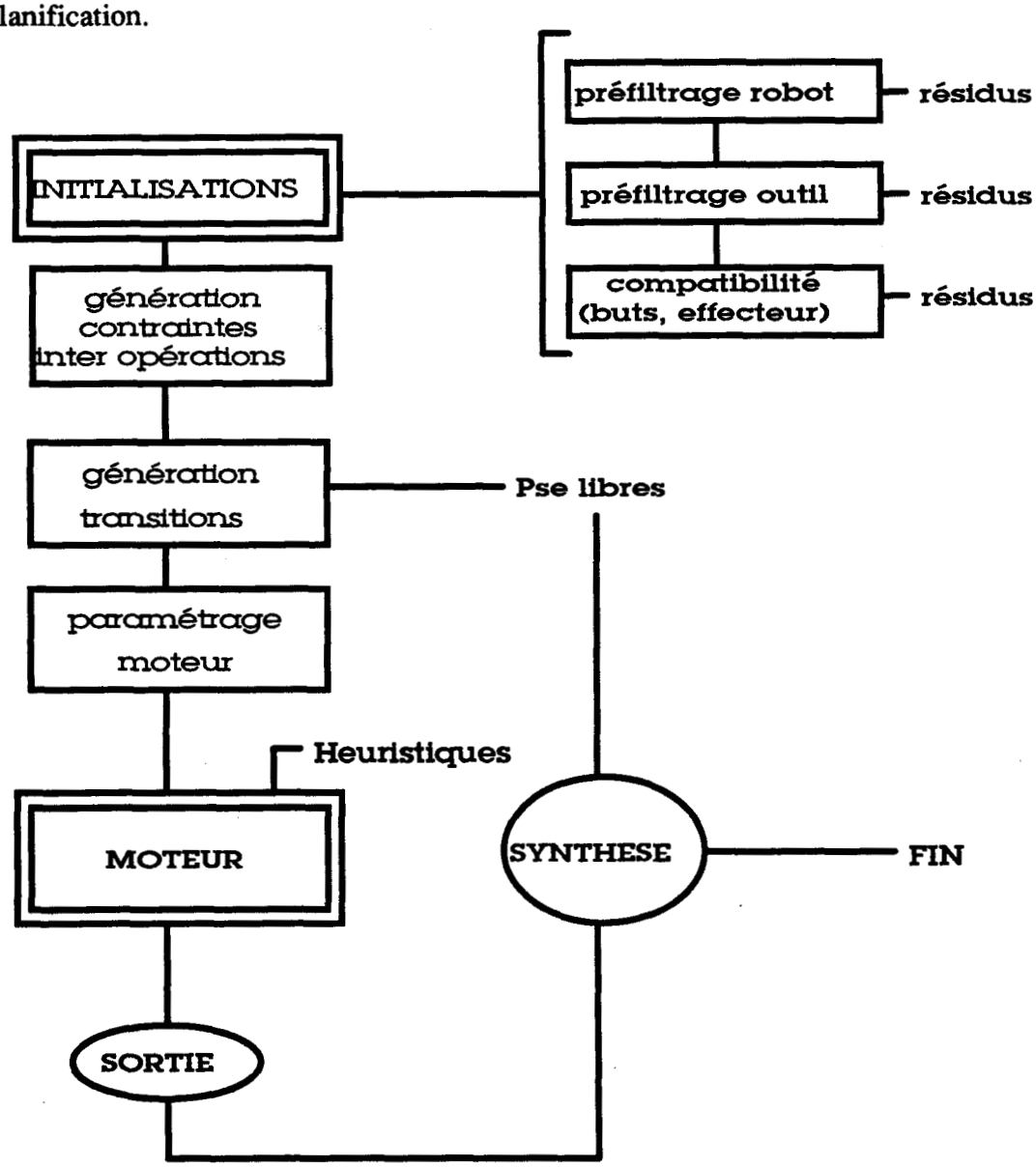


fig II.40

Les différentes contraintes de soudage exposées précédemment seront essentiellement prises en compte dans les étapes dites de génération de contraintes inter-opérations et de génération de transitions. Elles serviront donc essentiellement à alimenter notre moteur en buts et transitions, les composantes de nos vecteurs de réglages comportant bien évidemment des termes relatifs aux paramètres outils. Un détail de la procédure sera donné dans le paragraphe IV.5 relatif à l'intégration de l'ensemble des contraintes de tous horizons au sein de notre planificateur.

Notons que quelques règles relatives aux adéquations de type d'outillage seront prises en compte lors de l'étape d'initialisation, analysée en détail au IV.5.2.

IV.3 Prise en compte des contraintes d'implantation robot

IV.3.1 La problématique

Outre la vérification de la soudabilité des différents points de soudure à l'aide des outils disponibles ou modifiés en conséquence, il conviendra de s'assurer que les points affectés sur chaque ressource sont accessibles par cette ressource. En effet, les robots possèdent un certain espace de travail fonction de leur morphologie (agencement des différentes articulations, dimensions, butées articulaires, chaînes cinématiques fermées éventuelles ...) et il est nécessaire de s'assurer que les points affectés appartiennent bien au dit espace.

Après avoir présenté les types de robots entrant dans notre étude ainsi que les bases mathématiques nécessaires à leur étude, nous examinerons les différentes contraintes d'implantation robot à vérifier lors d'une étude de conception, de configuration ou de reconfiguration de ligne flexible robotisée ainsi que les différents réglages permettant d'adapter, le cas échéant, les robots de la ligne aux gammes proposées par le planificateur.

IV.3.2 Types de robots considérés

Nous nous intéresserons dans cette étude aux robots manipulateurs définis au travers des normes AFNOR /ISO 88/. Retenons simplement pour la suite de l'étude qu'il s'agit là de solides articulés dont la base est fixée dans l'espace décrivant l'environnement, et dont la position et l'orientation des différents corps rigides le constituant se déduisent directement de celles des articulations.

En ce qui concerne les robots manipulateurs industriels du commerce, l'analogie anthropomorphique conduit au découplage intuitif suivant: les trois premières articulations du robot constituent le porteur et les deux ou trois dernières articulations le poignet (figure II.41).

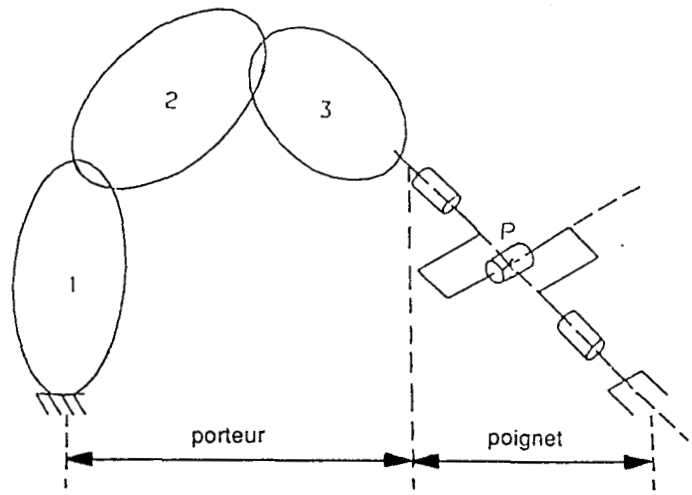


fig II.41

Notre robot est alors composé d'un manipulateur, d'une réhausse d'outil et d'un outil effecteur (figure II.42).

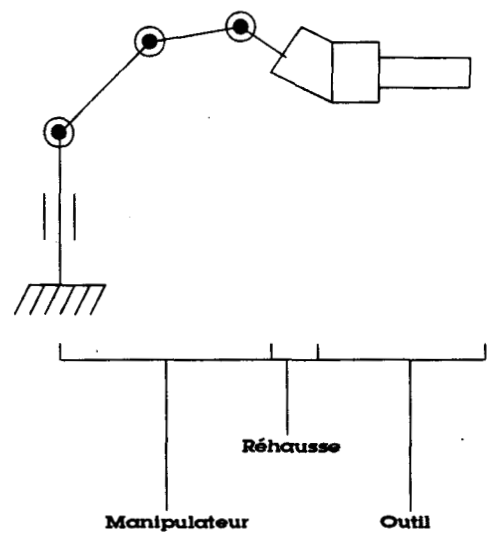


fig II.42

Pour l'étude de tels mécanismes, il est commode de définir un certain nombre de référentiels qui nous serviront de base durant toute la suite de ce mémoire.

Nous noterons (figure II.43):

- Rf le référentiel lié à l'atelier.
- R0 le repère lié à la base du manipulateur à étudier.
- Ri le repère lié au ième axe du robot.
- Rn le repère lié à l'extrémité du dernier axe du manipulateur.
- Rc le référentiel lié à l'extrémité de la réhausse d'outil.
- Re le référentiel lié à l'extrémité de l'effecteur ou repère outil.

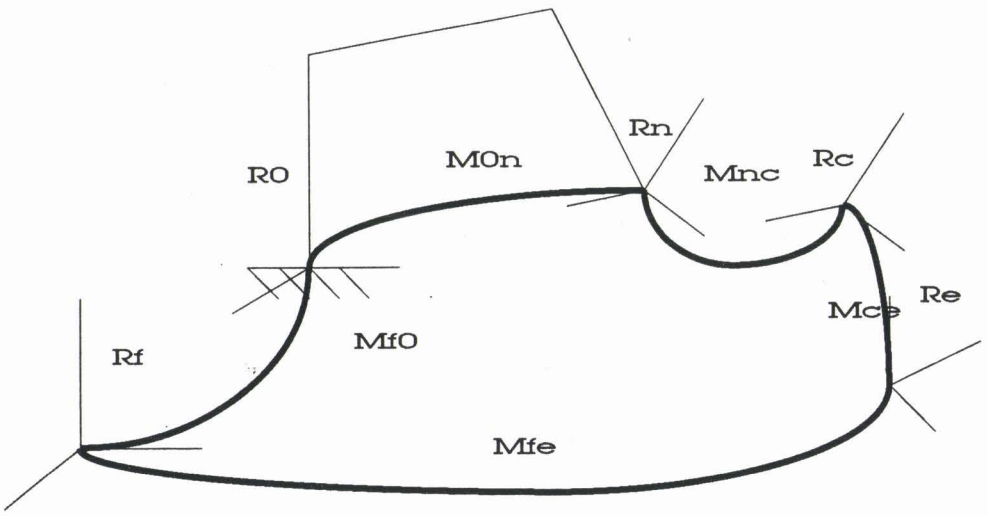


fig II.43

Avec ces conventions, on notera (figure II.43):

- Mf0 la matrice de passage de Rf à R0.
- Mi-1i la matrice de passage de Ri-1 à Ri.
- M0n la matrice de passage de R0 à Rn.
- Mnc la matrice de passage de Rn à Rc ou matice cale.
- Mce la matrice de passage de Rc à Re ou matrice outil.
- Mfe la matrice de passage de Rf à Re.

Il vient alors:

M0n = M01*M02*...*Mi-1i*...*Mn-1n

Mfe = Mf0*M0n*Mnc*Mce

IV.3.3 Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal du robot en fonction de ses coordonnées articulaires /DOM 88a/.

Ainsi, à partir de la géométrie des éléments constitutifs du robot (longueur des bras ...) et des valeurs qi des différentes articulations (angles de la rotation entre les bras pour les articulations rotoïdes, longueur de l'allongement pour les articulations prismatiques), on déduit le repère Ri caractérisant la position et l'orientation de chaque élément et en particulier le repère actif Re de l'outil fixé au manipulateur /REN 84/.

Il vient alors:

$$[Ri] = f([Qi])$$

avec $Qi = [q1, ..., qi,..,qn]$

IV.3.4 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse permet d'exprimer la configuration du mécanisme constituant le manipulateur en fonction de la situation dans l'espace de l'organe terminal /DOM 88a/.

Ainsi, pour une pose R donnée de l'espace, on connaîtra les variables articulaires qi en écrivant:

$$[Qi] = g([R])$$

avec $Qi = [q1, ..., qi,..,qn]$

Notons qu'il n'y a que très rarement unicité de la solution et que la pose [R] peut être accessible de plusieurs manières par un même robot manipulateur (Qi différents); on parlera de configurations (figure II.44): poignet retourné ou non, coude en bas ou en haut, porteur en avant ou en arrière.

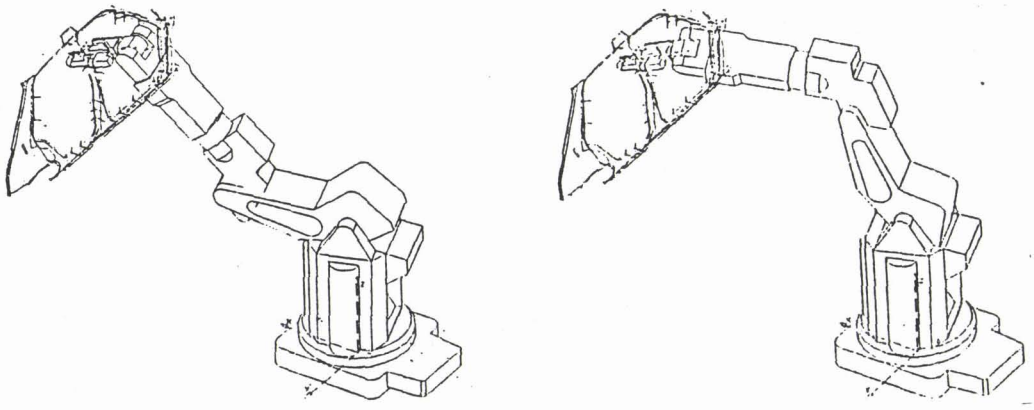


fig II.44

Il n'existe aucune méthode analytique générale pour trouver le modèle géométrique inverse, mais un certain nombre de méthodes adaptées à des classes de cinématiques particulières /DOM 88a/:

- /PIE 68/ résout le problème pour un nombre limité d'architectures simples.

- /PAU 81/ traite séparément chaque cas particulier et propose une méthode convenant pour la plupart des robots industriels.

- Certains /LEE 83/ /ELG 85/ proposent des méthodes géométriques spécifiques nécessitant une étude particulière pour chaque cas.

Lorsque le modèle géométrique inverse n'existe pas, c'est à dire lorsqu'il n'est pas possible d'en trouver une forme explicite symbolique, le transformateur de coordonnées peut être obtenu par des procédures numériques. Ces méthodes ont deux inconvénients majeurs: d'une part la convergence dépend des conditions initiales de l'algorithme pouvant conduire à un optimum local et d'autre part, elles sont pénalisantes du point de vue du temps de calcul.

Citons par exemple:

- /PIE 68/ qui propose une méthode du type Newton-Raphson procédant par linéarisation de la matrice de passage de la chaîne cinématique.

- /WHI 69/, /FOU 80/, /REN 80/, /FEA 83/, /GOL 85/ qui proposent des méthodes basées sur le modèle différentiel inverse.

- /WOL 84/, /SCI 86,87/ proposent quant à eux des méthodes basées sur la transposée de la matrice jacobienne.

IV.3.5 Les contraintes à satisfaire

Au cours de son raisonnement, le planificateur doit s'assurer qu'à chaque affectation de points sur un robot, ceux ci sont accessibles par le dit robot.

Cela revient à vérifier qu'il existe au moins une solution au modèle géométrique inverse pour chacun des points de la pseudo-gamme en cours d'élaboration ou, tout au moins, pour les nouveaux points candidats à l'affectation.

IV.3.6 Dimension de l'espace des réglages

En cours d'allocation, un certain nombre de réglages robots sont possibles et confèrent ainsi une adaptativité du robot à la gamme en cours de création.

Les modifications suivantes, présentées suivant une hiérarchie de coût croissant peuvent être décidées, le cas échéant sur un ou plusieurs robots de la ligne:

- Pas de modification.
- Modification de la réhausse d'outil.
- Modification de l'altitude Z de la base robot.
- Modification x, y, z du lieu d'implantation de la base robot.

Ainsi, il sera nécessaire de disposer de routines capables de tester:

- L'accessibilité des points de soudure candidats par un robot donné sans aucune modification de son implantation

- L'existence d'un paramétrage de réhausse d'outil d'un robot donné, validant l'accessibilité des points candidats, des points déjà affectés et dans le cas de plusieurs types de véhicules en ligne, des points des gammes des véhicules en production.

- L'existence d'une composante Z du vecteur de paramétrage de la situation de la base d'un robot donné, validant l'accessibilité des points candidats, des points déja affectés et dans le cas de plusieurs types de véhicules en ligne, des points des gammes des véhicules en production par le dit robot.

- L'existence d'un vecteur de paramétrage de la situation de la base d'un robot donné, validant l'accessibilité des points candidats, des points déja affectés et dans le cas de plusieurs types de véhicules en ligne, des points des gammes des véhicules en production, par le dit robot.

Deux politiques peuvent être envisagées pour le développement de ce type de routines:

- Discrétisation des différents espaces suivant les différents degrés de liberté correspondant aux composantes des vecteurs de paramétrage et application du modèle géométrique inverse aux différents points à valider. Cette méthode, simple d'implémentation présente les deux inconvénients d'être assez lente et de ne pas assurer de convergence; En effet, il se peut très bien qu'après discrétisation, on ne trouve aucune solution ce qui occasionne une perte de temps non négligeable puisque ce type de test est appelé à être exécuté a priori à chaque noeud du graphe d'affectation !

- Une autre approche beaucoup plus performante consiste à essayer de déterminer des critères permettant d'assurer l'existence ou l'absence d'une solution basés sur des considérations géométriques et analytiques, sans pour autant déclencher une discrétisation de l'espace des solutions coûteuse en pratique.

Ces deux politiques seront détaillées au V de notre mémoire.

La première version de SARTRE fonctionnait avec la première politique. Nous implémentons actuellement la seconde méthode beaucoup plus efficace en terme de coût de calcul.

IV.3.7 Réglages liés

Ce paragraphe a pour objectif de souligner l'incidence d'une modification du paramétrage d'un outil sur les paramètres relatifs à l'implantation du robot.

Reprenons figure II.45 les différentes conventions définies au IV.3.2.

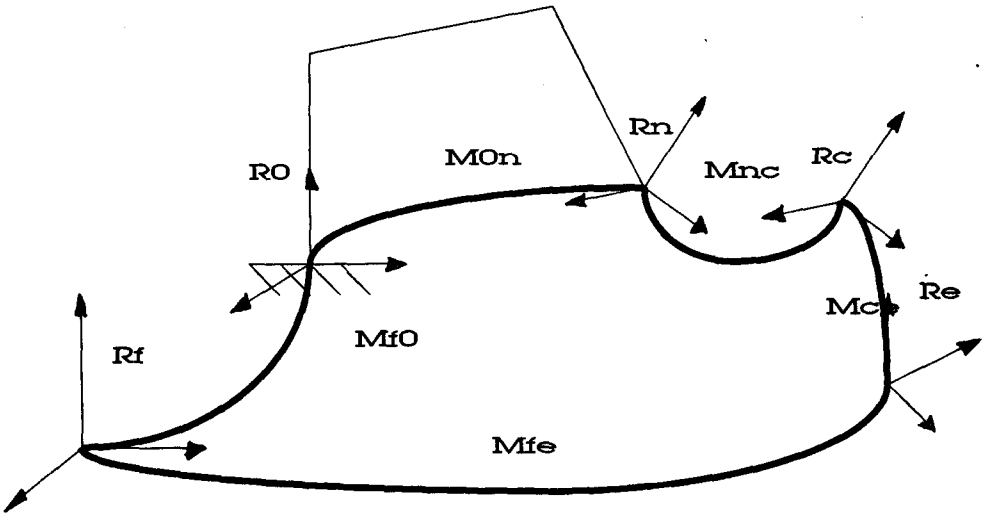


fig II.45

Sous ces notations, il vient:

Mfe = Mf0 * M0n * Mnc * Mce

Supposons maintenant que l'on effectue une modification physique de l'outil; suivant la nature de la modification, il est possible que la matrice outil varie, du fait d'un réglage affectant les dimensions critiques de la pince. A ce moment là, une variation de cette matrice outil Mce entraînera une modification de la matrice résultante Mfe (dMce -> dMfe) et l'accessibilité des points de la gamme est à revalider.

Ainsi, on a montré qu'une modification de certains paramètres de l'outil peut entrainer une revalidation de la gamme et en cas d'échec une modification de réhausse de pince, une modification de l'implantation de la base du manipulateur ou bien une remise en cause de la gamme elle-même.

Il est donc nécessaire d'identifier les paramètres d'outil dont le réglage est susceptible d'entraîner des conséquences en matière d'accessibilité robot et de limiter les variations de ces réglages, de disposer d'une routine permettant d'avoir une approche prédictive dans leur prise en compte qui devra se faire de toute manière au plus tôt au sein d'une planification.

La prise en compte de ce problème de réglage lié sera détaillée dans le paragraphe IV.5.5 relatif à l'intégration des heuristiques de résolution au sein de notre

moteur. Quant aux critères permettant de prévoir l'incidence d'une modification physique de la pince sur le manipulateur, nous les examinerons en partie V, traitant des méthodes mises en oeuvre dans la prise en compte des contraintes d'implantation robot sous SARTRE.

IV.3.8 Niveau d'intégration

Reprenons sur la figure II.46 une vue synthétique des différentes étapes de notre planificateur.

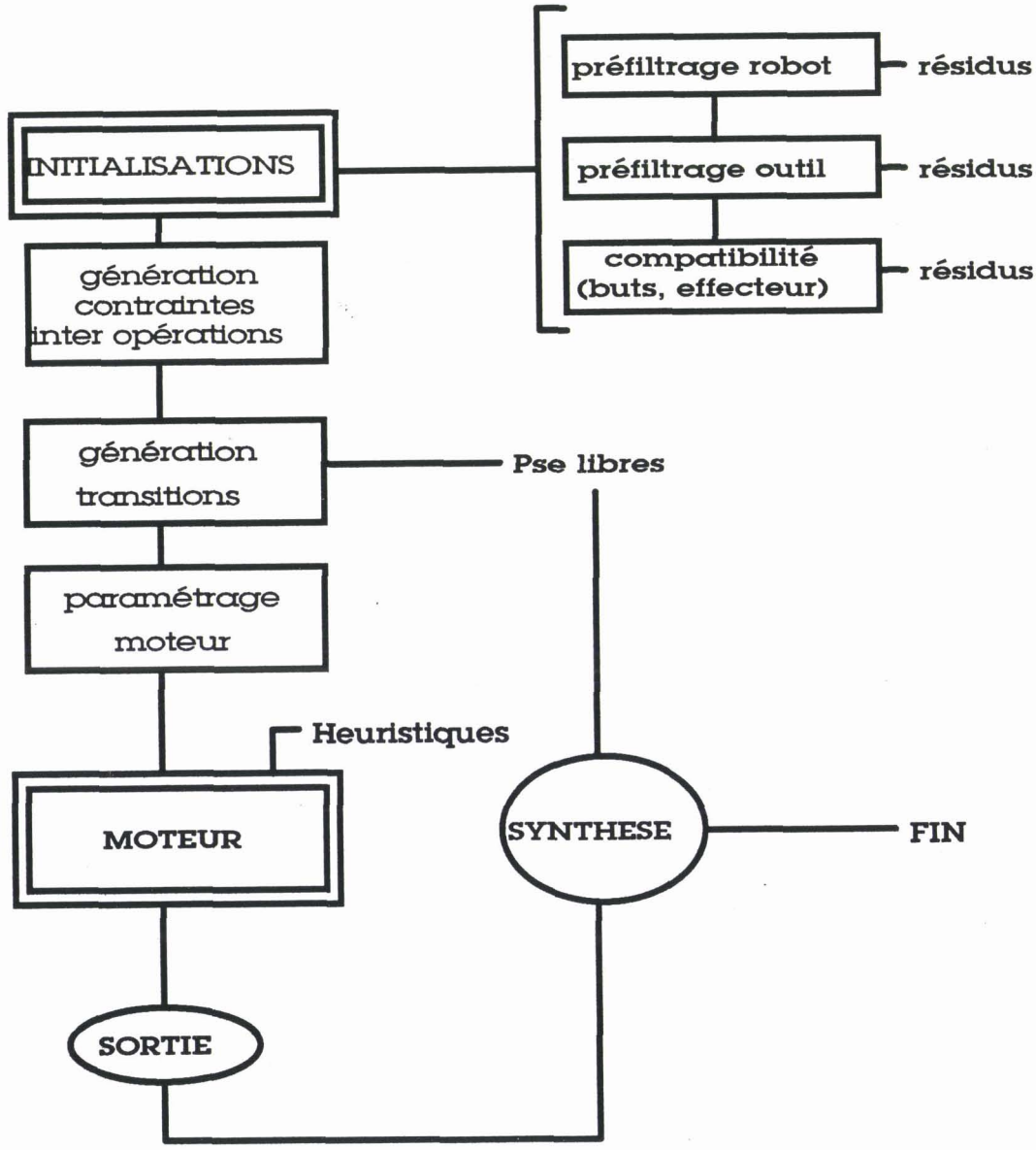


fig II.46

Les contraintes d'implantation robot peuvent être prises en compte a priori à deux endroits; d'une part au niveau de la génération des contraintes opérations, et d'autre part au niveau de la résolution de situation, notamment lors du choix des ressources.

Pris en compte au niveau de la génération des contraintes inter opérations, les paramètres d'implantation robot seraient considérés comme des composantes du vecteur de réglage de chaque ressource. Cette approche offre dans ce cas précis un inconvénient majeur: la génération des modifications robot conduit à un algorithme de complexité exponentielle et difficilement simplifiable.

Nous avons donc choisi de reporter ces contraintes au niveau de la résolution de situation et opté pour la seconde solution. Le détail de la démarche d'intégration des contraintes robots au sein de notre planificateur sera examiné au IV.5.5.

IV.4 Prise en compte du temps de cycle et des contraintes d'équilibrage de ligne

IV.4.1 Problématique

Une gamme robot est une suite ordonnée de poses; les poses peuvent être de deux types: les points d'arrêt et les points de passage; les points d'arrêt sont d'une part les points de soudure et d'autre part des points nécessaires pour permettre à l'armoire de commande du robot de modifier ses consignes de soudage; quant aux points de passage ils sont nécessaires pour contourner les obstacles présents lors du passage du robot du point d'arrêt courant au point d'arrêt suivant.

Reprenons la démarche de conception mise en oeuvre lors d'une session SARTRE. Nous voyons sur la figure II.47 que le niveau de planification permet de générer des pseudo gammes qui seront ensuite enrichies et évaluées en local à l'aide des outils classiques d'étude de cellules robotisées en C.A.O.

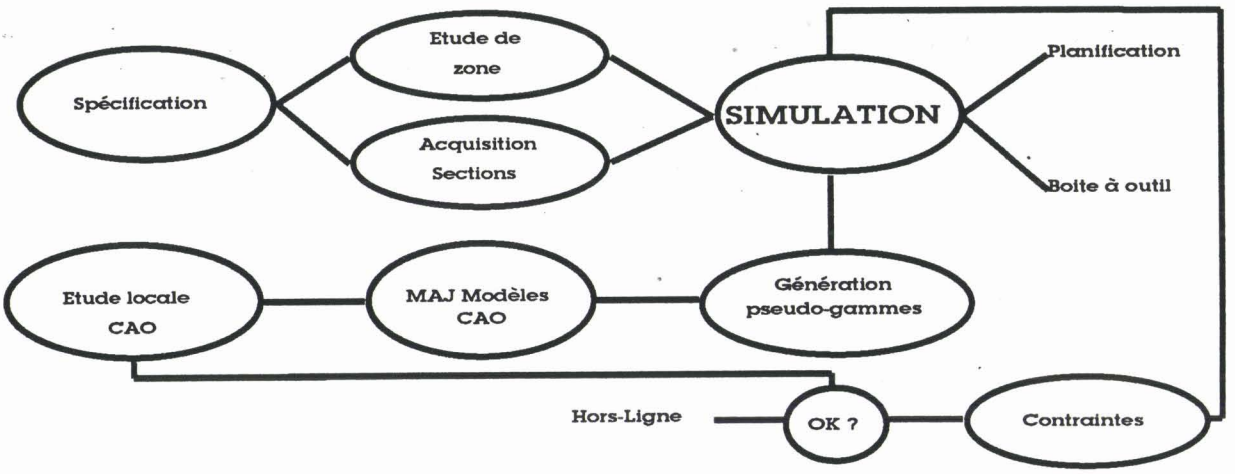


fig II.47

Les pseudo-gammes générées contiennent pour chacun des postes un nouveau vecteur de paramétrage ainsi qu'une liste de points de soudure.

Les outils de C.A.O robotique permettent d'enrichir les gammes notamment par la mise en place des points de passage et la validation du temps de gamme.

Si le temps de gamme n'est pas validé sur un ou plusieurs postes, il conviendra d'en déterminer les causes et de les spécifier en tant que contraintes rétroactives au sein du planificateur qui générera de nouvelles pseudo-gammes plus efficaces.

