

**UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL**

**APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE  
AU CHOIX D'UNE MÉTHODE D'ASSEMBLAGE**

**ANTOINE SINZINKAYO**

**DEPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES**

**(GÉNIE MÉCANIQUE)**

**DÉCEMBRE 2000**



**National Library  
of Canada**

**Acquisitions and  
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada**

**Bibliothèque nationale  
du Canada**

**Acquisitions et  
services bibliographiques**

**395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada**

*Your file* *Votre référence*

*Our file* *Notre référence*

**The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.**

**The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.**

**L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.**

**L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.**

**0-612-60916-2**

**Canada**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE  
AU CHOIX D'UNE MÉTHODE D'ASSEMBLAGE

présenté par : SINZINKAYO Antoine

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BARON Luc, Ph. D., président

M. MASCLE Christian, Doct. ès Sciences, membre et directeur de recherche

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. KALYAN Gosh, Ph. D., membre

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Je souhaite particulièrement exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de recherche, Messieurs Christian MASCLE et Marek BALAZINSKI, pour leur disponibilité tout au long de la réalisation du mémoire, leurs directives, leurs conseils et leur support financier.

Je tiens à exprimer mon immense gratitude à mes enfants qui m'ont encouragé dans mon désir d'étudier.

Je me permets aussi de remercier les membres du jury, Messieurs Luc BARON et Kalyan GHOSH, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail en détail et d'en être les rapporteurs.

Je désire finalement exprimer toute ma reconnaissance au stagiaire ingénieur Olivier COMA, pour son aide à la recherche d'une solution pour l'automatisation de mes analyses, à tous les amis et amies qui m'ont soutenu tout au long de ce travail.

## RÉSUMÉ

Les méthodes actuelles de conception en vue de l'assemblage permettent de déterminer une ou deux méthodes d'assemblage pour un produit donné. Ces méthodes proposent aussi des techniques de reconception et déterminent l'efficacité d'un assemblage. Les défauts de ces méthodes sont souvent la lourdeur de leur application, leur manque de finesse et de précision.

Dans ce mémoire, nous présentons la logique floue comme un outil d'aide à la décision, notamment quand il faut choisir la méthode d'assemblage la plus appropriée pour un produit donné. La méthode de conception en vue de l'assemblage que nous étudierons ici est celle de Boothroyd. Celle-ci permet de déterminer une ou deux solutions parmi les méthodes d'assemblage manuelle et automatique et les transitions entre deux méthodes sont discrètes. Nos résultats d'analyses donnent plus d'informations en spécifiant le poids de toutes les méthodes pour chaque valeur des variables. Le concepteur dispose alors de résultats plus complets et est mieux guidé dans le processus de conception.

Pour réaliser cette étude, nous avons représenté le tableau de Boothroyd : « Choix de la méthode d'assemblage » par une base de connaissance contenant trois prémisses et cinq conclusions dans le logiciel de logique floue FDSS développé à

l'École Polytechnique. Le moteur d'inférence utilisé est le SUM.PROD qui traduit au mieux les problèmes linéaires. Un fichier combinatoire permet de parcourir le tableau. Les résultats que nous avons obtenus avec la logique floue sont maintenant continus et représentent donc mieux la réalité. Nous avons alors adopté une nouvelle représentation du tableau du « Choix de la méthode d'assemblage ».

Nous proposons également un programme conçu dans le but d'automatiser ces analyses et ces applications, notamment pour la génération automatique de graphiques représentant le tableau. Ce programme permet de bien structurer l'information et de la traiter plus rapidement et d'une façon plus efficace.

Enfin, nous avons mené une brève étude sur la méthode de reconception pour assemblage manuel que propose Boothroyd. Comme précédemment, les transitions entre deux états étaient brusques et représentaient peu la réalité industrielle. En introduisant des données floues, comme la notion de flexibilité d'un composant, nous obtenons des résultats plus précis. La logique floue permet donc, en plus d'être un système d'aide à la décision, de qualifier de manière plus précise certaines caractéristiques dans notre application.

## **ABSTRACT**

Recent design for assembly methods allow to choose among one or two assembling method for a specific product. More, these methods often suggest a reengineering process and compute the assembly efficiency. But, their disadvantage is the lack of precision. So the designer has sometimes difficulties to take a decision with the only information given by these methods.

In this report, fuzzy logic is described like a decision support system, particularly when the best assembling method must be chosen for a specific product. In the present context, we are using the Boothroyd's design for assembly method. Boothroyd suggests only one or two adequate issues among the wide range of manual and automatic methods for a specific assembly. And, all the transitions among the possibly choices are discrete. Our analysis results are more precise and they give more information because they specify the weight of every method for every value of the variables. Consequently, the designer has more complete results and he is at ease in the design process.

To achieve this study, we have represented the Boothroyd table's : "Choice of the assembling method " by a knowledge base including three premises and five conclusions in the fuzzy logic software FDSS provided by the École Polytechnique. We used the SUM.PROD. inference engine which is the most precise for linear problems. To browse the table, a combinatory file was used. Our results are continuous and, as a

consequence, seem to represent better the reality. As a result, we conceived a new representation of the table.

We also made an application to automate these analysis, particularly during the creation of plots of the table. Moreover, it allows to treat information quickly and efficiently.

Finally, we made a brief study on the Boothroyd's reengineering method for manual assembling. Like evoked in the previous table, transitions between two states were abrupt. Introducing fuzzy data, like the flexibility of a product, we got more precise results. Fuzzy logic is not only a decision support system but also a tool which allow to precise some characteristics in our application.

**TABLE DES MATIERES**

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	iv
<b>RÉSUMÉ</b> .....	v
<b>ASBTRACT</b> .....	vii
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	ix
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	xiii
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	xvi
<b>LISTES DES ANNEXES</b> .....	xviii
<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1: LE PROCESSUS D'ÉLABORATION D'UN PRODUIT</b> .....	3
1.1 Cycle d'élaboration d'un produit.....	3
1.1.1 La conception.....	6
1.1.2 La conception en vue de la fabrication.....	7
1.1.3 La conception en vue de l'assemblage.....	12
1.1.4 La conception pour la fabrication et pour l'assemblage.....	22
1.2 La fabrication.....	27
1.3 L'assemblage.....	28
1.4 Conclusion.....	29

<b>CHAPITRE 2 : LA MÉTHODE DE BOOTHROYD.....</b>	<b>33</b>
2.1 Les classes de méthodes d'assemblage selon Boothroyd.....	33
2.1.1 Assemblage manuel.....	33
2.1.2 Assemblage par machine spécialisées.....	34
2.1.3 Machines programmables.....	35
2.2 Méthodologies d'analyse de l'assemblage.....	35
2.2.1 Étude pour l' assemblage manuel.....	36
2.2.2 Étude pour l' assemblage automatique.....	38
2.2.3 Quelques définitions des termes utilisés.....	39
2.2.4 Exemples de calcul.....	44
<b>CHAPITRE 3 : LA LOGIQUE FLOUE.....</b>	<b>47</b>
3.1 Introduction à la logique floue.....	47
3.2 Définitions.....	51
3.3 Opérateurs logiques.....	53
3.3.1 Opérateurs de conjonction (et logique).....	53
3.3.2 Opérateur de disjonction.....	54
3.4 Variables linguistiques.....	55
3.5 Propositions floues.....	56
3.5.1 Propositions floues élémentaires.....	56
3.5.2 Proposition floue générale.....	56

3.6 Raisonnement en logique floue.....	57
3.6.1 Rappel de la logique classique.....	58
3.6.2 <i>Modus ponens</i> généralisé.....	58
3.7 Applications.....	61

## CHAPITRE 4 : APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE AU TABLEAU

<b>NO 1 DE LA MÉTHODE DE BOOTHROYD.....</b>	<b>64</b>
4.1 Composition des règles, des prémisses et des conclusions.....	65
4.1.1 Données du problème.....	65
4.1.2 Exemple 1.....	74
4.1.3 Exemple 2.....	76
4.1.4 Exemple 3.....	77
4.1.5 Conclusions préliminaires.....	78
4.2 Analyse de la partie gauche du tableau 1.....	79
4.2.1 Zone $0.65 \geq VS$ .....	79
4.2.1.1 $16 \geq NA$ .....	79
4.2.1.2 $7 \leq NA \leq 15$ .....	83
4.2.2 Zone $0.4 \leq VS \leq 0.65$ .....	84
4.2.2.1 $16 \geq NA$ .....	85
4.2.2.2 $7 \leq NA \leq 15$ .....	85
4.2.3 Zone $0.2 \leq VS \leq 0.4$ .....	87
4.2.3.a $16 \geq NA$ .....	88

4.2.3.b $7 \leq NA \leq 15$ .....	89
4.2.4 Zone $NA \leq 6$ .....	91
4.3 Analyse de la partie droite du tableau 1.....	93
4.3.1 Tri selon VS, NA et RI.....	94
4.3.2 Tri selon VS, RI et NA.....	96
4.3.2.a $VS=0.63$ .....	96
4.3.2.b $VS=0.5$ .....	98
4.4 Analyse globale.....	101
4.4.1 Algorithme.....	101
4.4.2 Exemple.....	102
4.4.3 Première extension de la méthode.....	105
4.4.4 Seconde extension de la méthode.....	106
<b>CHAPITRE 5 : ÉTUDE POUR L'ASSEMBLAGE MANUEL.....</b>	<b>110</b>
5.1 Principe.....	111
5.2 Méthode.....	111
5.3 Automatisation de la méthode et utilisation de la logique floue.....	112
5.3.1 Mise en évidence de l'utilité de la logique floue.....	112
5.3.2 Représentation des tableaux 2 et 3 en logique floue.....	112
5.4 Représentation des tableaux 2 et 3 dans le système FDSS.....	113
5.5 Exemple pour le tableau 2.....	120

<b>CONCLUSION</b> .....	122
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	126
<b>ANNEXES</b> .....	132

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Phases d'élaboration d'un produit.....	5
Figure 1.2 : Schéma pour assemblage manuel.....	34
Figure 1.3 : Schéma pour assemblage automatique .....	34
Figure 1.4 : Schéma pour assemblage par machines programmables .....	35
Figure 3.1 : Termes et concepts en logique floue .....	51
Figure 3.2: Définition d'une fonction d'appartenance trapézoïdale .....	52
Figure 3.3 : Définitions possibles de fonction d'appartenance .....	53
Figure 3.4 : Fonction d'appartenance correspondant à l'intersection.....	54
Figure 3.5 : Fonction d'appartenance correspondant à l'union.....	55
Figure 3.6 : Illustration du traitement flou .....	60
Figure 4.1 : Représentation graphique des prémisses et conclusions pour le tableau I de Boothroyd .....	73
Figure 4.2: Résultats d'application de SAD no 1 .....	75
Figure 4.3: Résultats d'application de SAD no 2.....	76
Figure 4.4 . Résultats d'application de SAD no 3.....	77
Figure 4.5 : VS=0.67; NA=17 ; $1.05 \leq RI \leq 1.5$ .....	82
Figure 4.6 : VS=0.67; NA =8 .....	83
Figure 4.7 : VS =0.67; NA = 11 .....	83
Figure 4.8: VS=0.67; NA=14 .....	84
Figure 4.9: VS=0.45; NA=17 .....	85

<b>Figure 4.10: VS=0.45; NA=8</b> .....	<b>85</b>
<b>Figure 4.11: VS=0.45; NA=11</b> .....	<b>86</b>
<b>Figure 4.12: VS=0.45; NA=14</b> .....	<b>87</b>
<b>Figure 4.13: VS=0.25; NA=17</b> .....	<b>88</b>
<b>Figure 4.14: VS=0.30; NA=17</b> .....	<b>88</b>
<b>Figure 4.15: VS=0.25; NA=11</b> .....	<b>89</b>
<b>Figure 4.16: VS=0.25; NA=14</b> .....	<b>90</b>
<b>Figure 4.17: VS=0.35; NA=11</b> .....	<b>90</b>
<b>Figure 4.18: VS=0.35; NA=14</b> .....	<b>91</b>
<b>Figure 4.19: VS=0.25; NA=5</b> .....	<b>92</b>
<b>Figure 4.20: VS=0.45; NA=5</b> .....	<b>93</b>
<b>Figure 4.21: VS=0.63; NA=8</b> .....	<b>94</b>
<b>Figure 4.22: VS=0.55; NA=14</b> .....	<b>94</b>
<b>Figure 4.23: VS=0.45; NA=6</b> .....	<b>95</b>
<b>Figure 4.24: VS=0.30; NA=9</b> .....	<b>95</b>
<b>Figure 4.25: VS=0.63; RI=1.4</b> .....	<b>96</b>
<b>Figure 4.26: VS=0.63; RI=2</b> .....	<b>97</b>
<b>Figure 4.27: VS=0.63; RI=3.5</b> .....	<b>97</b>
<b>Figure 4.28: VS=0.5; RI=1.4</b> .....	<b>98</b>
<b>Figure 4.29: VS=0.5; RI=4.5</b> .....	<b>99</b>
<b>Figure 4.30: VS=0.3; RI=1.4</b> .....	<b>100</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Méthodes de conception et d'analyse couramment utilisées.....	32
Tableau 2.1 : Tableau no1 de Boothroyd.....	46
Tableau 4.2 : VS=0.68; NA=17; $0.25 \leq RI \leq 2.25$ .....	80
Tableau 4.3 : VS=0.68; NA=17; $1.05 \leq RI \leq 1.5$ .....	81
Tableau 4.4: Portion de tableau obtenu par suppression des valeurs inutiles.....	103
Tableau 4. 5 : Nombres de lignes triées par VS, NA et RI pour le côté droit du tableau.....	104
Tableau 4.6 : Nombres de lignes triées par VS, NA et RI pour le côté gauche du tableau.....	105
Tableau 4.7 : Côté droit du tableau avec intervalle de 0.5.....	105
Tableau 4. 8 : Côté gauche du tableau avec intervalle de 0.5, .....	106
Tableau 4.9 : Récapitulatif pour l'étude du côté droit du tableau.....	107
Tableau 4. 10 : Récapitulatif pour l'étude du côté gauche du tableau.....	108
Tableau 4.11 : Choix du tri en fonction des conclusions pour le côté droit du tableau.....	109
Tableau 4. 12 : Choix du tri en fonction des conclusions pour le côté gauche du tableau.....	109
Tableau 5.21: Manipulation à une main.....	113
Tableau 5.22: Une main avec outil.....	115
Tableau 5.23: Deux mains pour manipuler.....	116

<b>Tableau 5.24: Deux mains ou assistance nécessaire.....</b>	<b>117</b>
<b>Tableau 5.31: Composant ajouté mais non fixé.....</b>	<b>118</b>
<b>Tableau 5.32: Composant fixé immédiatement.....</b>	<b>119</b>
<b>Tableau 5.33 : Opération séparée.....</b>	<b>120</b>

**LISTES DES ANNEXES**

<b>ANNEXE 1 : ÉTUDE POUR ASSEMBLAGE MANUEL ET AUTOMATIQUE.....</b>	<b>132</b>
<b>ANNEXE 2 : REPRÉSENTATION GRAPHIQUE ET NUMÉRIQUE DES</b>	
<b>TABLEAUX DE BOOTHROYD.....</b>	<b>149</b>

## **INTRODUCTION**

Dans le processus d'élaboration d'un produit, l'étape d'assemblage a été longtemps considérée comme une phase secondaire. Pour un produit dont les techniques d'assemblage n'ont pas été préalablement étudiées pour l'assembler, les assembleurs sont obligés de trouver des solutions originales et coûteuses, nécessitant parfois un retour à la phase de départ du processus de conception. Or, plusieurs études démontrent que le coût d'une modification, ayant lieu en cours de développement d'un produit, augmente énormément si le cycle de conception est avancé[6]. Ainsi l'étape d'assemblage étant l'une des dernières du processus de l'élaboration d'un produit, le coût associé à une modification tardive du design est très élevé.

La recherche d'une solution d'assemblage est pour sa part très complexe. En effet, le domaine de l'assemblage est très vaste, car il s'agit à la base d'un concept simple qui offre un très large choix de possibilités. Rappelons qu'assembler consiste à unir physiquement deux ou plusieurs composants. Or, selon les matériaux en présence et leurs caractéristiques qui entrent en jeu comme le nombre de composants, le volume de production, les coûts permis et la qualité requise, la solution peut varier entre le soudage, le serrage, le vissage, le sertissage, etc.[10] Il faut aussi noter que la méthode d'assemblage elle-même est influencée. Le département des méthodes doit tenir compte de ces paramètres pour faire un choix parmi les méthodes manuelles ou automatiques.

Il est évident que l'efficacité de la recherche d'une solution d'assemblage varie en fonction de l'expérience. Dans certains cas, l'étape de remise en cause de la conception du produit aurait pu être évitée s'il existait une méthode efficace pour choisir les solutions d'assemblage dès le départ.

Pour résoudre ce problème, certaines recherches ont tenté de réduire les retours à la conception en offrant aux concepteurs un outil permettant de garder en perspective l'assemblage (Boothroyd et Dewhurst, 1983).

Le premier chapitre de ce mémoire décrit le processus d'élaboration d'un produit ou d'un système. Puis, le deuxième chapitre se rapporte à la méthode d'assemblage de Boothroyd, le troisième à la logique floue, le quatrième est consacré aux différentes applications et aux outils d'aide à la décision suggérés. Enfin, le cinquième chapitre comprend une analyse des résultats obtenus. Une attention particulière est réservée à cette dernière partie car elle constitue le corps du sujet de ce mémoire à savoir « Utilisation de la logique floue au choix d'une méthode d'assemblage ».

## **CHAPITRE 1: LE PROCESSUS DE CONCEPTION D'UN PRODUIT**

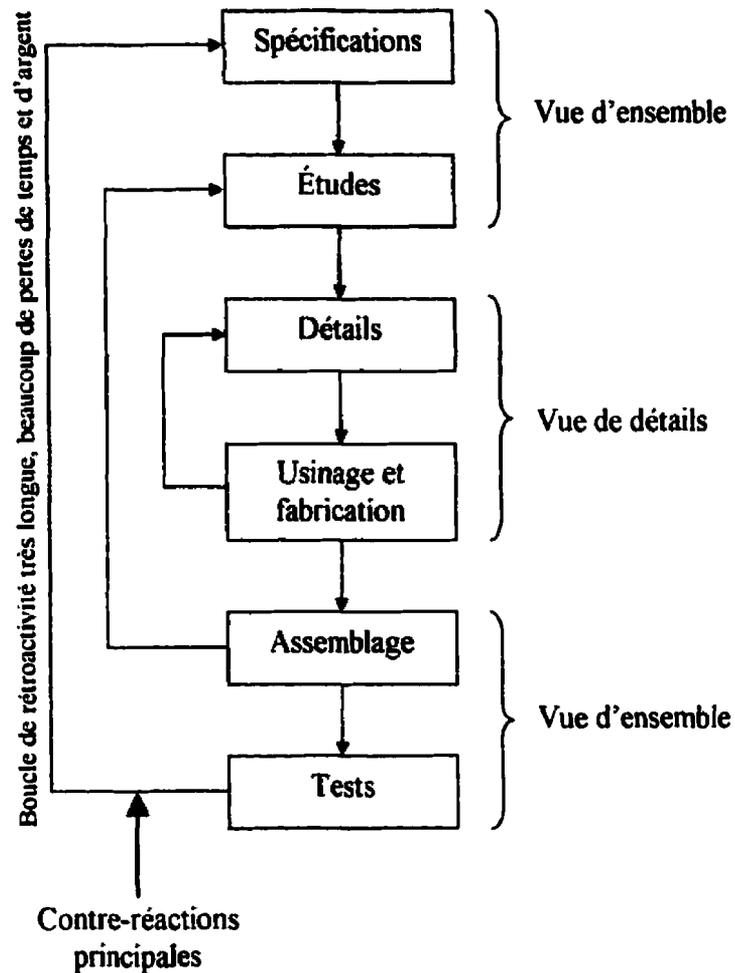
Concevoir, fabriquer et assembler des produits répondant à des spécifications précises, équilibrer les dépenses et les recettes correspondantes, générer un bénéfice, tel est le rôle économique de l'entreprise industrielle. Un marché qui se mondialise, une concurrence internationale agressive, des consommateurs exigeants, des produits devenant rapidement obsolètes, tel est aujourd'hui le contexte de cette activité et l'évolution des tendances. Ces nouvelles données ont obligé les entreprises industrielles à rationaliser leurs pratiques et à prêter dans ces objectifs une attention particulière à l'assemblage tout en mettant en œuvre les concepts de l'ingénierie simultanée (Jabbour,1997) [17].

### **1.1 Cycle d'élaboration d'un produit**

Entre l'idée qui traduit la conceptualisation d'un besoin et un produit qui traduit sa matérialisation physique, différentes fonctions sont nécessaires. Afin de bien mener notre étude, nous commençons par définir ces différentes fonctions qui constituent les phases successives d'élaboration d'un produit. Cette analyse constitue la base de la recherche d'un modèle intégré satisfaisant aux objectifs de l'automatisation de l'analyse de l'assemblage.

**Le produit moderne se caractérise par un cycle de vie de plus en plus court. Cela impose aux industries une adaptabilité et une flexibilité autant au niveau du produit fonctionnel qu'au niveau des machines de production.**

**Dans les qualités attendues des systèmes modernes de production, il faut souligner la nécessité de favoriser les domaines à forte valeur ajoutée, de disposer d'une automatisation poussée, d'une modularité au niveau machine et au niveau produit, d'une gestion à flux tendu et des circuits d'information efficaces. L'industrialisation d'un produit exige donc une certaine interchangeabilité au niveau des phases principales d'élaboration d'un produit.**



**Figure 1. 1 : Phases d'élaboration d'un produit**

Sur la figure on voit que la conception, les méthodes, la fabrication et l'assemblage sont les principales fonctions du cycle d'élaboration d'un produit.

La part consacrée à chacune de ces phases dépend non seulement des caractéristiques du produit, de ses propriétés mais également du type d'entreprise concernée. Le temps consacré par exemple à la conception peut varier considérablement suivant la complexité du produit et le degré d'innovation qu'il représente pour

l'entreprise. Le temps consacré à la fabrication ou à l'assemblage est entièrement dépendant des décisions prises pour la préparation de chacune de ces fonctions, des degrés de perturbation des moyens de production et de l'influence de ces perturbations sur le système de production.

### **1.1.1 La conception**

La conception est la phase la plus créative d'élaboration d'un produit. Elle a pour objectif de transformer les spécifications, qui qualifient le besoin perçu du produit sous forme de contraintes, en un ensemble de spécifications géométriques, technologiques et fonctionnelles telles qu'elles peuvent apparaître sur le plan détaillé du produit.

On peut décrire la conception comme étant un processus itératif au cours duquel un objet est conçu et modifié, afin qu'il puisse remplir des fonctions bien définies et se conformer à un ensemble de contraintes. Dans cette démarche, on identifie plusieurs étapes à savoir la création d'un modèle du produit, l'analyse, l'essai et la simulation, la construction de prototype, les éventuelles modifications et la réalisation du projet[17]. Les caractéristiques communes à l'ensemble des activités de conception sont les moyens utilisés par le concepteur. Habituellement, ce sont les outils analytiques et informatiques.

Les outils analytiques sont des formules empiriques et des équations issues des modèles mathématiques. Ceux-ci sont utilisés aussi bien lors de la création du modèle, que lors de son analyse ou de sa modification.

Les outils informatiques sont souvent sous forme de modelleur solide qui assiste le concepteur, en lui permettant de générer d'une façon plus ou moins rapide, des objets géométriques virtuels reflétant la forme de l'objet qu'il veut concevoir. Le premier intérêt du modelleur solide est la facilité de visualisation non ambiguë de la géométrie graduellement construite. Le deuxième est la possibilité d'analyser le comportement de l'objet en situation de fonctionnement par la mise à l'épreuve virtuelle, mécanique ou thermique du modèle.

Il faut noter que tout au long du processus le concepteur doit en tout temps se servir des informations (chiffres, graphiques et textes) qui constituent les propriétés et les caractéristiques du modèle.

### **1.1.2 La conception en vue de la fabrication**

La conception pour la fabrication est un processus où l'on cherche à optimiser l'utilisation des technologies, des procédés de fabrication et des coûts dès la phase de conception. Elle a aussi pour but de définir l'ensemble des caractéristiques, pour fournir au système automatisé une représentation du produit dotée d'une logique de raisonnement comparable à celle de l'expert [Deneux,93]. Ces caractéristiques sont partagées en quatre catégories [Marks, 87] :

1. Les caractéristiques géométriques qui sont les éléments géométriques de base tels que les points, les segments, les surfaces ou les volumes, ainsi que les différentes relations qui existent entre ces éléments et qui permettent la définition non ambiguë de la géométrie nominale d'un composant mécanique;

2. Les caractéristiques de précision qui quantifient les déviations maximales admissibles par rapport à la forme idéale de la pièce, tant au niveau macro-géométrique (tolérances dimensionnelles et géométriques), qu'au niveau micro-géométrique (états de surface);

3. Les caractéristiques technologiques qui sont des sous-ensembles de la géométrie de la pièce qui assurent une fonction particulière. Ces caractéristiques sont généralement définies par un vocabulaire spécifique (rainure, poche, etc.) plus riche que la seule description de la géométrie correspondante, car ces termes évoquent la fonction remplie ou le mode de fabrication de forme qu'ils décrivent;

4. Les caractéristiques matérielles décrivent les propriétés physiques, chimiques, électriques, thermiques ou mécaniques du matériau constituant la pièce, ainsi que les éventuels traitements subis par celle-ci qui ont pu altérer ses propriétés globalement (trempe) ou localement (peinture, anodisation, cémentation), et donc affecter ses surfaces.

La conception pour la fabrication réalise donc une intégration des fonctions de conception et de fabrication. Elle permet aussi de bénéficier de l'état actuel des outils disponibles dans la plupart des systèmes commerciaux de CFAO. En effet, ces derniers possèdent des modules d'analyse en commande numérique intégrée. Ce module utilise directement le modèle de conception et propose, après la sélection par l'opérateur d'un outil de coupe approprié, de générer automatiquement les trajectoires d'outil qui

permettent d'usiner des groupes de volumes standards, tels que les poches ou, les contournages.

L'accent porte sur la convivialité de ces modules qui vont jusqu'à offrir une simulation visuelle animée de l'usinage, en même temps que les différents temps opératoires calculés.

Après analyse des méthodes existantes, Torben [32] considère qu'il y a des informations essentielles pour le concepteur qui sont souvent ignorées, ce sont les informations sur les coûts et les possibilités géométriques. Il propose ainsi une méthode d'amélioration pour la sélection des matériaux et des processus de fabrication. Cette méthode est présentée comme un module intégrant les notions de coût et de géométrie.

Ce modèle aide non seulement à la sélection et mais aussi montre comment se conformer aux critères de sélection en tenant compte des besoins du client, des dimensions géométriques, du champ d'application, de la fonction du produit, etc. Il propose d'utiliser trois types d'informations:

1. Les informations liées au processus de conception générale de la géométrie, des tolérances, de la qualité, pour l'estimation des coûts et des problèmes d'environnement;
2. Le modèle de matériau qui inclut les critères de résistance, de corrosion, de couleur et de conductivité.
3. Les caractéristiques du produit pour les possibilités géométriques et limitations.

Ces modèles ont été validés en effectuant des investigations par sondage sur ce concept.

Van der Net (1996) [33] et son équipe considèrent eux aussi, que les possibilités de fabrication d'un produit doivent être évaluées dès la conception de celui-ci. Il faut donc modéliser les caractéristiques du produit dès le début. Les relations entre entités géométriques et tolérances sont la partie qu'ils considèrent très importante pour le concepteur. La méthode qu'ils proposent se base sur ces relations. Pour fabriquer un produit modèle on doit avoir une description consistante du produit pour toutes les étapes de conception et de fabrication.

Leur modèle prévoit la disponibilité de toutes les informations nécessaires à tous les stades du processus de conception et de fabrication, et décrit le produit d'une façon simple et consistante. Les analyses de fabricabilité sont faites et les valeurs de dimensions et de tolérances sont définies en même temps. Cependant, ces informations restent incomplètes pour capturer les fonctions non géométriques. Pour y parvenir, ils suggèrent d'utiliser un modèle dans un environnement où les produits prismatiques sont conçus à partir des descriptions volumétriques; la fabrication se faisant sur des machines à commandes numériques et la qualité étant assurée par la performance des machines.

Les concepts d'État de conception "design states" et d'État de transformation "design transformations" sont utilisés pour décrire la conception des produits mécaniques. On collecte aussi les informations concernant la géométrie, les fonctions et les techniques de fabrication lors du processus de conception pour la fabrication. Dans le modèle conventionnel, ce processus n'est pas explicitement connu; le produit final comprend la géométrie nominale et les tolérances spécifiées par les dessins, les modèles de surface et de volume.

Le nouveau concept utilise les notions "d'opérateurs et d'opérandes" pour spécifier le processus de fabrication désiré. On se sert des éléments « boîte, arrête et courbes » pour définir les objets qui peuvent être fabriqués "MO's" et objets primitifs "PO's". Ces derniers représentent une des parties essentielles du modèle qui déterminent les relations de position, d'orientation, de la géométrie, des tolérances et d'assemblage.

Les tolérances modèles sont conçues de manière à ce qu'elles puissent supporter plusieurs interprétations, suivant le processus en cours (planification, analyse de l'assemblage ou analyse de la qualité). Il se nomme modèle "enveloppe des tolérances". A partir de ce modèle, on détermine la médiane et la zone de distribution des tolérances. Les tolérances sont interprétées en utilisant le principe de dépendance surtout pour la modélisation de l'assemblage.

A.H. de Vries [32] et ses partenaires analysent aussi différentes étapes d'intégration de la conception et de la fabrication. Leur première étape consiste à concevoir les formes géométriques à partir desquelles on détermine les opérations de fabrication. C'est ce qu'ils appellent le "Feature recognition" (identification des caractéristiques). La deuxième étape procède par la définition des séquences dans lesquelles les opérations de conception et de fabrication seront faites (Erve, 88) [13]. Ils nomment cette étape le "Feature Based Design" (conception à partir des caractéristiques). L'intégration de la conception et de la fabrication est à ce moment facilitée par l'utilisation d'un modèleur solide et hybride. Le concept est modelé par la représentation des frontières appelée "Boundary representation (B-Rep)" ou par des primitives de base «CSG Solid Modeler». Cependant certaines opérations sont difficiles

à générer à cause des limitations physiques de fabrication comme l'enlèvement et l'ajout de matière, les changements de propriétés etc. Pour optimiser ces opérations, les objets primitifs (OP) sont dérivés par des opérateurs mathématiques d'union, de soustraction, d'intersection pour en faire des objets réalisables (Primitive/Manufacturable).

### **1.1.3 La conception en vue de l'assemblage**

L'approche de conception en assemblage est différente de celle rencontrée en fabrication car l'étude d'une pièce en particulier ne peut pas être isolée d'un environnement lui imposant certaines contraintes géométriques, technologiques et fonctionnelles tout aussi importantes que les contraintes intrinsèques à la pièce.

Selon cette approche, le problème de l'assemblage est traité en profondeur avec l'ensemble des contraintes qui le limite. Le traitement se fait cependant en assurant des échanges d'informations entre les différentes étapes des processus de conception, de fabrication et d'assemblage. Ce qui conduit également à la définition des besoins fonctionnels du produit tout en optimisant les techniques appliquées, les formes des pièces, ainsi que leur nombre.

La vérification de l'assemblage se situe environ au niveau des prototypes, des modèles de production, et donc après les phases conceptuelles (idées, concepts, spécifications) et de conception préliminaire et détaillée (dessin de détail et d'ensemble). Cette approche ne favorise pas la détection des erreurs potentielles tôt dans le processus de conception. Pourtant, une erreur détectée tardivement risque de coûter très cher. C'est

le cas lorsqu'il est nécessaire d'effectuer une modification au cours de l'étude de l'assemblage.

Dans le but de pallier ce problème, plusieurs compagnies se tournent vers le concept de l'ingénierie simultanée (IS) (Ettlie et Stoll, 1990) [14] pour améliorer la qualité du produit, tout en diminuant son coût et son temps de production, en évitant l'approche linéaire et en favorisant une approche plus parallèle. Ainsi, les problèmes potentiels de l'assemblage peuvent être abordés dès l'étape de conception puisque les membres de chaque département peuvent en discuter et les éviter.

Depuis quelques années, des chercheurs se sont penchés sur les problèmes d'assemblage et parmi ceux-là Boothroyd et Dewhurst (1993) [3] ont été les premiers à être reconnus pour leurs travaux effectués dans le domaine de la conception en vue de l'assemblage grâce à leur méthode «Design For Assembly» (DFA). Cette méthode permet de valider la nécessité de chaque composant, afin d'en réduire leur nombre et par la suite d'évaluer l'assemblabilité des composants restants. L'utilisation de nombreux tableaux et graphiques est essentielle pour analyser chaque composant.

Bien que cette méthode permette d'analyser les méthodes d'assemblage, elle ne permet que de déterminer la catégorie d'assemblage, manuelle ou automatisée, et d'optimiser la conception du produit, mais elle n'aide pas à trouver la manière d'effectuer l'assemblage et le choix des outils. Ses concepts ont permis le développement d'un logiciel appelé «Design For Assembly», mais ce dernier ne permet que d'analyser l'assemblage manuel et ne constitue pas une amélioration substantielle de la méthode.

Chan et Mo,(1983) [7] ont amélioré la méthode en extrayant l'information contenue dans un logiciel de CFAO pour trouver automatiquement les informations manquantes. Cette technologie est intéressante pour la détermination automatique des solutions d'assemblage, si ces informations sont intégrées dans le processus de recherche d'une solution d'assemblage.

Warnecke et al. (1980) [34] ne procèdent pas à l'analyse du produit comme le fait la méthode de DFA mais ils présentent un catalogue de solutions d'assemblage permettant de choisir une solution, la machinerie à utiliser et les contraintes à respecter. Les solutions trouvées par cette méthode permettent de choisir parmi les meilleures procédures d'assemblage sélectionnées. L'analyse de la valeur est ensuite utilisée pour choisir une solution parmi celles retenues à chacune des sous-opérations. Les inconvénients majeurs de cette approche sont la consultation manuelle du catalogue et l'absence d'intégration aux systèmes informatisés existants. De plus, le catalogue est basé sur l'expérience et non sur la science qui permet de prendre des décisions objectives face à une situation donnée.

D'autres chercheurs ont analysé les contraintes et les règles à considérer durant la planification automatique de l'assemblage. Parmi ceux-ci, certains ont énuméré de nombreuses contraintes à considérer lors de l'assemblage automatisé. Ces contraintes sont des directives de l'utilisateur qui le guident vers un choix final de planification. L'intérêt de ce travail réside dans l'énumération des contraintes faciles à utiliser dans des systèmes informatiques, contrairement aux informations contenues dans le catalogue de solutions de Warnecke et al.[34]. Certaines des contraintes peuvent s'appliquer à une

vision binaire de l'assemblage dans le cadre du choix d'une solution telle que choisir la solution la moins coûteuse , mais la majorité d'entre elles tient compte d'une séquence d'opérations d'assemblage.

Afin de trouver la séquence d'assemblage en vue de son recyclage, plusieurs recherches ont été effectuées sur le désassemblage (Design For Disassembly ou DFD). (Brooke,1990) [5] discute des différentes manières où le désassemblage peut aider l'industrie automobile, surtout en ce qui concerne le recyclage des produits.

Masclé,(1993) [23] a effectué des recherches dans lesquelles il se sert du désassemblage et de l'ingénierie inverse («reverse engineering») afin d'effectuer une reconception de produit par l'analyse d' une séquence d'assemblage plus efficace. Son utilisation des demi-degrés de liberté permet de trouver les directions libres de désassemblage – et donc d'assemblage – et ainsi de détecter des erreurs potentielles de conception. De plus, les informations provenant du désassemblage permettent de meilleures classification et caractérisation des solutions d'assemblage retenues pour le catalogue de solutions.

Une autre méthode, prenant appui sur des bases de données et des calculs économiques, s'impose dans les industries mondiales: l'Assemblability Evaluating Method (A. E. M.) de Hitachi. Cette méthode a été développée dans les années 80 et comporte trois principales étapes:

- la conception (dessin, prototypes, etc.) du produit;

- l'évaluation de son assemblabilité (degré de difficulté des opérations d'assemblage, les coûts, etc.) et sa comparaison (des concepts, des autres produits, etc.);
- l'amélioration du produit.

La compagnie Hitachi a développé cette méthode et l'a mise sur le marché, mais elle est encore mal étayée et peu documentée jusqu'à nos jours.

D'autres recherches sur l'aspect méthodologique de la conception des produits en fonction du montage ont été effectuées, l'objectif étant de créer un outil applicable à différents types de produits. Cet outil comporte deux parties essentielles:

1. Une analyse globale que l'on appelle «macro analyse» et dont le but est de modéliser la structure du produit. Cette modélisation permet entre autres de générer les processus de montage et de proposer des modifications de conception visant à rendre la structure du produit compatible avec un montage plus rationnel.
2. Une analyse fine que l'on appelle «microanalyse» et qui consiste à étudier en détail le déroulement de chaque opération de montage. Cette microanalyse débouchera sur des propositions de dessins des pièces afin de diminuer la difficulté des opérations.

Kim,(1989) [19] émet l'idée d'une conception en deux temps, commençant par une première phase d'ébauche de conception privée d'informations de détail concernant les liaisons entre les composants (conception ascendante), suivie d'une seconde phase de

conception détaillée, basée sur l'utilisation de caractéristiques de liaisons permettant de réaliser l'assemblage (conception descendante).

Kim procède aussi à l'évaluation d'un indice d'assemblabilité. L'intervention de certains paramètres (tolérances, types de mouvements à mettre en œuvre, forces à appliquer, poids, dimension, etc.) dans des formules empiriques permet d'obtenir des notes entre plusieurs propositions.

Grudzien, L.(1996) et collègues [16] proposent une démarche de conception d'un système d'assemblage appliquée dans un contexte d'ingénierie concurrente. A partir des compétences réparties dans des laboratoires différents, ils montrent que la complémentarité est possible pour réaliser un projet complexe en substituant au schéma linéaire d'organisation de la conception un schéma pluridisciplinaire. En mettant en place des supports d'expérimentation qui permettent un travail coopératif et méthodologique, ils parviennent à dégager des principes généraux, structuraux et fonctionnels de travail. La démarche repose de façon importante sur les interactions entre les différents acteurs et métiers de la conception. Une étude d'un système d'assemblage de sous-ensembles de tronçons d'avion a servi d'exemple pour retracer les principales étapes de cette méthodologie. On part de l'hypothèse que l'assemblage est manuel et l'on se propose d'étudier un banc d'assemblage automatisé. La clé de l'étude consiste à effectuer une analyse fonctionnelle, qui permet de définir la structure de représentation du produit lors du cycle de conception.

Pour contourner les problèmes d'imprécision des méthodes habituellement connus, ils proposent une démarche structurée qui consiste à définir l'ensemble des

entités (fonctions de service, fonctions opératoires) et à modéliser la structure de représentation du produit lors du cycle de conception.

L'étape «fonction de service» spécifie les besoins que le futur produit devra remplir de façon fonctionnelle, les spécifications et les contraintes globales. Ensuite, les fonctions sont décomposées en fonctions opératoires élémentaires. A ce stade, les graphes d'états sont utilisés pour modéliser les séquences opératoires. En tenant compte de la gamme d'assemblage des composants, les solutions de principes admissibles pour chaque fonction de service sont définies.

Une solution de principe est une combinaison de principes admissibles où chaque principe est associé à une fonction opératoire élémentaire. À partir de cet ensemble de solutions de principes, la meilleure est sélectionnée. De cette façon, les critères fonctionnels sont pris en compte pour le classement des solutions de principes.

La dernière phase consiste à séparer les fonctions opératoires statiques des fonctions opératoires dynamiques pour associer à chacune d'entre elles les fonctions techniques correspondantes: produire le mouvement, commander le mouvement, détecter la défaillance, etc.

L'étape de conception préliminaire détermine l'architecture globale du produit et l'aspect technologique pour chaque fonction technique en tenant compte des contraintes globales et de métiers. Cette phase marque le début de la conception simultanée des différentes composantes du produit: le mécanicien commence la conception de la partie mécanique, il dimensionne et positionne les composants et l'automaticien réalise l'analyse ascendante pour définir l'architecture générale de commande à partir des

composants techniques retenus. Enfin, le mécanicien d'exploitation définit la stratégie de maintenance pour le futur système.

Comme les spécifications techniques peuvent ne pas garantir en elles-mêmes que les spécifications d'un client seront effectivement satisfaites (car des défaillances peuvent apparaître dans ses spécifications ou dans le système organisationnel relatif à la conception et à la réalisation du produit), les auteurs recommandent d'étudier la communication entre les acteurs appartenant à différents corps de métier ayant un rôle en conception. Ceci permet d'identifier un certain nombre de non-qualité comme la perte d'informations au niveau de l'utilisation des logiciels, de la structure des messages etc. et donc de mettre en place une procédure d'échange permettant d'identifier les interlocuteurs, le typage des messages et les différentes modifications et validations à faire.

E. Dupinet et al.,(1997) [11] utilisent la logique floue pour résoudre le problème de distribution des tolérances pendant la conception d'un système d'assemblage. Ils proposent tout d'abord de déterminer les tolérances à partir des bases de données « Proportionnal scaling method ». Puis, de calculer ces tolérances à partir de règles (Rules of thumb) « Constant précision factor method » et enfin d'optimiser les coûts des paramètres de tolérance « Constant precision factor method ».

Cette technique permet de combiner les calculs en logique floue, qui évaluent les difficultés de fabrication, et la simulation à l'aide des algorithmes qui optimisent le tolérancement. La méthode repose sur la composition des règles d'inférence (CRI) qui préservent un maximum d'informations de règles et d'observations. L'allocation des

tolérances est faite ici en utilisant la logique floue basée sur la méthode de programmation non linéaire. On calcule les coûts ( $C_i$ ) imposés par les tolérances à partir des critères de conception et de fabrication (l'usinabilité des matériaux, les dimensions, etc.)

(Wiendahl, H.P.(1994)[36] propose un prototype de planification de la production des lignes d'assemblage qui facilite la détermination de l'autonomie des postes d'assemblage, les procédures de planification et les graphiques relationnels des opérations. L'autonomie des postes est caractérisée par sa capacité d'alimentation dictée par les délais de livraison et la capacité de production. Elle est classifiée en type A, B, C, D et E. Les types A et B sont souvent utilisés dans la production de masse et en série sur les lignes d'assemblage. Le type A diffère du type B par le fait que le client est approvisionné directement de l'ex-stock. Des formes hybrides existent aussi (combinaison des quatre types cités ci-haut). Cependant, H. P. Wiendahl relève quelques manquements à ces formes de logistique notamment dans la planification des procédures utilisées, dans le support des décisions, etc. Afin de remédier à cette situation, il propose un prototype basé sur des approches qui améliorent l'organisation des postes avec algorithmes et des graphiques de représentation.

La procédure commence par l'étude de la surface d'opérations d'assemblage (avec le flux de matériaux et d'informations spécifiqueS) et le processus utilisé. À partir des informations recueillies à ce stade, les postes sont organisés, les approvisionnements planifiés, les temps de cycle calculés. Puis, on détermine les stocks minimums, on trace les procédures et on produit les tableaux et les graphiques de suivi.

La génération automatique d'un certain nombre de procédures a été développée et testée. Dans ces opérations, les algorithmes génétiques (GA), les algorithmes de tolérance (TA) ainsi que leur combinaison sont souvent utilisés. Celle-ci s'est d'ailleurs montrée plus efficace et présente des avantages sur le temps de calcul, la génération de meilleures solutions, la flexibilité, etc.

Shah et al.,(1993) [27] analysent quelques approches utilisées pendant la conception pour l'assemblage. Dans les travaux les plus récents, la modélisation de l'assemblage a été l'objet de plusieurs recherches sous les aspects cinématique et géométrique. Un bon nombre de chercheurs ont utilisé les structures de graphes pour modéliser la topologie de l'assemblage. Eastman, (1981) [12] a, par exemple, utilisé les graphes dans lesquels les composants sont représentés par des nœuds et les matrices de transformation avec des arcs. Wesley, (1980) [35] a aussi utilisé les graphes et développé un programme d'aide « AUTOPASS » qui modélise les relations entre les pièces et les sous-ensembles de pièces.

D'autres travaux ont été effectués sur les relations topologiques et géométriques entre les entités du produit, la spécification des contraintes et leur validation. Dans cette méthode, il est proposé de classer l'assemblage en trois catégories: l'assemblage statique, dynamique et cinématique. L'étude se limite aux deux premières catégories, où on montre l'importance des caractéristiques suivantes: relations entre sous-ensembles, fait partie de (Part-of), relations de structures (SR), degrés de liberté (DOF), contraintes de dimensions (FIT) et limites (Lts).

Le modèle d'assemblage modèle est conçu à partir des volumes primitifs (FV), des futures formes (F F ) et des sous-ensembles (SUB-A)

A partir de ces éléments, on définit les spécifications des contraintes d'assemblage en utilisant des primitives de contrôle. C'est à ce stade que les repères sont déterminés. La validation de ces contraintes requiert la résolution d'un certain nombre d'équations de contraintes relatives aux dimensions, au positionnement et à l'orientation de chaque unité d'assemblage.

#### **1.1.4 La conception pour la fabrication et pour l'assemblage**

Elle a pour but l'intégration des techniques qui optimisent les relations entre les différentes phases de l'élaboration du produit. Cette intégration doit permettre la production de données non redondantes et de diminuer les sources d'erreurs dans la transmission de données. Les bénéfices que l'on peut tirer de l'utilisation de cette approche, au-delà d'une indiscutable réduction des coûts de production, incluent la réduction du nombre de composants, la réduction des problèmes techniques de fabrication et d'assemblage, la réduction des coûts de maintenance et l'amélioration de la fonction du produit.

La mise en œuvre de cette méthodologie de conception consiste à forcer les acteurs de la conception, de la fabrication et de l'assemblage à examiner ensemble leurs besoins réciproques pour résoudre de concert les problèmes de qualité, de fonction, de production et de profit, qui sont des objectifs communs. Cette idée rejoint, d'une certaine façon, le concept de l'ingénierie simultanée qui vise justement à concevoir un produit en

analysant simultanément les aspects conception, fabrication et assemblage de celui-ci. Le fait de briser les barrières traditionnelles entre les différents services participant au cycle d'élaboration d'un produit conduit à la parallélisation de certaines tâches qui sont traditionnellement réalisées en séquence dans une approche classique. Le succès d'une telle approche est conditionné par l'existence d'une structure hiérarchique des intervenants propice au dialogue.

Les chercheurs du laboratoire Deneux. A.B. et al., (1996) [10] ont développé une méthode de conception basée sur les fonctionnalités qui intègre l'aspect dimensionnement dès la conception (la vérification de la résistance et le dimensionnement des pièces mécaniques. Pour calculer et vérifier le dimensionnement des pièces déjà conçues en CAO, il était autrefois obligatoire de les remodeler manuellement dans l'environnement d'un solveur.

L'usage des formats standards d'échange a permis de contourner ce problème, mais l'interface présente l'inconvénient de transcoder la géométrie telle quelle, sans l'adapter au métier traité par l'outil d'analyse (Labat, 92) [20]. A ce jour, le calcul mécanique en CAO fait objet de nombreux travaux de recherche. Ce problème est toujours abordé mais souvent de façon différente et plusieurs approches de solutions ont été proposées.

D'autres chercheurs présentent un concept qui valorise la fonction dans les diverses étapes de la conception, en vue de solliciter pour véhiculer les informations aux différents stades de réalisation du produit. Basée sur l'analyse du cycle de vie du produit et sur les classifications des caractéristiques de Shah [28], l'approche par la

fonctionnalité étudie la réalisation des produits en trois étapes allant de l'expression du besoin jusqu'à la définition du produit. Dans la conception détaillée, il y a une présence potentielle de la fonction calcul. À ce niveau, tous les calculs mécaniques ayant une relation avec la définition du produit sont faits: le calcul cinématique, statique, dynamique, fonctionnel, de résistance (dimensionnement) et d'évaluation. Des modèles d'étude (Larralde, 88) [21] permettent la mise en équation des paramètres caractérisant la liaison (dimensions et matériau) d'une part et les composantes du torseur d'effort appliqué d'autre part. Ceci constitue l'objet du dimensionnement fonctionnel. En effet, le but est de dimensionner les formes fonctionnelles associées à chaque liaison pour aboutir à un pré-dimensionnement fonctionnel de toutes les pièces du mécanisme. Ceci se fait en deux étapes:

- Au niveau local, on étudie une partie de la pièce pour avoir les formes fonctionnelles correctement dimensionnées;
- Au niveau global, on effectue les calculs de vérification de la forme de la pièce.