Telle quelle, la démarche risque d'être lourde en allers et retours et il conviendra de tenter de générer dès le niveau de planification, les gammes les plus valides possibles au sens du temps de cycle ce qui pose un problème sous jacent de prise en compte heuristique des points de passage inconnus à ce niveau de la conception.

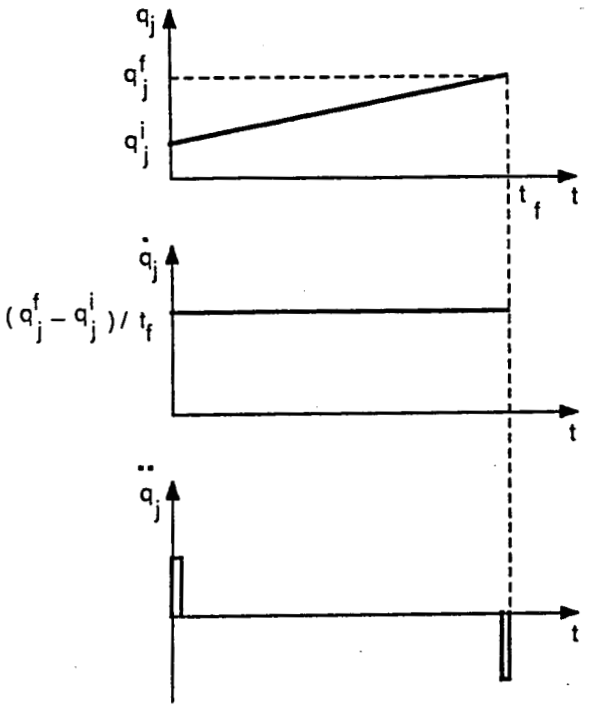
IV.4.2 Instabilité du temps de cycle

IV.4.2.1 Temps de cycle et loi de mouvement

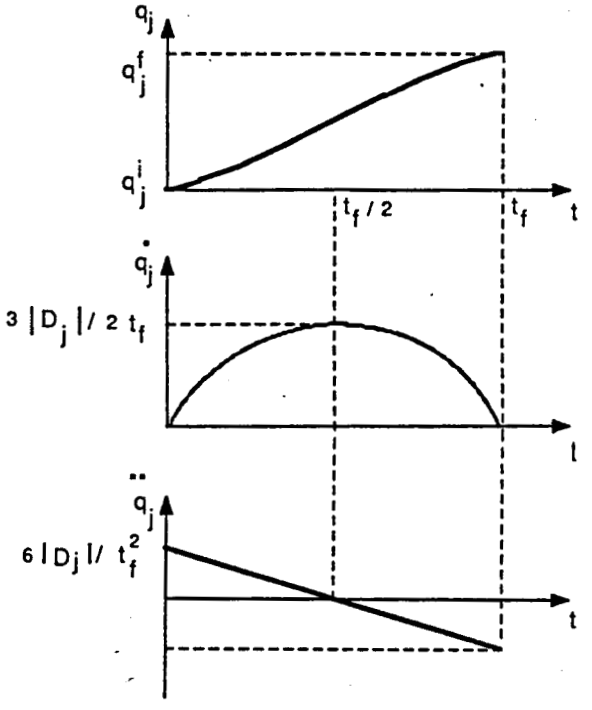
Le problème posé par le calcul du temps de cycle est celui de la détermination de l'intervalle de temps écoulé lors du passage d'une position i de notre robot à une position j.

Ce temps dépend fortement de la loi de mouvement programmée dans l'armoire de commande du robot et décrivant la variation des accélérations, vitesses et coordonnées articulaires en fonction du temps. Plusieurs types de lois sont

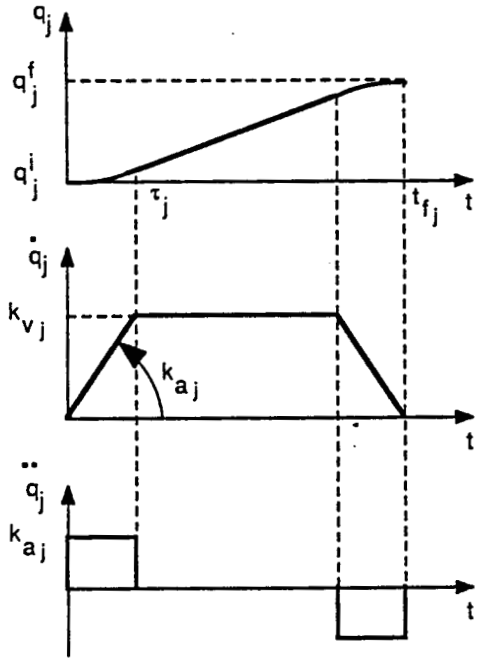
envisageables de la loi linéaire à la loi bang bang en passant par des lois polynômiales de degré variable ; elles sont décrites sur la figure II.48.



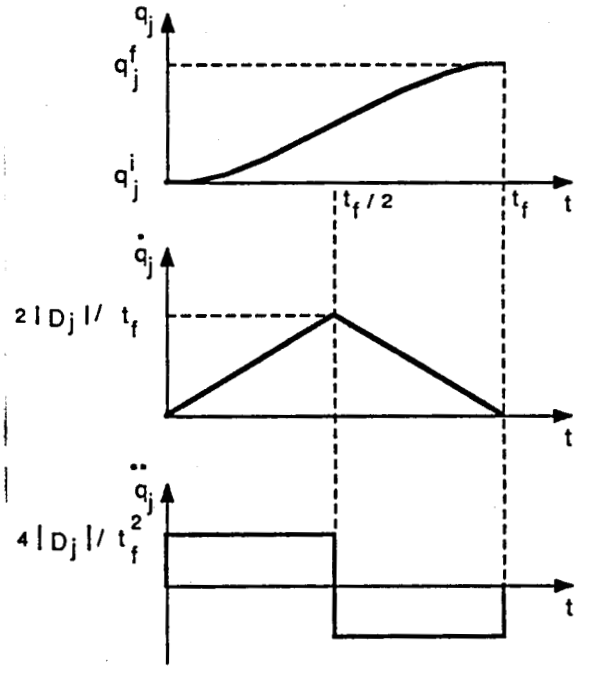
loi linéaire



loi polynômiale de degré 3



loi trapèze



loi Bang-Bang

fig II.48

Notons que des impondérables tels que les temps de dialogue robot-armoire de commande ainsi que la prise en compte de chacun des points comme point d'arrêt rendent le calcul inexact et nous amènent à considérer ce temps calculé comme un temps approché ou estimation du véritable temps de cycle.

Ainsi donc, si nous considérons un robot à n debrés de liberté, en notant qi et qf les vecteurs des coordonnées articulaires correspondant aux configurations initiales et finales, nous aurons:

$$qf1 - qi1 = \int_{t_i}^{t_{fm}} \dot{q}1 dt$$

$$qf2 - qi2 = \int_{t_i}^{t_{fm}} \dot{q}2 dt$$

.

.

$$qfn - qin = \int_{t_i}^{t_{fm}} \dot{q}n dt$$

permettant de déduire les différents temps tf1, tf2, ..., tfn mis par chacune des articulations pour passer de leur état initial à leur état final.

Pour le temps final tf, nous prendrons tf = MAX[tf1, ..., tfn]. Pour plus de détails sur la génération de mouvements, le lecteur se reportera à /DOM 88/.

IV.4.2.2 Estimation du temps de cycle pour une gamme existante

Pour une gamme existante composée de n poses p1, ..., pn, nous aurons en notant tij le temps mis par l'articulation j pour passer de la pose pi-1 à la pose pi:

$$tf = MAX[ti1, ..., tij, ..., tin]$$

qui représentera une estimation correcte du temps de gamme en considérant tous les points de la gamme comme des points d'arrêt et en faisant abstraction des pertes de temps occasionnées par les dialogues entre armoire de commande et organes de puissance du manipulateur.

IV.4.2.3 Estimation du temps de cycle pour une pseudo-gamme

Dans le cas d'une pseudo gamme, c'est à dire d'une suite de points de soudure, nous ne disposons pas des points de passage, mis en place pour contourner d'éventuels obstacles. Rappelons que ces derniers ne seront réellement déterminés que lors de l'étude C.A.O locale. Au niveau de la planification, nous ne pourrons nous contenter au mieux que d'une estimation de ces obstacles, estimation qui semble impossible à obtenir.

Quand bien même nous obtiendrions cette estimation, nous nous trouverions face au problème suivant:

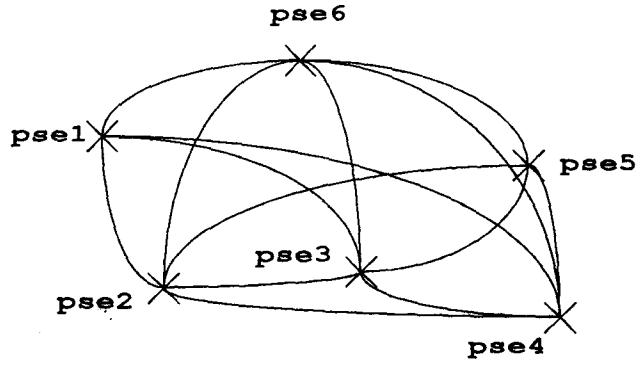


fig II.49

La pseudo-gamme peut être représentée par un graphe (figure II.49) dont les sommets seraient les points de soudure, reliés deux à deux par des arcs pondérés par une estimation du temps mis par notre robot pour aller d'un sommet à l'autre. Le problème serait alors de déterminer un chemin passant par tous les points de soudure et dont le coût serait minimal et en tous les cas inférieur au temps de cycle admissible. Ce problème n'est pas sans similitude avec celui bien connu en recherche opérationnelle du voyageur de commerce /SAK 84b/. Notons que cette procédure serait déclenchée en cours de planification et à chaque nouvelle tentative d'affectation d'un paquet de points à un robot !

Pour prendre en compte le problème de la validation du temps de gamme en cours de planification, nous avons opté pour une solution à base d'heuristiques déduites de la topologie des véhicules, que nous allons détailler.

IV.4.3 Tentative de minimisation

IV.4.3.1 Justification de l'approche

La démarche heuristique que nous proposons a été essentiellement motivée par la nécessité de s'affranchir des problèmes de temps de réponse de notre planificateur.

En effet, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, une méthode calculatoire, que nous déclencherions à chaque décision d'affectation d'un point de soudure sur une ressource robot poserait rapidement des problèmes de temps de calcul et d'explosion combinatoire.

L'application de certaines règles de métiers, relatives à la disposition des points de soudure sur le véhicule permet d'aboutir à une solution correcte en un temps relativement court.

IV.4.3.2 Heuristiques mises en oeuvre

La figure II.50 représente le modèle C.A.O d'une moitié de caisse de véhicule accompagnée des différents points de soudure nécessaires à son assemblage.

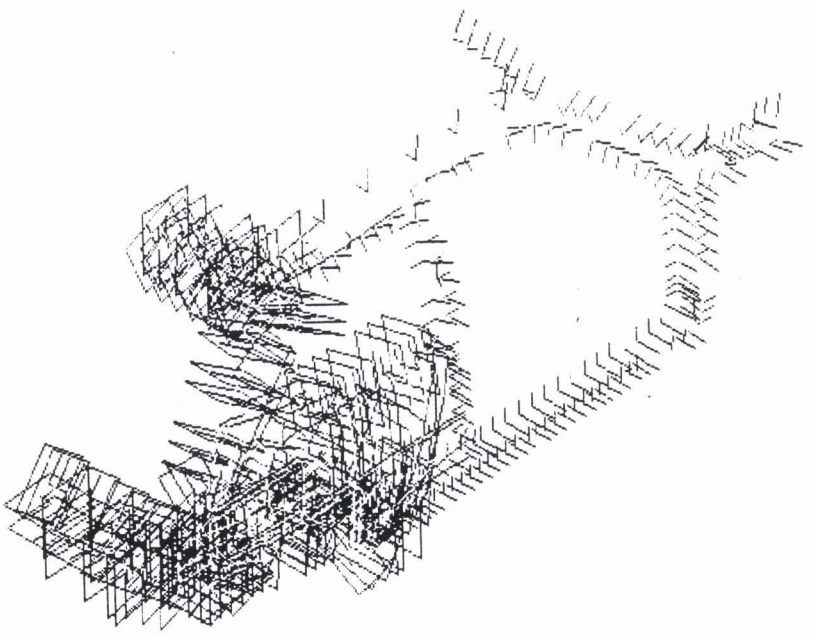


fig II.50

D'autre part, nous avons vu que le problème de la détermination du temps de gamme était fortement dépendant de la variation des variables articulaires du robot lors de l'exécution de la tâche robotique qui lui est assignée. Par conséquent, ce même temps de gamme dépend directement de la répartition des points de la gamme dans l'espace mais aussi et surtout de leur orientation.

L'idée sera donc d'affecter à une ressource donnée, dans la mesure du possible, des séquences de points impliquant une variation minime ou monotone des axes critiques de notre robot manipulateur.

Une voie possible est alors celle qui consiste à regrouper les points de soudure n'entraînant pas de variation significative quant à l'orientation de l'outil de soudage.

Plus précisément, nous effectuerons un premier regroupement en classes des points de soudure de notre véhicule puis nous tenterons lors de la planification de minimiser le nombre de classes de points de soudure par ressource tout en maximisant les points de soudure d'une même classe.

Nous avons brièvement exposé les principes utilisés pour la prise en compte du temps de gamme en cours de planification. L'agencement de ces principes au sein de notre moteur sera détaillé au IV.5.5 traitant de l'intégration des règles heuristiques de résolution.

IV.4.4 Equilibrage de gammes

IV.4.4.1 La problématique

Equilibrer une ligne, c'est arranger les tâches données entre les postes de travail afin que le temps total demandé à chaque poste soit approximativement le même /GRO 81/.

Si les éléments de travail peuvent être groupés de façon telle que les temps sur chaque poste soient égaux, nous avons une ligne parfaitement équilibrée et nous pouvons espérer une production sans à-coup. Dans la plupart des situations concrètes, il est très difficile de réaliser un équilibre parfait. Quand les temps sur chaque poste sont inégaux, le poste le plus lent détermine le taux de production global de la ligne.

De nombreux auteurs, parmi lesquels /WIL 72/, /PRE 74/, /MAS 66/, /DAR 75/, /KIL 61/ ont proposé des méthodes de solution exactes ou heuristiques à ce problème.

IV.4.4.2 SARTRE et l'équilibrage de gammes

Le problème des lignes de production robotisées et notamment dans le domaine de la soudure par points possède une caractéristique particulière: le temps de gammes n'est pas la somme des temps mis pour effectuer chacune des opérations de la gamme prises individuellement; Autrement dit, ce temps de gamme n'est connu qu'une fois la gamme validée. Pour cette raison, les méthodes classiques d'équilibrage de ligne, référencées au paragraphe précédent sont difficilement applicables.

Ainsi, la prise en compte du problème d'équilibrage de gammes au sein de l'environnement SARTRE s'est, là encore, faite de manière heuristique.

Une première version du logiciel n'assurait l'équilibrage qu'au sens d'un nombre de points de soudure moyen par ressources.

Une seconde version du planificateur, en cours de développement, permettra une adaptation automatique en cours de planification des moyennes de points par ressource par la prise en compte de la topologie des pseudo-gammes.

Le problème est malgré tout ouvert et la méthode de résolution mise en oeuvre sera appelée à évoluer au fur et à mesure des différentes validations que nous ferons subir à l'outil.

IV.5 Intégration

IV.5.1 Cycle de fonctionnement d'une planification

Il est détaillé sur la figure II.51.

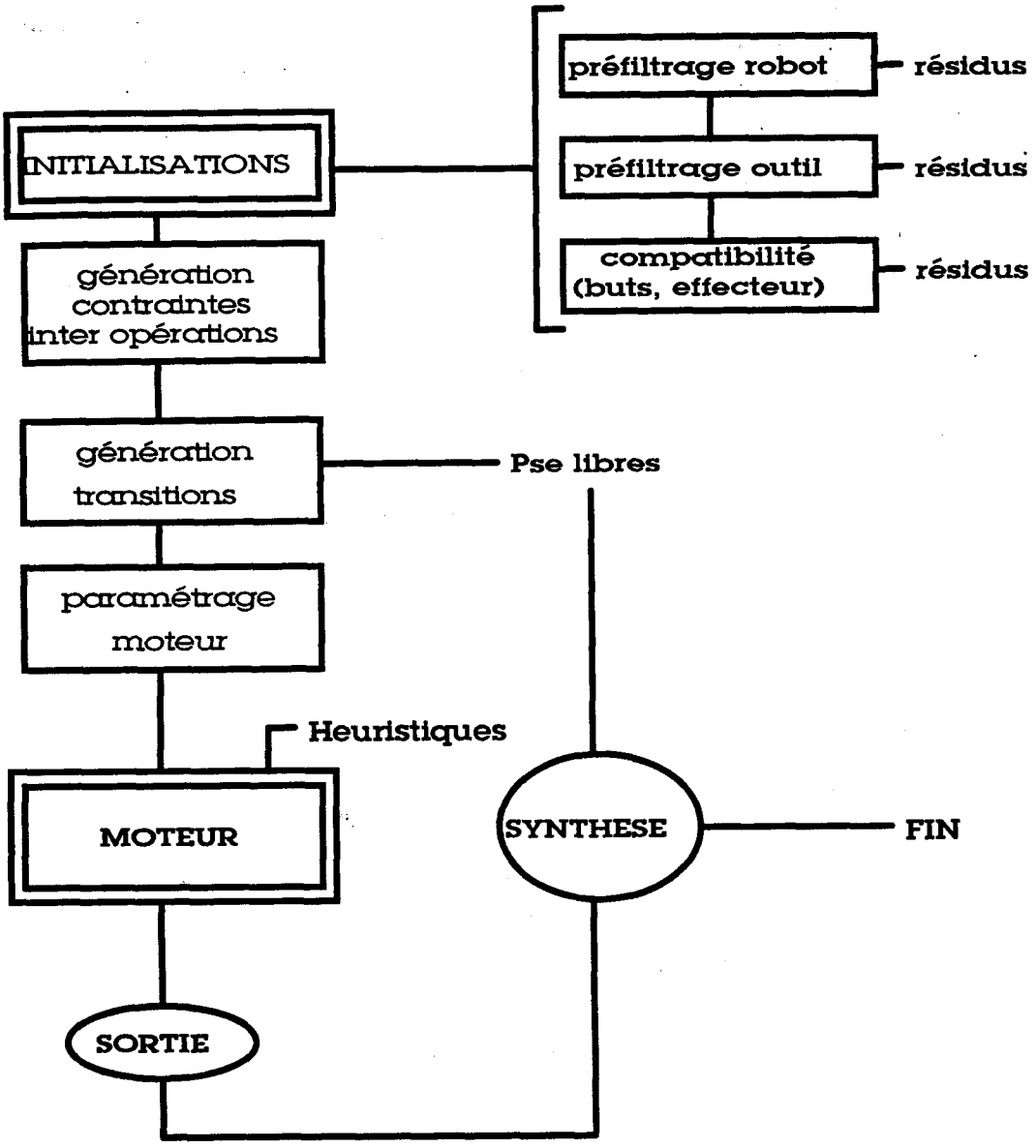


fig II.51

Plusieurs étapes sont fondamentales dans le cycle de fonctionnement d'une planification.

Celle ci débute par une initialisation, destinée à configurer les différentes piles du système ainsi qu'à détecter certains buts irréalisables.

Il vient ensuite les modules de "génération de contraintes inter-opérations" et de "génération de transitions", destinées à paramétrer notre moteur.

Le mécanisme de ce dernier sera alors lancé de manière à tenter d'effacer l'ensemble des buts qui lui sont proposés. Cette tâche est menée à bien grâce à une

adaptation (utilisation d'heuristiques de planification) de la généricité de notre moteur au problème des lignes d'assemblage robotisées en soudage par points.

Nous proposons dans la suite de l'exposé de décrire phase par phase le fonctionnement de notre planificateur ainsi que les différentes heuristiques mises en jeu lors de la recherche de solution.

IV.5.2 Initialisations

L'initialisation d'une planification se décompose en trois temps successifs (figure II.52): Un préfiltrage robot, Un préfiltrage effecteur, Une étude de compatibilité but-effecteur.

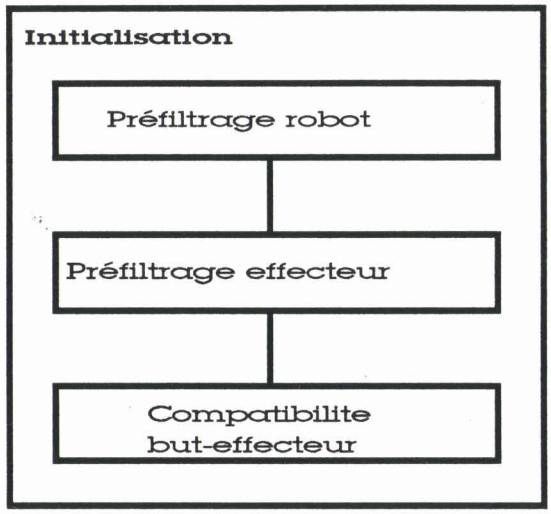


fig II.52

IV.5.2.1 Phase de préfiltrage robot

Cette phase va permettre d'effectuer un filtrage grossier des buts candidats sur chaque ressource à partir du critère suivant:

Un but b sera retenu sur une ressource Ri si et seulement s'il appartient à la boule de centre la base du robot O de rayon R tel que:

En notant S1, la valeur maxi prise par la distance du centre O à l'extrémité e du robot, pour qimin < qi < qimax, i$\in${1,...,n}, {qi} représentant l'ensemble des variables articulaires de notre manipulateur, le rayon R correspondra à la valeur maxi prise par S1, pour Me (matrice outil), Mc (matrice réhausse d'outil) , XYZ (implantation de la

base du manipulateur), prenant leurs valeurs dans leurs domaines de définition respectifs.

Ainsi:

$$R = \text{Sup}\ (\text{Sup}\ d(O,e))$$
$$dM_0 \quad q_i$$
$$\text{de} \quad q_{imin} < q_i < q_{imax}$$
$$dXYZ$$

Ainsi, ce préfiltrage va permettre d'éliminer les cas grossiers des points de soudure beaucoup trop éloignés des ressources potentielles.

Les résultats de ce filtrage seront empilés dans les piles de buts relatives à chaque ressource et serviront de base à la phase suivante de préfiltrage effecteur que nous allons à présent expliciter.

IV.5.2.2 Phase de préfiltrage effecteur

On va filtrer sur chaque ressource les buts de chacune des piles en appliquant les règles suivantes:

Si la pince est une pince grande profondeur alors on empile dans sa pile de buts que les assemblages ayant un $L > 450$.

Si la pince est une pince en Cé alors on empile dans sa pile de buts que les assemblages ayant (Ho1 libre ou Ho2 libre) et ($L < 450$).

Si la pince est une pince Ciseau alors on empile dans sa pile de buts que les assemblages ayant (Lo libre) et ($L < 450$).

IV.5.2.3 Phase de compatibilité but-effecteur

Sur chaque sommet des piles de buts de chaque ressource robot, on applique les critères de compatibilité outil du IV.2.6 et on empile le résultat final.

Cette étape d'initialisation de la planification permet de compléter les piles de buts de chaque ressource de telle manière que l'on ait condamné l'étude de certains buts sur certaines ressources à l'aide de règles et de critères simples.

A la fin de chacun des temps composant l'étape d'initialisation, il est possible que certains buts aient été trouvés irréalisables au sens où il n'aient pu franchir aucun des différents filtres.

IV.5.3 Génération des contraintes inter opérations

Dans cette étape, nous allons générer les différentes familles de paramétrages outils par la mise en oeuvre sur chacune des ressources de l'algorithme détaillé au IV.2.7.

Ainsi, sur chaque ressource, nous connaîtrons les buts en exclusions, les différentes possibilités de paramétrages outils ainsi que l'incidence d'un choix de paramétrage plutôt qu'un autre sur l'espace des contraintes attaché à chaque robot (figure II.53).

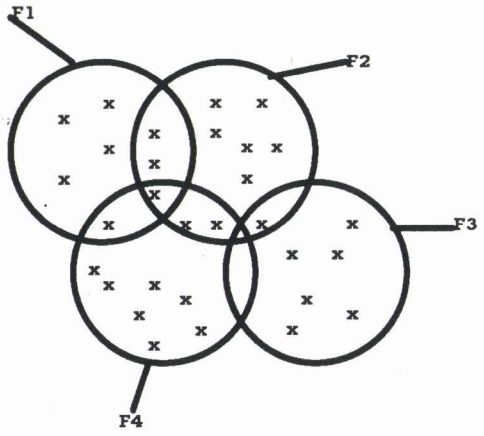


fig II.53

IV.5.4 Génération des transitions

A partir des résultats de l'étape précédente de génération de contraintes inter-opérations, nous allons effectuer une mise en forme de ces résultats sous un format compatible avec notre moteur.

A cet effet, nous allons utiliser le formalisme des transitions.

Les résultats seront ainsi mis sous la forme suivante:

SI le robot R est paramétré selon le vecteur de paramétrage outil P

ALORS il y aura compatibilité de soudage entre les points de soudure de l'ensemble T.

que nous noterons symboliquement:

Ri et Pil --> Til avec Ri : Robot Ri.

Pil: Paramétrage l de l'outil de Ri.
Til: Points de soudure compatibles pour Ri paramétré suivant le vecteur Pil.

IV.5.5 Règles heuristiques de résolution

IV.5.5.1 Généralités

A ce stade de l'étude, notre planificateur est initialisé et prêt à être lancé.

Toutefois, le moteur de caractère générique (figure II.54) a besoin d'un support heuristique lui permettant de s'adapter aux spécificités de la soudure robotisée par points.

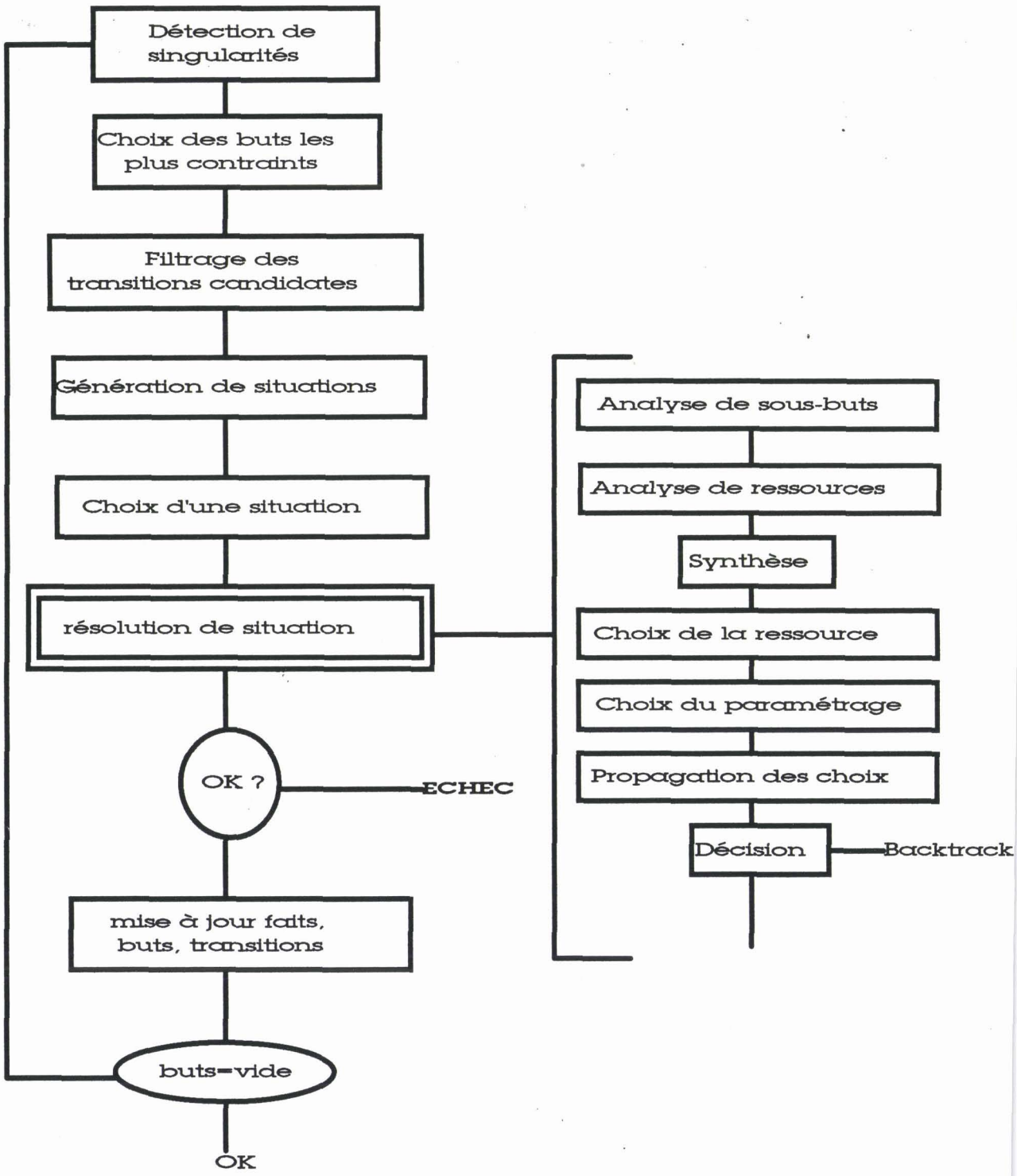


fig II.54

A cet effet, les phases d'analyse de synthèse de situation et de choix de ressources (figure II.54) nécessitent des règles heuristiques pour pouvoir fonctionner correctement.