La modélisation consiste donc à explorer les liaisons homogènes permettant de faciliter la phase de dimensionnement et de pouvoir répercuter les résultats du calcul au niveau de chaque pièce du mécanisme. Ainsi la conception par fonctionnalité permet d'intégrer plusieurs aspects d'étude dans un même modèle. L'objectif de cette approche est de montrer qu'il est possible d'aborder le problème de dimensionnement dès la conception.

Deneux et al. ont aussi présenté un prototype de système qui intègre le calcul dans le processus de conception selon les points de vue fonction et outil.

Dans cette approche, ils montrent que le problème d'intégration dépend de la méthode de conception, du modèle du produit et du processus. Cette intégration préconisée consiste à assembler en un tout cohérent toutes les activités de conception dans l'objectif de favoriser l'ingénierie simultanée et concourante des acteurs (personnes et outils) afin de minimiser les pertes de temps. Pour eux, l'intégration des fonctions de conception (calcul, fabrication, modélisation géométrique, etc.) consiste à définir et à mettre en œuvre des entités de haut niveau permettant aux différentes fonctions d'interpréter les objets des autres fonctions.

Les outils de modélisation sont spécifiques pour chaque activité de conception et le passage d'une activité à une autre est actuellement confronté à des problèmes de communication entre les outils. L'intégration des outils fortement hétérogènes revient donc à assurer la communication entre eux. Plusieurs schémas standards ou spécifiques ont été définis pour résoudre ce problème, mais ces formats présentent l'inconvénient de ne pas respecter la sémantique associée aux données.

Dans la plupart des travaux parus (Narayanin et al., 1992) [24] les auteurs constatent que les solutions proposées pour résoudre le problème d'intégration du calcul dans le processus consistent en la construction d'interfaces plus élaborées entre les modelleurs géométriques et les outils de calcul (intégration des outils) Ici, l'activité calcul est considérée comme un ensemble de tâches disséminées dans tout le processus de conception et qu'une réelle intégration de ces tâches dans le processus de conception requiert les éléments suivants :

1. Un modèle du produit basé sur des entités de haut niveau qui permettent l'intégration des fonctions de calcul et de conception et manipulent les données géométriques, technologiques et structurelles;
2. La gestion de la propagation des contraintes géométriques et technologiques et la prise en compte des modifications et des remises en cause.;
3. L'utilisation du calcul a priori et a posteriori.

Une attention particulière est portée aux domaines de modélisation technologique et technique qui concernent les métiers et dans lesquels le recours aux calculs est fréquent.

Grudzien, (1996)[16] et son équipe considèrent que la dépendance et la sécurité sont des aspects qui doivent aussi être pris en compte dès la phase de conception. En effet, les objectifs de tout système de production étant de maintenir la qualité et une bonne place dans le marché, il devient impératif pour ce système de respecter certaines exigences qui les favorisent. Il s'agit d'analyser les caractéristiques de dépendance (la disponibilité - MUT, la fiabilité - MTTF, la maintenabilité - MTTR et la sécurité) qui permettent de définir les critères d'aide à la décision lors de l'élaboration des spécifications des composants sensibles. Il s'agit également de concevoir des programmes de test des nouveaux composants et d'élaborer des stratégies de maintenance.

Les méthodes habituellement utilisées sont celles de Suh, 1990) [30] (axiomatiques) et celles de Pahl et Beitz (algorithmiques). Leur grande faiblesse est qu'elles ne tiennent pas compte du concept d'exploitation et spécialement du domaine de la maintenance.

Le modèle que l'on propose combine les deux approches et se base sur la modélisation du produit pendant la conception et il est défini à plusieurs niveaux :

- Niveau 1 : représentation des exigences du client qui transforme les besoins en caractéristiques de fonction, spécifie les services que le produit doit satisfaire et analyse les contraintes;
- Niveau 2 : représentation des exigences de fonctionnalité qui modélisent les solutions possibles pouvant assumer les fonctions définies au premier niveau. A ce niveau les trois concepts (Jacquet et al., 1996) : fonction opérationnelle, principes opérationnels et principes de solutions sont appliqués;
- Niveau 3 : représentation technologique représentant la structure technologique du système;
- Niveau 4 : représentation de détail qui présente les spécifications détaillées du système et détermine la structure du produit final.

## **1.2 La fabrication**

L'étude de la fabrication constitue une phase principale du cycle d'élaboration d'un produit. Elle consiste à définir les spécifications de fabrication qui garantissent l'obtention des spécifications de conception. La chronologie des activités liées à la fabrication fait apparaître trois phases :

1. Analyser et interpréter la proposition de conception (dimensions, tolérances, états de surface, etc.). Elle conduit à la définition des caractéristiques qu'il est nécessaire de retrouver dans le modèle des entrées issues de la phase de

conception pour favoriser une analyse déterministe de la préparation à la fabrication.

2. Déterminer comment produire la pièce (séquence des opérations, sélection des procédés de fabrication, sélection des machines-outils, sélection des outils, etc.)
3. Produire les résultats de l'étude (simulation de la gamme de fabrication, évaluation des temps d'usinage, production des programmes de commande numérique).

### **1.3 L'assemblage**

L'assemblage donne la valeur fonctionnelle au produit. Il est tributaire de tout ce qui se décide et se fait en amont (conception du produit, technologie employée, fabrication des pièces, manutention, etc.). Le marché actuel impose une flexibilité tant au niveau du produit, qu'au niveau des lignes et des machines d'assemblage. La plupart des nouveaux produits sont fabriqués en différentes variantes. D'autre part, une industrie doit produire en même temps plusieurs types de produits. Les volumes de commande étant variables dans le temps, la capacité de production doit pouvoir être adaptée. Le département des méthodes est donc en grande partie occupé à modifier, à reconcevoir et à planifier des ressources, des produits et des plans d'implantations, à reprogrammer des machines.

L'automatisation de l'assemblage apparaît donc comme une nécessité pour permettre non seulement d'augmenter la productivité mais aussi pour définir, par un temps de cycle contrat donné, des caractéristiques qui sont pertinentes pour l'analyse du

processus d'assemblage du produit, la détermination de la gamme et des ressources d'assemblage. Il doit aussi permettre de proposer un choix de machines ou de cellules flexibles, un schéma d'implantation de la zone d'assemblage, de simuler les flots des composants et aussi de vérifier les choix posés aux différentes étapes de l'élaboration du projet.

#### **1.4 Conclusion**

Les activités de recherche couvrent un ensemble de domaines qui visent à supporter le cycle d'élaboration d'un produit incluant sa conception, sa fabrication et son assemblage. La phase de conception, dont la durée relativement à celle du produit est faible, est à l'origine de la majeure partie des coûts induits. C'est une activité de création sous contraintes. Dans un système idéal, l'aspect créativité est propre au concepteur tandis que la gestion des contraintes devrait pouvoir être confiée au système qui le supporte.

Les activités de fabrication et d'assemblage apparaissent comme des sorties de l'activité de conception sous la double contrainte de disponibilité des ressources et de minimisation du coût. Ces deux activités, peu créatives mais extrêmement interprétatives et déductives, doivent être automatisées. L'automatisation apparaît avant tout comme relevant d'un problème de communication entre les divers intervenants. Un problème de communication survient entre deux acteurs lorsque l'objet de la communication n'est pas le même ou que, bien que s'agissant du même objet, la signification qui lui est donnée par chacun est différente. Il se résume donc à un

problème d'objet et de sémantique de l'objet. Pour que l'objet soit le même vis-à-vis du concepteur et du préparateur à la fabrication ou à l'assemblage, il faut que la représentation du produit soit la même pour tous. Pour qu'elle soit significative vis-à-vis de chacun, il faut qu'elle possède une valeur sémantique suffisante.

Après avoir conçu un produit, il faut pouvoir le fabriquer, l'assembler facilement à moindre coût et le mettre sur le marché. Il faut donc analyser et évaluer les possibilités et les contraintes de fabrication et d'assemblage dès la conception.

L'intégration complète de l'ensemble des phases de définition, de conception, de production et de commercialisation de produits est plus difficile à réaliser en assemblage qu'en usinage (Masclé, 1993) [23] « Le principal problème réside dans le faible niveau de la modélisation des opérations d'assemblage, contrairement à la fabrication, où les différentes opérations sont bien cernées depuis plusieurs années. Pour cette raison, une modélisation par la base de chacune des phases de l'élaboration d'un projet de conception de machine d'assemblage doit précéder une intégration réelle de chacune de ces phases dans le processus global. Cependant, on est immédiatement confronté à l'inconsistance entre les données utilisées pour concevoir le produit et les machines, pour calculer les différents paramètres : le temps de cycle, les trajectoires, et pour post-traiter le langage machine ».

Dans le chapitre suivant nous présentons la méthode d'assemblage de Boothroyd. Nous commençons par une brève présentation de sa méthodologie d'analyse, abordons ensuite une étude sommaire des tableaux utilisés pour l'analyse de l'assemblage d'un produit donné.

Nous présentons enfin les définitions des principaux termes utilisés et dégageons certaines difficultés que l'utilisateur peut rencontrer. Le tableau 1 ci-dessous donne quelques méthodes d'analyse et de conception qui sont couramment utilisés.

**Tableau 1.1 : Méthodes de conception et d'analyse couramment utilisées**

Outil de DFM	Description	Remarques
DFA	Méthode systématique pour réduire le nombre de pièces et s'assurer d'un bon assemblage.	Facile à implanter et bons résultats
CAO-FAO	Utilisation des logiciels pour la conception, l'analyse et la programmation des machines de fabrication et d'inspection	Bon contrôle de la configuration de la conception, aide à optimiser les analyses.
QFD	Méthode pour identifier et quantifier les besoins du client et les incorporer dans les différents processus de conception et de fabrication	Fournit une traçabilité entre les exigences des différents processus (conception et fabrication)
FMEA " Failure mode and effect analysis "	Méthode pour analyser les causes et effets des défaillances du système avant que la conception soit terminée	Aide à prévenir les défaillances d'un produit ou d'un système.
Analyse de la valeur	Approche systématique qui identifie les fonctions et en établit leur valeur.	Bon outil pour établir les coûts des configurations

## **CHAPITRE 2 : LA MÉTHODE DE BOOTHROYD**

La méthode de Boothroyd est un processus itératif qui permet de choisir la méthode d'assemblage, d'analyser les temps, les coûts et les difficultés associées à l'assemblage. Boothroyd assume qu'il est important de décider en début d'étude quel type de système d'assemblage sera probablement employé, soit celui présentant les coûts les plus bas.

Le choix de la méthode d'assemblage se fait à partir de certains paramètres tels que la durée de vie du produit, le nombre de composants et de sous-assemblages à assembler, le nombre de variantes de ces composants, le volume annuel de production, etc. Selon que l'assemblage choisi est manuel ou automatique, différents tableaux permettent de calculer les temps et les coûts d'assemblage de chacun des composants, des sous-assemblages ou des procédés utilisés et d'en déterminer l'efficacité.

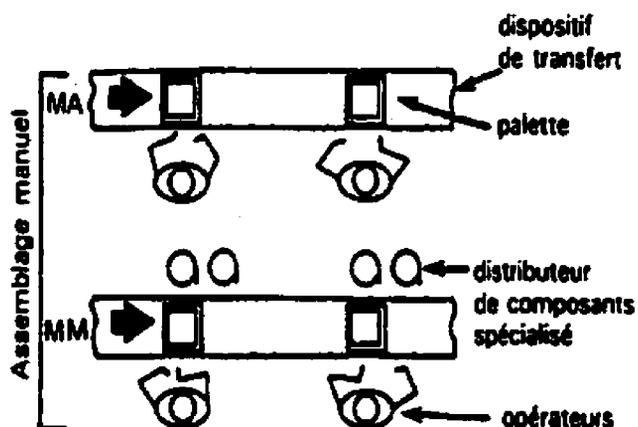
### **2.1 Les classes de méthodes d'assemblage selon Boothroyd**

#### **2.1.1 Assemblage manuel**

Boothroyd distingue deux possibilités :

- l'assemblage manuel (noté MA),
- l'assemblage manuel assisté mécaniquement (noté MM).

Le coût unitaire des assemblages manuels (MA) est relativement constant et



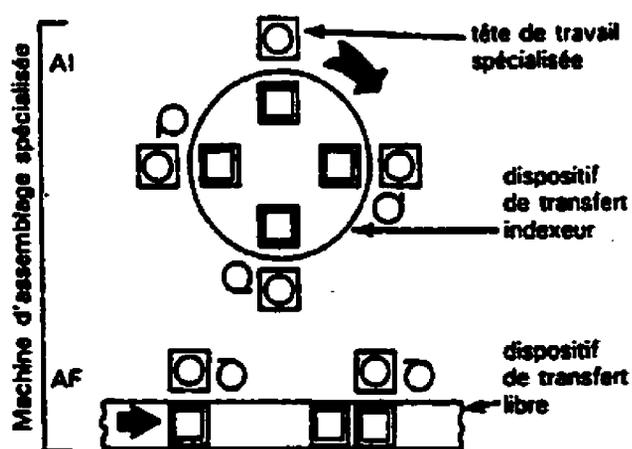
indépendant de la production en volume. Ce type de méthode d'assemblage est donc très flexible et facilement adaptable. L'assistance mécanique (MM) permet de réduire le temps d'assemblage et peut s'avérer être

plus économique dans certains cas.

**Figure 2.1 : Schéma pour assemblage manuel**

### 2.1.2 Assemblage par machines spécialisées

Ces machines sont conçues pour assembler un produit spécifique et sont équipées d'un



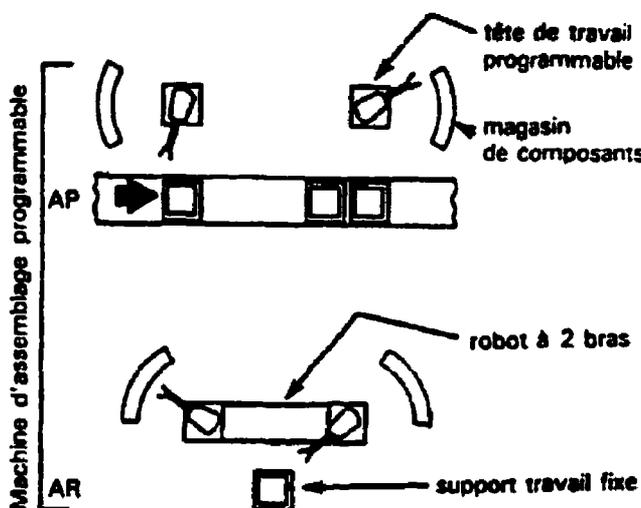
dispositif de transfert. Celui-ci peut opérer sur un principe d'indexage synchronisé (AI) ou de transfert libre non synchronisé (AF). Ces machines spécialisées sont chères, peu flexibles et impliquent un développement

important avant le fonctionnement optimal.

**Figure 2. 2 : Schéma pour assemblage automatique**

### 2.1.3 Machines programmables

Ces machines sont identiques aux machines spécialisées non synchronisées à l'exception des unités de travail qui sont multi-spécialisées et programmables. Une telle disposition



(AP) assure une grande flexibilité.

Pour des faibles volumes de production, deux bras du même robot peuvent travailler sur le même poste de travail (disposition AR). Il est à noter que cette disposition n'apparaît pas dans le tableau de Boothroyd, elle est développée à

part.

**Figure 2.3 : Schéma pour assemblage par machines programmables**

## 2.2 Méthodologie d'analyse de l'assemblage

L'analyse de l'assemblage choisi suit une série d'étapes chronologique :

**Étape 1 :** Inventaire de l'information sur le produit incluant les dessins d'ingénierie, les versions existantes du produit, prototypes, etc.

**Étape 2 :** Numérotation par ordre décroissant des composants et des sous-assemblages;

**Étape 3 :** Préparation de la fiche de travail;

**Étape 4 :** Remplissage de la fiche de travail;

Étape 5 : Détermination du temps de l'assemblage estimé (TM), du coût (CM) et du nombre minimum de composants théoriques (NM).;

Étape 6 : Estimation de l'efficacité de l'assemblage (EM) qui est calculée avec la

$$\text{formule suivante : } EM = \frac{3xNM}{TM} \quad (1)$$

Étape 7 : Reconception: l'analyse de la méthode débouche sur un processus de reconception qui vise à déterminer le coût et le temps de l'assemblage. Ce processus vise à l'élimination éventuelle des composants et à réduire les temps d'assemblage.

### 2.2.1 Étude pour l'assemblage manuel

Si après étude la méthode d'assemblage choisie grâce au tableau 1 de Boothroyd est l'assemblage manuel (MA,MM) Boothroyd propose une démarche pour faire une analyse de la conception afin de réduire le coût d'assemblage manuel. Dans cette analyse, les principaux aspects de la conception (caractéristiques géométriques et technologiques de la pièce, utilité de la pièce dans l'assemblage, etc.) sont examinés d'une façon systématique et l'efficacité de la conception est calculée. A la fin de la première étude, le concepteur est capable de tirer des conclusions (par exemple suppression de pièces) qui le mèneront à améliorer l'efficacité de la conception. Itération par itération, il peut arriver rapidement à un optimum.

Le principe consiste à :

- prendre une décision pour chaque composant concernant son élimination ou non ou sa combinaison avec d'autres composants,

- à faire l'estimation de temps nécessaire pour saisir, manipuler et insérer le composant.

Le concepteur peut ensuite déduire le temps d'assemblage total et le comparer avec le temps d'assemblage d'une conception idéale. Pour parvenir à la décision à prendre dans la première étape, le concepteur doit répondre à un ensemble de questions qui, présentées sous forme de tableaux, permettent de déduire un indice de ligne et un indice de colonne. A l'intersection (ligne-colonne) se trouve l'estimation du temps nécessaire à l'opération. Boothroyd distingue deux opérations dans l'assemblage manuel : la manipulation et l'insertion. Un tableau est associé à chacune de ces opérations (tableau 22 en annexe pour la manipulation manuelle et tableau 33 en annexe pour l'insertion manuelle).

Pour déterminer la nécessité du composant dans l'assemblage, le concepteur doit se poser les trois questions qui suivent. Répondre «oui» à une de ces questions démontre la nécessité du composant dans l'assemblage :

- le composant a-t-il des mouvements relatifs par rapport aux autres composants déjà assemblés ?
- le composant doit-il être d'un matériau différent ou être isolé de tous les autres composants déjà assemblés ?
- le composant doit-il être indépendant de ceux déjà assemblés pour permettre leur assemblage ou leur démontage ?

### **2.2.2 Étude pour l'assemblage automatique**

Cette étude est menée si la méthode d'assemblage choisie grâce au tableau no1 de Boothroyd est l'assemblage automatique. L'approche de cette étude est similaire à celle de l'assemblage manuel .

- une estimation du coût de la manipulation automatique du composant en vrac et sa présentation dans une orientation correcte pour permettre son insertion sur une machine d'assemblage;
- une estimation du coût d'insertion automatique du composant dans l'assemblage ainsi que du coût de toutes les opérations supplémentaires;
- une décision concernant la combinaison ou non du composant avec les autres composants de l'assemblage.

L'estimation des coûts de manipulation automatique (code à 5 chiffres) nécessite plus d'information que celle de l'assemblage manuel (code à 2 chiffres). Tout d'abord, Boothroyd fait la différence entre les composants de révolution et les autres, mais aussi selon le rapport de leurs dimensions projetées (tableau 4 en annexe) → 1<sup>er</sup> chiffre du code. Puis il détermine le code de manipulation à 2 chiffres (tableau 5 pour les composants de révolution ou tableau 6 pour les autres). Enfin, les 2 derniers chiffres permettent d'identifier les coûts supplémentaires du distributeur (tableau 7).

L'estimation des coûts d'insertion automatique est similaire à celle de l'assemblage manuel en utilisant seulement le tableau 8.

À partir de ces informations, une estimation du coût total d'assemblage et un taux d'efficacité sont calculés.

### **2.2.3 Quelques définitions des termes utilisés pour analyse d'assemblage d'un produit donné**

Le processus de manipulation manuelle comprend la prise en main, le transfert et l'orientation des composants ou sous-assemblages avant qu'ils soient insérés ou ajoutés au support de travail ou à l'assemblage partiellement construit.

Les composants peuvent présenter des difficultés de manipulation s'ils s'emboîtent ou sont liés, sont collés ensemble en raison de forces magnétiques ou couches de graisse, etc., sont glissants ou demandent une manipulation soignée.

Un composant est dit de révolution lorsque sa forme de base est un cylindre ou un prisme régulier de section transversale polygonale régulière avec au moins 5 côtés ou lorsque, de forme triangulaire ou carrée, il retrouve son orientation de  $120^\circ$  ou  $90^\circ$  autour de son axe principal respectivement. « L » est la longueur et « D » le diamètre du plus petit cylindre qui peut renfermer entièrement le composant. Dans le cas de composants prismatiques, « A » est la dimension du côté le plus long, « C » est la dimension du côté le plus court et « B » est la dimension du côté intermédiaire du plus petit prisme rectangulaire qui peut renfermer entièrement le composant.

Un composant de révolution est dit de symétrie ALPHA si ses extrémités ne réclament pas d'orientation particulière. Autrement dit, si un composant ne peut être inséré dans l'assemblage que dans une direction, il est alors référencé comme n'étant pas

de symétrie ALPHA. Pour les composants avec un axe d'insertion :  $\alpha = 360^{\circ}$  , quand il y a discrimination des extrémités du composant,  $\alpha = 180^{\circ}$  dans le cas contraire.

La symétrie BETA est la symétrie de rotation d'un composant autour de son axe d'insertion ou de manière équivalente autour d'un axe perpendiculaire à la surface sur laquelle le composant est placé durant l'assemblage. L'amplitude de la symétrie de rotation est le plus petit angle que le composant parcourt pour répéter son orientation.

Bêta =  $0^{\circ}$  pour un cylindre inséré dans un trou circulaire, bêta =  $90^{\circ}$  pour un composant à section carrée inséré dans un trou carré.

Un composant est considéré comme flexible si le composant ou une section du composant ne peut maintenir sa forme lors de la distribution automatique et créer ainsi des difficultés de fonctionnement des dispositifs d'orientation. Dans le cas de la manipulation manuelle, un composant flexible se déforme d'une façon importante pendant la manipulation et nécessite l'emploi des deux mains. Exemple de composants flexibles : larges garnitures en papier ou en feutre, bandes ou courroies en caoutchouc, etc.

Un composant est considéré comme délicat si les dommages peuvent survenir au cours de la manipulation, dommages dus, soit à des casses provoquées lors de la chute des composants des secteurs d'orientation ou des rampes sur la base de la trémie, soit à l'usure provoquée par la recirculation des composants dans la trémie. Quand l'usure est le critère de dommage, un composant est considéré comme délicat s'il ne peut pas circuler dans la trémie pendant 30 minutes tout en conservant la tolérance requise.

Un composant est considéré comme collant si une force, comparable au poids d'un composant non emmêlé ou non emboîté, est requise pour le séparer des autres en vrac.

Un composant est considéré comme léger pour être manipulé par les distributeurs-trémies conventionnels si le rapport de son poids au volume de son enveloppe est inférieur à 1.5 KN/m<sup>3</sup>.

Des composants auront tendance à se recouvrir dans un distributeur quand un alignement meilleur que 0.2 mm est nécessaire pour prévenir le galetage ou le recouvrement pendant la distribution en file unique sur une rampe horizontale.

Un composant est considéré comme étant trop grand pour être manipulé par : des distributeurs-trémies conventionnels lorsque sa plus petite dimension est supérieure à 50 mm ou lorsque sa dimension maximale est supérieure à 150 mm, un distributeur-trémie vibrant particulier si  $L > d/8$  ( $L$  est la longueur du composant mesurée parallèlement à la direction de distribution et  $d$  est le diamètre du distributeur ou du pot).

Un composant est considéré comme étant trop petit à manipuler correctement par : des distributeurs trémies conventionnels quand sa plus grande dimension est inférieure à 3 mm, un distributeur-trémie vibrant particulier si sa plus grande dimension est inférieure au rayon (mesuré dans un plan perpendiculaire à la direction de distribution) de la surface courbe qui relie la paroi de la trémie à la surface de la rampe.

Les composants sont considérés comme emboîtés si, en vrac, ils se lient entre eux et provoquent des problèmes d'orientation. Aucune force n'est nécessaire pour séparer les composants emboîtés. Dans le cas de la manipulation manuelle, les deux

mains sont nécessaires pour assurer la séparation ou pour obtenir l'orientation spécifique.

Les composants sont considérés comme sévèrement emboîtés ou emmêlés si, en vrac, une réorientation est nécessaire pour les séparer. Dans le cas de la manipulation manuelle, les deux mains sont nécessaires pour assurer la séparation ou pour obtenir l'orientation spécifique.

Les composants sont dits sévèrement emmêlés s'ils nécessitent des manipulations pour les orienter de manière spécifique et si une force est nécessaire pour les séparer. Dans le cas de la manipulation manuelle, les deux mains sont nécessaires pour assurer la séparation ou pour obtenir l'orientation spécifique.

Un composant est considéré comme abrasif s'il peut provoquer des dommages à la surface du dispositif de distributeur-trémie sauf si ces surfaces sont traitées spécialement.

Un composant est l'élément solide ou non d'un assemblage ajouté durant le processus d'assemblage. Un sous-assemblage est considéré comme un composant s'il est ajouté au cours de l'assemblage. Toutefois, adhésifs, flux, baguettes de soudure, ... employés pour assembler les composants ne sont pas considérés comme des composants.

Le maintien se rapporte à une opération qui, si nécessaire, maintient la position, l'orientation d'un composant déjà en place, avant ou pendant l'opération d'assemblage suivante ou durant le transfert de l'assemblage au prochain poste d'assemblage.

Un composant est positionné s'il ne nécessite pas de maintien ou de réalignement lors des opérations suivantes et s'il est seulement partiellement fixé.

Un composant est facile à aligner et à mettre en place si la position du composant est établie par la localisation des caractéristiques sur le composant ou sur sa partie jumelée et l'insertion est facilitée par des chanfreins ou des caractéristiques similaires bien conçus.

L'épaisseur ou  $Y_{min}$  est la dimension du plus petit côté du plus petit prisme rectangulaire qui renferme le composant. Toutefois, si le composant est cylindrique ou si sa section transversale est polygonale régulière, avec 5 côtés ou plus, l'épaisseur est définie comme le rayon du plus petit cylindre qui peut renfermer le composant.

La longueur ou  $Y_{max}$  est la dimension du plus long côté du plus petit prisme rectangulaire qui peut renfermer le composant.

Les composants glissants sont ceux qui glissent facilement des doigts ou des outils standards en raison de leurs formes et/ou de leurs conditions de surface.

Les composants qui demandent une manipulation soignée sont ceux qui sont fragiles ou délicats, ont des angles ou des bords tranchants ou présentent d'autres risques pour l'opérateur.

Accès encombré signifie que l'espace disponible pour l'opération d'assemblage provoque un accroissement significatif du temps d'assemblage.

Vue limitée signifie que l'opérateur doit se fier principalement à la sensation de toucher pendant le processus d'assemblage.

Immobilisation nécessaire signifie que le composant est instable après le placement, l'insertion ou durant les opérations suivantes, et donc requiert un maintien, un réalignement ou une immobilisation avant qu'il soit finalement fixé. L'immobilisation se réfère à une opération qui, si nécessaire, maintient la position et l'orientation d'un composant en place, avant ou pendant la prochaine opération d'assemblage. Un composant est positionné s'il n'a pas besoin d'immobilisation ou de réalignement pour les opérations suivantes et s'il est seulement partiellement fixé.

#### 2.2.4 Exemple de calcul

Données : on effectue un assemblage constitué par 35 composants (NA) selon différents modèles.

1. Le nombre de composants dont le plan change est 10.
2. La production annuelle (VS) est de 500000 (0.5 million) par équipe de travail et il y a 2 équipes (SH), le coût annuel d'un opérateur d'assemblage (WA) est 20000\$.
3. Le capital alloué pour remplacer un opérateur d'une équipe en cas d'automatisation (QE) est 40000\$.

Étape 1 : Calcul du facteur d'investissement RI :

Le facteur d'investissement se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$RI = (SH \times QE) / WA \quad (2)$$

En remplaçant SH, QE et WA par les valeurs des paramètres dans la formule 2 nous obtenons la valeur de RI suivante:  $RI = 2 \times 40000 / 20000 = 4$

**Étape 2 : Sélection de la ligne appropriée :  $VS=0.5$  et  $NA=35$  ceci conduit à choisir dans le tableau 1 la ligne 3.**

**Étape 3 : Sélection de la colonne appropriée :**

**Pour sélectionner la ligne appropriée, on considère les facteurs suivants :**

**$NA=35$ , donc  $NT < 1.5NA$ ,  $ND=10$ ; soit  $ND < 0.5NA$  et  $RI=4$ ; la colonne 1 est choisie.**

**La case désignée par «3;1» renferme les lettres AP qui représentent une ligne d'assemblage automatique avec des unités de travail programmables.**

**TABLEAU 1 -  
Choix de la méthode  
d'assemblage**

Coût d'assemblage :

Faible   
  Moyen   
  Élevé

Potentiel d'investissement de la compagnie: $RI = SH \times QE / WA$ (5)		NP = 1								Une variété de produits différents mais similaires, pas d'ajustage manuel et moins de 2% de composants défectueux (6). Variété de produits, ajustage manuel de quelques composants nécessaires, fluctuations de la demande ou faible potentiel d'investissement.		
		NT < 1,5 NA Nombre de composants nécessaires pour construire différents modèles du produit 1,5 fois plus petit que le nombre de composants dans l'assemblage (3). ET ND < 0,5 NA Moins de la moitié des composants sera sujette à des modifications majeures pendant la vie du produit (4).				NT ≥ 1,5 NA Plus de 50% de composants supplémentaires sont nécessaires pour répondre à la gamme des différents modèles du produit (3). OU ND ≥ 0,5 NA Plus de la moitié des composants a toutes les chances d'être affectés par des modifications de plan pendant la vie du produit (4).						
		$S \leq RI$	$2 < RI \leq 5$	$1 \leq RI \leq 2$	$RI < 1$	$S \leq RI$	$2 < RI \leq 5$	$1 \leq RI \leq 2$	$RI < 1$			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0,65 < VS volume de production annuel par équipe supérieur à 0,65 millions d'assemblages	16 ≤ NA 16 ou plus de composants à assembler	0	AF	AF	AF	MM (AF)	AP	AP	AP (MM)	MM	MA (AF)	MA
	7 ≤ NA ≤ 15 entre 7 et 15 composants à assembler	1	AF	AF (AI)	AI (AF)	MM (AI)	AP	AP	MM (AP)	MM	MA	MA
	NA ≤ 6 6 ou moins de composants à assembler	2	AI	AI	AI	AI	AI	AI (AP)	MM	MM	MA	MA
0,4 < VS ≤ 0,65 volume de production annuel par équipe entre 0,4 et 0,65 millions d'assemblages	16 ≤ NA 16 ou plus de composants à assembler	3	AP	AP	MM (AP)	MM	AP	AP	AP	MA (MM)	MA	MA
	7 ≤ NA ≤ 15 entre 7 et 15 composants à assembler	4	AI	AI	AI	MM	AP	AP	MM (AP)	MA (MM)	MA	MA
	NA ≤ 6 6 ou moins de composants à assembler	5	AI	AI	MM (AI)	MM	AI (MM)	MM	MM	MA (MM)	MA	MA
0,2 < VS ≤ 0,4 volume de production annuel par équipe entre 0,2 et 0,4 millions d'assemblages	16 ≤ NA 16 ou plus de composants à assembler	6	AP	AP	MM	MM	AP	AP	AP	MA	MA	MA
	7 ≤ NA ≤ 15 entre 7 et 15 composants à assembler	7	AI (MM)	MM	MM	MM	AP	MM	MA (MM)	MA	MA	MA
	NA ≤ 6 6 ou moins de composants à assembler	8	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MA (MM)	MA	MA	MA
VS ≤ 0,2 volume de production annuel par équipe inférieur ou égal à 0,2 millions d'assemblages		9	MM	MM	MM (MA)	MA	MM	MA	MA	MA	MA	MA

Tableau 2. 1 : Le tableau n°1 de Boothroyd

## **CHAPITRE 3 : LA LOGIQUE FLOUE**

### **3.1 Introduction à la logique floue**

Dans la vie réelle, les décisions sont souvent prises dans un environnement où les contraintes et les conséquences des actions ne sont pas précisément connues. Pour gérer quantitativement l'imprécision, on utilise généralement les concepts et les techniques de la théorie des probabilités et des outils provenant de la théorie des jeux. Le récent développement de la théorie des sous-ensembles flous a permis de créer un outil très approprié pour résoudre les problèmes de décision dans des conditions très incertaines. Selon le professeur Zadeh, L.A (1965) [37], la théorie des sous-ensembles flous est en effet un pas vers un rapprochement entre la précision des mathématiques classiques et la subtile imprécision du monde réel. Pour le moment l'homme est incapable de fabriquer une machine qui puisse le remplacer dans l'exécution de certaines tâches telles que la reconnaissance des langages, la compréhension des intentions, la prise de décision dans l'incertain, etc. Cette incapacité s'explique par la différence fondamentale qui existe entre l'intelligence humaine d'une part, et l'intelligence de la machine, d'autre part. Cette différence provient de l'aptitude humaine à penser et à raisonner en termes imprécis, non qualitatif, « flous ». Par le flou, on comprend les types d'imprécision associés avec la théorie des sous-ensembles flous. Dans cette théorie, les transitions de la non-appartenance à l'appartenance à un sous-ensemble n'ont pas de frontières précises

tandis qu'au contraire, la mathématique nous apprend qu'il n'y a que deux situations acceptables pour un élément : appartenir ou ne pas appartenir à un sous-ensemble.

La logique floue est alors une théorie qui nous permet de manipuler dans des conditions incertaines, des réalités dont la connaissance est imprécise.

La théorie des sous-ensembles flous est essentiellement une mathématique bien adaptée à la communication de l'homme avec l'homme et de l'homme avec la machine; les mathématiques formelles restant le moyen de communication de la machine, dans la machine, entre les machines, quelles que soient ces machines. La logique, au sens courant du mot, est une conception des mécanismes de la pensée qui ne devrait jamais être floue, toujours rigoureuse et formelle. En approfondissant les mécanismes de la pensée, les mathématiciens se sont aperçus qu'il n'y a pas, en réalité, une logique unique mais autant de logique que l'on veut, selon l'axiomatique choisie. La logique booléenne est donc la logique associée à la théorie booléenne des ensembles; par contre, la logique floue est associée à la théorie des sous-ensembles flous.

Développée, à partir de l'année 1965 par Zadeh L.A. de l'Université de Californie à Berkley, la logique floue est une branche de la logique qui permet de manipuler, dans des conditions incertaines, des réalités dont la connaissance est imprécise. C'est une méthodologie de contrôle qui simule des pensées humaines par l'intégration des imprécisions propres à chaque système physique.

(Sangalli, 1996) [26] conçoit la logique floue comme une nouvelle mathématique qui permet de raisonner à partir des notions vagues, aussi vague que notre façon de nous exprimer parfois.

Dans un récent essai sur la science contemporaine, le célèbre mathématicien français René Thom s'interrogeait sur la vraie nature du progrès scientifique. Il déplorait le fait qu'au lieu de nous aider à comprendre la réalité, la science d'aujourd'hui soit trop occupée à calculer, à faire tourner les ordinateurs.

Les tendances actuelles dans ce domaine où se chevauchent les mathématiques, l'informatique et l'intelligence artificielle ne font que confirmer la perception de Thom, (1996) Aux prises avec des problèmes toujours complexes, les scientifiques, les ingénieurs et autres spécialistes ont recours à de nouvelles pratiques et attachent beaucoup moins d'importance qu'auparavant à la théorie. D'une manière générale, ils misent plus sur la puissance des moyens de calcul (ordinateurs plus rapides, logiciels plus performants) que sur la compréhension des problèmes à résoudre.

Certaines de ces méthodes récentes comme les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones s'inspirent des modèles biologiques. D'autres, comme la logique floue, cherchent à représenter mathématiquement l'ambiguïté, l'incertitude du langage et du raisonnement humain. Envisagées dans leur ensemble, ces techniques sont connues sous le nom encore provisoire de « calcul souple » (soft computing) Elles représentent d'autres façons de calculer, des solutions de rechange à la rigidité d'un calcul classique obsédé par la précision et d'une arithmétique implacable fixée d'avance par un programme. Ainsi, les réseaux de neurones artificiels peuvent se passer de programmes et acquérir des connaissances par l'exemple ou la pratique, à la manière du cerveau humain. En ce qui concerne les algorithmes génétiques, le « calcul » imite le processus biologique de l'évolution des espèces, où le hasard joue un rôle prépondérant.

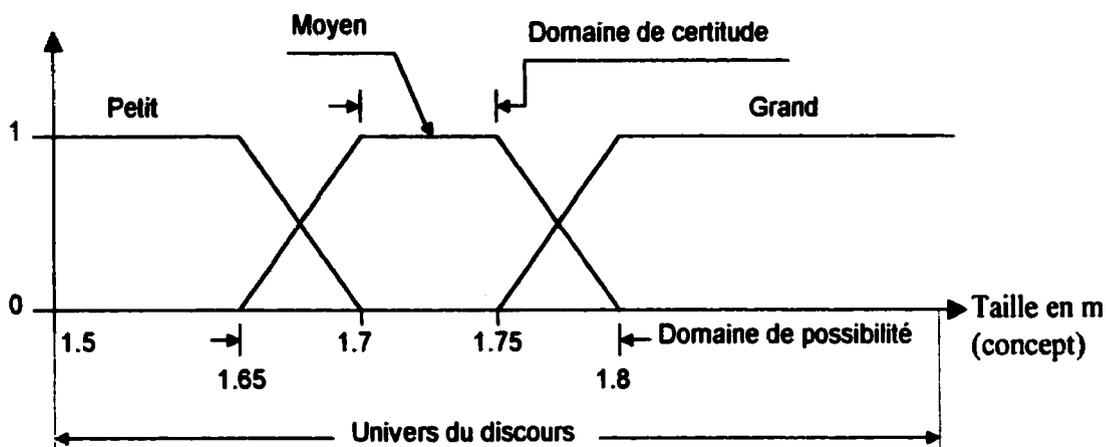
La logique floue, pour sa part, est très à l'aise avec l'imprécision et l'incertitude que l'on trouve partout dans le monde environnant : « un peu plus chaud », « pas tout à fait blanc », « environ zéro »

En 1965, le professeur Lofti Zadeh de l'université de Californie, faisait remarquer que la plupart des notions dont nous parlons (petite vitesse, personne honnête, longue maladie, etc.) n'admettent pas de définition précise et que, par conséquent, ces objets ne forment pas d'ensembles ordinaires. Pour représenter ces « classes linguistiques », il suggéra d'utiliser des degrés d'appartenance entre 0 et 1. Il désigna ces nouveaux objets par l'expression « ensembles flous » (fuzzy sets) et projeta de les utiliser par la reconnaissance automatique des formes.

En traitant par exemple la classe des personnes âgées comme un sous-ensemble flou, on permet aux gens de devenir âgés graduellement, comme dans la vraie vie. Enfin pour Zadeh, la notion d'ensemble flou n'est pas de nature statistique; le « flou » à la représente l'ambiguïté inhérente à l'intuition humaine et non une probabilité.

### 3.2 Définitions

Dans le but de mieux comprendre et clarifier la différence entre les ensembles classiques et les sous-ensembles flous, il est nécessaire de définir les termes et les concepts les plus usuels [1] [31]



**Figure 3. 1 : Termes et concepts en logique floue**

**Concept** : domaine auquel appartiennent les différents faits.

**Réalité linguistique** : expression linguistique d'un fait.

**Évaluation** : évaluation faite par l'observation et le jugement d'un cas particulier.

**Le domaine du discours** : champ de définition d'un concept.

**Possibilité ou appartenance** : c'est le niveau  $[0,1]$  de l'adhésion à un concept ou à l'évaluation dans le domaine du discours.

**Fonction d'appartenance** : un sous-ensemble flou  $A$  d'un ensemble  $U$ , appelé référentiel ou univers du discours, est défini par la fonction caractéristique  $\mu_A$  de  $U$  dans l'intervalle d'unité  $(0,1)$

$$\mu_A: U \Rightarrow [0,1], x \in U \Rightarrow \mu_A(x)$$

où  $\mu_A$  est la fonction d'appartenance et  $\mu_A(x)$  le degré d'appartenance de l'élément  $x$  dans l'ensemble flou  $A$ . Cette fonction relie chaque élément  $x \in U$  à un nombre  $\mu_A(x)$  dans l'intervalle fermé  $[0,1]$  et représente le degré d'appartenance de  $x$  à  $A$ . On peut aussi définir la fonction d'appartenance comme la fonction définie dans le domaine de discours exprimant une réalité linguistique ou une évaluation.

Domaine de certitude : portion de la fonction d'appartenance où elle est à son maximum.

Domaine de possibilité : domaine de la fonction d'appartenance où la fonction est non nulle.

On définit souvent la fonction d'appartenance en forme trapézoïdale. Les éléments qui définissent le trapèze sont les suivants :

$m1$  : début de domaine de certitude;

$m2$  : fin du domaine de certitude;

$a$  : déviation à gauche entre le domaine de certitude et celui de possibilité;

$b$  : déviation à droite entre le domaine de certitude et celui de possibilité;

$h$  : l'appartenance maximale de la fonction  $0 \leq h \leq 1$ .

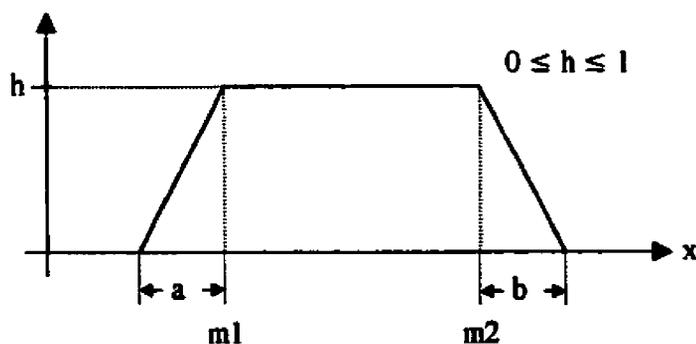
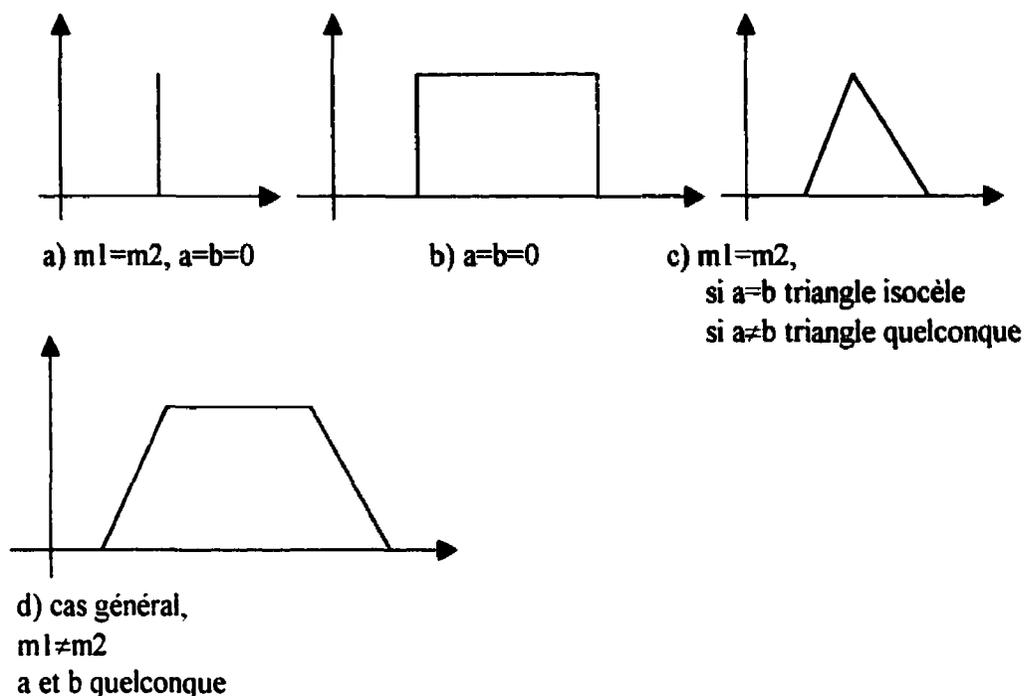


Figure 3. 2 : Définition d'une fonction d'appartenance trapézoïdale

Conformément à cette définition, les formes admissibles sont représentées à la figure 8.



**Figure 3. 3 : Définitions possibles de la fonction d'appartenance**

### 3.3 Opérateurs logiques

Les principales opérations de la théorie des ensembles flous étudiées sont l'union, l'intersection, l'égalité et l'inclusion. En logique floue comme en logique classique, il existe des opérateurs de conjonction et de disjonction.

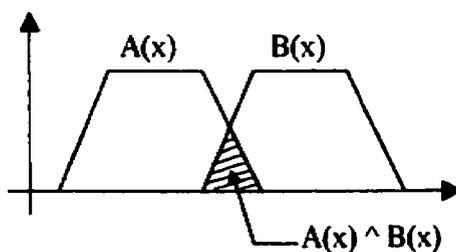
#### 3.3.1 Opérateurs de conjonction (et logique)

Intersection  $x \cdot y = \min\{x, y\}$

Produit algébrique  $x \cdot y = xy$

Produit bordé	$x \odot y = \max\{0, x+y-1\}$
Produit drastique	$x ] y = [x, \text{ si } y=1]$ $[y, \text{ si } x=1]$ $[0, \text{ si } x, y < 1]$

Pour la conjonction, l'opérateur le plus utilisé est l'intersection ou opérateur minimum. L'intersection représente le plus grand sous-ensemble flou qui contient à la fois A et B (figure 3. 4)



**Figure 3. 4 : fonction d'appartenance correspondant à l'intersection**

### 3.3.2 Opérateur de disjonction

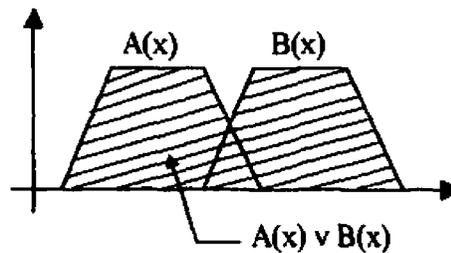
Union	$x \vee y = \max\{x, y\}$
Somme algébrique	$x + y = x + y - xy$
Somme bordée	$x \oplus y = \min\{1, x + y\}$ $[x, \text{ si } y = 0]$

Somme drastique  $= [y, \text{si } x \leq y=0$

$[0, \text{si } x,y > 0$

Somme disjonctive  $x \Delta y = \max. \{ \min(x, 1-y), \min(1-x, y) \}$

L'opérateur maximum (union) représente le plus petit sous-ensemble flou qui contient A et B (figure 3. 5)



**Figure 3. 5 : fonction d'appartenance correspondant à l'union**

### 3.4 Variables linguistiques

L'un des avantages de la théorie des ensembles flous est le développement d'une méthode pour la formulation et la résolution de problèmes trop complexes ou trop mal définis pour pouvoir être analysés par les méthodes classiques. Dans cette méthode, les valeurs assignées aux variables qui peuvent être obtenues, par exemple, par expérience d'un opérateur humain et peuvent être exprimées par des expressions telles que « grand », « moyen », « aux environs de », etc. Les valeurs de la variable floue sont donc des étiquettes floues exprimées en terme de fonctions d'appartenance respective. De

façon générale, ces étiquettes floues peuvent être des expressions d'une langue courante et on les appelle « variables linguistiques » [31]

### **3.5 Propositions floues**

#### **3.5.1 Propositions floues élémentaires**

La représentation, puis le traitement de connaissances exprimées symboliquement et non numériquement, passent par l'utilisation de variables linguistiques.

Une proposition élémentaire est définie à partir d'une variable linguistique par la qualification « V est A » (par exemple : la vitesse est grande)

#### **3.5.2 Proposition floue générale**

Une proposition floue générale est obtenue par la composition de propositions floues élémentaires : « V est A », « W est B »,... pour les variables V,W...supposées non indépendantes.

La plus simple s'exprime comme la conjonction de propositions floues élémentaires. « V est A » et « W est B » (par exemple, la vitesse est grande et l'accélération est moyenne). V et W sont définis sur des ensembles de références X et Y et sont associés au produit cartésien  $A \times B$  caractérisant la variable conjointe (V,W) sur l'ensemble  $X \times Y$ . Sa valeur de vérité est donc définie par  $\min (f_A^{(X)}, f_B^{(Y)})$  en tout point (x, y) de  $X \times Y$ .

Une telle proposition floue apparaît très fréquemment dans les règles de systèmes à base de connaissances et en commande floue comme dans le programme « FDSS » (développé par l'École Polytechnique – voir plus loin).