D'autre part, en cas d'échec, notre moteur peut fonctionner en régime révocable, dont la mise en oeuvre est très fortement liée au problème à traiter.

Nous allons ainsi détailler les différentes heuristiques implémentées ainsi que la gestion des retours en arrière dans le cadre d'une reconfiguration de ligne robotisée en soudure par points.

IV.5.5.2 Analyse et synthèse de situation

Nous avons vu qu'une situation est caractérisée par une liste de sous-buts et un ensemble de ressources tels que chaque sous-but de la liste est allouable sur chaque ressource de l'ensemble dans au moins une configuration de paramétrage.

La phase d'analyse et de synthèse de situation va consister en un examen détaillé des sous-buts et des ressources de la situation pour en dresser une "géographie" qui sera exploitée lors de l'étape suivante de choix de ressources.

* Analyse de la liste des sous-buts: cette analyse s'effectue suivant l'arbre de décision suivant:

Les sous-buts sont en fait classés suivant les valeurs prises par le paramètre "Lu".

La priorité est alors donnée aux sous-buts appartenant à la classe du "Lu maximum", ce qui permet ainsi une optimisation dans les paramétrages outil, tendant à éviter d'affecter des sections minuscules à des outils énormes.

A la fin de cette étape, on dispose d'une sous-liste contenant les sous-buts à examiner en priorité ainsi que leurs possibilités de regroupement.

* Analyse de l'ensemble des ressources: en regard de l'analyse précédente, un examen des ressources de la situation à résoudre va être mené; elle permettra de classer les ressources selon les trois critères suivants:

- Distinction entre les ressources dont la pile des tâches est vide, comporte des points de soudure du même groupe, de deux groupes distincts, de trois groupes distincts ...

- Distinction entre les ressources restées dans leur état initial (pas de modification) et les autres, classées suivant la hiérarchie de coûts exposée au IV.5.5.

- Classes de valeurs du paramètre "Lu" de l'outil de chacune des ressources.

IV.5.5.3 Heuristiques de choix de ressources

Les règles heuristiques implémentées dans le cadre du choix des ressources et des paramétrages associés ont pour objectif de prendre en compte les contraintes de temps de gammes et de coût des modifications. Elles interviennent au sein du module de résolution de situation, module clé du moteur (figure II.54) et font suite à l'étape d'analyse et synthèse de situation étudiée précédemment.

Les variations de paramétrage des différentes ressources suivent la hiérarchie de coûts à respecter lors de l'affectation des points de soudure aux postes détaillée sur la figure II.55.

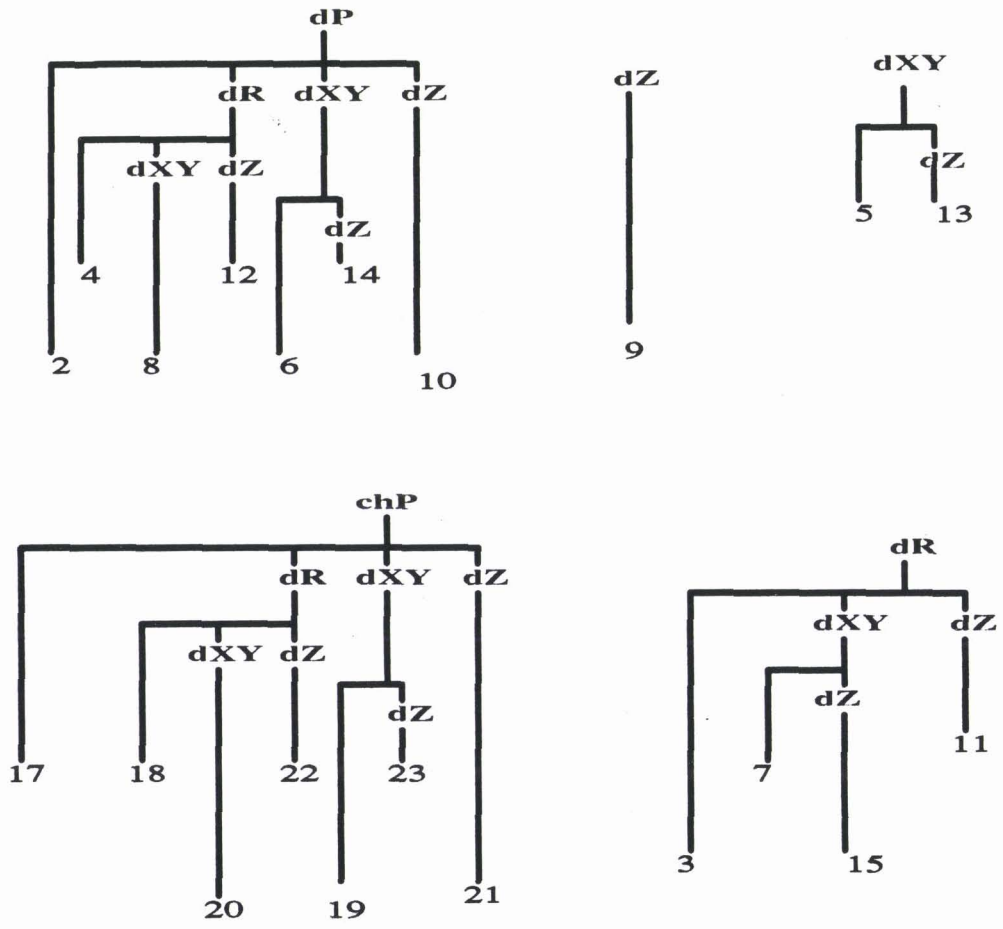


fig II.55

Sur ce schéma, dP, chP, dR, dZ, dXY représentent respectivement une modification de paramétrage d'outil mineur, un changement de la géométrie de l'outil, une modification de la réhausse d'outil, une variation du paramètre Z de la base du manipulateur, une variation dans le plan XY de la base du manipulateur.

Ainsi, des priorités seront respectées dans le choix des heuristiques à utiliser (ordre des règles).

D'autre part, l'intégration des heuristiques de prise en compte des temps de gammes détaillées au IV.4 et des contraintes de paramétrage des IV.2 et IV.3 donnent naissance à des règles de planification prenant en compte trois types de critères:

- Les évolutions potentielles des états des paramétrages des ressources:

On distinguera:

* Les ressources restées dans leur état initial (non modifiées).
* Les ressources ayant des possibilités de variation de paramétrages à coût constant.
* Les ressources évoluant d'un état initial non modifié à un état courant entraînant une variation de paramétrage de coût minimal (par rapport aux autres variations potentielles d'états de ressources).
* Les ressources évoluant d'un état initial déja modifié, à un état courant à coût croissant.
* Enfin, les ressources évoluant d'un état initial non modifié à un état courant entrainant une variation de paramétrage à coût croissant.

Chacun de ces cas se trouvera dans la partie prémisses de règles tendant à conclure sur un effacement de sous-buts, c'est à dire une affectation de points de soudure.

- Les sous-buts à effacer:

Il seront traités de manière différente suivant qu'ils augmentent ou pas le nombre de groupes de points constituant la pseudo gamme courante du robot potentiel d'affectation.

- Estimation du temps de gamme courant:

Lors de la prise de décision d'affecter à un robot R un ensemble de sous-buts S, deux cas de figure peuvent être envisagés:

* la totalité des éléments de l'ensemble S peut être affectée sans dépassement de temps de gamme; a ce moment là, on décide d'autoriser cette allocation.

* la totalité des éléments de l'ensemble S ne peut être affectée à la ressource R sous peine de dépassement de capacité; l'allocation est alors effectuée au maximum de la capacité du robot, celui ci est ensuite bloqué, c'est à dire retiré de la liste des ressources possibles. On se réserve malgré tout la possibilité de revenir sur cette décision en débloquant momentanément cette ressource pour en réexaminer la pseudo-gamme. Cette possibilité sera détaillée au IV.5.5.4, traitant du régime révocable.

La base de règles résultante de ces considérations est appliquée aux sous-buts issus de l'étape d'analyse de situation et à chaque cycle du moteur.

Elle permet une évolution des différentes piles de buts vers un état stable. Si dans cet état stable, certains buts n'ont pu, pour diverses raisons, être effacés, le moteur entamera une phase de retour arrière que nous allons examiner.

IV.5.5.4 Régime révocable

Au cours de son raisonnement, le planificateur peut "retourner en arrière" sur deux classes de choix:

- Choix des paramétrages, choix des ressources à paramétrer:

Lors de cette remise en cause, le système accepte de proposer une solution à coût supérieur ou égal au choix courant.

- Déblocage de ressources:

Le planificateur peut décider de remettre en cause les choix de "blocage de ressources" effectués antérieurement. En effet, si les buts restant à effacer sont potentiellement affectables sur une des ressources bloquées, celle ci sera transitoirement débloquée et on tentera d'affecter les sous-buts potentiels en désallouant certains points

de la pseudo gamme courante associée à cette ressource. Ces derniers points seront pris parmi ceux ayant la plus grande liberté d'affectation.

IV.6 Paramétrage du planificateur. Fonctionnement en mode simulation

IV.6.1 Généralités

L'interface homme-machine de notre planificateur est représentée figure II.56.

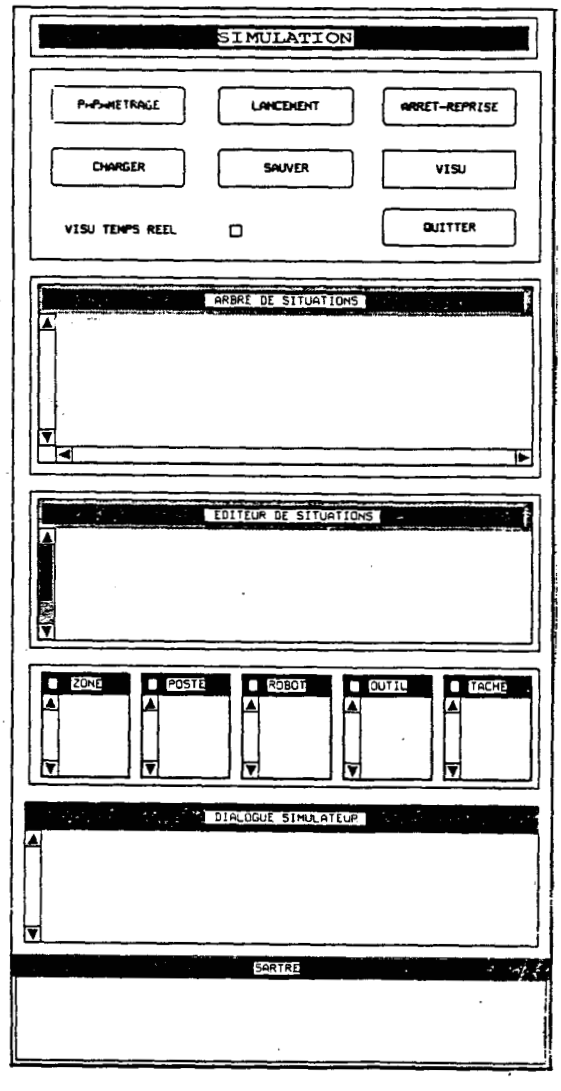


fig II.56

Nous voyons que les menus offrent la possibilité de lancer une simulation, de l'interrompre et de la relancer (utilisation de l'interruption programmable sous Le-Lisp), de la sauvegarder et de recharger des simulations précédentes. L'utilisateur a également la liberté de suivre l'évolution de la planification à l'aide de la visualisation

du graphe de situations attestant des différents choix effectués par le mécanisme d'allocation. Une trace des différents postes, robots, outils, zones affectés par la résolution est également possible ainsi qu'un état des buts restants à effacer.

Une dernière facilité est offerte: celle de paramétrer entièrement sa simulation grâce au menu paramétrage que nous allons détailler.

IV.6.2 Fonctionnalités

L'interface de paramétrage du menu de simulation est représentée figure II.57.

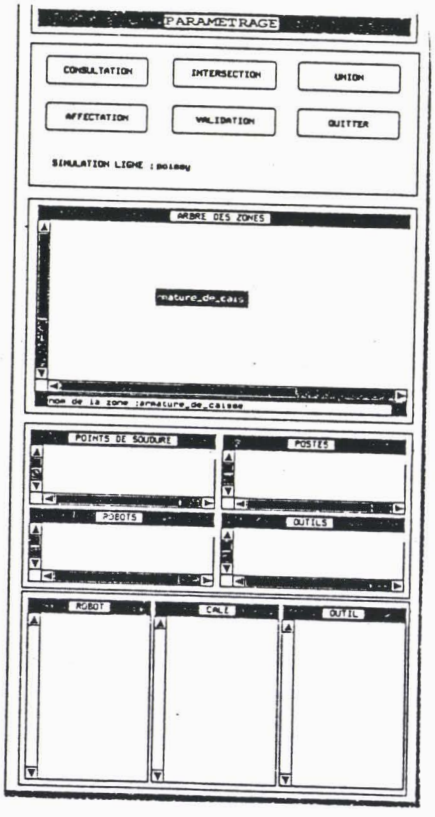


fig II.57

Cette interface offre les fonctionnalités suivantes:

- Choix des zones de la ligne à simuler.
- Choix des postes.
- Choix des ressources (robots et outils).

- Paramétrage des ressources.
- Choix des buts à effacer (points de soudure à étudier).
- Possibilité de forcer ou d'interdire l'affectation de points sur certaines zones, postes, robots, outils de la ligne.

Couplé aux possibilités d'interruption et de reprise de simulation, ce menu de paramétrage offre d'intéressantes possibilités pour dynamiser la planification.

IV.7 Métaplanification

IV.7.1 Intérêt

Le mécanisme de planification que nous venons d'évoquer est attaché à chaque zone et est insuffisant pour résoudre le problème d'allocation sur l'ensemble de la ligne c'est à dire sur un arbre de zone.

En effet, lancer une planification par zone éventuellement de manière parallèle ne suffit pas du fait d'une certaine liberté que possèdent quelques points de soudure de pouvoir être étudiés sur plusieurs zones (résultat de l'étude de zone). Ainsi, un niveau décisionnel de métaplanification s'avère nécessaire pour régler l'ordonnancemement des différentes planification de zones (figure II.58).

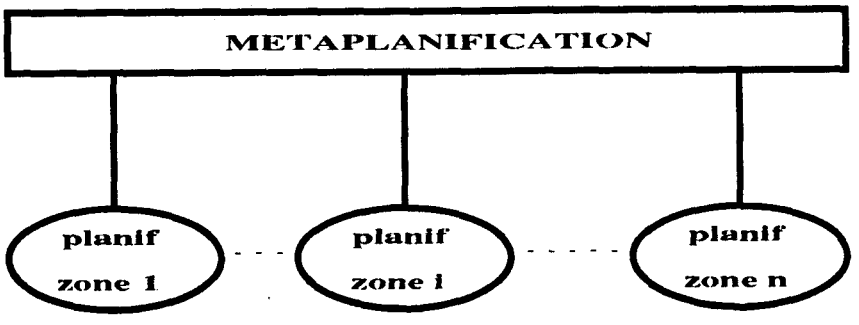


fig II.58

IV.7.2 Mise en oeuvre

Rappelons brièvement les données du problème à résoudre.

Nous disposons d'une ligne ou d'une portion de ligne robotisée agencée sous la forme d'une arborescence de zones (figure II.59). Des outils de planification permettent de répartir les points de soudure au sein de chaque zone mais du fait de leur éventuelle

liberté d'affectation inter zone, il convient d'étudier un niveau de planification qui proposera à chacune des zones des buts à satisfaire, c'est à dire des points de soudure à répartir, et qui aura également pour charge de synchroniser l'ensemble.

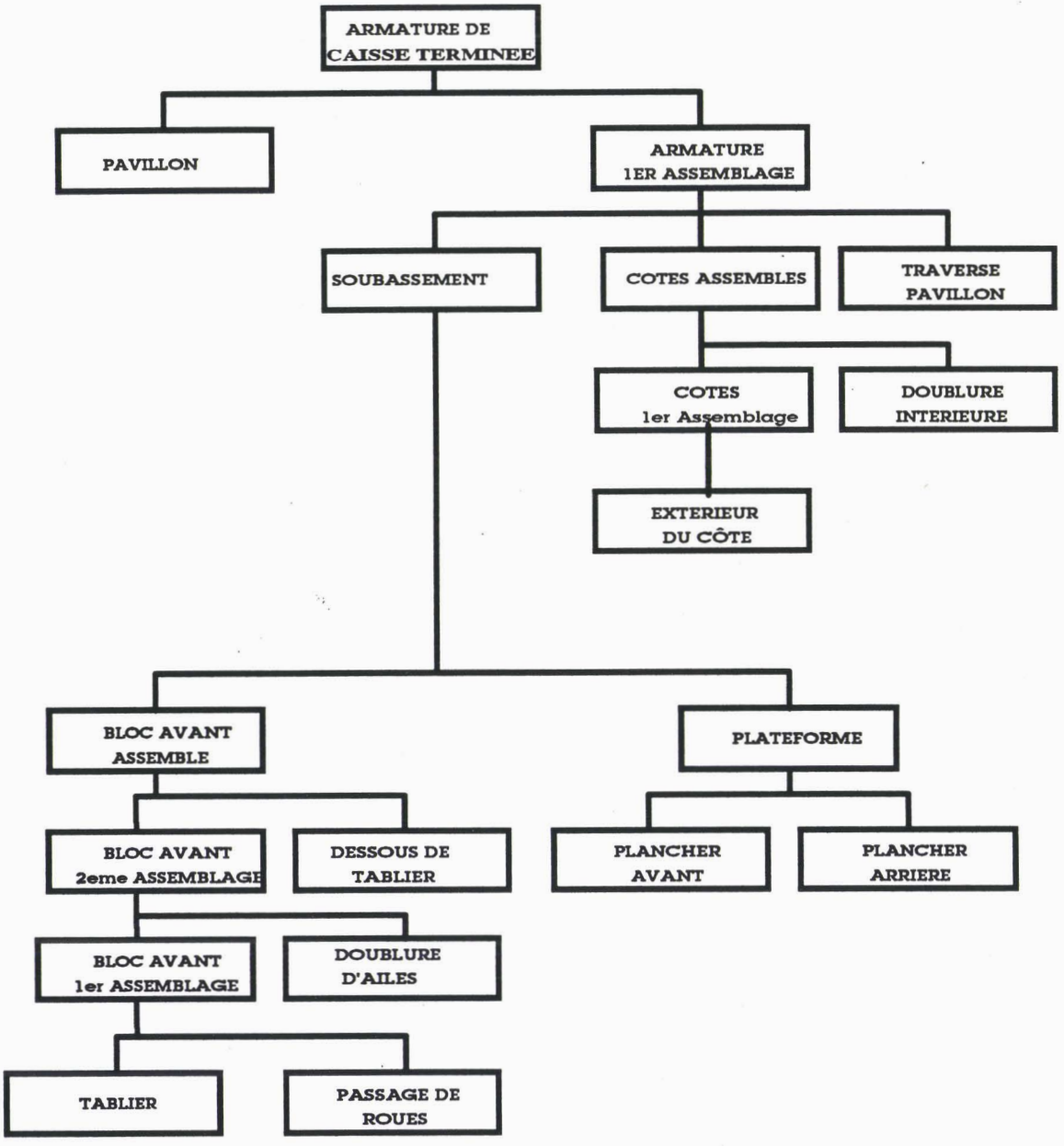


fig II.59

Pour résoudre ce type de problème, au moins deux classes de politique sont envisageables:

* Considérer l'ensemble des zones comme une "méga zone" et mettre en oeuvre au niveau de l'algorithme de métaplanification le même type d'approche que lors de la planification, en considérant la table des libertés d'affectation points de soudure zone et en commençant par tenter d'effacer les buts les plus contraints (figure II.60).

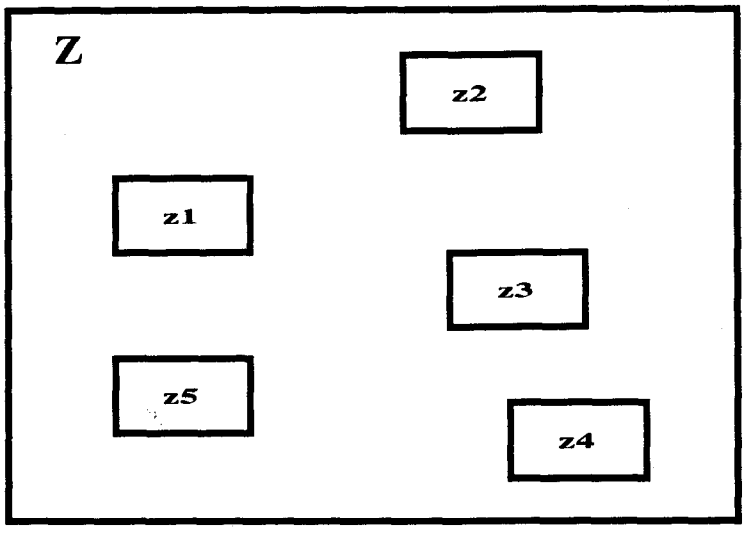


fig II.60

* Individualiser la résolution zone par zone et synchroniser l'ensemble: Plusieurs stratégies sont envisageables. La plus simple (figure II.61) consiste à planifier les feuilles de l'arbre des zones et à reporter dans les zones aval les buts éventuellement non effacés dans la mesure du possible. En cas d'échec de la résolution sur une zone, une phase de backtrack pourra être entamée.

D'autres stratégies prenant plus en compte les paramétrages des ressources de chaque zone peuvent être envisagées mais leur implémentation est encore à l'étude.

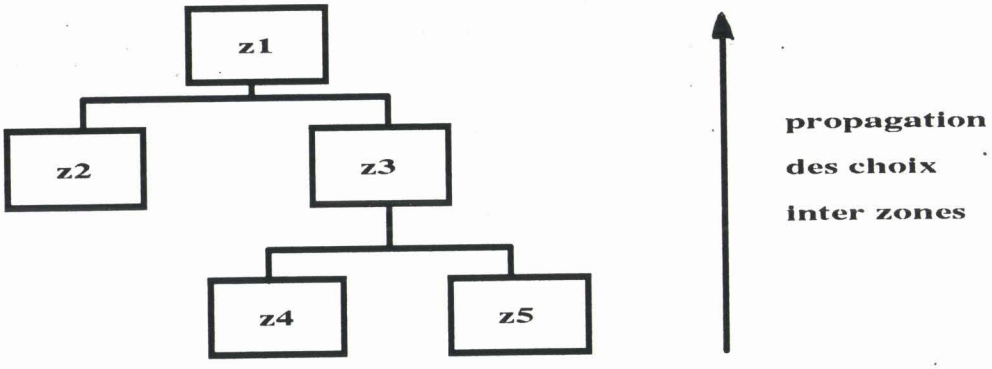


fig II.61

V Une méthode de positionnement de robots manipulateurs en conception de systèmes flexibles de production

V.1 Introduction

Les premiers travaux concernant les inverseurs de cordonnées en robotique industrielle visaient à l'élaboration de systèmes de commandes des manipulateurs et exigeaient par là même la connaissance complète du modèle de la chaîne cinématique. Ces algorithmes fort intéressants pour leur caractère généraliste présentaient l'inconvénient de ne pas être aisément manipulables dans le cadre de notre étude. En effet, il nous était nécessaire de disposer d'un modèle permettant d'associer à une pose un domaine d'implantation du robot considéré qui soit commode à manipuler d'un point de vue algorithmique. C'est pourquoi nous avons développé une solution originale au problème de l'agencement géométrique d'un manipulateur sur site robotisé mixant un point de vue analytique à des considérations géométriques. La puissance de la représentation permet de prendre en compte d'une manière commode au sein de SARTRE les problèmes d'implantation robot avec une efficacité élevée en terme de coût de calcul.

V.2 Espace de travail et espace d'implantation: l'état de l'art

Initialement, les recherches dans le domaine de la robotique industrielle étaient axées sur la résolution des problèmes posées par la commande des robots. Elles ont conduit au développement d'inverseurs de coordonnées performants dont l'utilisation initiale était d'être câblés au sein des baies de commande. Avec l'apparition des techniques de simulation robotique en C.A.O, l'utilisation de ces algorithmes apparut comme naturelle pour élaborer le noyau de ces nouveaux systèmes.

Les besoins de la C.A.O robotique en matière d'accessibilité robot sont essentiellement de deux sortes:

- L'étude des zones de l'espace accessibles par un robot ou espace de travail

- L'étude du domaine d'implantation d'un robot chargé de mener à bien une tâche.

Après un état de l'art des méthodes proposées pour résoudre le premier besoin, nous en examinerons l'adaptation au second ainsi que les limites qui nous on conduit à développer notre propre approche du problème.

V.2.1 Espace de travail

L'approche du problème de l'accessibilité peut être menée suivant une optique "commande": c'est la recherche de l'espace de travail du manipulateur, c'est à dire de la zône dans laquelle une "pose" (repère à atteindre) pourra être atteinte par l'organe terminal du robot (repère actif lié à l'outil). Plusieurs variantes sont envisageables:

* **Espace constructeur:** les constructeurs de robots proposent tous dans leurs documentations une description de la zone de l'espace accessible par le manipulateur, ou plus précisément par le centre de son poignet. La figure II.62 représente deux exemples d'espaces constructeurs. Il faut ensuite déduire de cette zone l'espace de travail du robot muni de son outil.

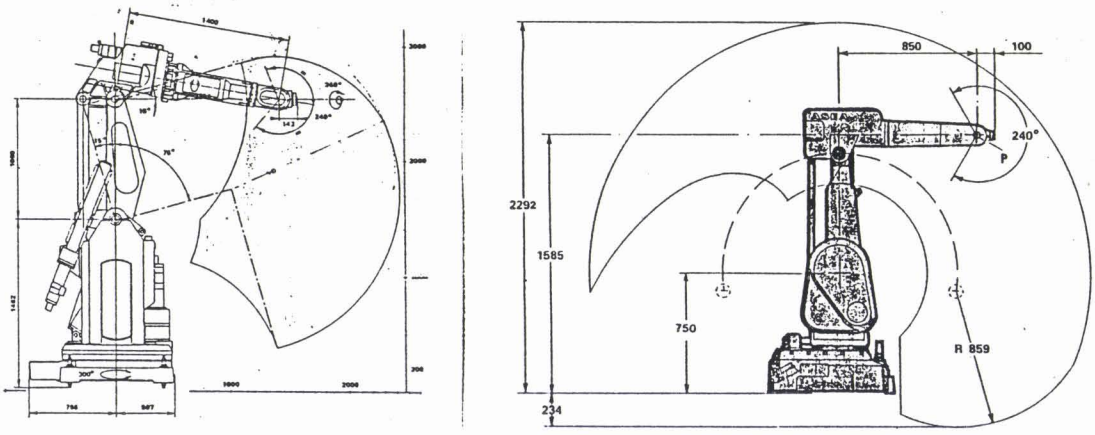


fig II.62

* **Espace de travail du robot en position:** il est obtenu en "augmentant" la zone contructeur d'une mesure correspondant à la distance entre le centre du poignet et le point actif de l'outil. Dans cet espace, tous les points sont accessibles en position avec au moins une orientation possible de l'organe terminal. Néanmoins, dans le cas d'une soudure par points ou une pose est repérée par une position et une orientation (coordonnées + référentiel associé), il est insuffisant pour pouvoir conclure.

* **Espace de travail totalement accessible:** de la même façon, il décrit l'espace de travail pour lequel tous les points sont accessibles quelle que soit

l'orientation de l'organe terminal. Cet espace, s'il existe, est très réduit et ne permet donc pas l'étude du procédé de manière acceptable.

* **Orientation de l'organe terminal:** les espaces précités ne suffisent évidemment pas pour mener à bien l'étude, puisque les poses à atteindre impliquent en outre une orientation précise de l'outil. L'espace de travail du robot, si l'on tient compte de l'orientation liée à la pose, est de dimension 6, ce qui est difficilement représentable.