De même, on peut composer deux propositions floues élémentaires par disjonction de propositions floues élémentaires. « V est A » ou « W est B » ( par exemple, la vitesse est grande ou l'accélération est moyenne). La valeur de vérité de la proposition floue obtenue est définie par  $\max.(f_A^{(x)}, f_B^{(y)})$  en tout point  $(x, y)$  de  $X \times Y$ .

Une implication entre deux propositions floues élémentaires définit aussi une proposition floue que l'on peut exprimer par « si V est A, W est B ». Par exemple, si la vitesse est grande alors la route est bonne. Généralement, on peut construire des propositions floues de conjonction, disjonction ou implication portant sur des propositions floues quelconques.

En particulier, une proposition floue utilisant une implication entre deux propositions floues quelconques, sous forme « si V est A et W est B, alors U est C » (si la vitesse est grande et l'accélération est moyenne, alors la route est bonne), est une règle floue; « V est A et W est B » étant les prémisses de la règle et « U est C », sa conclusion.

### **3.6 Raisonnement en logique floue**

Lorsque les connaissances sont imprécises, vagues et incertaines, la logique classique ne suffit pas et on doit utiliser la logique floue [31] [37].

### 3.6.1 Rappel de la logique classique

En logique classique, on utilise les schémas de raisonnement tels que le modus ponens et le modus tolens.

#### a) Modus ponens

*Si*  $p \rightarrow q$  vrai et  $p$  vrai alors  $q$  vrai

#### b) Modus tolens

*Si*  $p \rightarrow q$  vrai et  $p$  faux alors  $q$  faux

Pour traiter des connaissances imprécises, L.A. Zadeh a présenté la logique floue comme une corde pour le raisonnement approximatif, c'est-à-dire le raisonnement sur des connaissances pour lesquelles des caractérisations rigides n'offraient pas de significations. Par exemple, la règle « si le prix de la voiture est inférieur à 15000 dollars, j'achète » sera utilisable si le prix est de 15100 dollars. Ce cas ne peut pas être exploité en logique classique parce que le prix indiqué ne satisfait pas la prémisse.

La logique floue peut être considérée comme une extension de la logique classique. Dans le cas où toutes les propositions floues sont booléennes, la logique floue est identique à la logique classique.

### 3.6.2 Modus ponens généralisé

Dans la logique classique, le *modus ponens* permet d'obtenir une conclusion seulement quand on connaît exactement les valeurs considérées  $p$  et  $q$ . Dans le cas d'un raisonnement approximatif, il est nécessaire de modifier le *modus ponens* pour obtenir la souplesse de raisonnement. Si les sous-ensembles flous  $A$  et  $A'$  ont des fonctions

d'appartenance peu différentes, les propositions floues « A est B et A' est B' » peuvent être considérées comme proches.

Dans le cadre du raisonnement approximatif, le *modus ponens* a son équivalent sous forme du modus ponens généralisé qui tient compte de l'idée de proximité. Cette méthode a été proposée par L.A. Zadeh. Elle peut s'écrire sous la forme :

x est A' avec la fonction d'appartenance  $\mu_{A'}$

et

Règle floue : si x est A  $\mu_A$  alors y est B  $\mu_B$

donc

y est B' avec la fonction d'appartenance  $\mu_{B'}$

Les informations disponibles pour déterminer la conclusion sont, d'une part, celles relatives à la règle et, d'autre part, celles relatives au fait observé.

La méthode d'inférence approximative basée sur la règle de composition d'inférence est utilisée dans les quatre moteurs d'inférence du logiciel FDSS. Sa composition et son fonctionnement sont présentés dans la partie Annexe de ce mémoire.

### Exemple :

Supposons une base de règles :

Règle 1 : A1  $\Rightarrow$  B1 alors

Règle 2 : A2  $\Rightarrow$  B2 alors

Règle 3 : A3  $\Rightarrow$  B3 alors

...      ...      ...

Règle n :  $A_n \Rightarrow B_n$  alors

Obs. :  $A'$

Concl. :  $B'$

Par exemple,  $B'$  peut être déduit par la composition max-min (O) sous-ensemble flou  $A'$  et la règle  $A \Rightarrow B$  (la règle d'inférence composée). On a donc :

$$B' = A' \circ (A \Rightarrow B)$$

Où :  $\circ$  est un opérateur de la règle d'inférence composée .

La fonction d'appartenance de  $B'$  peut être calculée comme une combinaison de  $\mu_{A'}$  et de

$$\mu_{A \Rightarrow B} \text{ de la forme : } \mu_{B'}(y) = \sup_{x \in X} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A \Rightarrow B}(x, y)]$$

Pour une t-norme appelée opérateur de modus ponens généralisé.

Le choix de T doit rendre le modus ponens généralisé compatible avec le modus ponens ordinaire, c'est-à-dire que l'on doit obtenir  $\mu_{B'}$  identique à  $\mu_B$  dès que  $\mu_{A'}$  est identique à  $\mu_A$ .

La figure 3.6 montre l'opération de fuzzification et défuzzification.

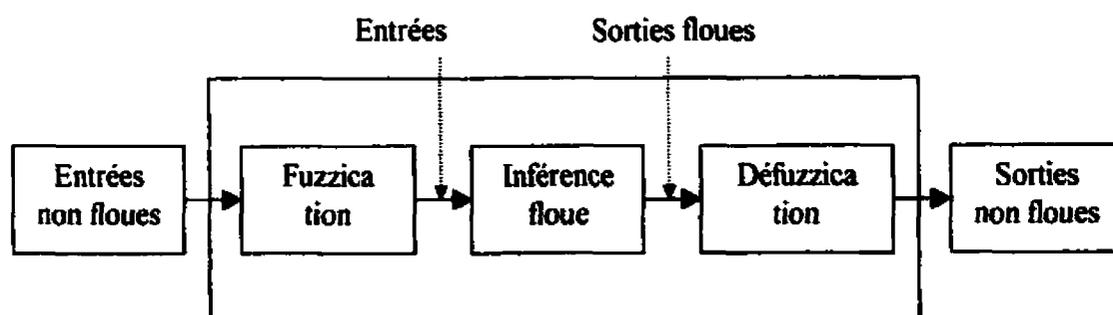


Figure 3. 6 : Illustration du traitement flou

### 3.7 Applications

Actuellement la logique floue connaît plusieurs applications dans plusieurs domaines [26]. Dans les années 1975, l'application de la logique floue dans le contrôle d'un four à cimenterie en Scandinavie a permis de réduire la consommation d'énergie d'environ 20%.

Au Japon, le contrôle de freinage du métro à l'aide d'un contrôleur utilisant la logique floue a permis d'améliorer le confort et une réduction de consommation d'énergie de 20%.

Plusieurs autres applications, notamment dans les appareils électroménagers, dans la climatisation, dans l'automobile, dans la fabrication comme le contrôle de la force de coupe « neural fuzzy controller » et dans le choix de conditions de coupe etc., ont été créés.

Au début des années 70, un ingénieur du Queen Mary College à Londres, Abe Mamdani, travaillait sur un sujet à la mode : l'apprentissage automatique. Son but était de faire en sorte qu'un ordinateur « apprenne » à contrôler le fonctionnement d'une petite machine à vapeur. Après plusieurs échecs, il décida de changer d'approche : plutôt que d'entraîner l'ordinateur à apprendre par lui-même, il allait lui fournir un manuel de procédure. Aidé par son étudiant Seto Assilian, Mamndani condensa en 24 règles linguistiques les connaissances nécessaires pour contrôler la machine. Ces consignes avaient toutes le même format simple : si [conditions rencontrées] alors [mesures à prendre]. Par exemple : « Si la pression est très au-dessous de la normale, alors augmenter beaucoup la chaleur ». Grâce aux ensembles flous il parvint à faire

comprendre ce langage à l'ordinateur. Ainsi, à chaque variable d'un système donné correspondra une fonction décrivant son degré d'appartenance.

A l'aide de cette méthodologie, la théorie des ensembles flous permet de convertir des expressions vagues comme « vitesse moyenne », « réduire légèrement » en des relations numériques qui rendent possible, par la suite, l'expression des règles de procédure nécessaires au contrôle du système sous forme d'opérations mathématiques. La traduction de ces opérations dans la langue de l'ordinateur n'est qu'une question de routine. Muni de ce programme et de certaines données (pression, vitesse, etc.) fournies régulièrement par des capteurs, l'ordinateur calcule les valeurs numériques (quantité de chaleur, ouverture de valve, etc.) requises pour un bon fonctionnement.

C'est ainsi qu'une petite machine à vapeur devint le premier système contrôlé par « la logique floue »

A la suite du succès de la méthode de Mamndani, l'idée d'utiliser le flou dans le contrôle de systèmes quitte les laboratoires et atteint l'industrie.

A la fin de 1990, les applications pratiques de la logique floue au Japon dépassent la centaine. La plupart sont liées à des appareils ménagers et à une gamme de produits de consommation (les machines à laver; appareils de télévision; des photocopieuses, etc.)

Le Centre de recherche informatique de Montréal (CRIM) a organisé il y a quelques années un atelier sur la logique floue et ses applications dans l'industrie. Divers projets et prototypes y furent présentés, certains faisant l'objet de thèses de maîtrise. Par exemple, une méthode floue qui permettrait de décider quand on doit

remplacer un poteau électrique, un logiciel qui déterminerait les paramètres de la coupe de métaux dans les ateliers d'usinage, etc.)

Un système d'aide à la prise de décision appelée Fuzzy flou a été développé à l'École Polytechnique de Montréal (Canada) et à l'Université de Silesie Gliwice (Pologne)

## **CHAPITRE 4 : APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE À LA MÉTHODE DE BOOTHROYD**

Dans l'application de la méthode de Boothroyd, l'utilisateur doit se servir de tableaux essentiels pour trouver par exemple une solution d'assemblage. La méthode se révèle ainsi lourde. La question est de savoir comment aider celui-ci à se retrouver dans cette information. Même si quelques résultats de recherche dans ce domaine existent déjà, il ressort que la décision est encore prise avec l'aide de l'expérience de la personne et que les outils pertinents d'aide à la décision sont encore rares.

L'idée d'utiliser la logique floue dans la méthode de Boothroyd permet d'étendre la plage utile des tableaux et de revenir à un espace continu. En effet, Boothroyd ne propose, la plupart du temps, qu'une seule méthode d'assemblage, parfois il donne une deuxième possibilité évaluée à 90% des avantages financiers de la première, et n'évalue pas le potentiel des autres. De plus, l'estimation des temps, et donc des coûts, est discrète et une faible variation d'un paramètre peut engendrer de grandes différences dans la conclusion.

Par exemple, à l'observation du tableau 22 (sous-tableau 2 de Boothroyd), on remarque des écarts importants entre deux valeurs consécutives. Dans ce tableau, la différence entre la valeur de la colonne 0 (Épaisseur > 0.25mm) et celle de la colonne 1 (Épaisseur ≤ 0.25mm) est de 90%: 3.6s pour l'épaisseur = 0.26mm et 6.85s pour l'épaisseur =

0.25mm. Ces constatations nous ont conduit à chercher la façon de caractériser de manière moins brusque ces transitions.

L'utilisation de la logique floue permet d'obtenir des transitions continues et, appliquée à cette méthode, elle se présente comme un outil d'aide à la décision efficace.

#### **4.1 Composition des règles, des prémisses et des conclusions**

##### **4.1.1 Données du problème**

Le tableau no 1 de Boothroyd comprend 6 variables qui permettent de déterminer un numéro de ligne et de colonne : VS, NA, RI, ND, NT et NP. Parmi ces variables, nous ne nous intéressons qu'à VS, NA et RI car les autres ne sont pas continues. Par exemple, le tableau est d'abord subdivisé en deux parties :  $NP=1$  et  $NP \neq 1$  selon qu'on traite un produit ou plusieurs. Compte tenu de la définition de NP, nous ne pouvons pas exprimer la notion de NP à peu près égale à 1 et, par conséquent, nous ne pouvons pas représenter NP par un ensemble flou. Il en va de même pour ND et NT. Notre base de connaissance est composée des prémisses et des conclusions suivantes :

- Prémisses 1 : VS volume de production par quart de travail
- Prémisses 2 : NA Nombre de composants
- Prémisses 3 : RI Potentiel d'investissement
- Conclusions 1 : MM (manuel)
- Conclusions 2 : MA (manuel assisté)
- Conclusions 3 : AI (automatique à transfert indexable)

- Conclusion 4 :AF (automatique à transfert libre)
- Conclusion 5 :AP (automatisation programmable)

La relation entre les règles et les conclusions est faite par un ensemble de règles déduites du tableau 1 de Boothroyd à l'exemple de :

*Si VS = 0.3, NA = 11 et RI = 3.5 alors la conclusion est MM.*

Au total nous avons construit 48 règles pour chacune des 2 parties du tableau étudié.

Nous nommons « Partie gauche », la partie du tableau délimitée par les lignes de 0 à 9 et les colonnes de 0 à 3; la « Partie droite » étant délimitée par les lignes de 0 à 9 et les colonnes de 4 à 7. La partie à l'extrême droite du tableau (colonnes 8 et 9, NP≠1) n'est pas étudiée car elle présente peu d'intérêt. En effet, on note qu' à l'intersection de chaque ligne et de chaque colonne, la conclusion est toujours la même : MA.

À l'aide de FDSS, nous avons construit le fichier suivant :

inference\_type=SUM.PROD.

defuzz\_mode=COA

[Premise 1]

name=Volume de production

1=0.000000;0.200000;0.000000;0.100000;1.000000;~0.2

2=0.300000;0.300000;0.100000;0.225000;1.000000;~0.3

3=0.525000;0.525000;0.225000;0.125000;1.000000;~.525

4=0.650000;1.000000;0.125000;0.000000;1.000000;~.65

**[Premise 2]****name=NA****1=0.000000;6.000000;0.000000;5.000000;1.000000;~6****2=11.000000;11.000000;5.000000;5.000000;1.000000;~11****3=16.000000;20.000000;5.000000;0.000000;1.000000;~16****[Premise 3]****name=RI****1=0.000000;1.000000;0.000000;0.500000;1.000000;~1****2=1.500000;1.500000;0.500000;2.000000;1.000000;~1.5****3=3.500000;3.500000;2.000000;1.500000;1.000000;~3.5****4=5.000000;10.000000;1.500000;0.000000;1.000000;~5****[Conclusion 1]****name=(Manuel) MA****1=0.000000;0.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~0****2=2.500000;2.500000;1.000000;1.000000;1.000000;~2.5****3=5.000000;5.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~5****4=7.500000;7.500000;1.000000;1.000000;1.000000;~7.5****5=9.000000;9.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~9****6=10.000000;10.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~10**

**[Conclusion 2]****name = (manuel assisté) MM**

1=0.000000;0.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~0

2=2.500000;2.500000;1.000000;1.000000;1.000000;~2.5

3=5.000000;5.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~5

4=7.500000;7.500000;1.000000;1.000000;1.000000;~7.5

5=9.000000;9.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~9

6=10.000000;10.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~10

**[Conclusion 3]****name = (aut. index) AI**

1=0.000000;0.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~0

2=2.500000;2.500000;1.000000;1.000000;1.000000;~2.5

3=5.000000;5.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~5

4=7.500000;7.500000;1.000000;1.000000;1.000000;~7.5

5=9.000000;9.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~9

6=10.000000;10.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~10

**[Conclusion 4]****name=AF (transfert libre)**

1=0.000000;0.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~0

2=2.500000;2.500000;1.000000;1.000000;1.000000;~2.5

3=5.000000;5.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~5

4=7.500000;7.500000;1.000000;1.000000;1.000000;~7.5

5=9.000000;9.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~9

6=10.000000;10.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~10

**[Conclusion 5]****name = (Automatisation programmable) AP**

1=0.000000;0.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~0

2=2.500000;2.500000;1.000000;1.000000;1.000000;~2.5

3=5.000000;5.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~5

4=7.500000;7.500000;1.000000;1.000000;1.000000;~7.5

5=9.000000;9.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~9

6=10.000000;10.000000;1.000000;1.000000;1.000000;~10

**[Rules]**

1=1;1;1;1;6;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

2=1;1;2;6;5;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

3=1;1;3;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

4=1;1;4;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

5=1;2;1;1;6;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

6=1;2;2;6;5;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

7=1;2;3;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

8=1;2;4;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

9=1;3;1;1;6;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

10=1;3;2;6;5;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

11=1;3;3;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

12=1;3;4;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

13=2;1;1;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

14=2;1;2;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

15=2;1;3;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

16=2;1;4;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

17=2;2;1;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

18=2;2;2;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

19=2;2;3;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

20=2;2;4;5;1;6;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

21=2;3;1;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

22=2;3;2;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
23=2;3;3;1;1;1;1;6;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
24=2;3;4;1;1;1;1;6;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
25=3;1;1;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
26=3;1;2;6;1;5;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
27=3;1;3;1;1;6;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
28=3;1;4;1;1;6;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
29=3;2;1;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
30=3;2;2;1;1;6;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
31=3;2;3;1;1;6;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
32=3;2;4;1;1;6;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
33=3;3;1;6;1;1;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
34=3;3;2;6;1;1;1;5;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
35=3;3;3;1;1;1;1;6;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
36=3;3;4;1;1;1;1;6;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
37=4;1;1;1;1;6;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
38=4;1;2;1;1;6;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
39=4;1;3;1;1;6;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
40=4;1;4;1;1;6;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
41=4;2;1;6;1;5;1;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
42=4;2;2;1;1;6;5;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00  
43=4;2;3;1;1;5;6;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

44=4;2;4;1;1;1;6;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

45=4;3;1;6;1;1;5;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

46=4;3;2;1;1;1;6;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

47=4;3;3;1;1;1;6;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

48=4;3;4;1;1;1;6;1;0.00;0.00;0.00;0.00;0.00

[ScreenLayout]

TitleFont=Arial,10,0,0

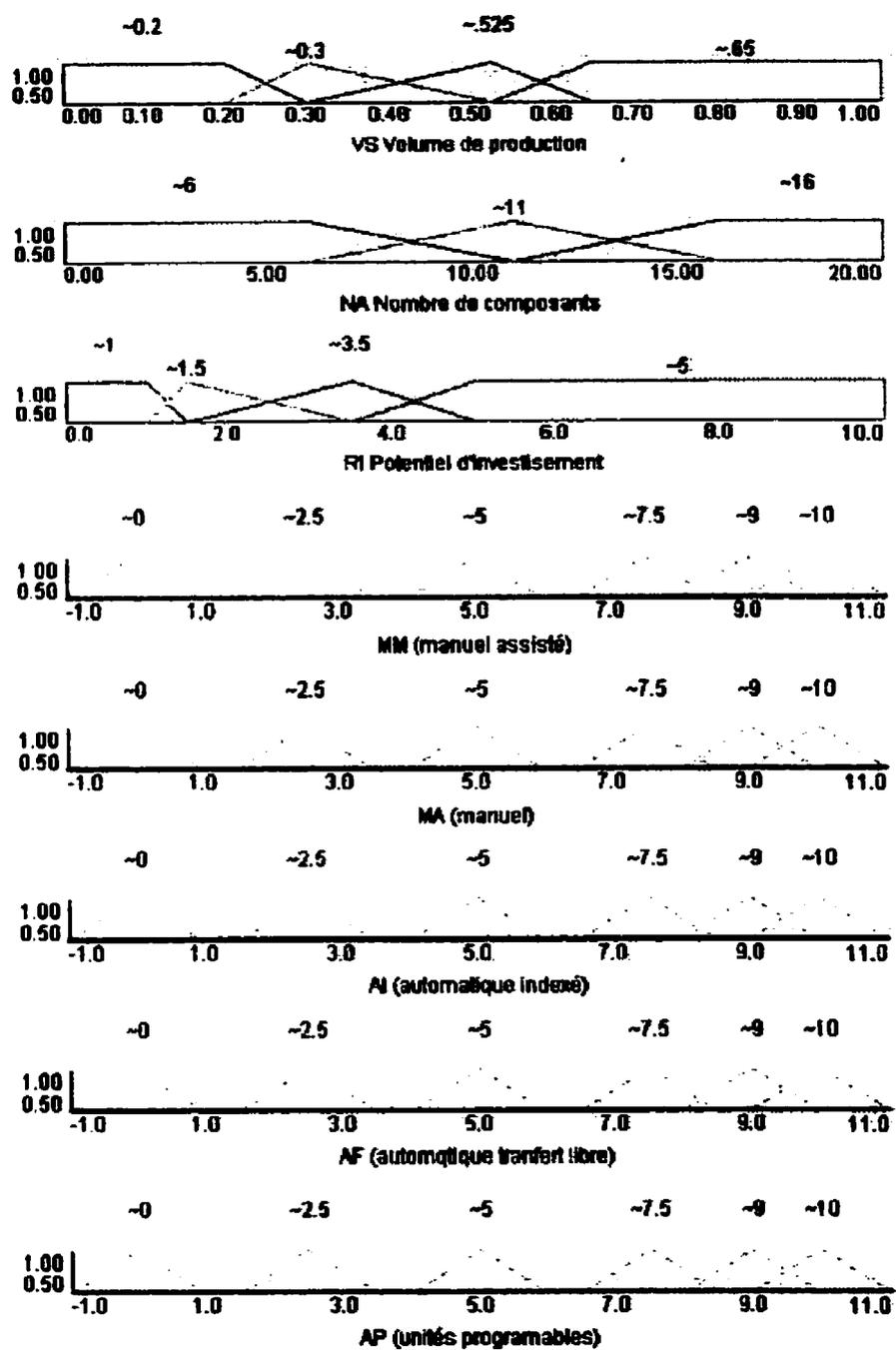
AxisFont=Arial,10,0,0

SubTitleFont=Arial,10,0,0

LegendFont=Arial,10,0,0

Les trois premiers chiffres se réfèrent aux prémisses dans le tableau de Boothroyd (Vs-volume de production par quart de travail, NA-nombre de composants, RI-facteur d'investissement) et les cinq chiffres se réfèrent aux conclusions. La sixième méthode (centre robotisé) n'est pas considéré dans le tableau.

La représentation graphique des prémisses et des conclusions est la suivante. Chaque valeur est représentée par un ensemble flou (figure 4.1)



**Figure 4. 1 : Représentation graphique des prémisses et des conclusions pour le tableau 1 de Boothroyd.**

Le volume de production varie entre les valeurs limites 0.2M et 0.65M, le nombre de composant varie de 6 à 16 et le facteur d'investissement de 1 à 10. Au delà de ces chiffres nous avons les mêmes conclusions que pour les valeurs limites, nous n'effectuons donc pas d'extrapolation.

Les cinq conclusions sont représentées de la même manière. L'échelle varie de 0 (méthode non adaptée) à 10 (méthode adéquate). L'ensemble flou ~9 représente les méthodes notées entre parenthèses dans le tableau 1. Ces méthodes sont des choix pertinents de méthode d'assemblage à 90% des coûts du choix optimal et les choix sans parenthèse sont appropriés à 100%.

Étudions les 3 exemples suivants qui mettent en évidence l'apport ou non de la logique floue.

#### 4.1.2 Exemple 1

Dans la partie gauche du tableau :

Données :  $VS=0.8$ ,  $NA=11$ ,  $RI=4$

Résultats sans la logique floue :  $AI=9$ ,  $AF=10$

Résultats avec la logique floue :  $AI=6$ ,  $AF=10$

Dans le cas précis nous lisons dans le tableau no 1 de Boothroyd que toutes les fois que le volume de production est supérieur à 0.65 M par quart de travail, que le nombre de composant est compris entre 7 et 15 et que le facteur d'investissement est compris entre 2 et 5 nous avons deux méthodes  $AF(100\%)$  et  $AI(90\%)$  qui se concurrencent. Les résultats obtenus avec la logique floue (figure 4.2), ( $AF=100\%$ ,  $AI=60\%$ ), montrent que la

différence considérée de 10% peut varier pour différentes valeurs des paramètres comprises dans une même intervalle prise pour analyse.

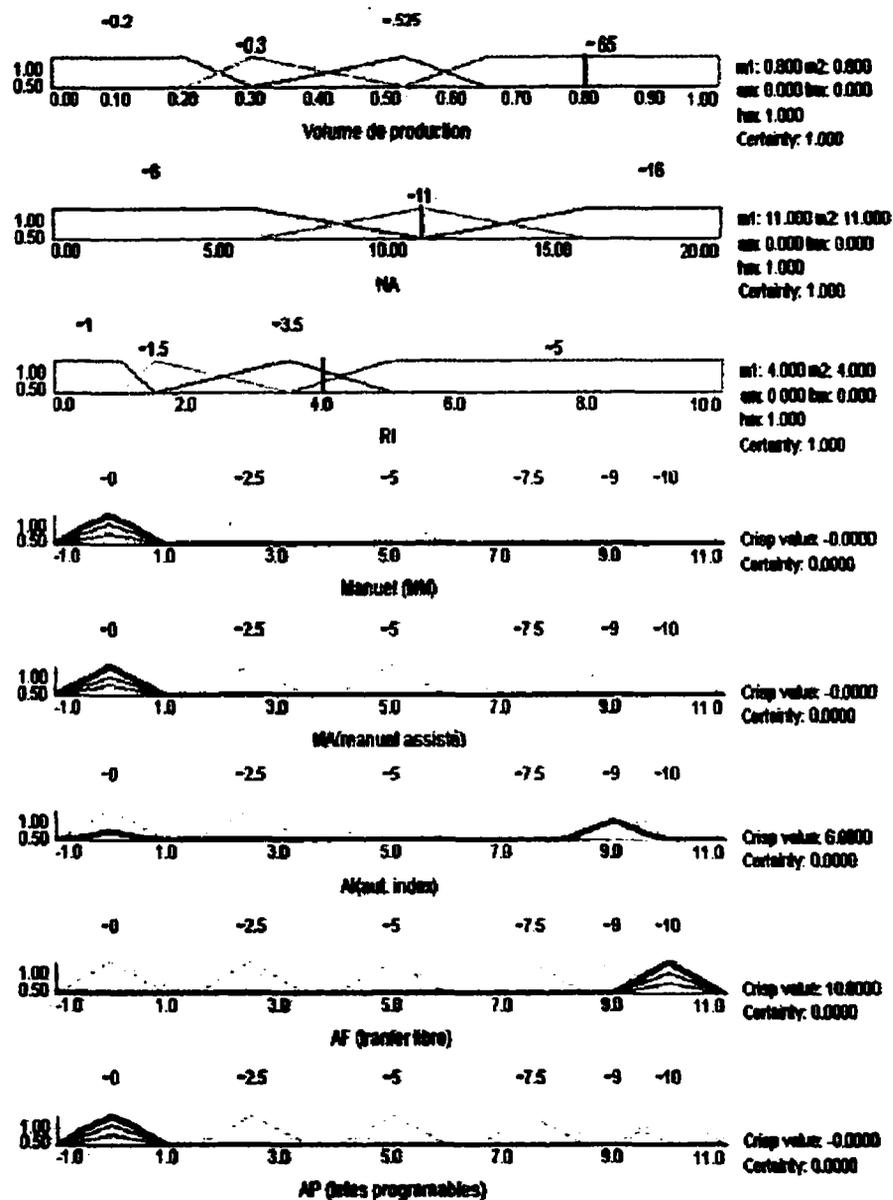


Figure 4. 2 : Résultats d'application de SAD n°1

### 4.1.3 Exemple 2

Dans la partie gauche du tableau :

Données : VS=0.8, NA=11, RI=2.5

Résultats sans la logique floue : AI=9, AF=10

Résultats avec la logique floue : AI=9.5, AF=9.5

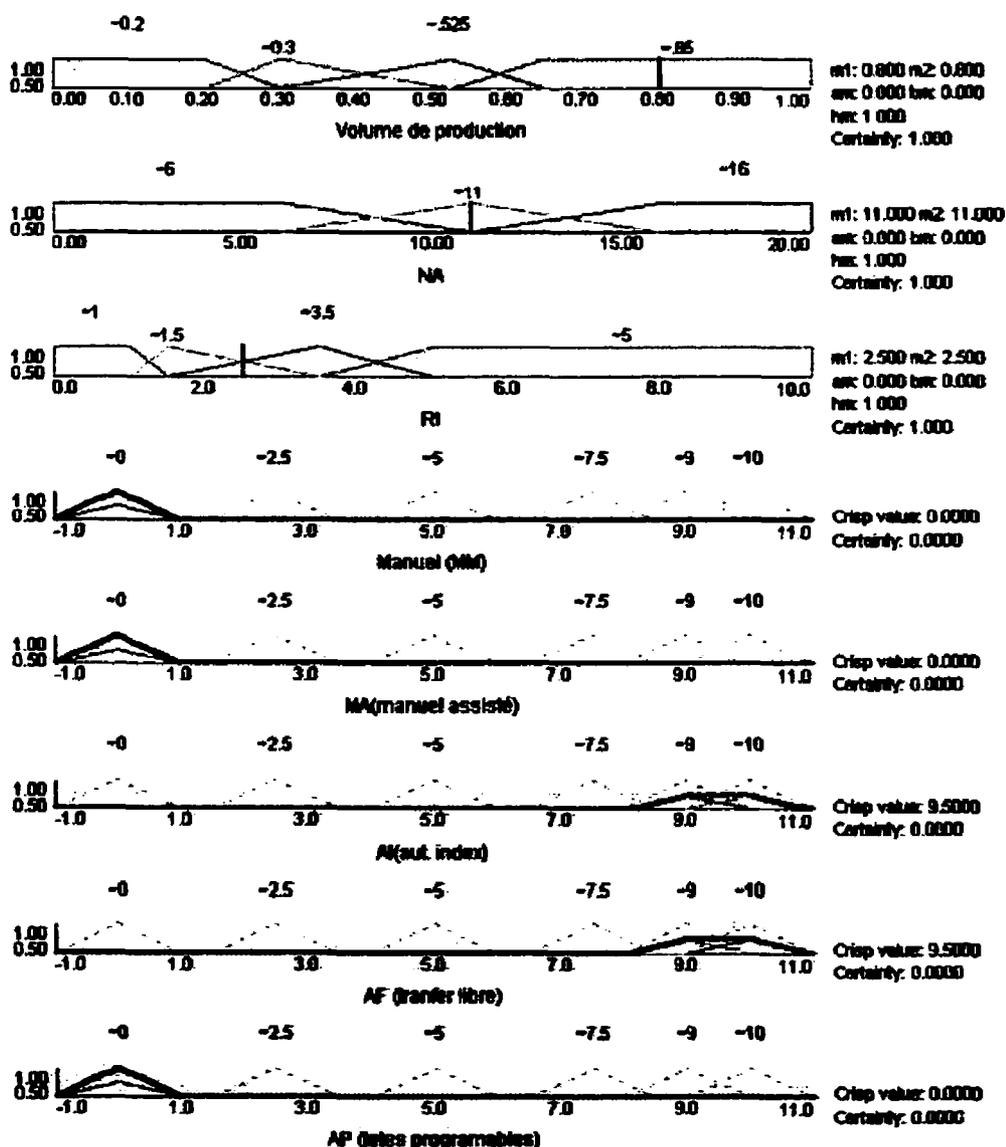


Figure 4.3 : Résultats d'application de SAD n°2

En diminuant le facteur d'investissement, les deux méthodes sont à égalité(95%)

### 4.1.4 Exemple 3

Dans la partie droite du tableau :

Données : VS=0,5, NA=20, RI=4

Dans le tableau : AP=10, la figure 4.4 montre aussi: AP=10

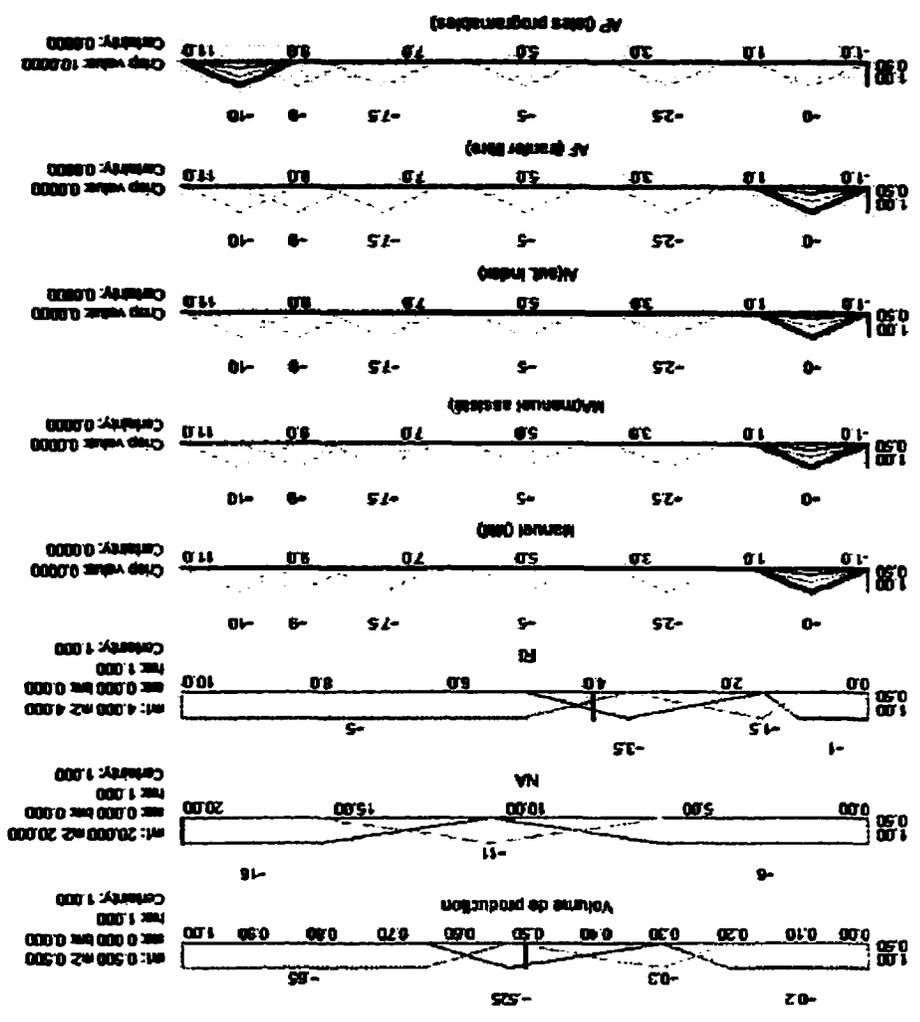


Figure 4.4 : Résultats d'application de SAD n°3

Dans ce cas précis, la logique floue n'apporte pas d'information supplémentaire. En se référant au tableau no1 de Boothroyd, on constate que pour ces valeurs de VS, NA et RI, la solution est dans une case AP et que les cases environnantes contiennent aussi AP.

Cet exemple représente les cas pour lesquels il est inutile de faire des calculs en logique floue. Dans la suite du rapport, nous présentons une méthode de simplification pour ne conserver que les données de logique floue jugées plus utiles pour notre analyse.

#### **4.1.5 Conclusions préliminaires**

La base de connaissance que nous avons construite donne de bons résultats.

Nous obtenons des résultats similaires pour les mêmes valeurs des paramètres choisies dans le tableau et pour la logique floue(exemple no3).

Les deux premiers exemples d'application montrent que le choix d'une méthode appropriée d'assemblage ne devrait pas limiter à la simple lecture du tableau. En effet, en variant les différents paramètres tout en restant dans l'intervalle défini on a d'autres solutions en plus de celles proposées par le tableau no 1 de Boothroyd. Les valeurs résultant de l'application de la logique floue sont continues. L'interpolation est linéaire et permet de visualiser le passage d'une méthode à une autre. Ainsi, l'utilisateur peut être mieux orienté dans sa prise de décision.

Simuler entièrement le tableau de Boothroyd avec la logique floue demande beaucoup de calculs et nécessite d'automatiser au maximum l'obtention des résultats. Pour parvenir à cet objectif, un programme qui génère des fichiers contenant toutes les combinaisons pour  $n$  variables qui prennent chacune  $p$  valeurs a été conçu (annexe 1).

Le fichier obtenu est ensuite traité dans le logiciel FDSS. Ensuite, une macro Excel récupère les résultats et crée automatiquement des graphiques.

Finalement, nous obtenons une série d'images qui représentent le tableau de Boothroyd. D'autres utilitaires, comme un visualisateur d'images, permettent de mettre en évidence les résultats ( annexe 2).

#### **4.2 Analyse de la partie gauche du tableau 1**

Pour notre analyse, nous avons ciblé les cases qui renferment deux possibilités de choix de méthodes et les cases avoisinantes pour montrer que FDSS donne plus de possibilités que celles offertes par Boothroyd. Pour y arriver, nous fixons d'abord une valeur de VS et de NA et faisons varier RI avec un intervalle donné. Les valeurs obtenues sont sélectionnées pour être transmises dans un tableau, est traité dans Excel pour le traçage des courbes.

##### **4.2.1 Zone $0.65 \geq VS$**

###### **4.2.1.1 $16 \geq NA$**

Dans cette zone domine AF et MM pour  $RI \leq 1$ . En prenant comme exemple  $VS=0.68$ ,  $NA=17$  et RI variant avec un pas de 0.25 dans l'intervalle de 0.25 à 2, on trouve les résultats suivants :

**Tableau 4. 1 : VS=0.67 ; NA=17 ;  $0.25 \leq RI \leq 2.25$** 

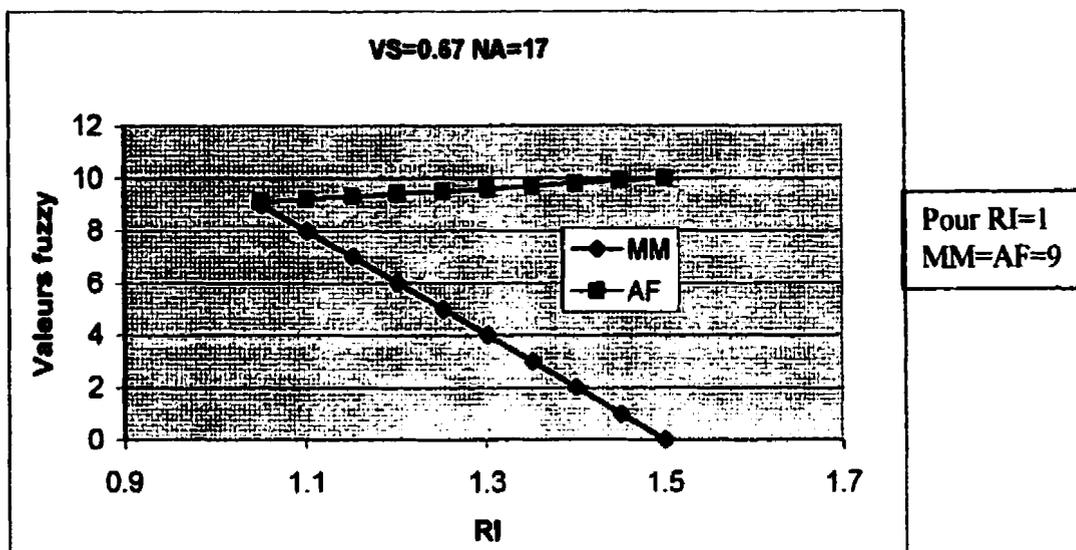
	VS=0.67 NA=17	MM	AF
1	RI=0.25	10	9
2	RI=0.50	10	9
3	RI=0.75	10	9
4	RI=1	10	9
5	RI=1.25	5	9.5
6	RI=1.50	0	10
7	RI=1.75	0	10
8	RI=2	0	10
9	RI=2.25	0	10

Les résultats du tableau correspondent au choix de Boothroyd sauf à la ligne qui montre que le changement dans les valeurs de MM est déplacé de 1 à 1.25. Pour les valeurs de RI inférieures à 1.25, MM domine tandis que pour RI supérieur à 1.25, AF domine.

En diminuant le pas de 0.05 dans l'intervalle 1 à 1.5 nous obtenons les résultats suivants :

**Tableau 4. 2 : VS=0.6 ; 7 NA=17 ;  $1.05 \leq RI \leq 1.5$** 

	VS=0.67 NA=17	MM	AF
1	RI=1.05	9	9.1
2	RI=1.10	8	9.2
3	RI=1.15	7	9.3
4	RI=1.20	6	9.4
5	RI=1.25	5	9.5
6	RI=1.30	4	9.6
7	RI=1.35	3	9.7
8	RI=1.40	2	9.8
9	RI=1.45	1	9.9
10	RI=1.50	0	10



**Figure 4. 5 : VS=0.67; NA=17;  $1.05 \leq RI \leq 1.5$**

Ces valeurs et ces graphiques permettent de mettre en évidence la transition linéaire à la ligne 0 entre les colonnes 3 ( $RI < 1$ ) et 2 ( $1 \leq RI \leq 2$ ) dans le tableau no 1 de Boothroyd.

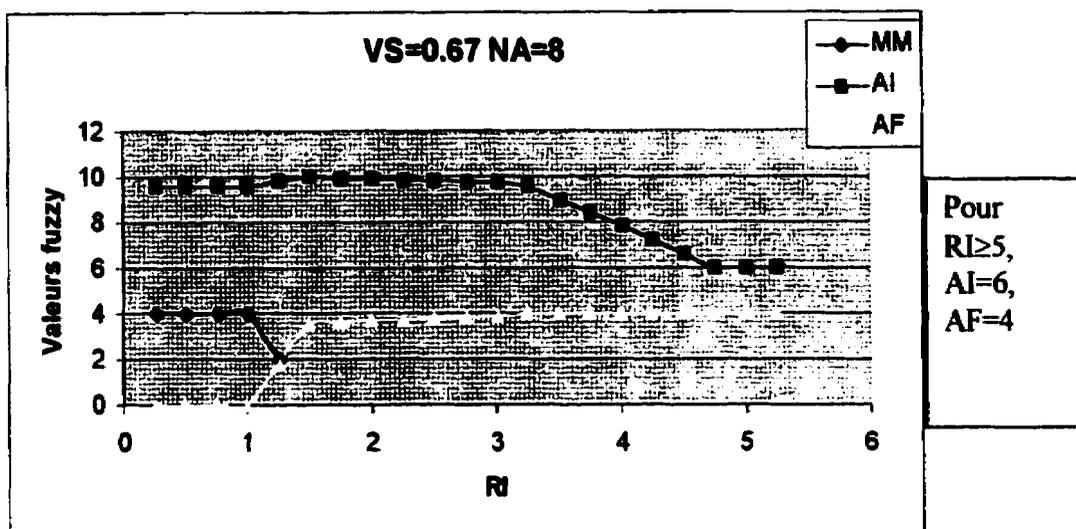
4.2.1.2:  $7 \leq N_a \leq 15$ 

Figure 4. 6 : VS=0.67; NA=8

Pour  $RI=1.25$ , nous avons  $MM=AF=2$ . Cependant, cette valeur d'intersection ne présente pas d'intérêt car la solution AI sera préférée à MM ou à AF.

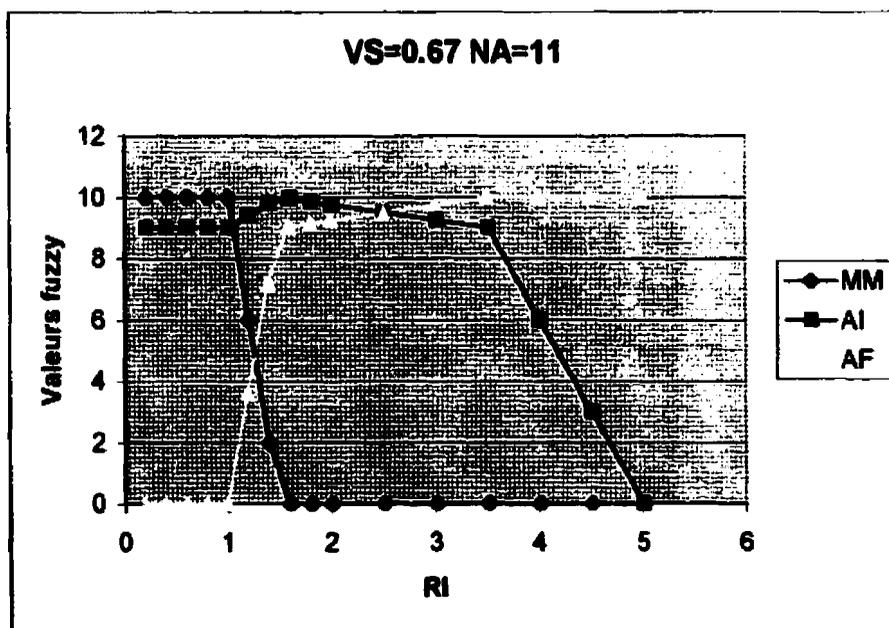


Figure 4. 7 : VS=0.67; NA=11

Dans l'intervalle de  $RI=0.25$  à 1 dominant MM et AI. Pour  $RI= 1.25$  nous avons trois choix : MM (5), AI (9.5), AF (4.5). De  $RI=1.5$  à  $RI=3.5$ , AI décroît tandis que AF croît. Pour  $RI=2.5$ , AI et AF valent 9.5.

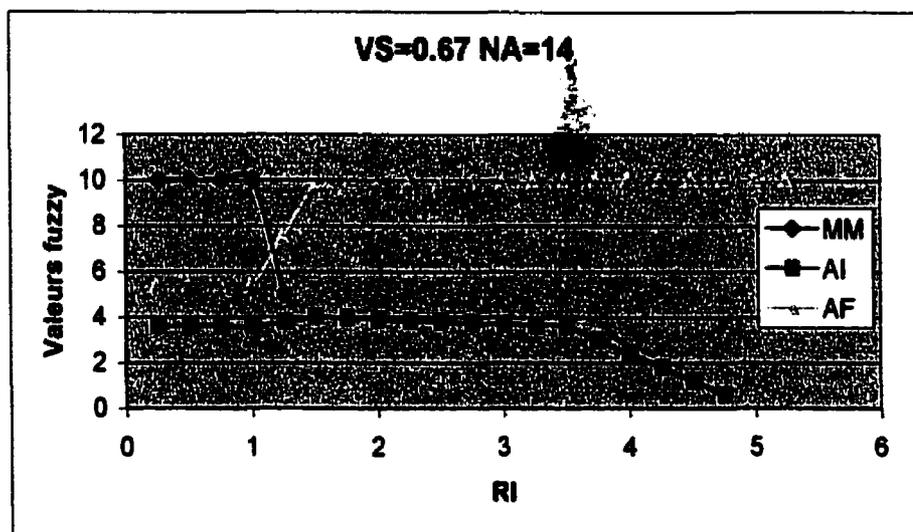


Figure 4. 8 :  $VS=0.67$ ;  $NA=14$

Pour  
 $RI=1.15$ ,  
 $MM=AF=7$

#### 4.2.2 Zone $0.4 \leq VS \leq 0.65$

Dans cette zone, trois conclusions apparaissent : MM, AI et AP. En étudiant le tableau, on constate que quand RI augmente, le choix de la méthode d'assemblage passe de manuel (MM) à automatique (AI ou AP). De plus, quand NA augmente, la conclusion change de AI à AP.