* **Configurations du robot:** le robot pouvant accéder à une pose donnée selon plusieurs configurations (figure II.63), l'espace de travail est à considérer pour chacune de manière indépendante. Il est ainsi possible de contrôler les changements de configurations qui donnent lieu à des impossibilités ou à des mouvements de grande amplitude (envoi du bras manipulateur dans une zône libre en vue de procéder à un retournement de poignet par exemple): ils sont de la plus grande importance pour la conception du processus.

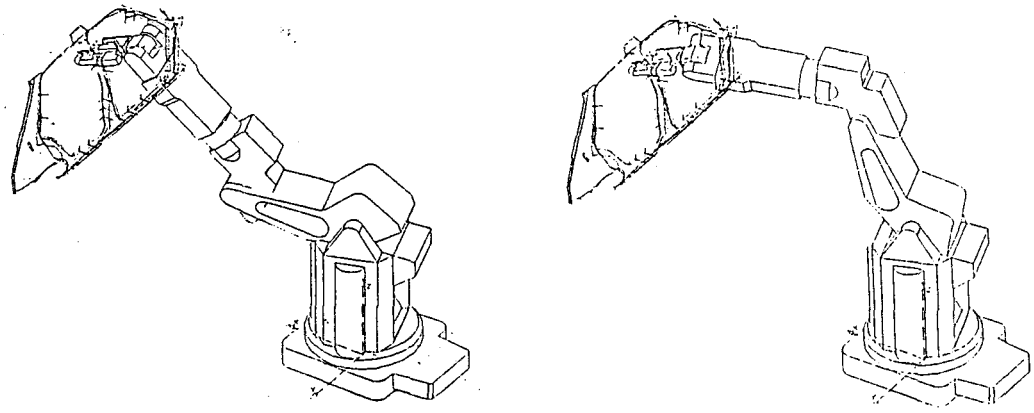


fig II.63

A orientation donnée de l'organe terminal, la description de l'espace de travail est réalisée en considérant les limites de débattement des articulations du poignet du robot. Les travaux réalisés jusqu'à présent montrent la difficulté de prendre en compte de façon correcte l'orientation de l'organe terminal du robot /CHE 89/, /RAS 87/.

L'une des approches /LU 88/, suppose que les articulations du poignet n'ont pas de limite à leurs débattements. Ceci est acceptable lorsque les angles morts des différentes articulations sont très faibles. Le raisonnement, uniquement géométrique, déduit le volume accessible (à orientation fixée) des zones balayées successivement par chacun des axes du manipulateur.

Une autre approche /BOR 86/, fondée sur la notion "d'aspects" (les différentes configurations du robot), traite complètement l'orientation de l'organe terminal. Il permet de bien comprendre la complexité du problème de l'accessibilité. L'étude des suivis de courbes en particulier montre que, bien que chaque pose de la trajectoire soit accessible, la tâche est souvent impossible à réaliser du fait de la nécessité d'une reconfiguration (un retournement de poignet par exemple).

V.2.2 Espace d'implantation

Nous proposons de traiter le problème de l'accessibilité suivant une vue du problème orientée "process", laquelle conduit à rechercher l'espace d'implantation du robot, en décrivant la zone dans laquelle la base du robot doit être placée pour pouvoir accéder à une pose donnée (orientation et position) et à un ensemble de poses.

Nous verrons qu'elle peut apporter de sérieux avantages déterminants pour la conception, la mise au point et la simulation de sites robotisés.

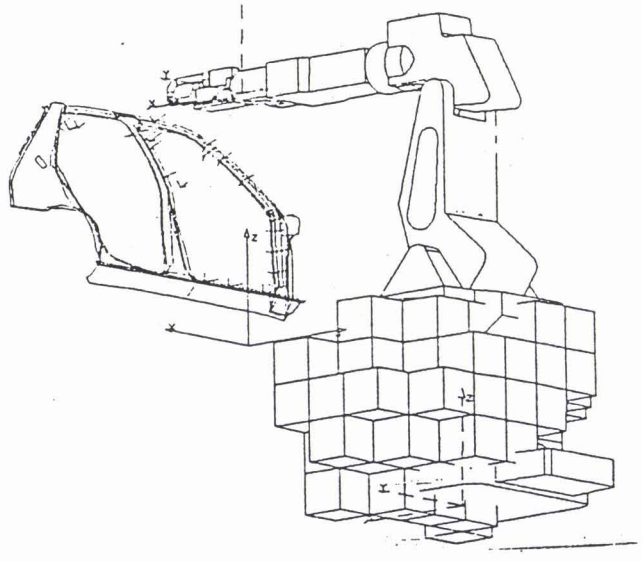


fig II.64

Une approche parmi les plus classiques est l'approche discrète, dont les résultats sont exposés figure II.64.

Une zone de recherche est définie à partir des considérations géométriques élémentaires sur le robot et son environnement, puis est discrétisée par un balayage en position ou en orientation sur la base du robot.

Ceci permet d'obtenir un volume d'implantation approché. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir se généraliser aux robots industriels quelconques, sous réserve de disposer d'inverseurs de coordonnées efficaces pour tous les manipulateurs considérés.

Néanmoins, le coût de l'algorithme est élevé et le volume obtenu est difficilement manipulable. En particulier, la présence de discontinuités au sein du volume est difficile à détecter. De plus, si l'espace d'implantation est très découpé ou très réduit, l'algorithme peut ne pas trouver de solution alors même qu'il en existe une (problème du pas de discrétisation).

D'autre part, le domaine obtenu est inutilisable dans le cas d'une création dynamique de gammes où l'affectation des points n'est pas figée, comme dans le cas de l'environnement SARTRE.

V.3 L'approche proposée

V.3.1 Le concept de base

Il découle d'une observation effectuée physiquement sur un robot manipulateur que l'on veut déplacer de manière à atteindre avec son organe terminal un repère donné dans l'espace à 6 dimensions (position + orientation).

Notons R0, R1, R2 les repères liés respectivement à la base du robot, à l'organe terminal, à la pose à atteindre.

Plusieurs cas de figures peuvent se présenter:

- On ne peut faire coïncider ni les origines ni les autres composantes de R1 et R2; il convient alors de s'approcher suffisament de R2 de manière à mettre en correspondance les origines des deux repères.

- On est alors amené au cas où le repère est accessible en position mais pas en orientation; on constate que dans ces cas là, c'est généralement une des articulations du poignet qui pose problème et tout le travail va consister à déplacer le robot suivant une direction appropriée pour tenter de la débloquer.

Dans le cas de robots industriels (6 axes) à poignet à axes concourants, il est possible de dissocier le porteur (trois premiers axes fixant la position) du poignet (trois derniers axes fixant l'orientation).

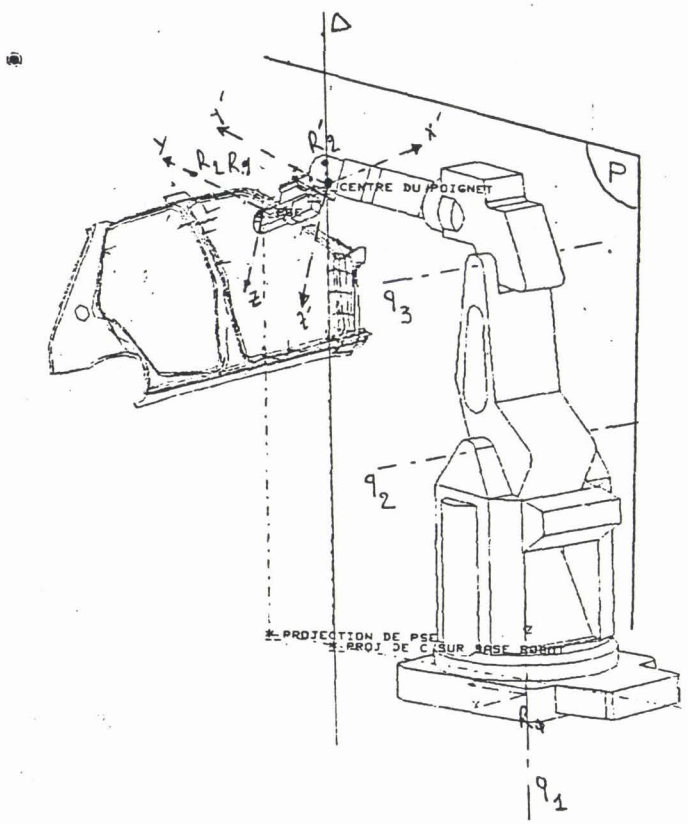


fig II.65

Plaçons nous maintenant dans un repère lié à la pose à atteindre, par exemple R2 ou plus exactement R'2, lié à la position et à l'orientation que devrait avoir le centre du poignet si l'on faisait coïncider R1 et R2. Dans R'2, R0 peut être repéré assez commodément à l'aide d'un système de coordonnées cylindriques (r, thêta, z), se prêtant bien à la symétrie du problème (figure II.65). Notons que ce paramétrage convient pour tous les robots à "porteur se déplaçant dans un plan" et nous y reviendrons au paragraphe V.5 consacré à la génralisation de l'approche.

Dans ces systèmes de coordonnées, il va alors être aisé, en étudiant d'abord les possibilités d'évolution du porteur puis en contraignant les résultats obtenus par la prise en compte des limitations imposées par le poignet et les éventuelles chaînes cinématiques fermées, de déterminer avec exactitude le domaine d'implantation du robot pour chaque pose qu'il devra réaliser. Nous verrons également que l'étude peut être utile à la résolution d'autres problèmes notamment ceux posés par les lignes de production robotisées flexibles que nous examinerons au V.4.

V.3.2 Etude du porteur

Le porteur est caractérisé par un système d'équations de la forme:

$r = f(qi)$
$z = g(qi)$

Dans le cas d'un porteu 3 axes (figure II.66) on obtient le système d'équations suivant:

(1) $r = l2*\sin(q2) - l3*\sin(q2+q3)$
(2) $z = l1 - l2*\cos(q2) + l3*\cos(q2+q3)$

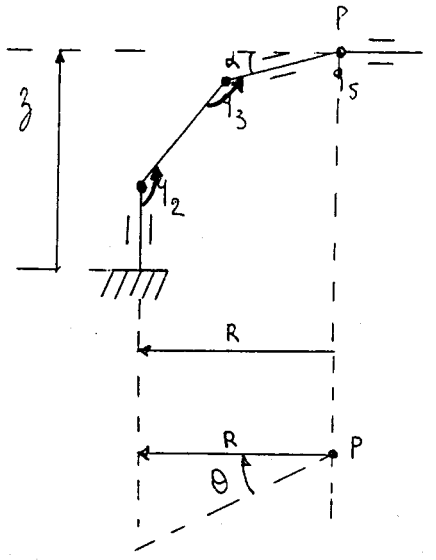


fig II.66

Plaçons nous dans le plan (q2, q3) et représentons l'évolution de (2) mise sous la forme $k(q2, q3) = 0$ et paramétrée en z. On obtient la figure II.67.

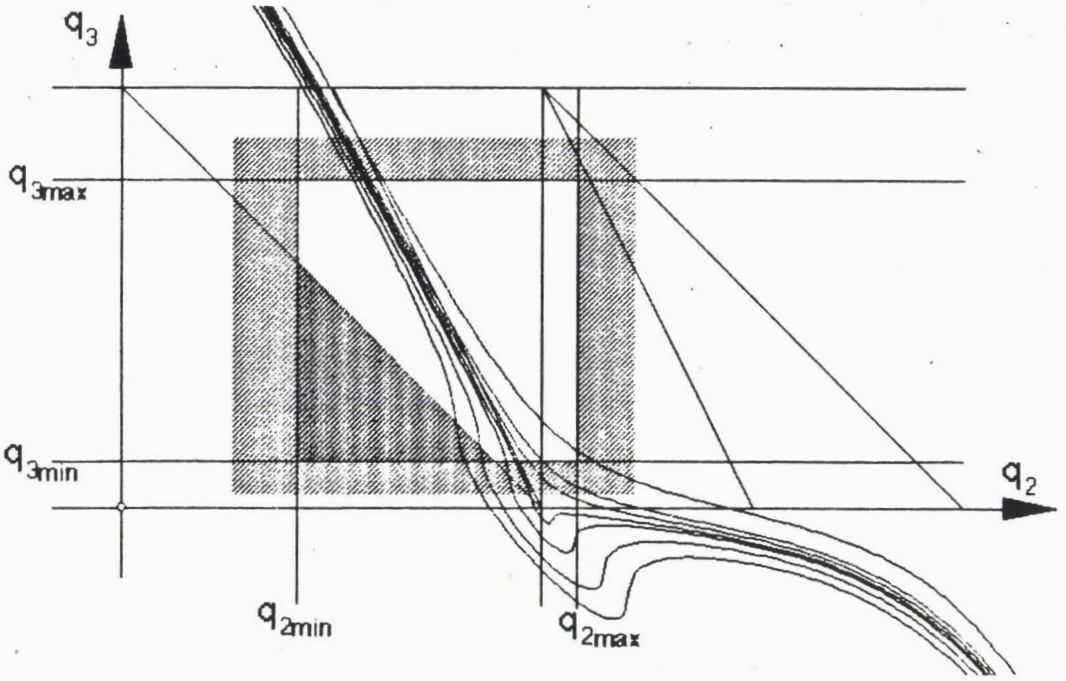


fig II.67

D'autre part, (1) mise sous la forme r = f(q2, q3) est continue et différentiable.

Sous la contrainte (2) k(q2, q3) = 0, l'étude d'extrema de f donne:

$$df = \frac{\partial f}{\partial q_2} dq_2 + \frac{\partial f}{\partial q_3} dq_3$$

$$dk = \frac{\partial k}{\partial q_2} dq_2 + \frac{\partial k}{\partial q_3} dq_3$$

$$df + \lambda\, dk = 0$$

Tous calculs faits, on obtient comme solution q3=0 modulo (pi).

Compte tenu des critères technologiques, il ne pourra y avoir pour r = f(q2, q3) qu'au plus un extremum atteint pour q3 = pi.

V.3.3 Prise en compte des contraintes

V.3.3.1 Contraintes de débattements

Elles représentent les domaines de définition des différentes variables articulaires du porteur.

Elles s'expriment sous la forme suivante:

$q2min < q2 < q2max$
$q3min < q3 < q3max$

et se représentent sous la forme de quatre droites (contraintes linéaires) dans l'espace (q2, q3) (cf figure II.67).

V.3.3.2 Contraintes de boucles fermées

Il est possible de représenter dans l'espace (q2, q3), les chaînes cinématiques fermées de type parallélogramme (cf figure II.68) sous la forme:

$K1 < q2 + q3 < K2$

K1, K2 étant des constantes dépendant du manipulateur.

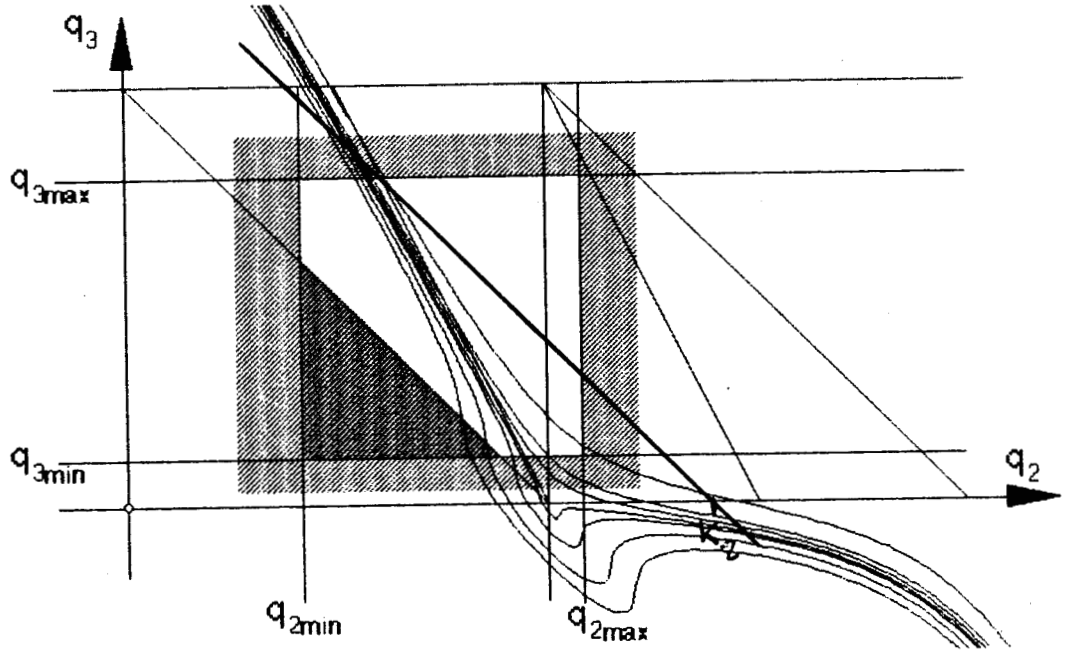


fig II.68

V.3.3.3 Contraintes de position du coude

Deux configurations, respectivement appelée "coude en haut" et "coude en bas", sont possibles pour le coude(figure II.69).

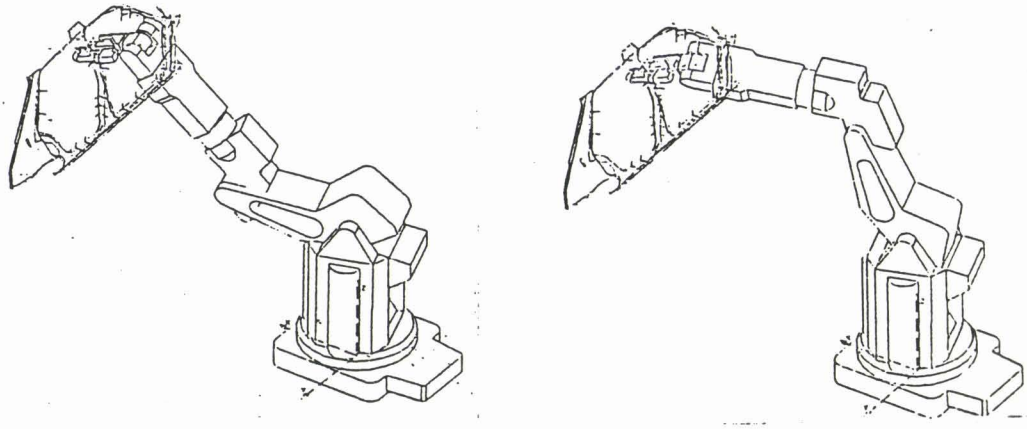


fig II.69

Supposons que l'on accepte seulement les solutions dites "coude en haut", nous aurons la contrainte suivante:

$0 < q3 < pi$

D'autre part, nous n'étudierons notre domaine que dans les cas où:

$-pi/2 < alpha < pi/2$ ce qui donne finalement:

$pi < q2 + q3 < 2pi$

qui se modélise là encore par deux droites dans l'espace (q2, q3) (figure II.70).

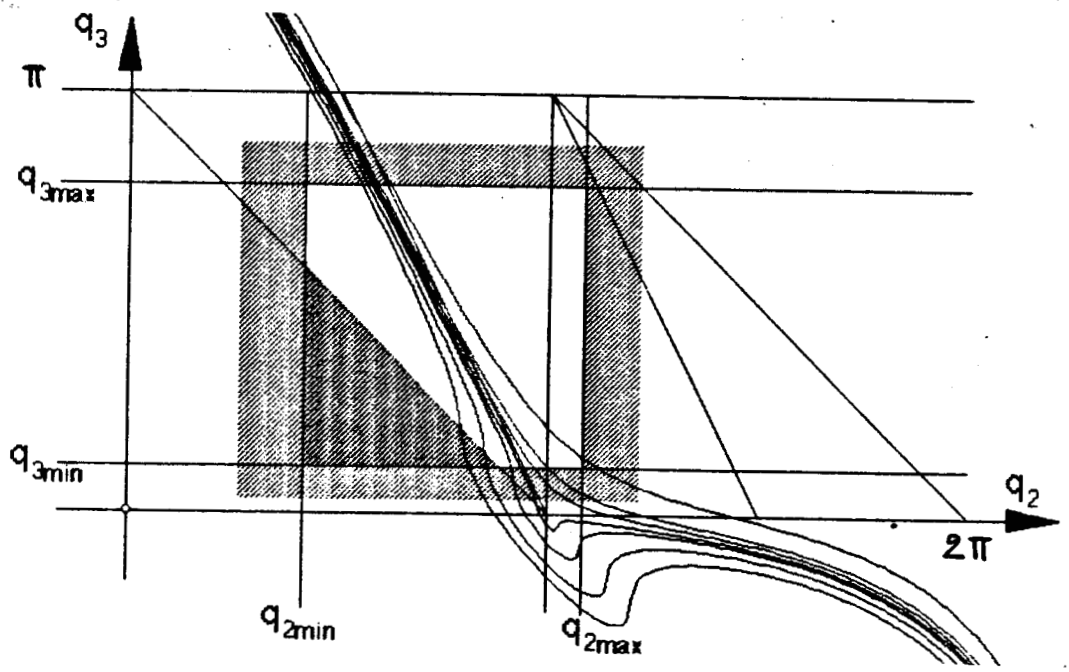


fig II.70

V.3.3.4 Contraintes dues au poignet

Dans le cas d'un poignet à 3 axes concourants, le plus fréquemment rencontré sur des robots manipulateurs en soudure par points (figure II.71), nous allons tenter de mener une étude qui permettra de connaître la nature des contraintes imposées par ce poignet sur le porteur et de les faire ainsi figurer sur notre graphe.

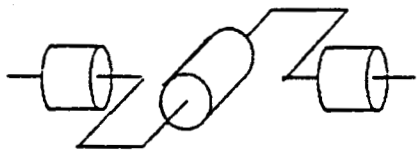


fig II.71

La limitation des débattements du poignet est due à l'articulation q5 dont l'intervalle de variation est souvent réduit en pratique.

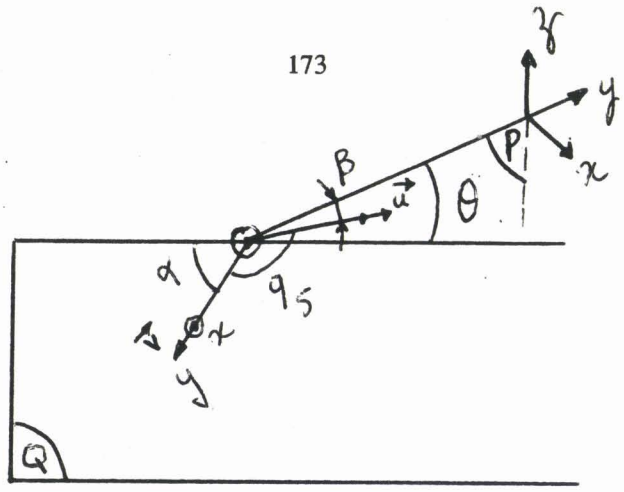


fig II.72

Avec les notations de la figure II.72, et en notant u un vecteur directeur de l'axe 6 et v un vecteur directeur de l'axe 4, la contrainte poignet prend la forme suivante:

$$u.v < \|u\| \|v\| \cos(q5max)$$

Développons cette inégalité avec:

u [0, cos(beta), -sin(beta)] v [sin(teta)*cos(alpha), -cos(teta)*cos(alpha), -sin(alpha)]

$$u.v = -\cos(teta)*\cos(alpha)*\cos(beta) + \sin(alpha)*\sin(beta)$$

Supposons pour la commodité des calculs q5max = pi/2, ce qui correspond aux contraintes industrielles nécessaires pour éviter les collisions outils-robot, on obtient alors les résultats suivants:

*** Si 0 < beta < pi/2** alors

$$-pi/2 < alpha < arctg(\cos(teta) / tg(beta))$$

*** Si -pi/2 < beta < 0** alors

$$arctg(\cos(teta) / tg(beta)) < alpha < pi/2$$

Sachant que alpha= q2 + q3 - 3pi/2, les contraintes dues au poignet pourront également figurer sous forme de droites dans l'espace (q2, q3) comme l'indique la figure II.73.

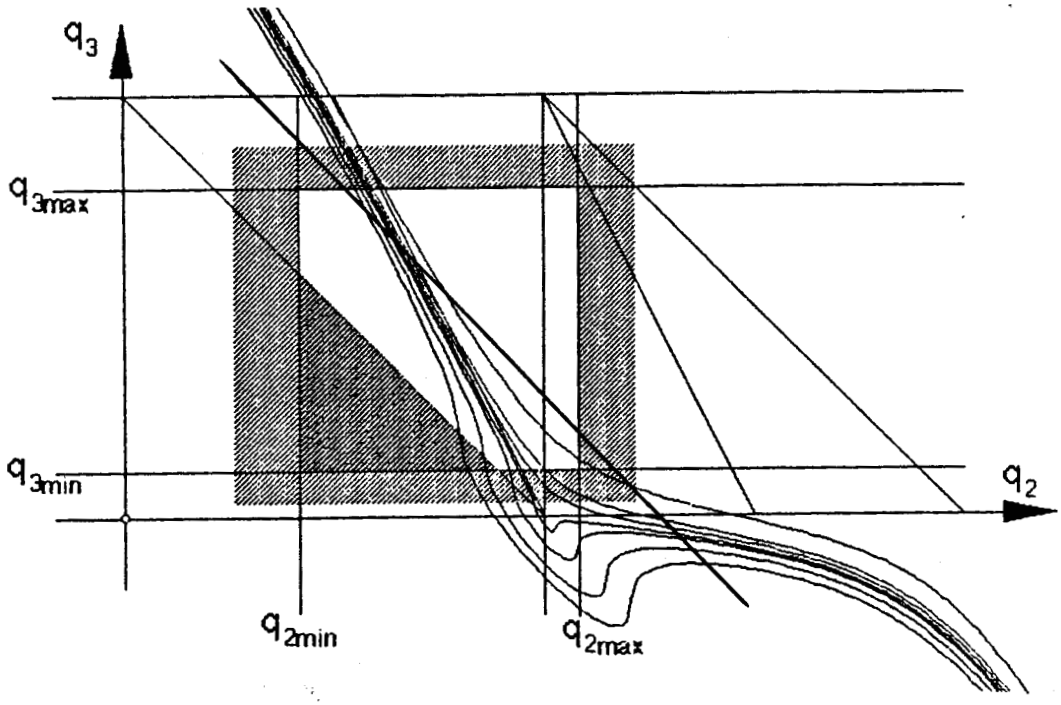


fig II.73

V.3.4 Analyse du domaine obtenu

La synthèse des différentes contraintes détaillées ci-dessus nous conduit aux cas suivants:

* Si 0 < beta < pi/2 alors, la contrainte poignet prend la forme:

pi < q2 + q3 < 3pi/2 + arctg (cos(teta) / tg(beta)) correspondant à la figure II.74.

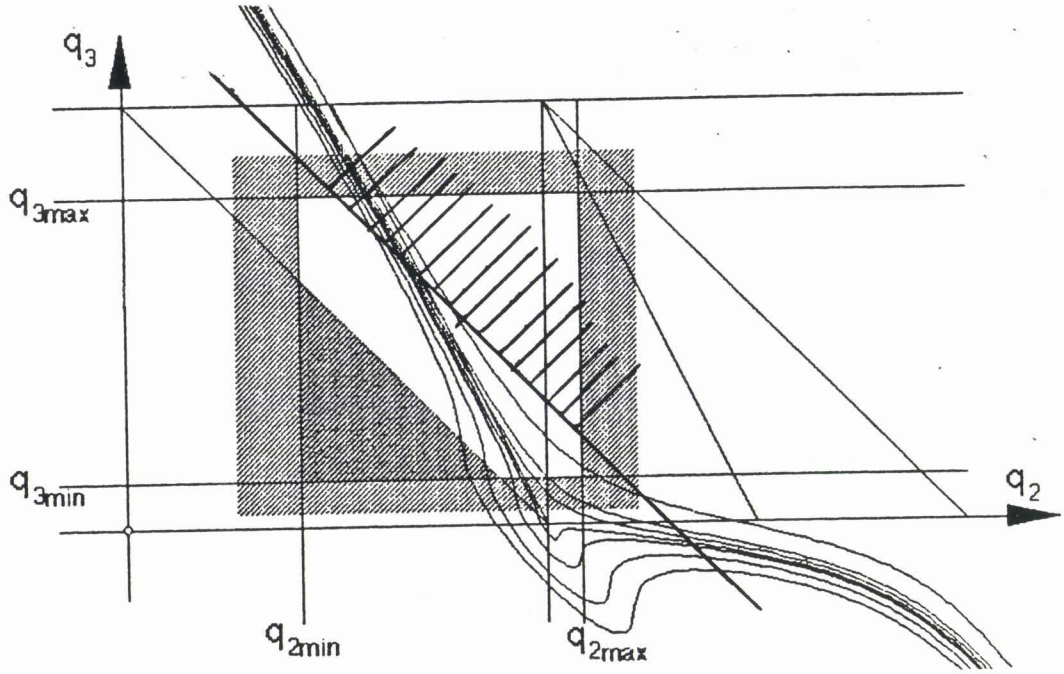


fig II.74

Dans ces conditions, on constatera que le domaine d'implantation possible de notre robot ne comporte pas de "trous" et est tracé pour z fixé et pour chaque angle thêta en calculant les intersections entre R= f(q2, q3) et les équations des droites délimitant le domaine de définition de (q2, q3) (y compris les droites engendrées par la contrainte poignet).

Une étude plus précise du domaine donnerait la table de variation de la figure II.75.

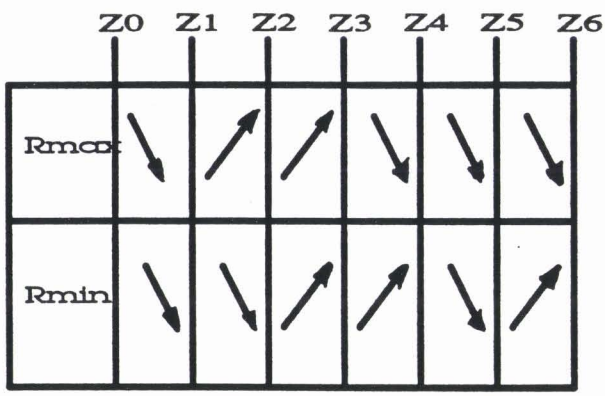


fig II.75

Cette table engendre le graphique représenté figure II.76.

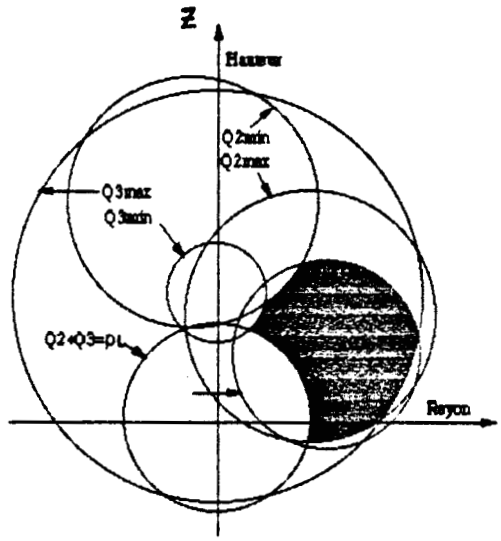


fig II.76

Les arcs de cercle formant le contour du graphe sont respectivement calculés suivant les paramétrages spécifiés figure II.77.

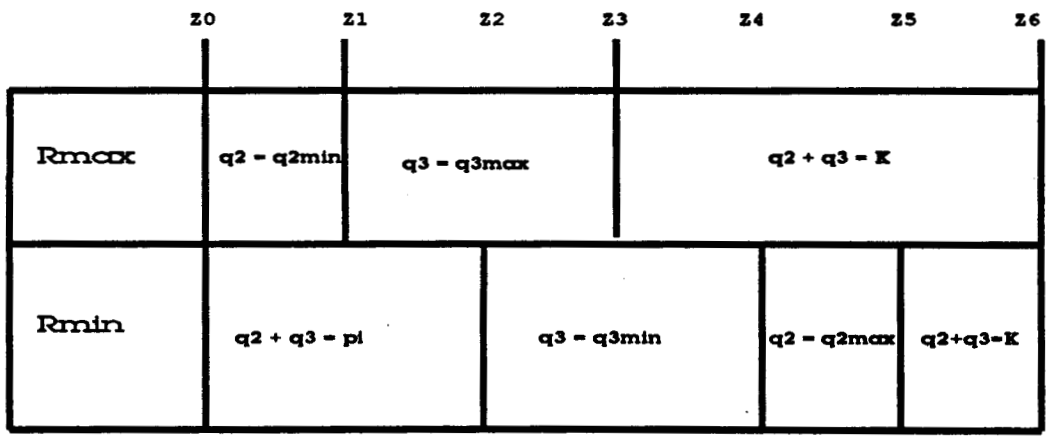


fig II.77

Notons que ce graphique peut se composer de 6, 5, 4, 3, 2, 1 ou même 0 partie suivant les valeurs du couple (thêta, béta).

* Si -pi/2 < beta < 0 alors, la contrainte poignet prend la forme suivante:

$$3pi/2 + arctg\ (cos(thêta) / tg(beta)) < q2 + q3 < 2pi$$

correspondant au schéma représenté sur la figure II.78.

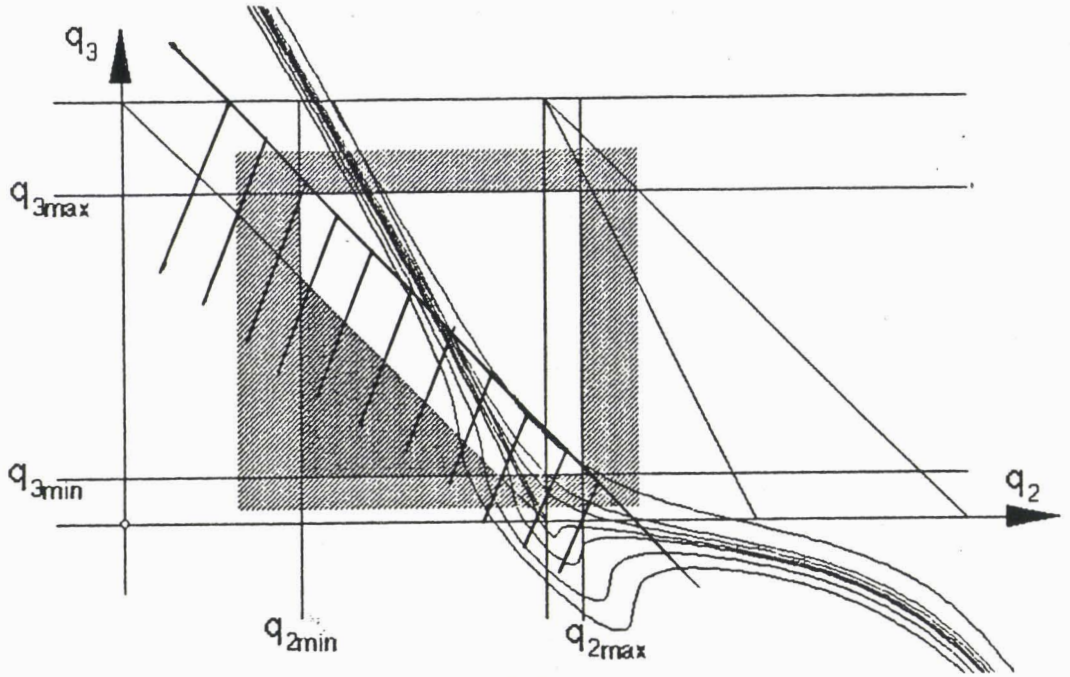


fig II.78

Dans ce cas, il se peut que pour certaines altitudes z, le domaine comporte des trous.

Une étude similaire à celle menée dans le cas où 0 < béta < pi/2 donne un graphe R = h(z) conforme à la figure II.79.

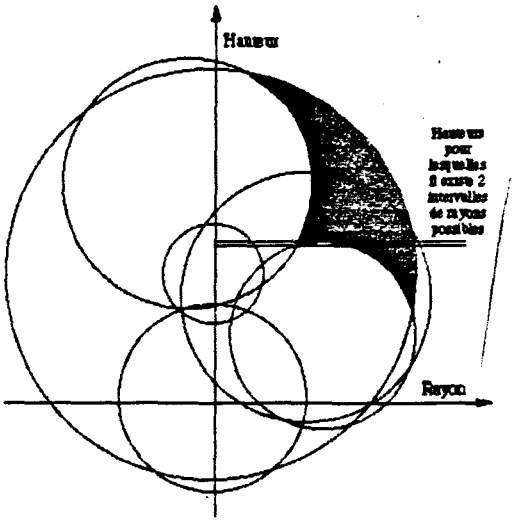


fig II.79

V.4 Exploitation et mise en oeuvre de l'approche

V.4.1 Implantation automatique de robots

Cette application est surtout très utile dans le cas où le volume du domaine d'implantation est très faible ou très découpé, lorsque les méthodes de discrétisation classiques exposées précédemment ne peuvent trouver d'implantation possible qu'au prix d'une discrétisation excessivement fine impliquant un trop grand nombre de calculs.

Nous appliquons notre méthode pour l'ensemble des poses constituant une tâche discrète comme la réalisation de points de soudure (figure II.80).

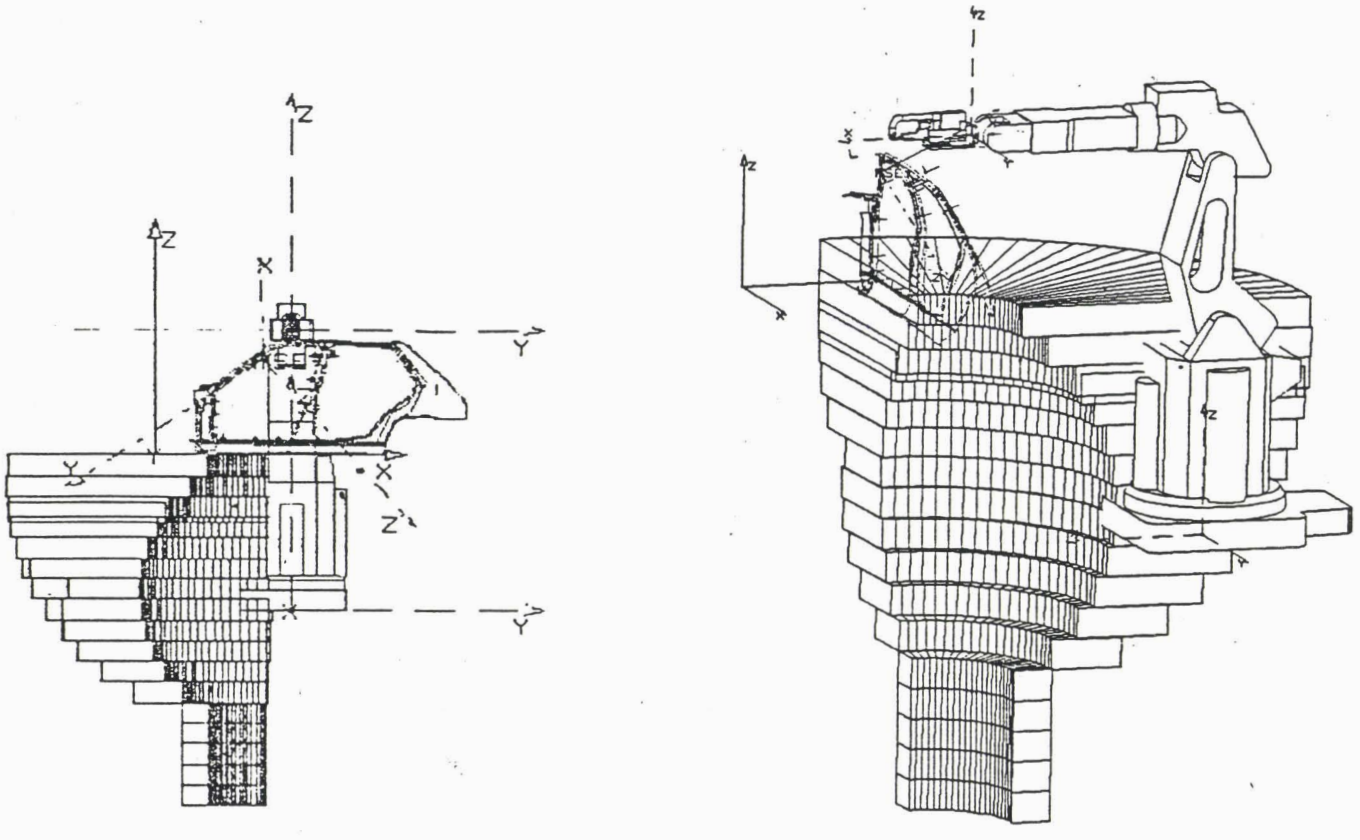


fig II.80

Le volume obtenu permet de visualiser la zone d'implantation possible pour un robot manipulateur donné, en tenant compte de l'orientation de la base de ce dernier (ceci n'est pas pénalisant en pratique). Le robot sera alors implanté à l'intérieur de ce domaine par le technicien (figure II.81).

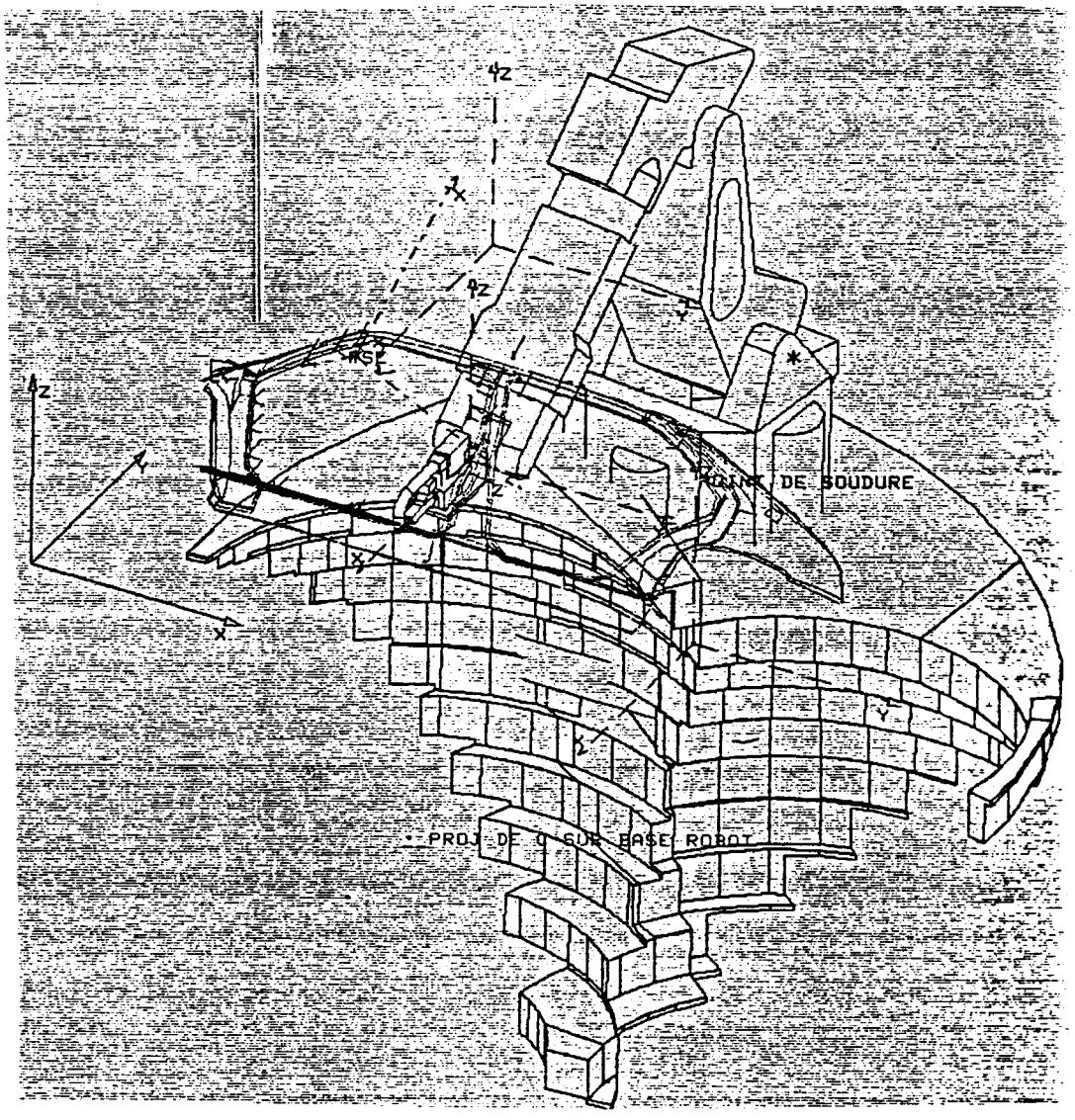


fig II.81

V.4.2 Etude d'accessibilité

Dans la suite de ce paragraphe, nous supposons disposer d'un robot manipulateur implanté et équipé de son organe terminal. Ce robot doit effectuer une gamme composée d'un certain nombre de poses. Chacune de ces poses est caractérisée par le quadruplet (r, z, thêta, béta).

Pour valider l'accessibilité d'une pose, il suffira de vérifier que chaque pose repérée par (r, z, thêta, béta) appartient à l'un des deux domaines étudiés au V.3.4 et rappelés figure II.82.

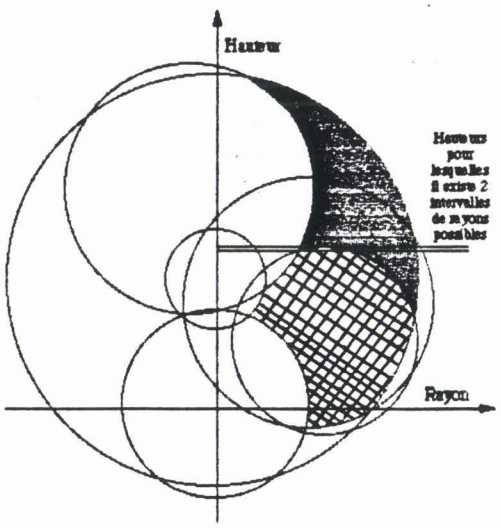


fig II.82

V.4.3 Intégration au sein de l'environnement SARTRE

V.4.3.1 Problématique

Sous SARTRE, le problème essentiel est celui de l'allocation dynamique de points de soudure à différentes ressources robots d'une ligne de production flexible existante.

Lors de cette affectation, il est nécessaire de s'assurer de l'accessibilité effective des différents points de soudure affectables à une ressource. A cet effet, plusieurs modifications de la ressource sont autorisées, de la réhausse de cale à la modification physique de l'implantation du robot.

Toutes ces opérations nécessitent la mise en oeuvre de routines testant:

* l'accessibilité d'un nouveau point à affecter à une ressource.
* l'existence d'une réhausse de pince permettant l'accessibilité des nouveaux et des anciens points de soudure affectables et déjà affectés à une ressource robot.

* l'existence d'une modification d'implantation robot autorisant l'accessibilité par ce dernier des nouveaux et anciens points de soudure affectables et déjà affectés.

Les routines classiques d'inversion de coordonnées couplées à un mécanisme de discrétisation d'espace permettent une première solution nécessairement lente du fait de l'explosion combinatoire engendrée. De plus ces méthodes ne permettent d'assurer l'inexistence d'une solution qu'après avoir balayé tout l'espace et peuvent éventuellement ignorer une solution du fait d'un choix de pas de discrétisation trop important. La première version de SARTRE utilise ce type d'approche mais nous allons voir que l'implémentation de l'approche détaillée dans ce chapitre permet de s'affranchir des problèmes inhérents à la méthode discrète au prix d'une étude en partie spécifique à la morphologie du manipulateur utilisé.

V.4.3.2 Accessibilité robot

Le problème de l'accessibilité robot se pose lorsqu'un nouveau point est en passe d'être alloué à une ressource robot. Le test d'accessibilité peut bien entendu se faire à l'aide des routines d'inversion de coordonnées classiques mais nous pouvons également utiliser la méthode développée dans ce chapitre sous la forme exposée au V.4.2.

V.4.3.3 Paramétrage de la réhausse d'outil

Si l'on introduit une réhausse d'outil entre l'axe 6 de notre manipulateur et sa pince à souder, la pose repérée auparavant par (r, z, béta, thêta) sera repérée (r', z', béta', thêta) et si l'on utilise un paramétrage de réhausse d'outil conforme à la figure II.83, on aura:

$$z'-z = (l + h*tg(gamma)) \sin(béta)$$
$$r'-r = (z'-z) / tg(béta)$$
$$béta' = béta + gamma$$

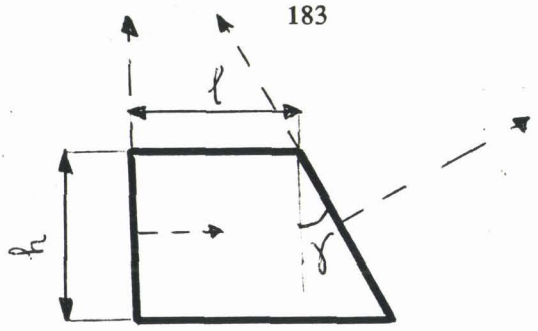


fig II.83

Ainsi, nos graphes représentant r' en fonction de z' pourront avec r' = r + (r' - r) et z' = z + (z' - z) attester de l'évolution de (r' - r) en fonction de (z' - z).

De cette manière, nous aurons pour chaque pose l'espace des réhausses d'outil possibles. Pour une gamme en cours de création, l'intersection des différents domaines attachés à chacune des poses donnera l'espace des réhausses d'outil final s'il existe.

V.4.3.4 Paramétrage de la base du manipulateur

Pour des raisons de coût associé aux modifications, on choisira dans un premier temps de ne faire varier que la hauteur de la base du robot puis, si cela n'est pas suffisant, de changer littéralement l'implantation de notre robot (manipulation beaucoup plus coûteuse).

Notons dz la différence d'altitude entre la base de notre manipulateur z' et le sol z dans un repère lié à la pose à atteindre.

$$z' = z - dz$$

Nous pouvons sur ces bases transformer nos graphes r = f(z') en r = g(dz) donnant ainsi les possibilités de variation de nos rayons en fonction de la modification de l' altitude de notre manipulateur.

Si l'on suppose que dans un premier temps nous ne nous autorisons qu'une modification d'altitude du robot manipulateur, nous aurons en portant sur nos graphes,

pour chaque pose repérée (r, z', béta, thêta) le rayon r, l'ensemble des possibilités de variation dz comme le montre la figure II.84.

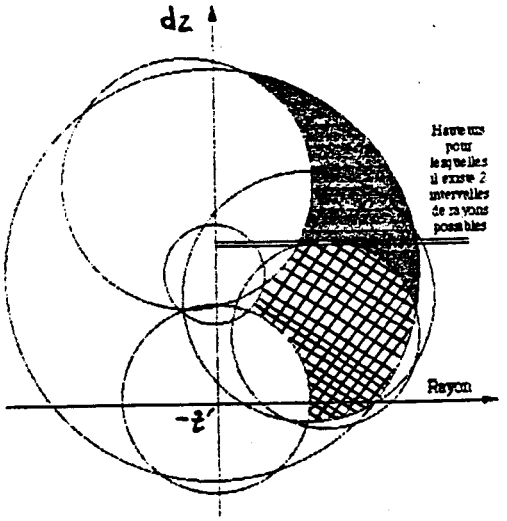


fig II.84

En ce qui concerne le paramétrage de notre manipulateur, la difficulté principale vient du fait que nous avons jusqu'à présent raisonné dans des repères liés aux poses à atteindre.

Le changement de repère est indiqué figure II.85.

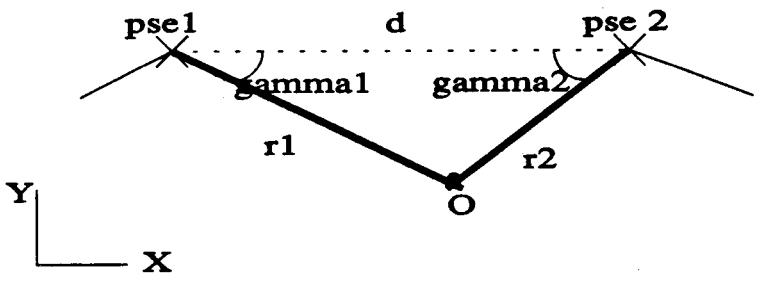


fig II.85

Sur cette figure, nous avons placé, en vue de dessus, deux points de soudure pse1, pse2 repérés par rapport à la base de notre robot O par les paramètres (r1, gamma1) et (r2, gamma2).

Ainsi, nous aurons:

r1 = f(r2, gamma2)
gamma1 = g(r2, gamma2)

Par là même, il sera possible d'étudier l'influence d'une variation de (r2, gamma2) sur (r1, gamma1) ce qui permettra d'ajuster la position de la base de notre robot dans la plan (X, Y).

V.5 Tentative de généralisation et perspectives

Tout au long de ce chapitre nous avons porté notre étude sur les robots industriels les plus usités dans le domaine de la soudure par points, les manipulateurs à porteur antropomorphes RRR et à poignet à trois axes concourants. Nous allons, dans ce paragraphe tenter une généralisation de notre approche.

Afin de dénombrer les différentes architectures de manipulateur possibles, on ne considère que deux paramètres: le type d'articulation (rotoïde, prismatique) et l'angle que font deux axes articulaires successifs (0°, 90°). Généralement, et sauf cas très particuliers (dernières articulations des robots BARNABE, CINCINNATI T3, KUKA IR600), les axes consécutifs sont soit parallèles, soit perpendiculaires. Le nombre de morphologies possibles se présente alors en fonction du nombre de degré de liberté sous la forme du tableau exposé figure II.86 /CHE 86/, /DEL 87/.

Nombre de degrés de liberté	Nombre de structures
2	8
3	36
4	168
5	776
6	3508

fig II.86

En fait, il existe synthétiquement 36 morphologies possibles de porteur, parmi lesquels 12 sont mathématiquement différentes et non redondantes /MIL 83/ et sont représentées figure II.87.

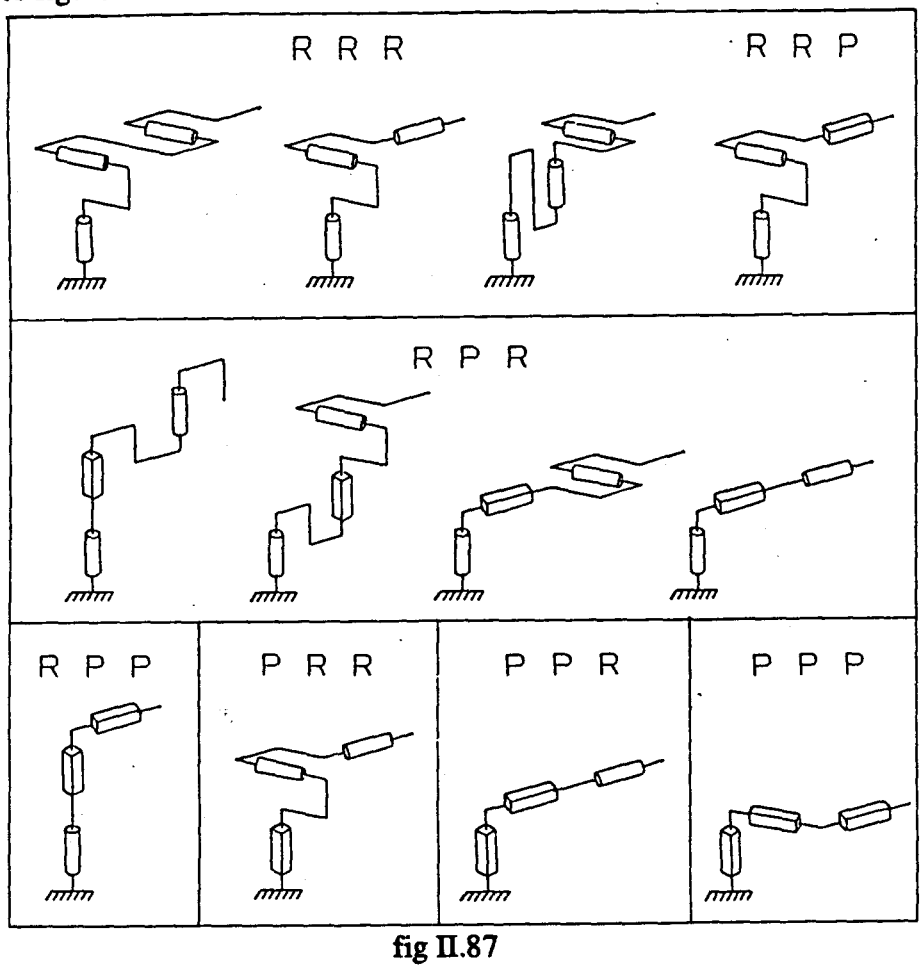


fig II.87

En pratique /LIE 79/, on ne trouve que les cinq structures suivantes:

- les porteurs antropomorphes (RRR) et plus précisément, la première structure de cette classe sur la figure II.87, comme par exemple les ACMA X58, ASEA (IRB6 et 60), KUKA ...

- les porteurs sphériques (RRP) comme les robots BARNABE, UNIMATION(1000, 2000, 4000) ...

- les porteurs toriques (RPR) correspondant à la première structure de cette classe sur la figure II.87, comme par exemple les ACMA H80, SCARA ...