4.2.2.1 :  $16 \geq NA$

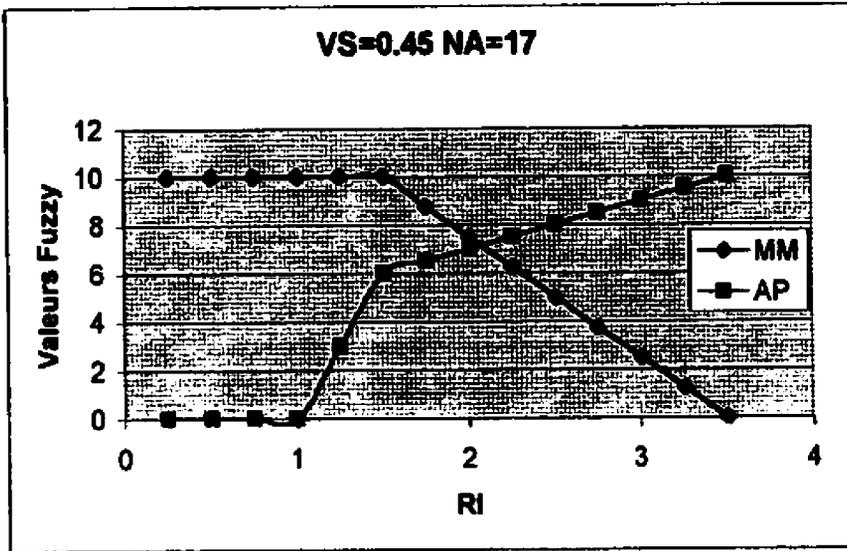


Figure 4.9 : VS=0.45 NA=17

Pour RI=2.1,  
MM=AP=7

4.1.2.2:  $7 \leq NA \leq 15$

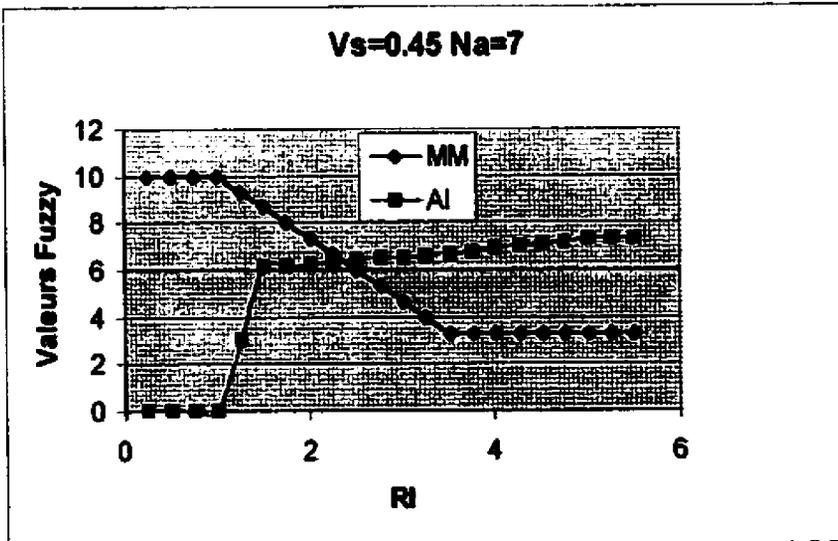
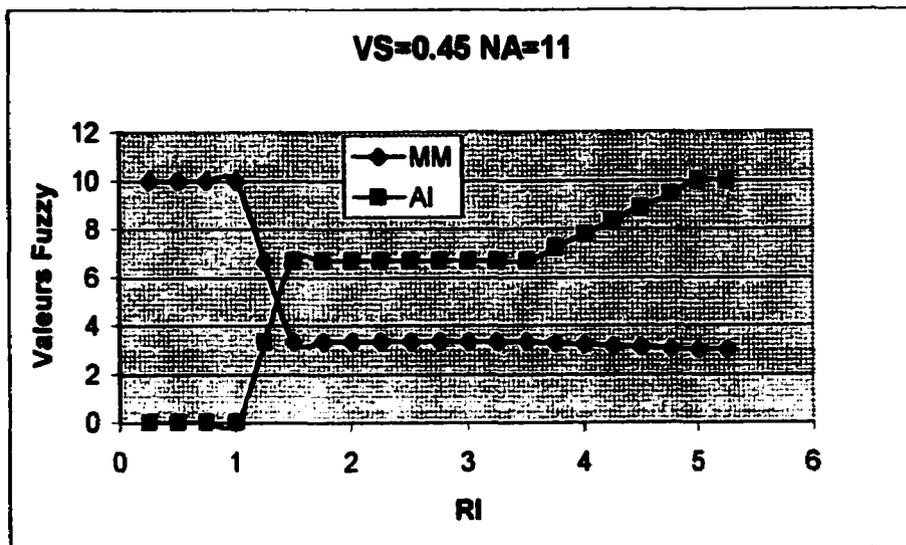


Figure 4.10 : VS=0.45; NA=8

Pour RI=2.1,  
MM=AI=6.3

Pour RI $\geq$ 5,  
AI=7.3,  
MM=3.4



**Figure 4. 11 : VS=0.45; NA=11**

Pour  $RI=1.2$ ,  
 $MM=AI=5$

Pour  $RI \geq 5$ ,  
 $AI=10$ ,  
 $MM=3$

En comparant le graphique ci-dessus avec celui ci-dessous, on remarque que quand NA augmente, la méthode d'assemblage manuel assistée MM devient de moins en moins adaptée pour RI croissant, et l'automatisation programmable (AP) devient un choix de plus en plus judicieux.

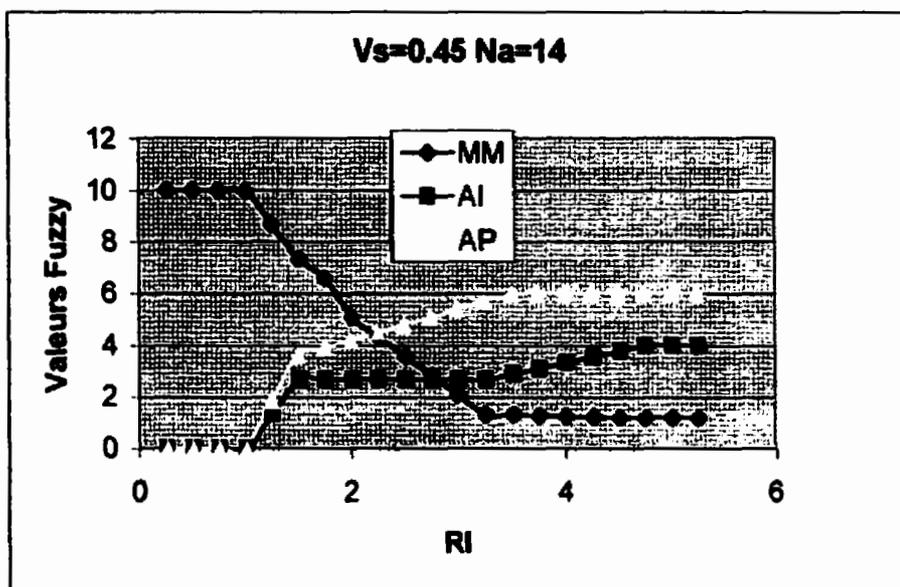


Figure 4. 12 : VS=0.45;NA=14

Pour RI=2.2,  
MM=AP=4.5

Pour RI $\geq$ 5,  
AP=6,  
AI=4,  
MM=1

#### 4.2.3. Zone $0.2 \leq VS \leq 0.4$

Dans cette zone, la méthode d'assemblage manuel assisté MM est celle qui apparaît le plus, ce qui est logique car le volume de production est faible. L'automatisation devient intéressante seulement quand le potentiel de réinvestissement de la compagnie est  $>2$ .

4.2.3.1 :  $16 \geq NA$

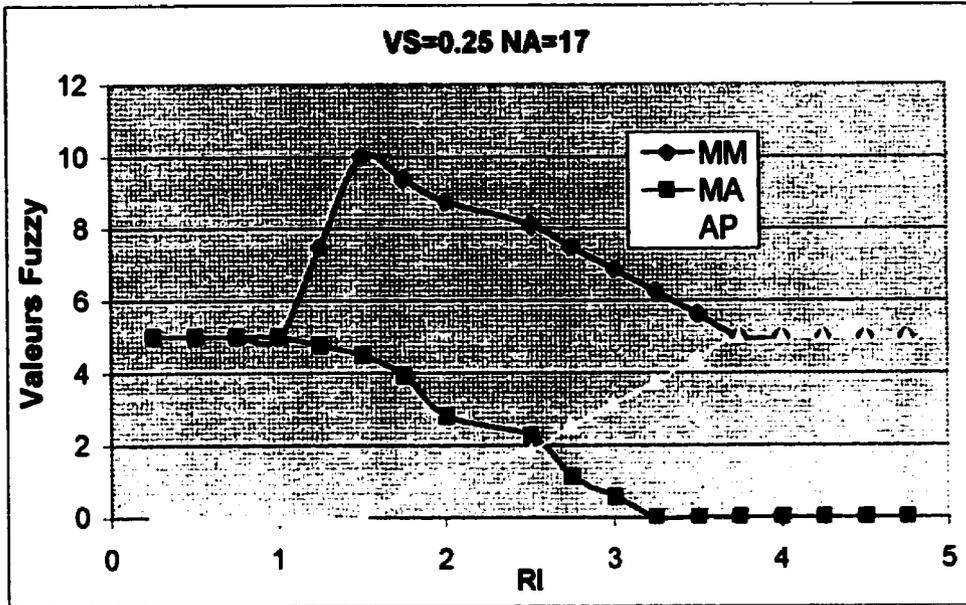


Figure 4. 13 : VS=0.25; NA=17

Pour RI=2.55,  
MA=AP=2

Pour RI≥3.75,  
MM=AP=5

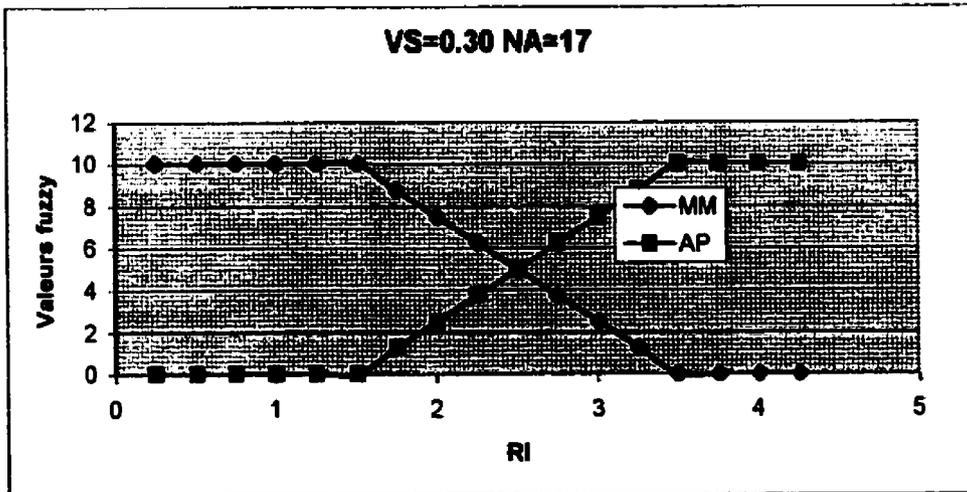


Figure 4. 14 : VS=0.30; NA=17

Pour  $RI=2.5$ ,  $MM=AP=5$ . Nous obtenons exactement le même graphique pour  $VS=0.35$  et  $NA=17$ .

#### 4.2.3.2 : $7 \leq NA \leq 15$

Pour  $NA < 11$ , plusieurs méthodes sont proposées mais il n'y a aucune intersection entre les conclusions.

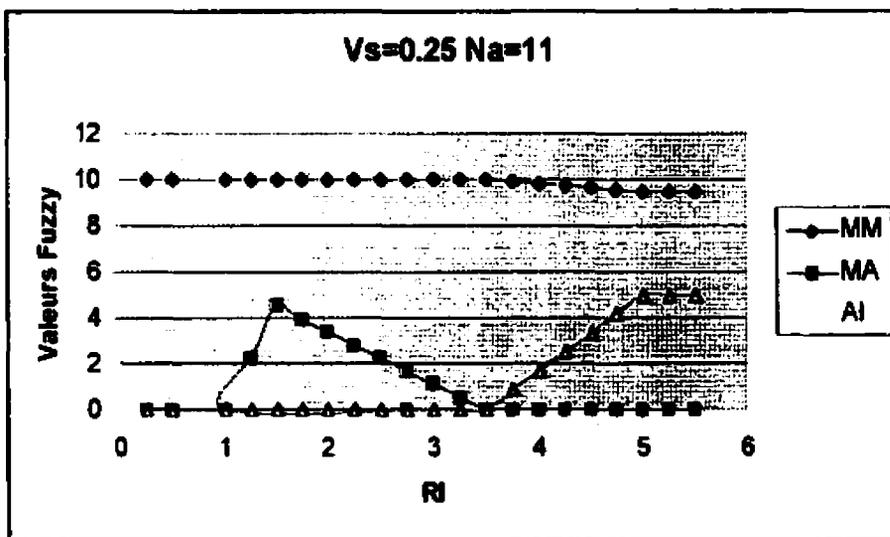
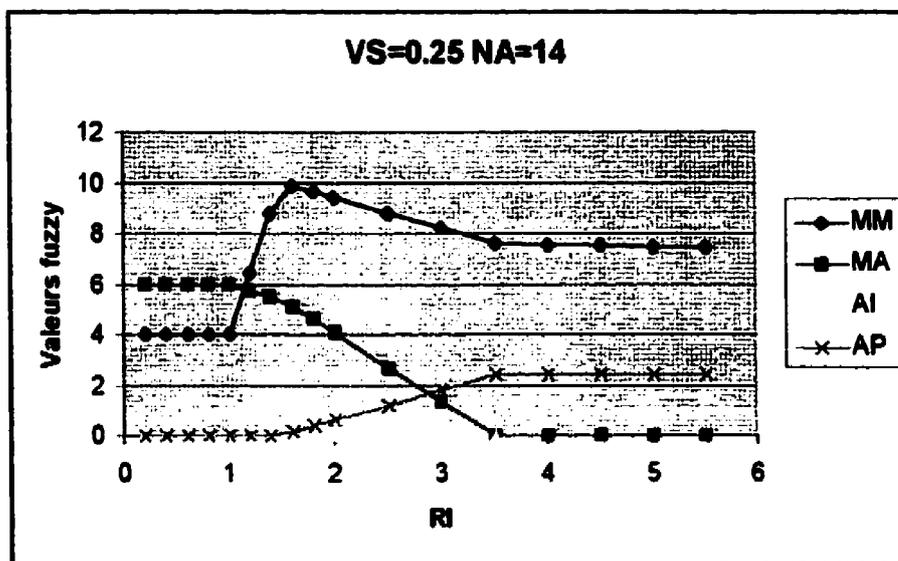


Figure 4. 15:  $VS=0.25$ ;  $NA=11$

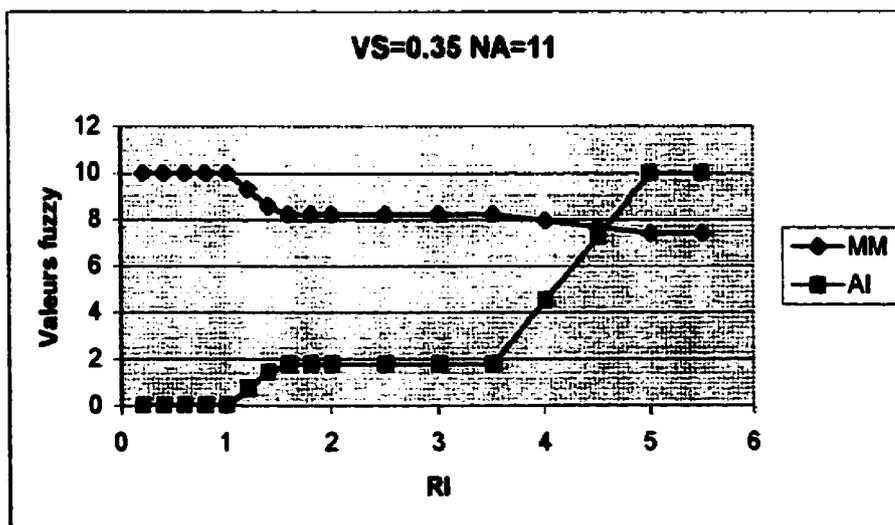
Pour  $RI \geq 5$ ,  
 $MM=9.5$ ,  
 $AI=5$



**Figure 4. 16 : VS=0.25; NA=14**

Pour  $RI=1.15$ ,  
 $MM=MA=5.8$

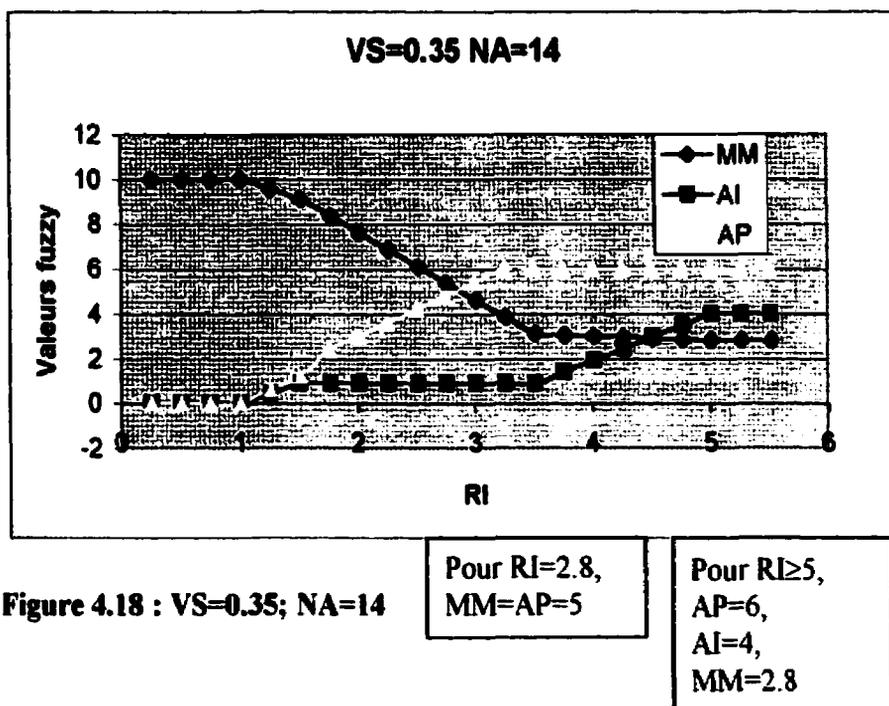
Entre  $VS=0.25$  et  $VS=0.35$ , on constate que les méthodes d'assemblage automatique prennent de plus en plus de poids. Des graphiques pour  $VS=0.35$  démontrent une transition entre ces deux états.



**Figure 4.17 : VS=0.35; NA=11**

Pour  $RI=4.6$ ,  
 $MM=AP=7.5$

Pour  $RI \geq 5$ ,  
 $AI=10$ ,  
 $MM=7.5$



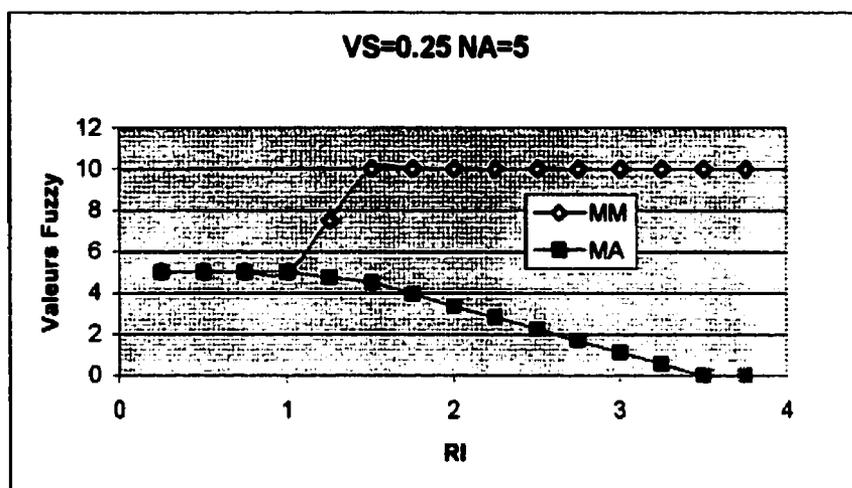
Il est important de noter que dans cette zone AP a une valeur faible(6) alors que le nombre de composant est élevé (14). Elle est proche de MM (2.8) et AI (4). Cette situation met en cause l'influence de NA dans le choix de la méthode en référence au tableau no1 de Boothroyd. cela explique peut être pourquoi les industriels hésitent à automatiser .

#### 4.2.4. Zone $NA \leq 6$

Dans le tableau de Boothroyd que, dans cette zone, les conclusions sont :

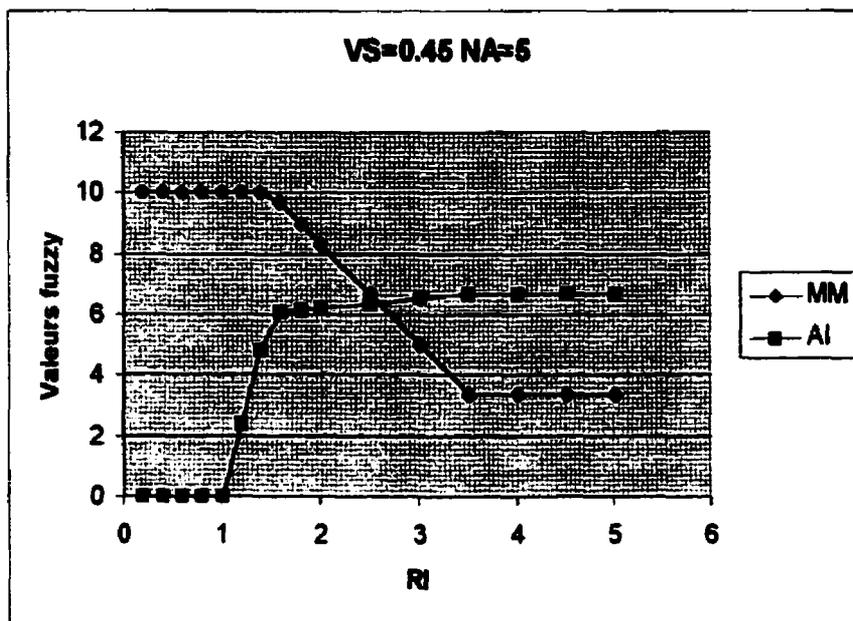
- Pour  $VS > 0.65$ , AI quel que soit RI ;
- Pour  $0.4 < VS \leq 0.65$ , AI pour  $RI > 2$ , MM pour  $RI < 1$  et MM (100%) et AI (90%) pour  $1 \leq RI < 2$  . Pour  $0.2 < VS \leq 0.4$ , MM quel que soit RI ;

- Pour  $VS \leq 0.2$  : MM pour  $RI > 2$ , MA pour  $RI < 1$  et MM (100%) et MA (90%) pour  $1 \leq RI < 2$ . Nous en déduisons que seule la transition entre les zones  $VS \leq 0.2$  et  $0.2 < VS \leq 0.4$  et celle entre  $0.2 < VS \leq 0.4$  et  $0.4 < VS \leq 0.65$  présentent un intérêt dans cette étude.



**Figure 4. 19 : VS=0.25; NA=5**

Pour  $RI < 1$ ,  
MM=MA=5



**Figure 4.20: VS=0.45; NA=5**

Pour RI=2.6,  
MM=AI=6.5

Pour RI=3.5,  
AI=6.8,  
MM=3.5

### 4.3 Analyse de la partie droite du tableau 1

Afin de ne pas être exhaustif, nous réduirons au minimum l'étude de la partie droite du tableau. Nous ne retiendrons pour illustrer les résultats que des graphiques proposant au moins trois solutions d'autant plus que dans cette partie il y a peu de variantes et de changements par rapport à la partie gauche. Le tri des données se fait toujours, en premier lieu, selon VS, NA et RI croissants. Les figures sont présentées par valeur de VS décroissantes.