- les porteurs cylindriques (RPP) comme les ACMA TH8, MANTEC(A, I et M)...

- les porteurs Cartésiens (PPP) comme les ACMA P80, OLIVETTI(SIGMA)...

Seuls les robots Cartésiens (PPP) posent problèmes pour notre méthodologie. En effet, les considérations de symétrie évoquées pour adopter le paramétrage en coordonnées cylindriques ayant pour origine le centre du poignet de notre manipulateur ne peuvent pas s'appliquer pour un porteur PPP; il faudra pour ce dernier adopter un paramétrage cartésien qui nécessite une étude particulière.

Ainsi, en ce qui concerne les différents porteurs, notre approche convient à la quasi totalité des structures.

En ce qui concerne les morphologies de poignet /DEL 87/ établit la classification détaillée figure II.88.

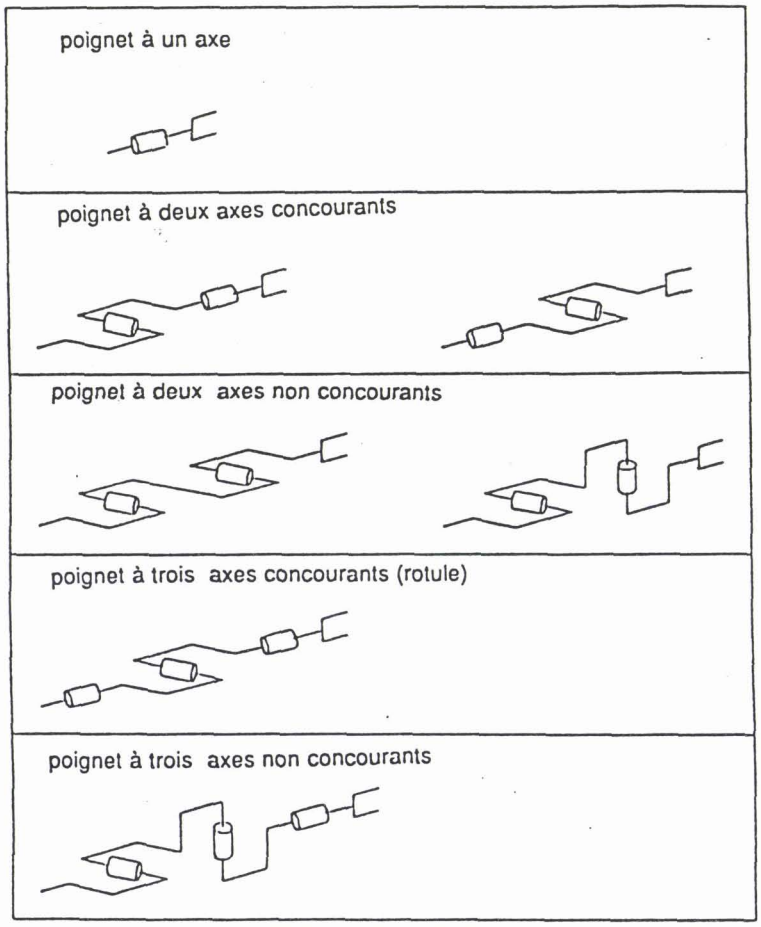


fig II.88

Seuls les poignets à axes non concourants posent problèmes et nécessitent une étude complémentaire qui reste à faire pour pouvoir se prononcer sur leur éventuelle intégration.

Néanmoins, la majorité des robots industriels en soudure par points est intégrable à notre démarche qui propose une solution aux principaux problèmes d'implantation de robots manipulateurs dans l'industrie manufacturière.

Conclusion

Nous avons détaillé tout au long de ce second chapitre, l'ensemble des développements qui constituent le système SARTRE.

Il représente un environnement apte à simuler une conception et une reconfiguration de ligne de production robotisée dans l'industrie automobile.

SARTRE intègre au sein d'un modèle orienté objet des outils de spécification, de modélisation et de gestion des connaissances statiques du domaine étudié ainsi qu'un planificateur basé sur un mécanisme à caractère générique appelé "le moteur" et chargé de proposer des solutions au problème d'allocation de ressources sous contraintes sous-jacent à toute étude de reconfiguration de lignes robotisées.

Les pseudo-gammes ainsi générées par ce niveau décisionnel seront validées à l'aide d'outils de C.A.O robotique classique, localement sur chacune des ressources. Les éventuelles incohérences ou incompatibilités détectées seront réintroduites dans le planificateur en tant que contraintes rétroactives et permettront de proposer de nouvelles pseudo-gammes plus valides.

De plus, notre approche nous a conduit à proposer une méthode de positionnement de robots industriels s'intégrant dans notre démarche et permettant de disposer d'un modèle de domaine d'implantation robot attaché à chacune des poses à atteindre qui soit commode à manipuler d'un point de vue algorithmique. Cette méthode est applicable sur tous les problèmes d'implantation automatique de robots manipulateurs, d'étude d'accessibilité et est en cours d'intégration dans SARTRE. Elle permettra très certainement de s'affranchir de certains problèmes de coûts de calcul lors de la recherche de solutions d'implantation qui pour l'instant sont traités à l'aide d'un algorithme de discrétisation qui peut être déclenché (dans le cas le plus défavorable) à chaque cycle de planification, lors des étapes de choix de ressources et de paramétrages.

APPLICATION A UN EXEMPLE INDUSTRIEL ENSEIGNEMENTS ET PERSPECTIVES

Introduction

Nous présentons dans cette partie, un exemple d'utilisation de SARTRE dans le cas de la reconfiguration d'une ligne d'assemblage robotisée en soudage par points du groupe P.S.A.

Les connaissances statiques concernant les moyens de production mis en oeuvre constituent des données réelles extraites des bases de données des services Méthodes. Quant aux connaissances statiques, ayant trait aux véhicules, elles proviennent des bases de données des services Etudes.

Ce troisième et dernier chapitre de notre rapport comporte cinq volets:

- En I, après un bref rappel concernant le développement d'une application à l'aide de techniques d'Intelligence artificielle, on tente de situer l'état de nos développements au sein d'une démarche méthodologique.

- Dans le volet II on examinera en détails la ligne de production cible de notre système ainsi que les produits à fabriquer.

- Le troisième volet rend compte de l'application de la démarche de spécification sur notre exemple.

- La partie IV, traite de la mise en oeuvre de notre planificateur et des résultats obtenus sur le cas de figure spécifié précédemment.

- Enfin en V, on tente de tirer un certain nombre d'enseignements du test réalisé "in situ", donnant matière à l'exposé de futures évolutions de notre prototype.

I Cycle de vie et validation

La mise en oeuvre de techniques d'intelligence artificielle amène le concepteur à adopter une démarche méthodologique de développement organisée en quatre étapes /DOM 88b/ (figure III.1):

- Elaboration d'un présystème:

Le présystème va permettre d'effectuer les choix techniques; il ne traite qu'une partie du problème, fait abstraction des contraintes opérationnelles et ne fait en aucun cas appel à des investissements spécifiques du fait même de son caractère probatoire. Après avoir fait la preuve de l'intérêt d'une approche symbolique, le présystème ne sera plus utilisé.

- Elaboration d'un prototype:

L'ensemble du problème est réidentifié et les concepts et le formalisme retenu sont redéfinis pour donner naissance à un modèle propre.

- Evolution vers un démonstrateur avancé:

Cette évolution s'effectue par enrichissement incrémental du prototype à la vue des tests.

- Système final:

Il est issu du démonstrateur avancé, de l'étude et la mise au point des différentes interfaces permettant une intégration du système dans son environnement ainsi qu'une adaptation à l'utilisateur.

En ce qui concerne SARTRE, nous en sommes actuellement au stade du démonstrateur avancé appelé à évoluer en fonction des différents tests de validation que nous lui ferons subir. Notons que les aspects d'interfaçage et d'intégration ont été développés avec notamment la mise en place d'une interface utilisateur conviviale ainsi que la mise en place d'une gestion persistante des connaissances statiques du domaine étudié.

C'est le déroulement d'un des tests de validation que nous proposons de décrire dans cette partie, non sans avoir au préalable défini le cas cible retenu.

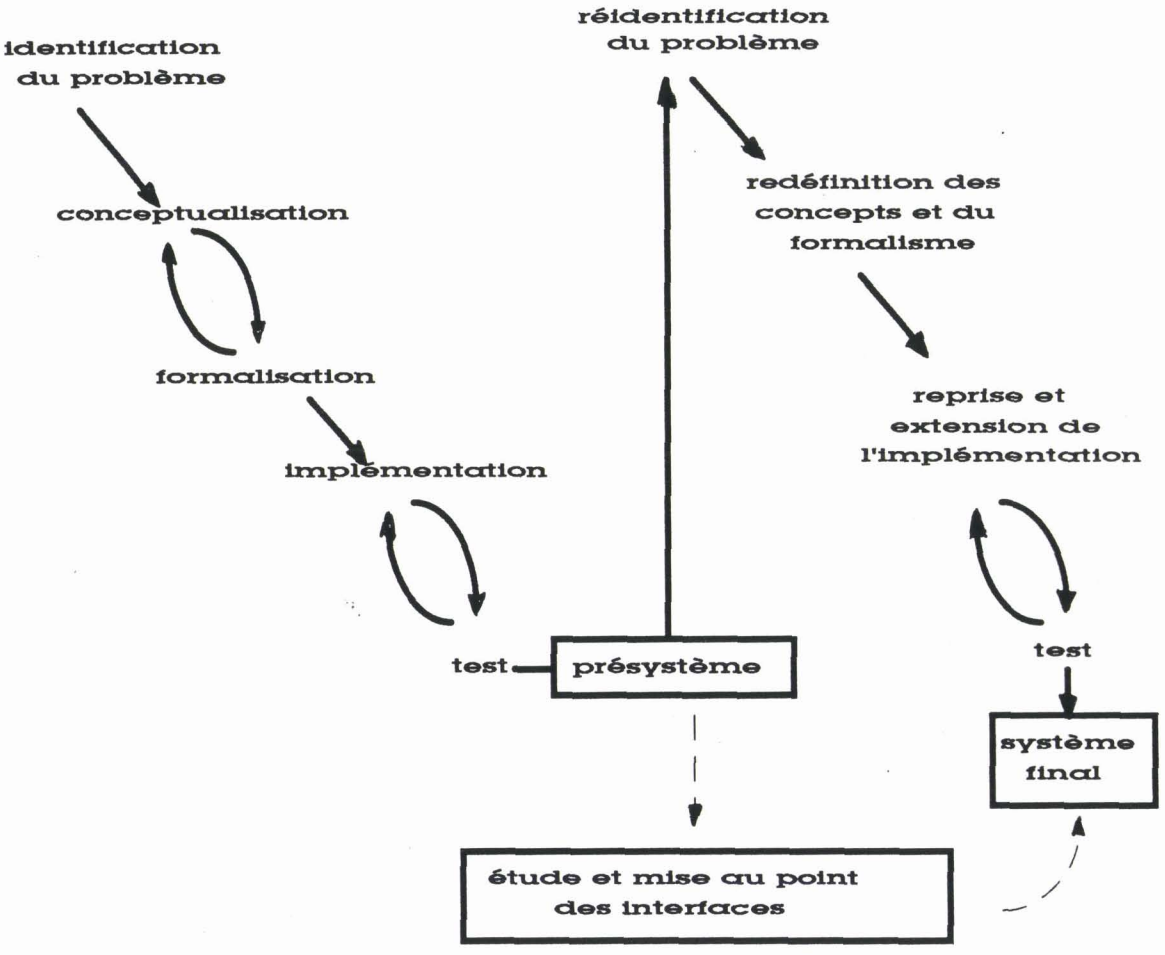


fig III.1

II Présentation de la ligne et des produits

II.1 Description de la ligne

La ligne de production servant de support à nos tests est implantée sur une des usines du groupe P.S.A et est agencée classiquement en arborescence de zones.

Elle comprend cinq zones principales (figure III.2):

- Plateforme.
- Bloc avant.
- Coté de caisse.
- Soubassement.
- Armature.

La zone plateforme comprend 19 robots dont:

- 8 robots ACMA X58.
- 6 robots BARNABE.
- 2 robots ACMA H48.
- 1 robot ADV.
- 2 robots ACMA X58 G0.

La zone bloc-avant comprend également 19 robots dont:

- 16 robots ACMA X58.
- 2 robots ACMA H48.
- 1 robot ADV.

La zone coté-de-caisse comprend 2x13 robots dont:

- 2x7 robots ACMA X58.
- 2x4 robots ADV.
- 2x2 ACMA X58 G0.

La zone soubassement comprend 18 robots dont:

- 10 robots ACMA X58.
- 3 robots ACMA H48.
- 4 robots ADV.
- 1 robot Portique.

La zone armature comprend 34 robots dont:

- 18 robots ACMA X58.
- 3 robots ACMA H48.
- 6 robots ADV.
- 4 robots ACMA X58 G0.
- 3 robots portique.

C'est sur cette dernière zone que nous avons effectué notre validation. Parmi ces 34 robots, 16 sont des robots de reprise; il s'agit des paires:

- (R97, R98).
- (R105, R106).
- (R107,R108).
- (R109, R110).
- (R111, R112).
- (R113, R114).
- (R153, R154).
- (R155, R156).

Ces robots étant disposés, pour la plupart, symétriquement par rapport au sous-ensemble à assembler, nous nous limiterons à une moitié de zone constituée par le sous-ensemble des robots pairs {R98, R106, R108, R110, R112, R114, R154, R156}.

Ces 8 robots sont équipés de la manière suivante:

- R98 : pince Ciseau.
- R106: pince en Cé.
- R108: pince Ciseau.
- R110: pince en Cé.
- R112: pince Ciseau.
- R114: pince Ciseau.

- R154: pince Ciseau.
- R156: pince en Cé.

La pince Ciseau étant la plus complexe, de par la mobilité de ces bras, nous avons lancé notre simulation sur le sous-ensemble des robots équipés de pince Ciseau {R98, R108, R112, R114, R154}.

Pour ces différentes ressources, nous disposions de l'ensemble des paramètres d'implantation et d'outils nécessaires pour mener à bien notre test.

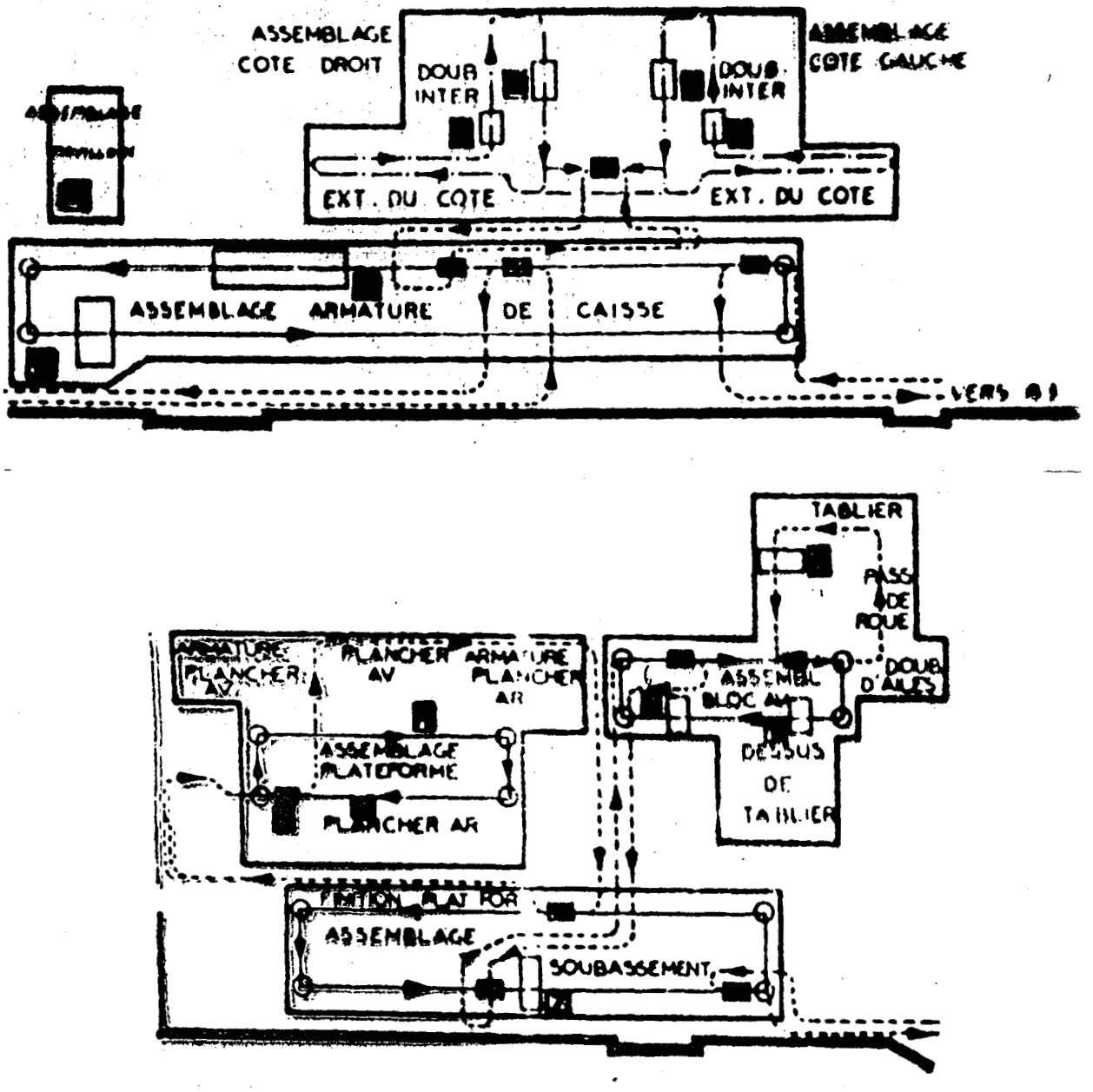


fig III.2

II.2 Les produits

Nous disposons pour notre validation du modèle C.A.O d'une demie caisse de véhicule comprenant l'ensemble des points de soudure à réaliser ainsi que les différentes sections associées (figures III.3, III.4, III.5).

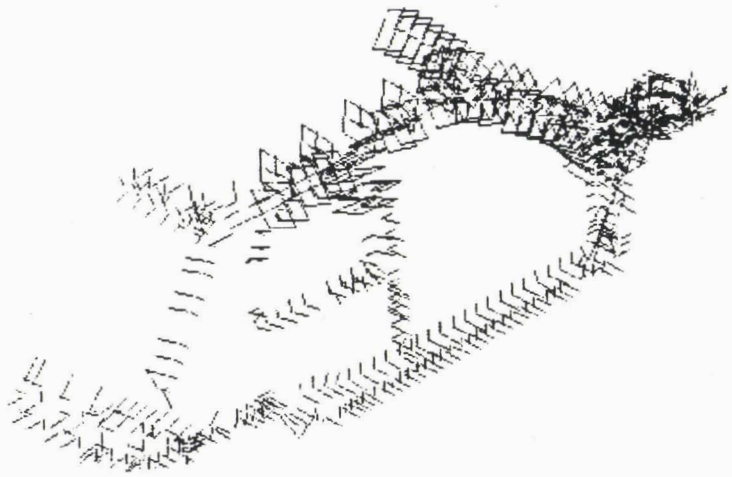


fig III.3

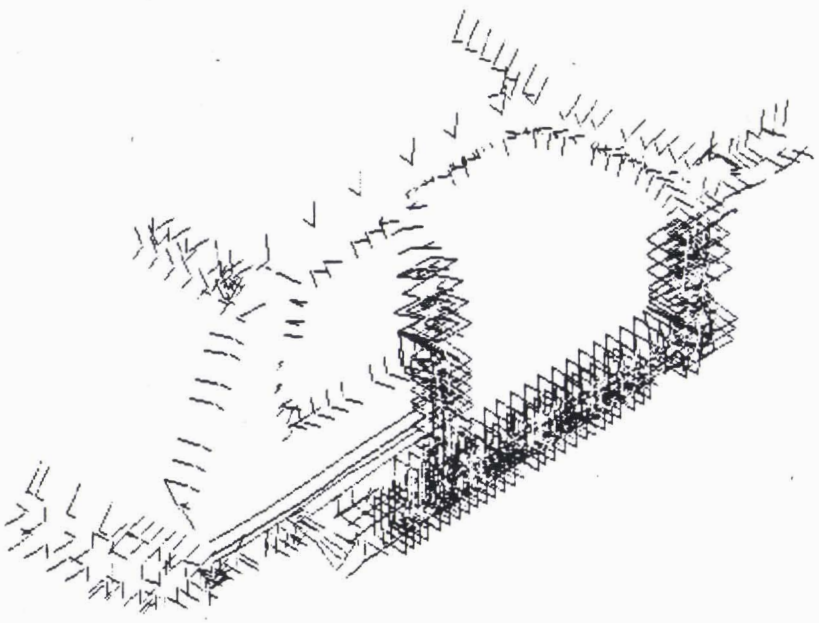


fig III.4

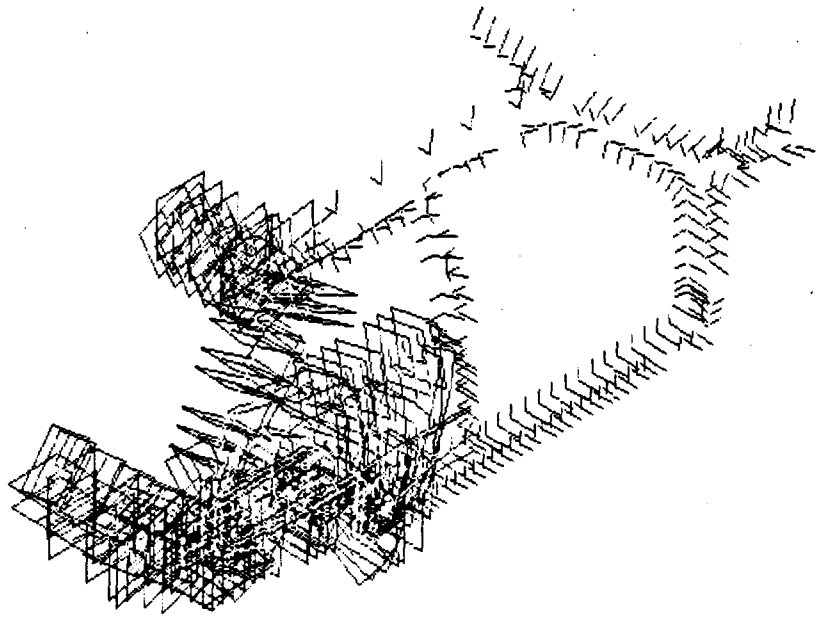


fig III.5

Après épuration, nous disposons d'un ensemble de points de soudure à répartir sur nos cinq ressources (figure III.6).

pts

p6314 p6312 p6310 p6308 p6306 p6302
p6300 p6298 p6296 p6294 p6292 p6290
p6288 p6286 p6284 p6282 p6280 p6268
p6266 p6264 p6252 p6250 p6246 p6244
p6242 p6232 p6226 p6224 p6222 p6220
p6218 p6216 p6214 p6212 p6210 p6208
p6206 p6204 p6202 p6200 p6196 p6194
p6192 p6190 p6176 p6172 p6170 p6168
p6166 p6164 p6142 p6140 p6138 p6136
p6134 p6132 p6130 p6128 p6126 p6124
p6122 p6120 p6118 p6116 p6114 p6112
p6110 p6108 p6106 p6100 p6098 p6092
p6090 p6088 p6080 p6034 p6030 p5992
p5982 p5980 p5978 p5974 p5972 p5970
p5968 p5966 p5914 p5912 p5910 p5908
p5906 p5904 p5886 p5880 p5878 p5876
p5874 p5866 p5810 p5808 p5806 p5756
p5754 p5752 p5750 p4086 p4084 p4080
p4078 p4076 p4058 p4056 p4042 p4040
p4038 p4034 p4032 p4030 p4026 p4024
p4022 p4020 p4018 p4014 p3954 p3952
p3950 p3946 p3944 p3942 p3940 p3936
p3934 p3932 p3930 p3928 p3922 p3920
p3882 p3830 p3826 p3824 p3798 p3796
p3794 p3792 p3788 p3786 p3784 p3782
p3780 p3778 p3774 p3768 p3766 p3762
p3760 p3758 p3756 p3754 p3752 p3750

fig III.6

III Modélisation et spécification

L'étape de spécification comporte deux phases:

- Une phase de spécification ligne.
- Une phase de spécification véhicule.

III.1 Spécification ligne

Il s'agit là de spécifier l'ensemble des connaissances statiques relatives aux différents moyens de production constituant la zône armature de caisse de la ligne d'assemblage robotisée considérée.

Cette opération peut s'effectuer de deux manières différentes:

- En mode interactif grâce à l'utilisation du menu "spécification ligne" de la page d'accueil de SARTRE.
- En automatique par exploitation d'un fichier de données.

Pour ce test, nous avons retenu la seconde solution. La démarche est synthétisée figure III.7.

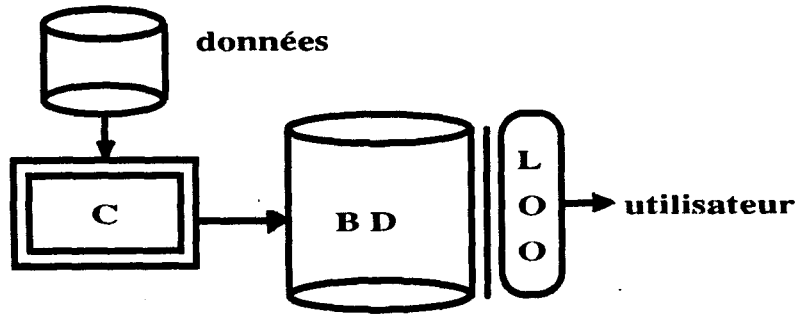


fig III.7

BU LILLE

Après avoir chargé dans notre base de données, sous ORACLE, l'ensemble des données présentes dans le fichier d'entrée, nous pouvons y accéder sous SARTRE par l'intermédiaire du lien couche objet / SGBD.

III.2 Spécification véhicule

Elle s'effectue en deux temps:

- Extraction des paramètres de sections: a partir du modèle C.A.O du véhicule, nous exportons l'ensemble des points de soudure ainsi que les différents paramètres de sections qui y sont liés, de façon interactive.

- Renseignement de la base de données SARTRE: le fichier de paramètres sections ainsi créé va permettre à l'aide de l'article CAOBD du menu UTILITAIRES de la page d'accueil de SARTRE, d'alimenter le modèle de données implémenté sous ORACLE. Les différentes instances de points de soudure seront générées et la consultation de la base donnera le résultat de la figure III.8.

L'ensemble des données statiques du problème sont maintenant spécifiées et modélisées sous SARTRE sous la forme d'un double modèle orienté objet et orienté données.

Tout est à présent correct pour le lancement de la simulation que nous allons maintenant détailler.

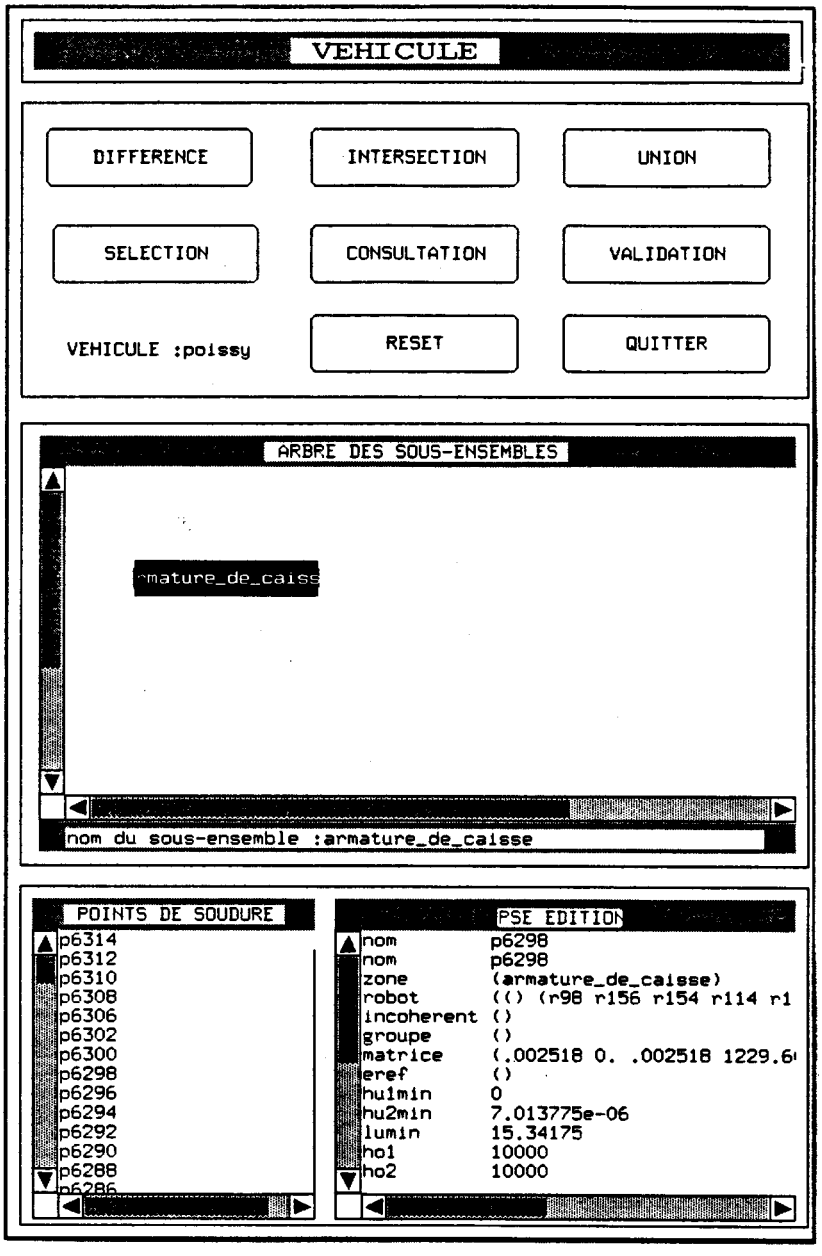

VEHICULE
DIFFERENCE
INTERSECTION
UNION
SELECTION
CONSULTATION
VALIDATION
VEHICULE :poissy
RESET
QUITTER
ARBRE DES SOUS-ENSEMBLES
rmature_de_caiss
nom du sous-ensemble :armature_de_caisse
POINTS DE SOUDURE
p6314
p6312
p6310
p6308
p6306
p6302
p6300
p6298
p6296
p6294
p6292
p6290
p6288
p6286
PSE EDITION
nom p6298
nom p6298
zone (armature_de_caisse)
robot (() (r98 r156 r154 r114 r1
incoherent ()
groupe ()
matrice (.002518 0. .002518 1229.6
eref ()
hu1min 0
hu2min 7.013775e-06
lumin 15.34175
ho1 10000
ho2 10000

fig III.8

IV La simulation sous SARTRE

IV.1 Généralités

Compte tenu des données qui nous ont été fournies, nous envisagerons dans la suite de cet exposé de traiter le cas de la simulation de l'introduction d'un second véhicule sur une ligne existante depuis le début de la démarche jusqu'à l'étape de création des pseudo-gammes (figure III.9) et cela sur la zone armature de caisse du système de production.

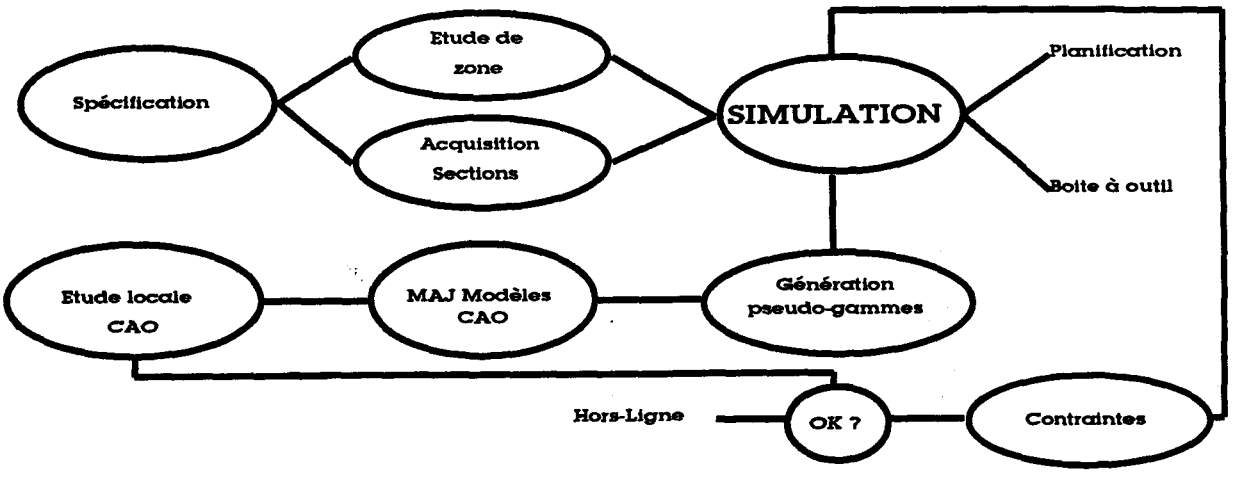


fig III.10

Ce test aura pour objectif majeur la vérification du bon fonctionnement de notre moteur, la validation des différentes règles heuristiques de planification ainsi que leur enrichissement.

Il sera à compléter par l'étape de validation C.A.O locale qui permettra de faire évoluer les pseudo-gammes générées vers de véritables gammes et de révéler d'éventuelles impossibilités qui seront prise en compte dans une phase de rétroaction en tant que contraintes de planification.

IV.2 Introduction d'un véhicule et reconfiguration de ligne préexistante

Les figures III.11 et III.12 rappellent les principes de fonctionnement de notre planificateur et de notre moteur.

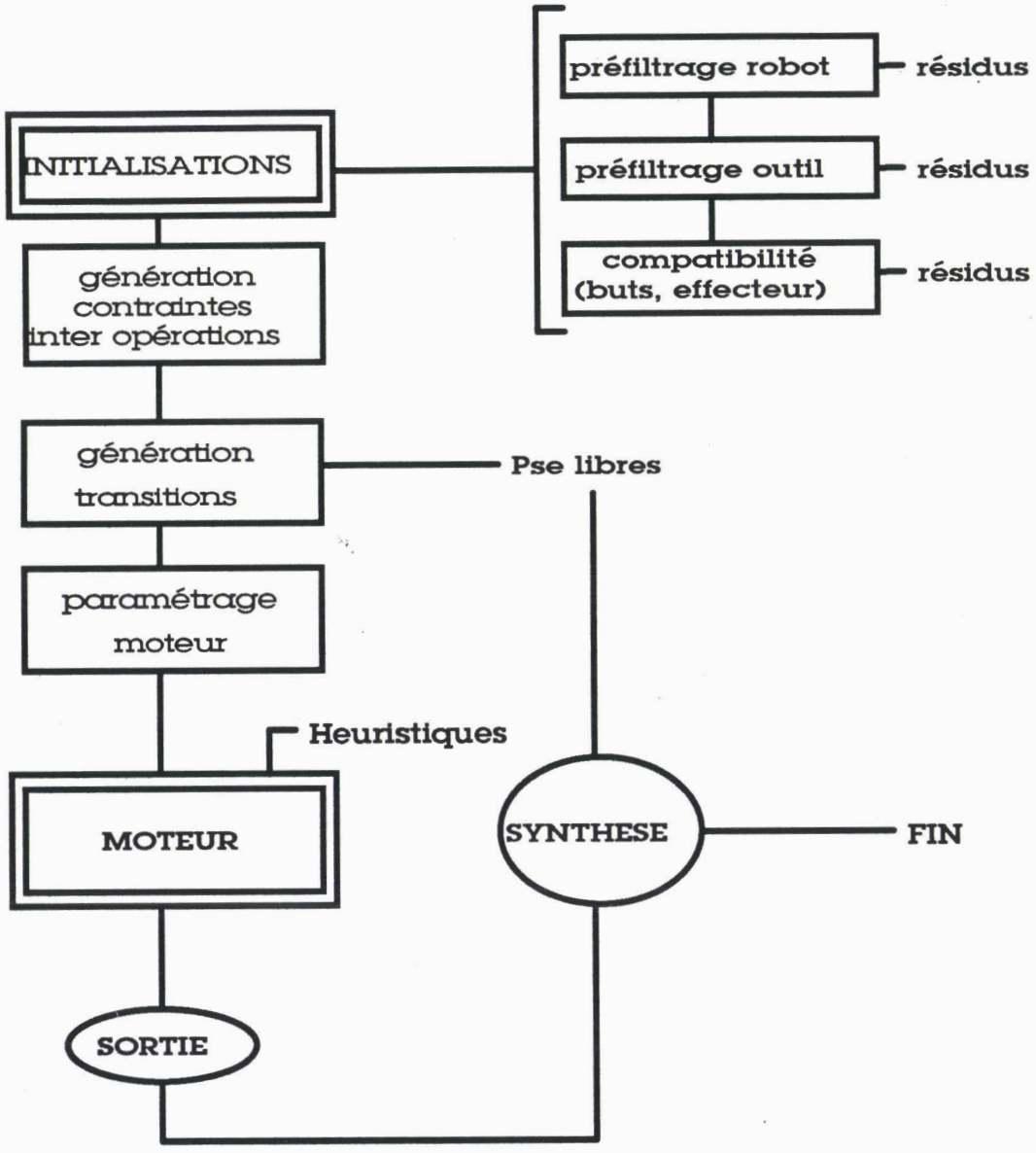


fig III.11

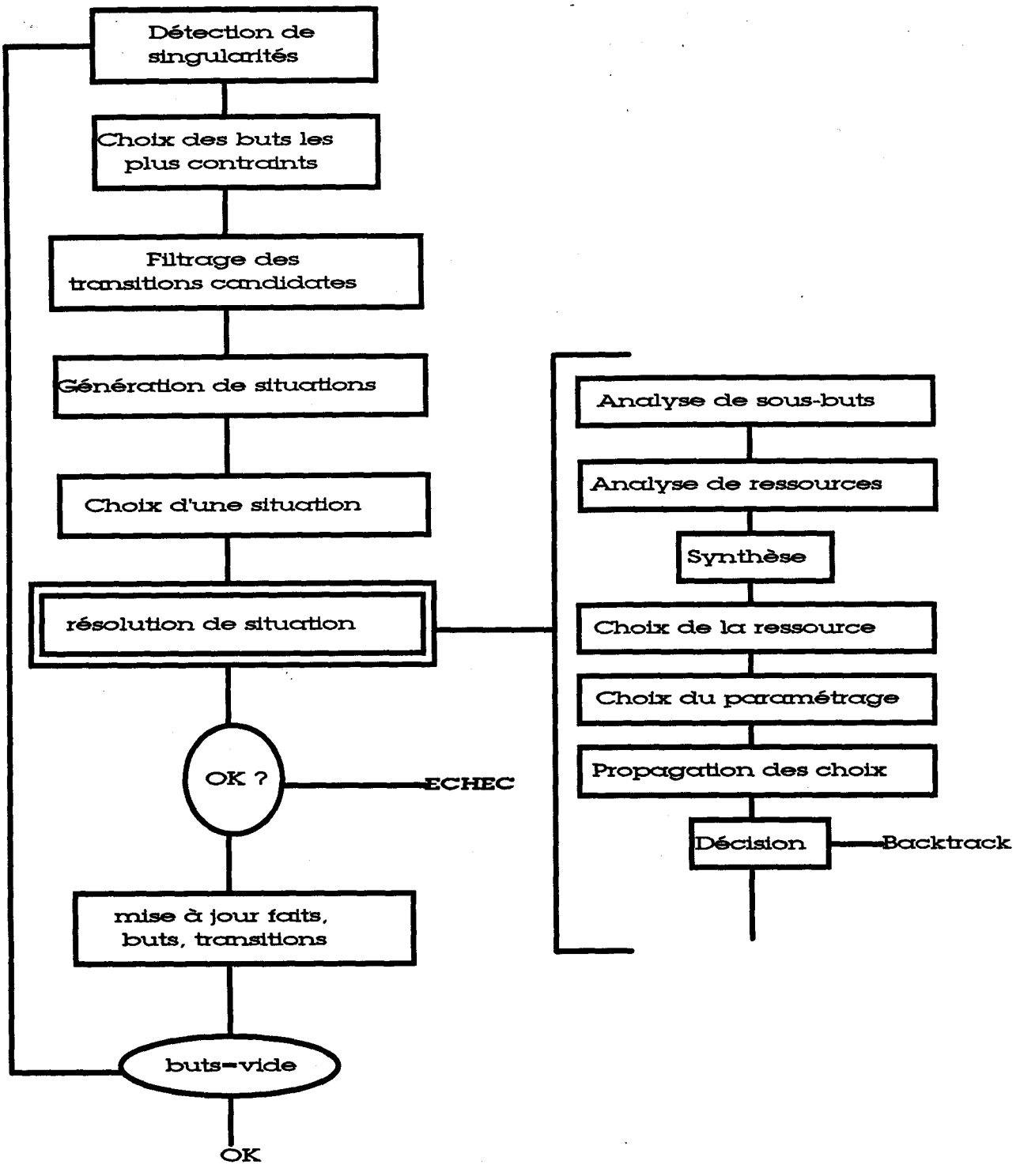


fig III.12

Au lancement de la simulation (figure III.13), SARTRE nous renseigne sur un cas de concurrence fatale détecté lors de la phase de détection de singularités (figure III.12).

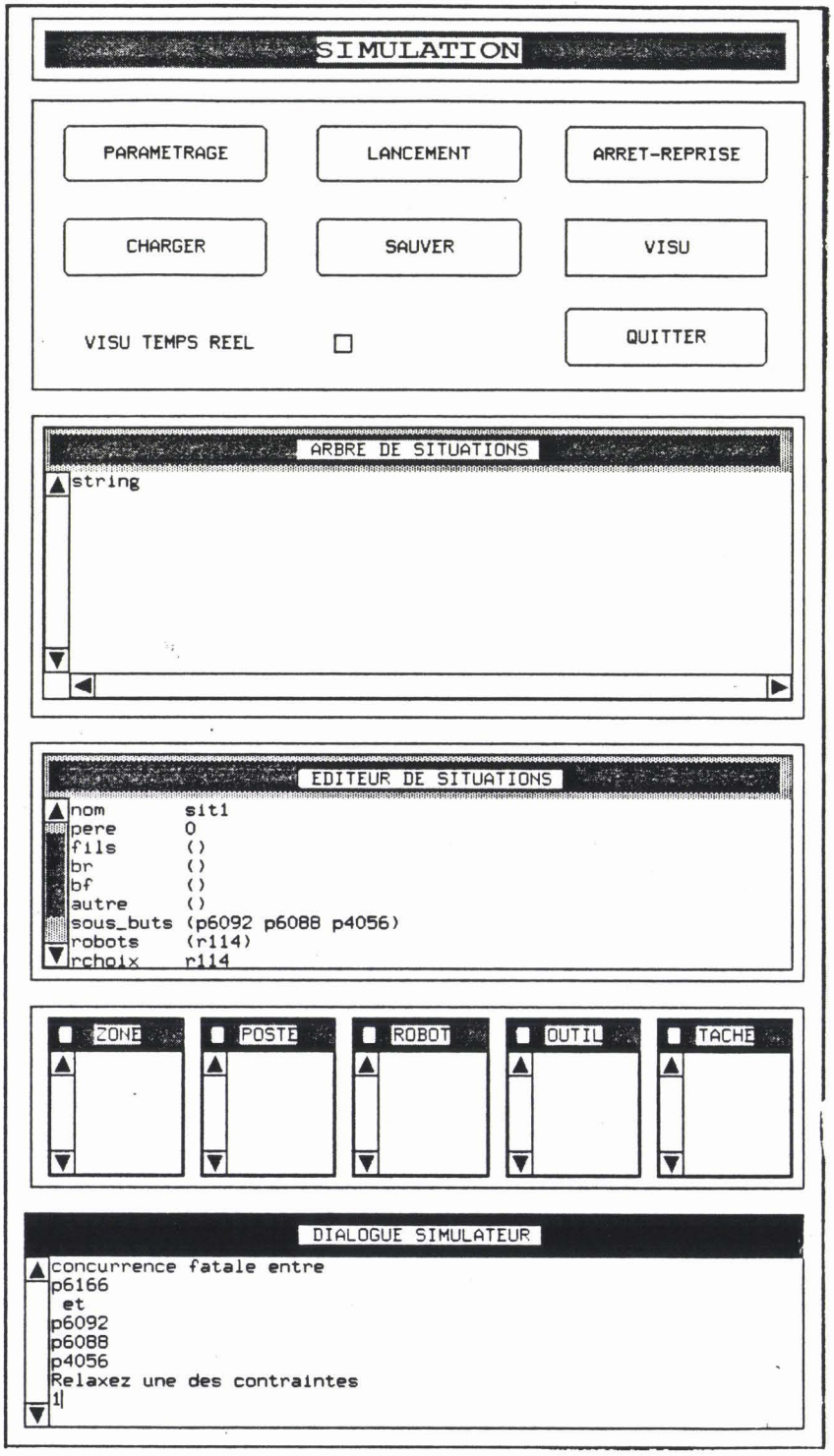

SIMULATION
PARAMETRAGE
LANCEMENT
ARRET-REPRISE
CHARGER
SAUVER
VISU
VISU TEMPS REEL
QUITTER
ARBRE DE SITUATIONS
string
EDITEUR DE SITUATIONS
nom sit1
pere 0
fils ()
br ()
bf ()
autre ()
sous_buts (p6092 p6088 p4056)
robots (r114)
rchoix r114
ZONE
POSTE
ROBOT
OUTIL
TACHE
DIALOGUE SIMULATEUR
concurrence fatale entre
p6166
et
p6092
p6088
p4056
Relaxez une des contraintes
1

fig III.13

En effet, (p6166) et (p6092 p6088 p4056) ne sont réalisables que sur une seule ressource mais suivant des classes de réglages distinctes. Il conviendra donc de décider de supprimer de la liste des buts l'une ou l'autre de ces deux listes sous peine de bouclage du moteur.

Nous déciderons de supprimer la liste la plus petite qui est la liste 1.

Notre planificateur poursuit sa tâche et "rend la main"; l'allocation est alors terminée et nous pouvons aller observer les résultats de la planification à l'aide du sous-menu gamme du menu utilitaires.

Les figures III.14, III.15, III.16, III.17, III.18 et représentent l'état des pseudo-gammes de chacune de nos 5 ressources robots équipées de pince Ciseau.

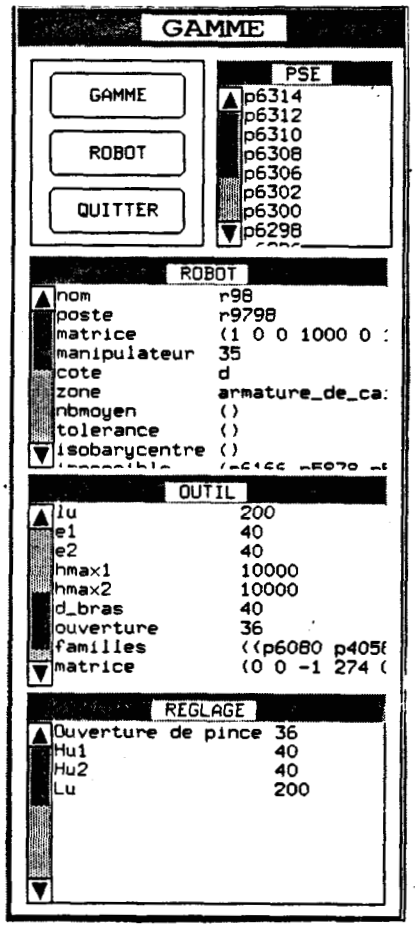


fig III.14

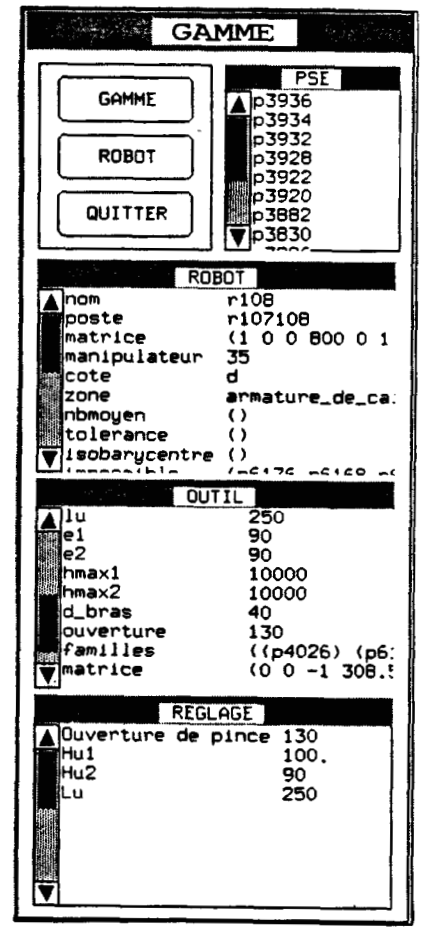


fig III.15

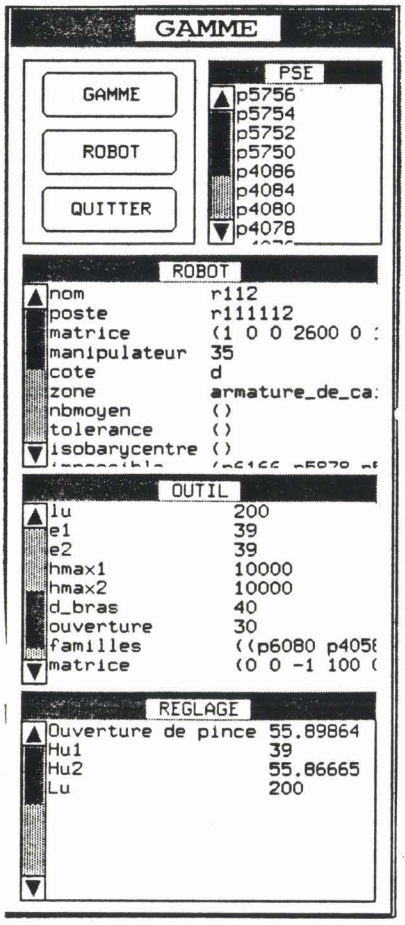


fig III.16

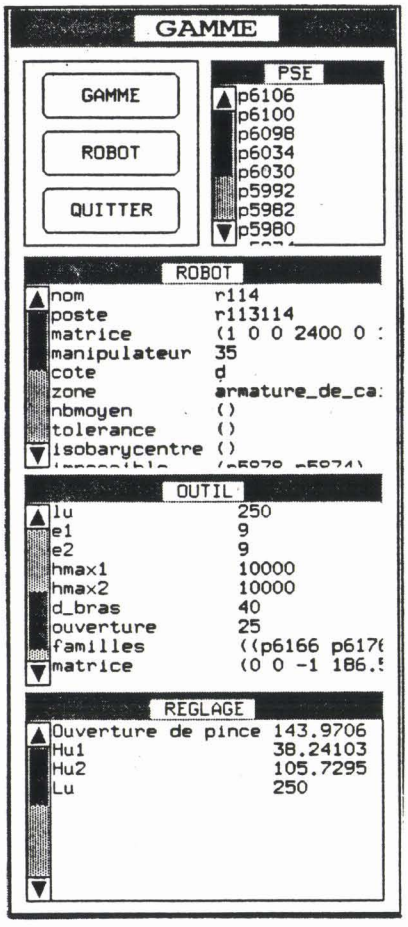


fig III.17

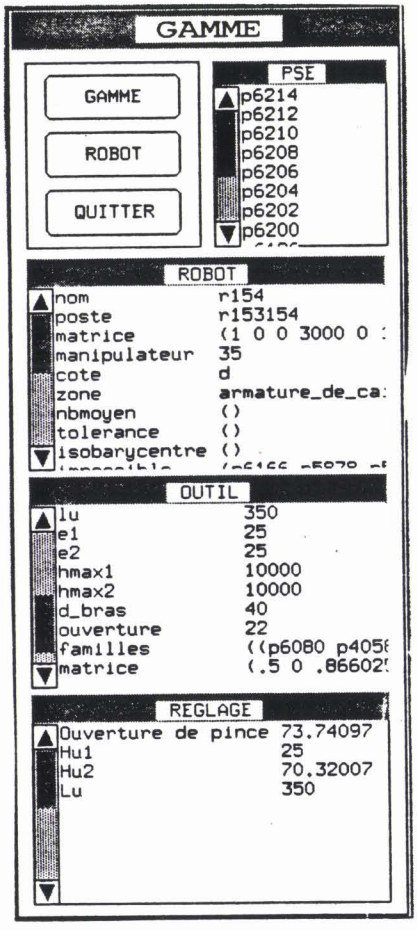


fig III.18

Nous observons sur chacune des figures, un certain nombre de fenêtres; la fenêtre PSE, contient l'ensemble des points de soudure de la pseudo-gamme résultat de la planification. Les fenêtres ROBOT et OUTIL nous renseignent sur l'état des ressources avant le lancement de la simulation. Quant à la fenêtre REGLAGE, elle rend compte des différents réglages effectués sur chaque ressource en cours de simulation et donne ainsi les nouveaux paramétrages des moyens de production de la ligne.

Les résultats complets de la simulation sont consultables en annexe.

V Enseignements et perspectives

L'exemple de simulation que nous avons présenté nous amène à formuler les remarques suivantes:

- Ce test a été effectué sur la première version de SARTRE, dans laquelle le planificateur n'assure l'équilibrage de gammes qu'au sens du nombre de points de soudure par pseudo-gammes.

- La seconde version de SARTRE, en fin de développement, permettra de prendre en compte l'ensemble des règles heuristiques détaillées au IV.5 du chapitre II. Nous obtiendrons ainsi une répartition beaucoup plus fine, fruit d'une mise en oeuvre d'heuristiques liées notamment à la notion de groupage de points définies au IV.5.

- Les résultats obtenus montrent que sur le véhicule dont nous disposions, les problèmes essentiels étaient des problèmes locaux dûs essentiellement aux paramétrages outils. En effet, aucune implantation robot n'a été modifiée, facilitant par la même la convergence de notre planification. Ainsi, un second test sera nécessaire avec d'autres types de véhicules ou en modifiant artificiellement l'implantation de certains robots, de manière à valider les routines d'existence de paramétrage de réhausse d'outils et d'implantation robot ainsi que leur agencement au sein des différentes heuristiques de planification.

- Ce second test, permettra également d'affiner les diverses heuristiques mises en jeu dans notre moteur lors des étapes de "choix de ressource" et "choix de paramétrage".

- Malgré tout, les routines de génération de contraintes ainsi que le mécanisme de notre moteur ont été testés avec succès.

- Enfin, pour une validation totale, il conviendra, à partir des pseudo-gammes, de générer les différents modèles C.A.O des postes robotisés pour la mise en place des points de passage ainsi que d'éventuels retours de contraintes qui permettront l'affinage des pseudo-gammes (figure III.19).

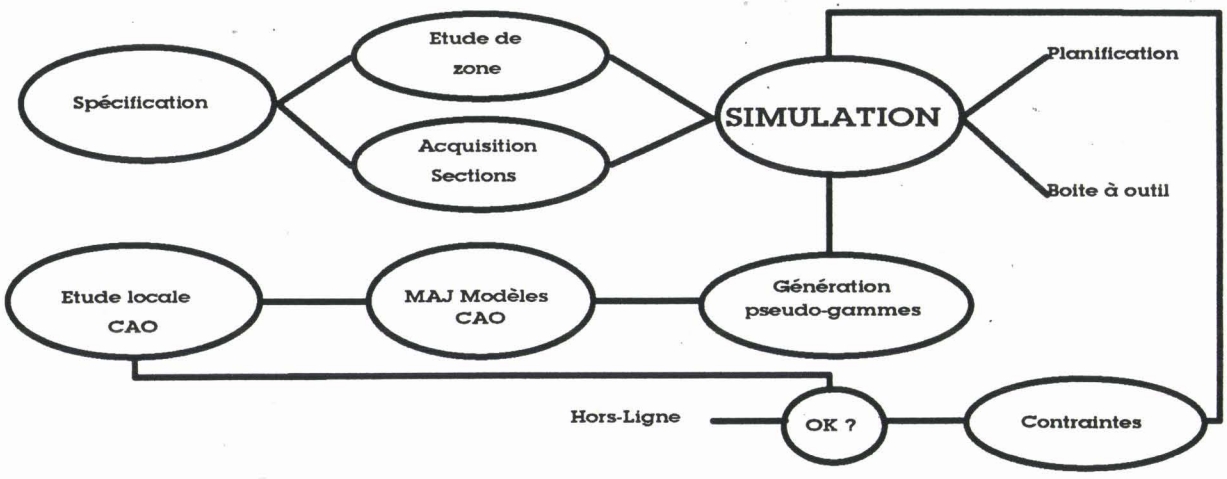

Spécification
Etude de zone
Acquisition Sections
SIMULATION
Planification
Boite à outil
Etude locale CAO
MAJ Modèles CAO
Génération pseudo-gammes
Hors-Ligne
OK ?
Contraintes

fig III.19

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un exemple d'utilisation du système SARTRE sur une application industrielle du groupe P.S.A.

Cet exemple consistait en l'étude de l'introduction d'un véhicule sur une ligne polyvalente robotisée existante.

Quantitativement, nous avons réalisé la répartition d'environ 160 points de soudure sur 5 ressources avec une moyenne de 32 points par robot, ce qui a donné lieu à la modification de trois outils robots.

Nous avons ainsi pu valider le mécanisme de notre moteur ainsi que les étapes de génération de contraintes.

Une seconde validation sera par la suite nécessaire sur un autre type de véhicule permettant de tester la seconde version de notre logiciel intégrant l'ensemble des règles heuristiques de planification ainsi que notre contribution au problème du positionnement des robots manipulateurs. Elle est actuellement en cours et concerne l'introduction d'un véhicule nouveau sur une ligne de production robotisée du groupe P.S.A en présence de gammes déjà existantes. Ce test constituera un cas réel de mise en oeuvre de SARTRE sur un véhicule devant effectivement être mis sur le marché dans quelques années.

Une fois les pseudo-gammes générées, il conviendra de les utiliser pour mettre à jour les différents modèles C.A.O des postes robotisés, donnant ainsi la possibilité aux préparateurs d'enrichir les pseudo-gammes, notamment par l'ajout des points de passage, permettant de valider nos gammes. Cette dernière étape n'a pu être menée dans le cadre de cette thèse, du fait du trop grand nombre d'intervenants nécessaires (un par poste), retenus par les impératifs du bureau des Méthodes.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons réalisé un prototype de poste de travail du roboticien pour l'étude, la simulation et le reconfiguration de lignes de production flexible dans l'industrie manufacturière.

Nous avons ainsi montré l'utilité d'un niveau décisionnel dans le cadre d'ensembles robotisés, complétant harmonieusement les systèmes de simulation C.A.O robotique locaux.

Notre outil est adapté aux besoins de l'industrie automobile en matière de simulation de lignes d'assemblage robotisées par soudage par points /YVA 90b/.

Il fournit un niveau de planification original, développé en Le-Lisp autour d'une couche orientée objet, permettant de préparer les différentes gammes robot qui seront validées en simulation C.A.O Robotique classique.

L'environnement fournit également des outils de spécification et de modélisation des connaissances statiques du domaine étudié, organisés autour d'une double architecture modèle orienté objet, modèle relationnel.

Enfin SARTRE peut également être utilisé sous la forme d'une boîte à outils pour la résolution de problèmes ponctuels, grâce à la mise à disposition d'utilitaires, apparaissant naturellement comme des retombées de l'étude que nous avons menée.

Les résultats obtenus lors des tests "in situ" sont encourageants; ils ont permis de valider le coeur de notre système, constitué par le mécanisme du moteur mis en oeuvre lors des planifications, et offrent d'importants champs prospectifs parmi lesquels:

- Enrichissement des heuristiques de planification, notamment dans la prise en compte du temps de gammes et de l'équilibrage de ligne.

- Elaboration d'un niveau de méta-planification, permettant de synchroniser les différentes planifications de zones.

- Intégration de notre approche concernant les problèmes d'étude d'implantation robot.

- Amélioration de la convivialité de l'application selon une expression de besoins utilisateurs.

- Amélioration des liens avec les systèmes C.A.O robotique existants, ce qui permettra de faire un pas de plus dans l'intégration, dans l'attente d'architectures matérielles plus performantes et de systèmes de C.A.O robotique plus ouverts.

- Industrialisation du prototype.

BIBLIOGRAPHIE

/AID 89/ "AIDA: Manuel d'utilisation"
Ilog, 1989

/AND 85/ G. Andre, R.Boulic
"Système graphique et capteurs proximétriques pour la programmation de robots"
Proceedings of MICAD, 1985, pp.185-191.

/ASQ 89/ "ASQUELL: Manuel d'utilisation"
Ilog, 1989

/AUM 87/ M. Aumiaux, G. Rodde
"Automatiser la production"
Editions Masson 1987.

/BAR 81/ A. Barr, E.A. Feigenbaum
"The handbook of Artificial Intelligence, Vol 1"
Heuristech Press-William Kaufman, Inc (Standford, Los Altos), 1981.

/BEL 82/ G. Bel, J.B. Cavaillé, D. Dubois
"Outils de conception d'ateliers flexibles d'usinage"
RGE, Novembre 1982, pp.742-748.

/BEL 85/ G. Bel, M. Berrada, M. Corrège, D. Dubois
"Simulisp: un banc d'essai des systèmes experts pour la commande des ateliers de production"
Congrès Afcet Automatique, Toulouse, 1985, pp.463-475.

/BEN 87/ E. Bensana
"Utilisation des techniques d'intelligence artificielle pour l'ordonnancement d'atelier"
Thèse de Doctorat de l'ENSAE, Toulouse, Novembre 1987.

/BEZ 87/ P. Bezier
"Courbes et surfaces, Mathématiques et CAO, Vol 4"
Editions Hermès, 1987.

/BEZ 89/ Beziat
"Optimisation d'implantation de lignes de fabrication"
Actes de MICAD, Paris 1990.

/BON 87/ R. Bonetto
"Les ateliers flexibles de production"
Editions Hermes, Paris 1987.

/BON 88/ E. Bonomi, J-L. Lutton
"Le recuit simulé"
Revue "Pour la science", n°129, juillet 1988.

/BOR 86/ P.Borrel
"Contribution à la modélisation géométrique des robots manipulateurs. Apllication à la Conception Assistée par Ordinateur"
Thèse d'Etat, USTL Montpellier, 1986.

/BOU 86/ R. Boulic
"Conception assistée par ordinateur de boucles de commande avec capteurs en robotique et téléopération"
Thèse de Docteur-Ingénieur, I.R.I.S.A, Novembre 1986.

/BOU 87/ J.P. Bourey
"Structuration de la partie procédurale du système de commande de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière"
Thèse de Doctorat de l'Université de Lille Flandres Artois, 15 Décembre 1987.

/BRA 83a/ G.W. Brahms
"Réseaux de Pétri: théorie et pratique."
Tome 1, Editions Masson, 1983.

/BRA 83b/ G.W. Brahms
"Réseaux de Pétri: théorie et pratique."
Tome 2, Editions Masson, 1983.

/BRO 84/ J. Brown, D. Dubois, K. Rathmill, S. Sethi, K. Stecke.
"Classification of flexible manufacturing systems"
The FMS magazine, Avril 1984, pp.114-117.

/BRO 87/ D.E. Brown, C.C. White
"An expert system approach to boiler system"
IEEE transactions on SMC, Mars-Avril 1987, Vol 17, pp.293-297.

/CAS 85/ P. de Casteljau
"Formes à pôles, Mathématiques et CAO, vol2"
Editions Hermès, 1985.

/CAS 87/ E. Castelain
"Modélisation et simulation interactive de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière"
Thèse de Doctorat de l'Université de Lille Flandres Artois, 26 Février 1987.

/CEG 89/ "Réussir une application systèmes experts"
synthèse de l'enquête CEGOS-EC2 1989
CEGOS, 8 novembre 1989.

/CHA 89/ J. Chailloux
"Le-Lisp de l'INRIA, Version 15.22, Le manuel de référence"
INRIA, 6 janvier 1989.

/CHE 86/ P. Chedmail, S. Delignières
"Choix de morphologies de robot"
Rapport de contrat ENSM-PSA, juillet 1986.

/CHE 89/ Chedmail, Wenger
"Positionnement des robots par recherche optimale"
Actes de la 8ème conférence internationale MICAD89, Paris, 13-17 février 1989.

/CHR 87/ C. Chrisment
"Mise en oeuvre des bases de données"
Eyrolles 1987.

/COD 70/ E.F. Codd
"A Relationnal Model for Large Shared Data Banks"
Comm. of ACM, Vol 13, n° 6, June 1970.

/COD 79/ E.F. Codd
"Extending the Relationnal Model to Capture More Meaning"
ACM TODS, Vol 4, n° 4, December 1979.

/COI 84/ P. Cointe
"Implémentation et interprétation des langages objets, application aux langages Formes, Objvlisp et Smalltalk"
Thèse d'état, Université Paris 6, 1984.

/COL 90/ A. Colmerauer
"Une introduction à PROLOG III"
Actes des journées d'Avigon, 1989.

/CRA 89/ E. Craye
"De la modélisation à l'implantation automatisée de la commande hiérarchisée de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière"
Thèse de Doctorat de l'université de Lille Flandres Artois, 13 janvier 1989.

/CRO 87/ A. Crosnier
"Intégration d'une fonction de perception dans un système de conception assistée par ordinateur pour la robotique"
Thèse de 3ème cyclee, U.S.T.L Montpellier, Mai 1987.

/DAR 75/ E.M. Dar-El
"Solving Large Single-Model Assembly Line Balancing Problems: A Comparative Study"
AIIE Transactions, Vol 5, n° 3, 1975, pp.302-310.

/DAS 89/ Dassault-Systèmes
"Documentation CATIA"
Dassault-Systèmes, 24-28 Avenue du Général De Gaulle, 92150 SURESNES.

/DEJ 85/ E.J. Dejesus
"PEARL: A knowledge based expert assistant CAD tool"
Second Conference on Artificial Intelligence Application, Miami, 1985, pp.264-268.

/DEL 82/ C. Delobel, M. Adiba
"Bases de données et systèmes relationnels"
Dunod Informatique, BORDAS, Paris 1982.

/DEL 87/ S. Delignières
"Choix de morphologies de robots"
Thèse de Docteur-ingénieur ENSM, Nantes, 1987.

/DEM 86/ R. Demolombe
"Problématique des bases de données déductives"
dans Nouvelles perspectives des bases de données, Eyrolles, 1986, pp.89-97.

/DES 85/ Y. Descottes, J.C. Latombe
"Making compromises among antagonist constraints"
Artificial Intelligence, Vol 27, 1985, pp.183-217.

/DOM 84/ E.Dombre
"A CAD system for programming and simulating robot actions"
Digital systems for Industrial Automation, Vol 2(2), 1984, pp.201-226

/DOM 86/ E. Dombre
"Environnement de programmation par C.A.O: que faut-il en attendre ?"
SYSCOROB: Architectures matérielle et logicielle des controleurs en robotique, Paris-La-Défense, décembre 1986, pp.103-119.

/DOM 87/ E. Dombre
"Conception assistée par ordinateur en robotique"
Revue Française de Mécanique, numéro spécial robots industriels, n° 1987.4, pp.213-221.

/DOM 88/ E. Dombre
"Techniques de la robotique: Perception et planification"
Editions Hermès, 1988.

/DOM 88a/ E. Dombre
"Modélisation et commande des robots"
Editions Hermès, 1988.

/DOM 88b/ C.H. Dominé
"Techniques de l'intelligence artificielle"
Editions Dunod, 1988.

/DOU 90/ J. Doulcier
Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, en préparation, 1991.

/ELG 85/ S. Elgazzar
"Efficient kinematic transformation for the PUMA 560 robot"
IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA. 1(3), pp.142-151, 1985.

/ENG 89/ J.F. Engelberger
"Les robots industriels: Applications, gestion et pratique"
Hermès, 1989.

/ERN 69/ G. Ernst, A. Newell
"A case study in generality and problem solving"
Academic Press, New York, 1969.

/FAR 87a/ H. Farreny, M. Ghallab
"Eléments d'intelligence artificielle"
Editions Hermès, 1987.

/FAR 87b/ M.L. Faracini, M.S. Hulthage, M.D. Rychener
"The development of ALADIN an expert system for aluminum alloy design"
Robotics, Vol 2, 1987, pp.329-337.

/FEA 83/ R. Featherstone
"Position and velocity transformations between robot end-effector coordinates and joint angles"
The International Journal of Robotics Research, Vol 2(2), 1983, pp.35-45.

/FER 85/ J. Ferber
"Les langages objets: De la programmation à la représentation des connaissances"
Congrès COGNITIVA Paris, 4-7 juin 1985.

/FOU 80/ A. Fournier
"Génération de mouvements en robotique; application des inverses généralisées et des pseudo-inverses"
Thèse d'Etat, USTL, Montpellier, avril 1980.

/FOX 83/ R.E. Fox
"Constraint directed search: a case study of job-shop scheduling"
ISIS technical report, Carnegie Mellon University, 1983.

/GAR 83/ Y. Gardan, M. Lucas
"Techniques graphiques interactives et CAO"
Editions Hermès, 1983.

/GAR 86/ Y. Gardan
"la C.F.A.O: Introduction, techniques et mise en oeuvre"
Editions Hermès, 1986.

/GAR 89/ G. Gardarin, P. Valduriez
"Relational Databases and Knowledge Bases"
Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

/GEN 83/ M.R. Genesereth
"Diagnostic using hierarchical design models"
Proceedings IJCAI, Los Altos, Août 1983, pp.278-283.

/GEN 87a/ J.C. Gentina, D. Corbeel
"Coloured adaptative structured Petri Nets: a tool for the automatic synthesis of hierarchical control of flexible manufacturing systems"
IEEE International Conference on Robotics and Automatism, Raleigh(USA), 31 mars-3 avril 1987, pp.1166-1173.

/GEN 87b/ J.C. Gentina, J.P. Bourey, M. Kapusta
"Coloured adaptative structured Petri Nets: a tool for the aided synthesis of the control system of flexible manufacturing systems (F.M.S)"
Conference IBM-International Education Centre
The Second Acis Studies Conference
Centre IBM de LA HULPE à Bruxelles, 14-16 Octobre 1987.

/GOL 85/ A.A. Goldenberg, B. Benhabib, R.G. Fenton
"A complete generalized solution to inverse kinematics of robots"
IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol 1(1), 1985, pp.14-20.

/GON 85/ M. Gondran, M. Minoux
"Graphes et algorithmes"
Editions Eyrolles, 1985.

/GRO 81/ M.P. Groover
"Automation et Systèmes de Production"
HERMES, 1981.

/HAT 89/ J.P. Haton
"Panorama des systèmes multi agents"
11ème journée francophone sur l'informatique, architectures avancées pour l'IA, poste de travail, parallélisme, connexionisme, outils logiciels, EC2 éditeur, Nancy, 12-13 janvier 1989.

/HUT 79/ G.K. Hutchison
"Flexible manufacturing systems in the United States"
Automation in manufacturing, 1979.

/HUS 85/ J.M. Husson
"Process en cours"
Micros et robots, Vol 16, Mars 1985, pp.56-80.

/ISO 88/ "Robots manipulateurs industriels - Vocabulaire"
AFNOR ISO/TR 8373 , 1988.

/KAP 88/ M. Kapusta
"Génération assistée d'un graphe fonctionnel destiné à l'élaboration structurée du modèle de la partie commande pour les cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière"
Thèse de Doctorat de l'Université de Lille Flandres Artois, 5 Décembre 1988.

/KEM 85/ K.G. Kempf
"Manufacturing and Artificial Intelligence"
Robotics I, 1985, pp.13-25.

/KIL 61/ M.D. Kilbridge, L. Wester
"A Heuristic Method of Assembly Line Balancing"
Journal of Industrial Engineering, Vol 12, n°4, 1961, pp. 292-298.

/KIR 84/ A.S. Kiran
"Simulation studies in job shop scheduling (I): a survey"
Computer and Industrial Engeneering, Vol 8, n°2, 1984, pp.87-93.

/LEB 90/ F. Lebastard
"DRIVER: Couche objet virtuelle persistante et Raisonnement"
Actes d'Avignon, 28 mai-1er juin 1990.

/LEE 83/ C.S.G. Lee, M. Ziegler
"A geometris approach in solving the inverse kinematics of PUMA robots"
proc. 13th International Symposium on Industrial Robots, Chicago, Avril 1983.

/LIE 79/ A. Liègeois, E. Dombre
"Analyse des robots industriels; relations entre structures, performances et fonctions"
Rapport IRIA n°79102, Projet SURF LAM, Montpellier, 1979.

/LIN 80/ R. Lindsay, B.G. Buchanan, E.A. Feigenbaum, J. Ledeberg
"DENDRAL"
McGraw-Hill, New York, 1980.

/LU 88/ Y. Lu
"Etude du volume de travail des robots: enveloppe, atteignabilité"
Thèse de l'ENSAM, 1988.

/MAC 82/ D. Macdermot
"R1: a rule based configurer of computer system"
Artificial Intelligence, Vol 19, n° 1, Septembre 1982, pp.39-88.

/MAS 66/ A.A. Mastor
"An experimental Investigation and Comparative Evaluation of Production Line Balancing Techniques"
Unpublished PH.D. Dissertation, UCLA, 1966.

/MAS 89/ "MASAI: Manuel d'utilisation"
Ilog, 1989

/McC 78/ J. McCARTHY
"Theory of LISP"
SIG-PLAN Notices, 13, 1978, pp.217-223.

/MER 85/ J. Merlet
"Les logiciels de simulation"
Journal de la Robotique, Vol 14, n° 16, Décembre 1985

/MIL 83/ V. Milenkovic, B. Huang
"Kinematics of major robot linkage"
Proceedings of 13th symposium on industrial Robots,Vol 16, Chicago, pp.31-47, Avril 1983.

/MOO 85/ R.L. Moore
"Adding real-time expert system capabilities to large distributed control systems"
Control engineering, April 1985, pp.118-121.

/NIL 82/ N.J. Nilsson
"Principles of Artificial Intelligence"
Springer-Verlag 1982.

/NOY 87/ D. Noyes
"Approches méthodologiques pour l'aide à la conception et à la conduite des systèmes de production"
Thèse d'état, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1987.

/OPL 89/ A. Oplobedu, J. Marcovich, Y. Tourbier
"CHARME: Un langage industriel de programmation par contraintes"
Actes des journées d'Avignon, 1989.

/OSB 86/ S.L. Osborn, T.E. Heaven
"The Design of a Relational Database System with Abstract Data Types for Domains"
ACM TODS, Vol 11, n° 3, September 1986.

/PAU 81/ R.C.P. Paul
"Robot manipulators: mathematics, programming and control"
MIT press, 1981.

/PER 88/ J.C. Perez
"De nouvelles voies vers l'Intelligence Artificielle"
Masson, 1988.

/PIE 68/ D.L. Pieper
"The kinematics of manipulators under computer control"
Ph. D. Thesis, Standford University, Standford, 1968.

/PIT 77/ J. Pitrat
"A chess combination programm which uses plans"
Artificial Intelligence,Vol 8,n° 3, 1977, pp.275-320.

/POI 89/ J.P. Poitou
"30 ans de CAO en France"
Editions Hermès, 1989.

/PRE 74/ T.O. Prenting, N.T. Thomopoulos
"Humanism and Technology in Assembly Line Systems"
Spartan Books, Hayden Book Co., Rochelle Park, N.J., 1974.

/RAS 87/ Rastegar, Deravi
"Method to determine workspace, its subspaces with different numbers of configurations of manipulator"
Mech. & Mach. Theory n°22, 1987.

/RAY 85/ P.T. Rayson
"A review of expert system principles and their role in manufacturing systems"
Robotica, Vol 3, 1985, pp.279-287.

/REN 80/ M. Renaud
"Calcul de la matrice jacobienne nécessaire à la commande coordonnée d'un manipulateur"
Journal of Mechanism Machine Theory, Vol 15, n° 1, 1980, pp.81-91.

/REN 84/ Renaud, Gorla
"Modèle des robots manipulateurs"
Cepadues, 1984.

/RYC 83/ M.D. Rychener
"Expert system for engineering design: experiments with basic technics"
IEEE Design Automation Conference, 1983.

/SAK 84a/ M. Sakarovitch
"Optimisation combinatoire: Programmation discrète"
Hermann 1984.

/SAK 84b/ M. Sakarovitch
"Optimisation combinatoire: Graphes et programmation linéaire"
Hermann 1984.

/SCI 86/ L. Sciavicco, B. Siciliano
"Coordinate transformation; a solution algorithm for one class of robots"
IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol 16, n° 4, 1986, pp.550-559.

/SCI 87/ L. Sciavicco, B. Siciliano
"An inverse kinematic solution algorithm for dexterous redundant manipulators"
Proceedings 3rd International Conference on Advanced Robotics, ICAR'87, Versailles, october 1987, pp.247-256.

/SHO 76/ E.H. Shortliffe
"Computer-based medical consultations:MYCIN"
American Elsevier, New York, 1976.

/STE 84/ G.L. Steele Jr
"Common Lisp: The language"
Digital Press, 1984.

/TON 84/ B. Tondu
"Génération de mouvements points à points optimaux en robotique; application à l'évaluation des performances et à la C.A.O des robots"
Thèse de Docteur-Ingénieur, U.S.T.L, Montpellier, juillet 1984.

/TOU 88/ P. Tournassoud
"Géométrie et IA pour les robots"
Editions Hermès, 1988.

/TSU 84/ S.Tsur, C. Zaniolo
"On the Implementation of GEM: Supporting a Semantic Data Model on a Relational Back-End"
ACM SIGMOD Int. Conf., Boston, june 1984.

/VER 89/ L. Vergely
"Modélisation de Capteurs: Développement d'outils d'aide à la Conception de Cellules Robotisées"
USTL, Montpellier, 1989.

/VES 83/ G.T. Vesorders, S.J. Stolfo, J.E. Zielinski, F.D. Miller, D.H. Copp
"ACE: An expert system for telephone cable maintenance"
Proceedings IJCAI, Karlsruhe, août 1983, pp.116-121.

/WAG 90/ M.R. Wagner
"Understanding The ICAD System"
ICAD, Inc, Cambridge, Massachussets, 1990.

/WAR 77/ D.H.D Warren, L.M. Pereira, F. Pereira
"PROLOG: The language and its implementation compared with LISP"
Proceedings of the Symposium on A.I and Programming Language (ACM) SIG-PLAN Notices,12,8
et SIGART Newsletter64, 1977,pp.109-115.

/WHI 69/ D.E. Whitney
"Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses"
IEEE Trans. on Man Machine Systems, Vol 10, n° 2, june 1969, pp.47-53.

/WIL 72/ Wild, Ray
"Mass-Production Management"
John Wiley & Sons Ltd, London, 1972.

/WOL 84/ W.A. Wolovich, H. Elliot
"A computational technique for inverse kinematics"
Proceeding 23rd IEEE conference on Decision and Control, Las Vegas, Décember 1984, pp.1359-1363.

/YVA 90a/ P.A. Yvars
"Un outil de planification en simulation C.A.O de lignes de production robotisées"
Actes de la 9ème conférence internationale MICAD90, Paris, 12-16 février 1990, Hermès, 1990.

/YVA 90b/ P.A. Yvars
"Poste de travail du roboticien pour l'étude et la simulation de lignes de production flexibles"
Actes du colloque international Productique et Intégrations, Bordeaux 12-14 juin 1990, Teknea, 1990.

ANNEXE

EXEMPLE DE SIMULATION

SORTIE DES RESULTATS

```
pts
(p6314 p6312 p6310 p6308 p6306 p6302 p6300 p6298 p6296 p6294 p6292
p6290 p6288 p6286 p6284 p6282 p6280 p6268 p6266 p6264 p6252 p6250
p6246 p6244 p6242 p6232 p6226 p6224 p6222 p6220 p6218 p6216 p6214
p6212 p6210 p6208 p6206 p6204 p6202 p6200 p6196 p6194 p6192 p6190
p6176 p6172 p6170 p6168 p6166 p6164 p6142 p6140 p6138 p6136 p6134
p6132 p6130 p6128 p6126 p6124 p6122 p6120 p6118 p6116 p6114 p6112
p6110 p6108 p6106 p6100 p6098 p6092 p6090 p6088 p6080 p6034 p6030
p5992 p5982 p5980 p5978 p5974 p5972 p5970 p5968 p5966 p5914 p5912
p5910 p5908 p5906 p5904 p5886 p5880 p5878 p5876 p5874 p5866 p5810
p5808 p5806 p5756 p5754 p5752 p5750 p4086 p4084 p4080 p4078 p4076
p4058 p4056 p4042 p4040 p4038 p4034 p4032 p4030 p4026 p4024 p4022
p4020 p4018 p4014 p3954 p3952 p3950 p3946 p3944 p3942 p3940 p3936
p3934 p3932 p3930 p3928 p3922 p3920 p3882 p3830 p3826 p3824 p3798
p3796 p3794 p3792 p3788 p3786 p3784 p3782 p3780 p3778 p3774 p3768
p3766 p3762 p3760 p3758 p3756 p3754 p3752 p3750)


r98
Lu
200
E1
40
E2
40
Ouverture
36
gamme (p6314 p6312 p6310 p6308 p6306 p6302 p6300 p6298 p6296 p6294
p6292 p6290 p6288 p6286 p6284 p6282 p6280 p6268 p6266 p6264 p6252
p6250 p6246 p6244 p6242 p6232 p6226 p6224 p6222 p6220 p6218 p6216)
Modif Lu
200
Modif Hu1
40
Modif Hu2
40
Modif ouverture
36
--------------------------------------------------------------------
r156
Lu
210
E1
15
E2
15
Ouverture
35
gamme ()
--------------------------------------------------------------------
```

```
r154
Lu
350
E1
25
E2
25
Ouverture
22
gamme (p6214 p6212 p6210 p6208 p6206 p6204 p6202 p6200 p6196 p6194
p6192 p6190 p6164 p6142 p6140 p6138 p6136 p6134 p6132 p6130 p6128
p6126 p6124 p6122 p6120 p6118 p6116 p6114 p6112 p6110 p6108 p6090)
Modif Lu
350
Modif Hu1
25
Modif Hu2
70.32007
Modif ouverture
73.74097
-----------------------------------------------------------------
r114
Lu
250
E1
9
E2
9
Ouverture
25
gamme (p6106 p6100 p6098 p6034 p6030 p5992 p5982 p5980 p5974 p5972
p5970 p5968 p5966 p5914 p5912 p5910 p5908 p5906 p5904 p5886 p5880
p5876 p5866 p5810 p5808 p5806 p3930 p6080 p4058 p6088 p4056 p6092)
Modif Lu
250
Modif Hu1
38.24103
Modif Hu2
105.7295
Modif ouverture
143.9706
-----------------------------------------------------------------
r112
Lu
200
E1
39
E2
39
Ouverture
30
gamme (p5756 p5754 p5752 p5750 p4086 p4084 p4080 p4078 p4076 p4042
p4040 p4038 p4034 p4032 p4030 p4024 p4022 p4020 p4018 p4014 p3954
p3952 p3950 p3946 p3944 p3942 p3940 p6168 p6170 p6172 p6176 p5978)
Modif Lu
200
Modif Hu1
39
Modif Hu2
55.86665
Modif ouverture
55.89864
-----------------------------------------------------------------
```

```
r110
Lu
155
E1
40
E2
40
Ouverture
25
gamme ()
-----------------------------------------------------------------------
r108
Lu
250
E1
90
E2
90
Ouverture
130
gamme (p3936 p3934 p3932 p3928 p3922 p3920 p3882 p3830 p3826 p3824
p3798 p3796 p3794 p3792 p3788 p3786 p3784 p3782 p3780 p3778 p3774
p3768 p3766 p3762 p3760 p3758 p3756 p3754 p3752 p3750 p4026)
Modif Lu
250
Modif Hu1
100.
Modif Hu2
90
Modif ouverture
130
-----------------------------------------------------------------------
r106
Lu
130
E1
17.5
E2
17.5
Ouverture
25
gamme ()
```

BIBLIOTHEQUE INTERUNIVERSITAIRE
SECTION DE SCIENCES
LILLE

RESUME

Nous présentons dans ce mémoire un prototype de poste de travail du roboticien pour l'étude, la simulation et la reconfiguration de lignes de production flexibles dans l'industrie manufacturière.

Notre démarche est basée sur l'addition d'un niveau décisionnel aux systèmes de C.A.O Robotique classiques, permettant de générer et d'allouer des gammes sur une ligne robotisée paramétrée, à partir de la connaissance des spécifications de cette dernière.

Le système a été implémenté en langage Le-Lisp, autour d'une couche orientée objet, et intègre au sein d'un même environnement:

* un outil de spécification, de modélisation et de gestion des connaissances statiques du domaine étudié, basé sur une double approche modèle orienté objet, modèle relationnel.
* un niveau de planification à base d'heuristiques, construit autour d'un mécanisme d'allocation de ressources sous contraintes générique, appelé le "moteur".

Notre approche est appliquée au cas de l'industrie automobile, à travers l'étude de la reconfiguration des lignes d'assemblages robotisées en soudure par points du groupe P.S.A, dans le cadre de l'introduction d'un nouveau type de véhicule sur une ligne existante.

BIBLIOTHEQUE INTERUNIVERSITAIRE
SECTION DE SCIENCES
LILLE

MOTS-CLES

SYSTEMES DE PRODUCTION FLEXIBLE
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
SIMULATION
C.A.O ROBOTIQUE
ALLOCATION DE RESSOURCES
ASSEMBLAGE
LANGAGE LE-LISP
LANGAGE ORIENTE OBJET