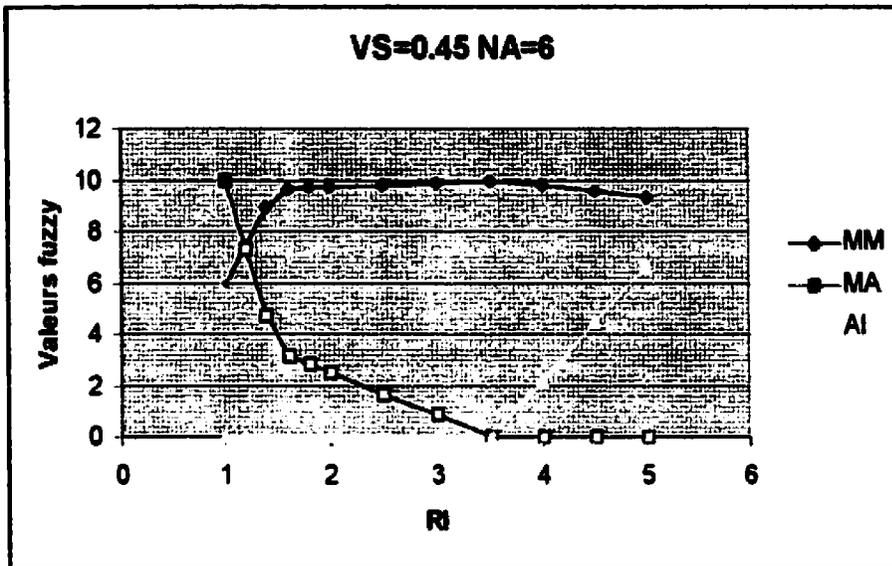


Figure 4. 23 : VS=0.45; NA=6

Pour RI=1.2,  
MM=MA=7.4

Pour RI>5,  
MM=9.3,  
AI=6.7

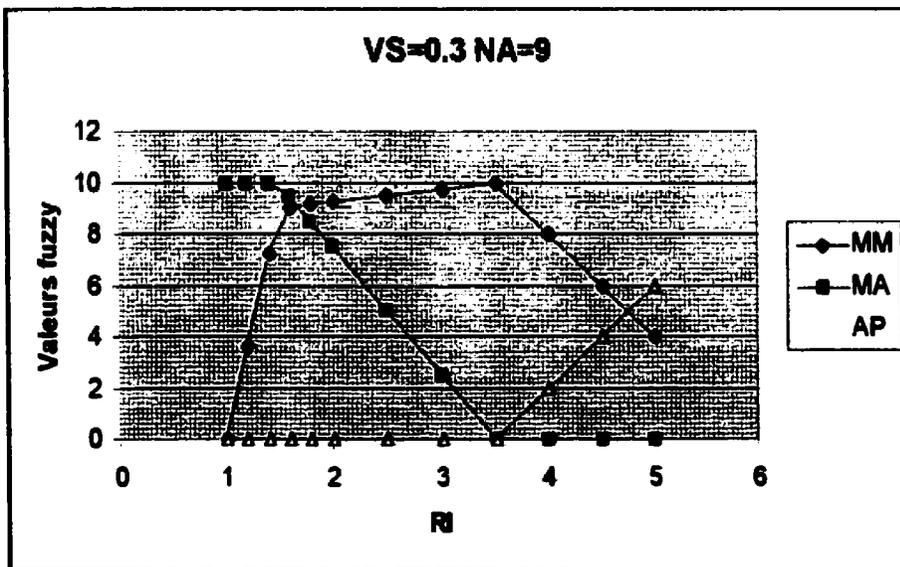


Figure 4. 24 : VS=0.3; NA=9

Pour RI=1.7,  
MM=MA=9

Pour RI=4.75,  
MM=AP=5

Pour RI>5,  
MM=4,  
AP=6

4.3.1 Tri selon VS, NA et RI

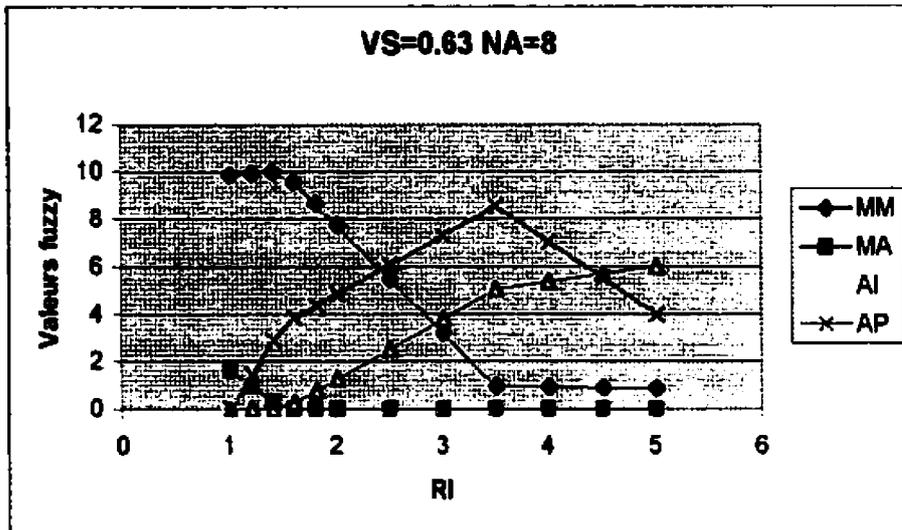


Figure 4. 21 : VS=0.63;  
NA=8

Pour RI=2.4,  
MM=AP=5.8

Pour RI=4.5,  
AI=AP=5.6

Pour RI≥5,  
AI=6, AP=4

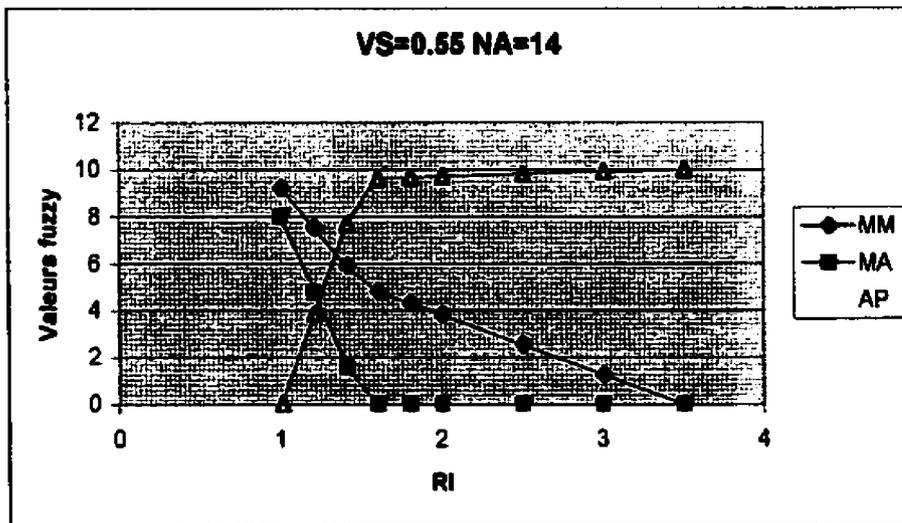


Figure 4. 22 : VS=0.55;  
NA=14

Pour RI=1.25,  
MA=AP=4.5

Pour RI=1.35,  
MM=AP=6.5

Pour RI>3.5,  
AP=10

Les quatre figures précédentes mettent bien en évidence l'influence de RI sur la solution d'assemblage : si RI augmente la tendance est orientée vers une solution automatique mais ce n'est pas toujours la meilleure solution.

#### 4.3.2 Tri selon VS, RI et NA

##### 4.3.2.1 : VS=0.63

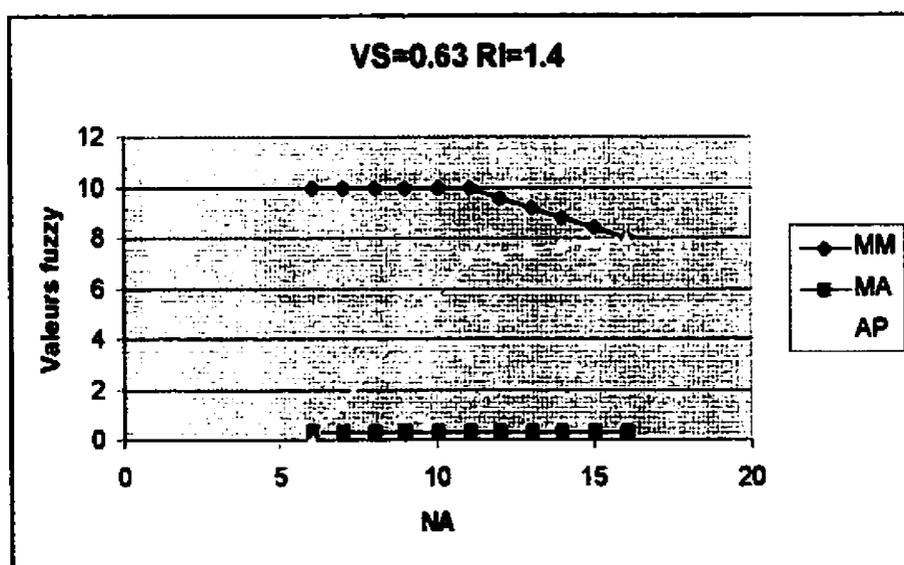


Figure 4. 25 : VS=0.63 RI=1.4

Pour  $NA > 16$ ,  
MM=AP=8

Ici on voit que AP et MM ne sont pas clairement distincts dès que  $NA > 12$ .

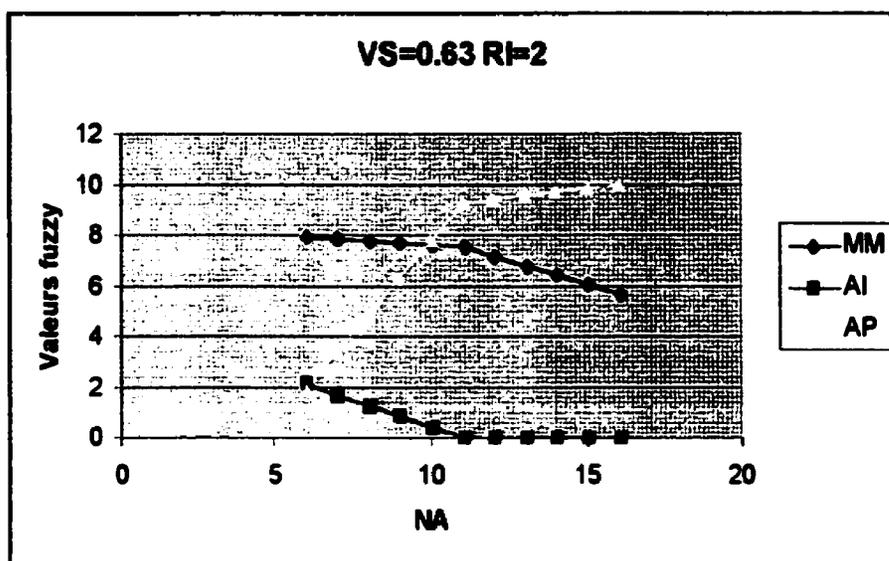


Figure 4.26 : VS=0.63; RI=2

Pour NA=10,  
MM=AP=7.5

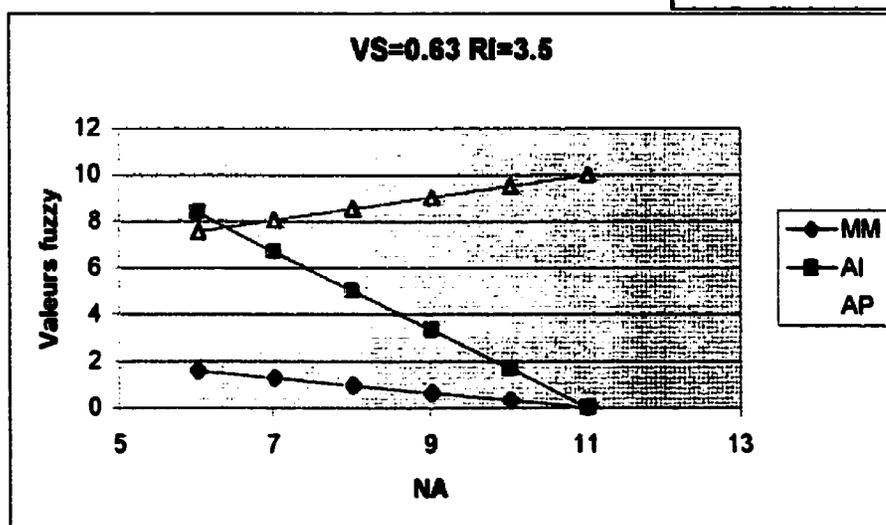
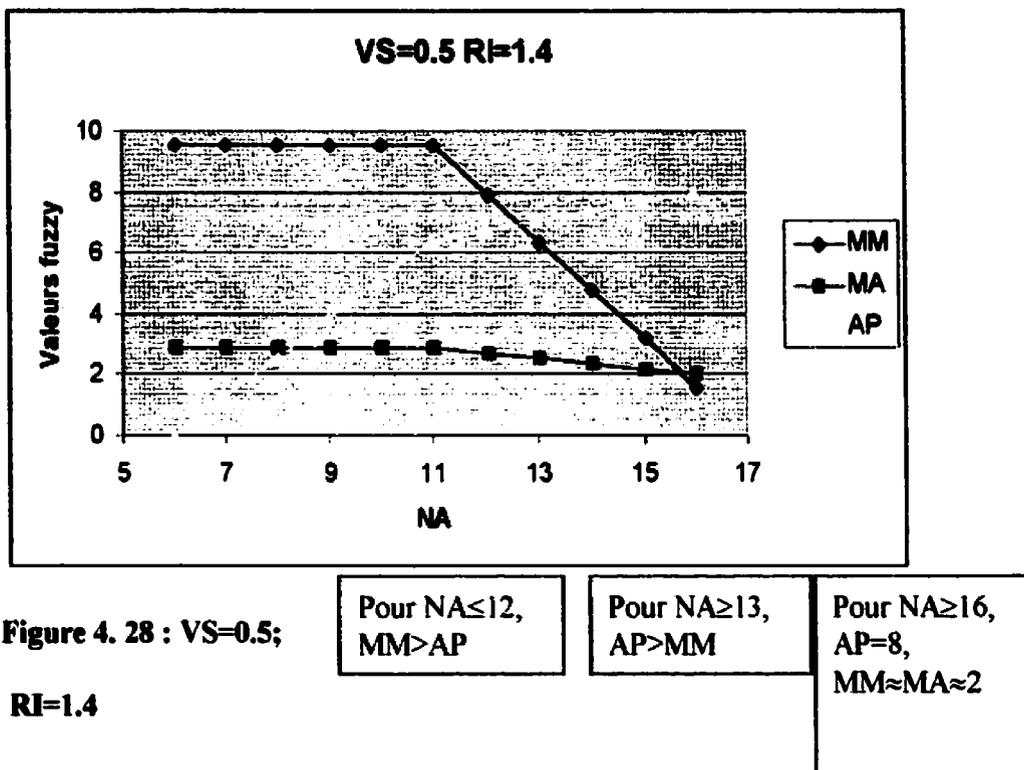


Figure 4.27: VS=0.63; RI=3.5

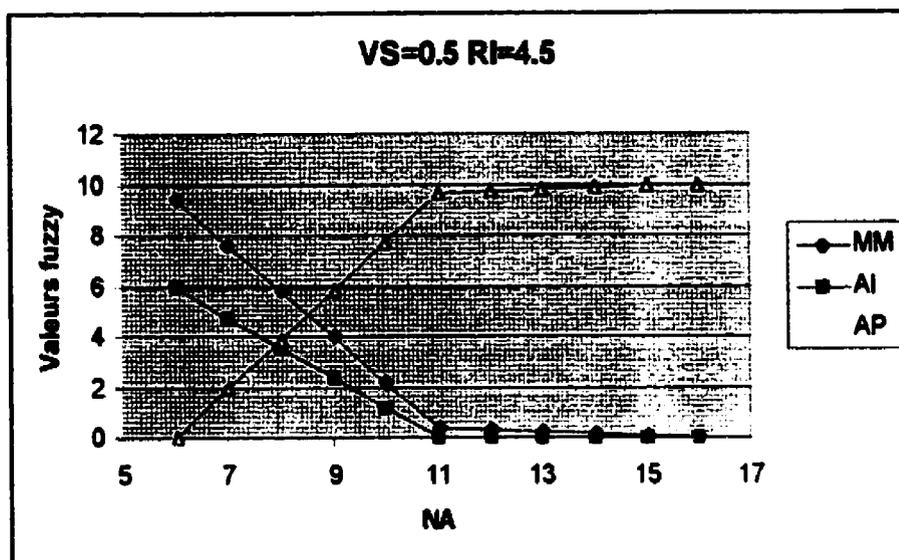
Pour NA≤6,  
AI=8.4,  
AP=7.6

Ici AI et AP ne sont pas clairement distincts pour  $NA \leq 6$

## 4.3.2.2 : VS=0.5



Les quatre graphiques permettent de conclure que plus NA augmente et plus les solutions automatiques deviennent appropriées. En effet, dans cette partie le nombre de composant augmente à cause de l'augmentation de différents modèles de produit et des modifications. La méthode d'assemblage doit être plus flexible pour s'adapter aux différents changements. C'est ainsi qu'on remarque une grande influence de NA et RI sur la forme des courbes : plus RI est grand et plus les courbes représentant les solutions manuelles décroissent rapidement (et plus les courbes représentant les solutions automatiques croissent rapidement). Nous ne considérons pas les paramètres NT et ND car dans la partie droite on n'a pas beaucoup de variation.



**Figure 4.29 : VS=0.5;  
RI=4.5**

Pour  $NA \leq 6$ ,  
MM=9.5,  
AI=6

Pour  $NA=8$ ,  
AI=AP=3.6

Il est étonnant ici que AI ne soit pas plus important. C'est là où parfois les résultats de Boothroyd sont à mettre en doute !

## 4.3.2.3 : VS=0.3

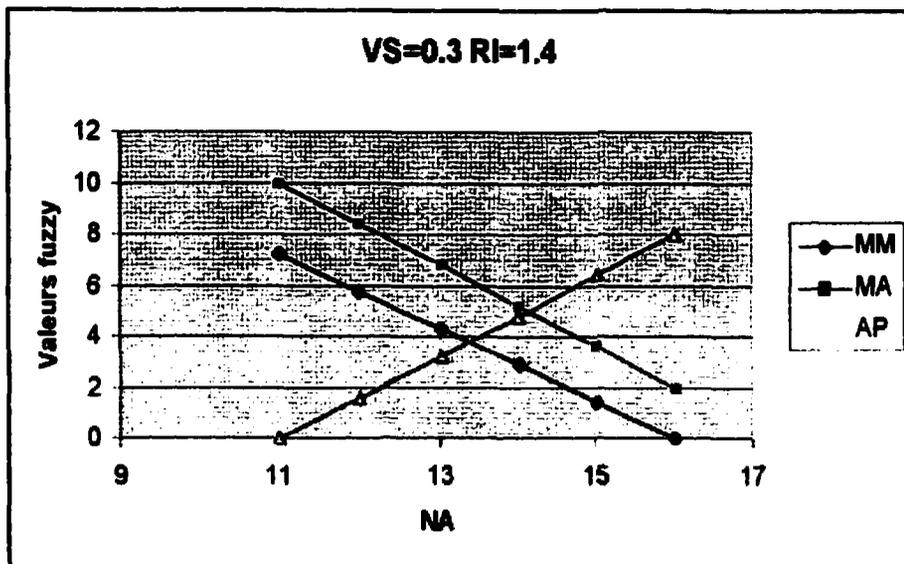


Figure 4.30 : VS=0.3; RI=1.4

Pour  $NA \leq 11$ ,  
 MA=10,  
 MM=7.2

Pour  $NA \geq 16$ ,  
 AP=8,  
 MA=2

Nous aurions bien sûr pu illustrer la partie droite du tableau de manière plus étoffée. Cependant, cette partie du tableau est la moins intéressante du point de vue de la logique floue car elle ne met pas en relation toutes les conclusions. MM, MA et AP sont les principales conclusions et les transitions se font essentiellement, pour une valeur de RI donnée, par variation de NA ou de VS et non par variation de ces deux variables. Surtout on ne peut pas considérer l'influence de ND et NT.

#### **4.4 Analyse globale**

Afin de diminuer le volume de données qui nous a permis de générer tous les graphiques, nous avons créé une macro supplémentaire qui permet de supprimer les lignes inutiles. Nous raisonnons de la manière suivante : si deux lignes consécutives ont les mêmes conclusions, alors on peut supprimer une de ces deux lignes.

##### **4.4.1 Algorithme**

L'algorithme est le suivant :

- Pour chaque partie du tableau (droite et gauche),
- On trie les données par valeurs de prémisses croissantes (par exemple VS, NA puis RI),
- On copie et colle les données de la feuille complète de résultats dans une nouvelle feuille,

Pour chaque ligne, on stocke les valeurs des conclusions et les valeurs des conclusions de la ligne suivante.

Si les deux vecteurs de valeurs sont égaux alors : on supprime la ligne précédente ou la ligne suivante de manière à encadrer seulement les valeurs des sorties utiles.

(Cette boucle permet de trier les données selon la variable d'ordre le plus bas, RI dans notre exemple. Nous allons faire la même chose avec les deux autres variables en utilisant des blocs de données).

Pour chaque valeur d'une des deux autres variables (par exemple NA), on stocke l'ensemble des valeurs des conclusions et les valeurs des conclusions pour la valeur suivante de cette variable.

Si les deux matrices de valeurs sont égales alors on supprime le bloc correspondant à la plus petite valeur de la variable.

On fait alors de même avec la dernière variable (VS dans notre exemple).

- Le tri pour toutes les conclusions étant maintenant effectué, on fait de même pour une seule conclusion à la fois.

#### **4.4.2 Exemple**

Trions, par exemple, les valeurs obtenues pour la partie droite du tableau I de Boothroyd par VS, NA et RI croissant et étudions le début du sous-tableau simplifié.

**Tableau 4. 2 : Portion de tableau obtenu par suppression des valeurs inutiles**

VS	NA	RI	MM	MA	AI	AF	AP
0.2	20	3.5	0	10	0	0	0
0.2	20	4	3.33333	6.66667	0	0	0
0.2	20	4.5	6.66667	3.33333	0	0	0
0.2	20	5	10	0	0	0	0
0.22	6	1	0	10	0	0	0
0.22	6	1.2	0.72	10	0	0	0
0.22	6	1.4	1.44	10	0	0	0
0.22	6	1.6	1.81	9.9	0	0	0
0.22	6	1.8	1.83	9.7	0	0	0
0.22	6	2	1.85	9.5	0	0	0
0.22	6	2.5	1.9	9	0	0	0
0.22	6	3	1.95	8.5	0	0	0
0.22	6	3.5	2	8	0	0	0
0.22	6	4	4.66667	5.33333	0	0	0
0.22	6	4.5	7.33333	2.66667	0	0	0
0.22	6	5	10	0	0	0	0

On remarque que, dans le tableau 4, toutes les valeurs de VS inférieures à 0.2 ont disparu. De même pour toutes les valeurs de  $NA < 20$  et de  $3.5 \geq RI \geq 5$ . Cela signifie que pour toutes les valeurs de  $VS < 0.2$ ,  $NA = 6$  et  $RI = 3.5$ , les valeurs des conclusions sont les mêmes :  $MA=10$ ,  $MM=AI=AF=AP=0$ , et que pour toutes les valeurs de  $VS < 0.2$ ,  $NA < 20$  et  $RI \geq 5$ , les valeurs des conclusions sont :  $MM=10$ ,  $MA=AI=AF=AP=0$

En procédant ainsi, nous avons réduit, pour le côté droit, le nombre de lignes de la manière suivante :

**Tableau 4. 3 : Nombre de lignes triées par VS, NA et RI pour le côté droit du tableau**

<b>Tri par VS, NA et RI</b>	<b>Toutes les conclusions</b>	<b>MM</b>	<b>MA</b>	<b>AI</b>	<b>AF</b>	<b>AP</b>
<b>Avant simplification</b>	13965	13965	13965	13965	13965	13965
<b>Après simplification</b>	2485	2401	863	481	1	2032

De même, pour le côté gauche :

**Tableau 4. 4 : Nombre de lignes triées par VS, NA et RI pour le côté gauche**

<b>Tri par VS, NA et RI</b>	<b>Toutes les conclusions</b>	<b>MM</b>	<b>MA</b>	<b>AI</b>	<b>AF</b>	<b>AP</b>
<b>Avant simplification</b>	13965	13965	13965	13965	13965	13965
<b>Après simplification</b>	2420	1992	46	870	159	453

#### 4.4.3 Première extension de la méthode

Pour diminuer encore le nombre de lignes, au lieu de comparer l'égalité des valeurs, nous avons testé si la différence (en valeur absolue) entre deux valeurs consécutives était inférieure à 0.5. Nous avons obtenu les résultats suivants pour le côté droit :

**Tableau 4. 5 : Côté droit du tableau avec un intervalle de 0.5**

<b>0.5</b>	<b>Toutes les conclusions</b>	<b>MM</b>	<b>MA</b>	<b>AI</b>	<b>AF</b>	<b>AP</b>
<b>Avant simplification</b>	13965	13965	13965	13965	13965	13965
<b>Après</b>	2068	1330	569	287	1	1020

Pour le côté gauche :

**Tableau 4. 6 : Côté gauche du tableau avec intervalle de 0.5**

<b>0.5</b>	Toutes les conclusions	MM	MA	AI	AF	AP
Avant simplification	13965	13965	13965	13965	13965	13965
Après simplification	1820	1081	25	870	159	453

#### **4.4.4. Seconde extension de la méthode**

La méthode de simplification que nous avons choisie dépend des valeurs consécutives que prennent les conclusions. En conséquence, l'ordre dans lequel les valeurs sont triées est très important. Aussi, pour compléter cette étude, nous avons effectué les mêmes calculs pour tous les tris possibles de VS, NA et RI. Nous avons six combinaisons possibles :

**VS NA RI    VS RI NA    NA VS RI    NA RI VS    RI VS NA    RI NA VS**

Finalement, nous obtenons les résultats suivants :

**Tableau 4. 7 : Récapitulatif pour l'étude du côté droit du tableau**

Étude pour côté droit		Toutes les conclusions	MM	MA	AI	AF	AP
NA, RI et VS	Simplifié	2423	2383	1332	431	1	1539
	Arrondi à 0.5	1981	1316	502	164	1	570
NA, VS et RI	Simplifié	2471	2431	1474	471	1	1637
	Arrondi à 0.5	2250	1426	609	249	1	766
RI, NA et VS	Simplifié	2233	2025	770	435	1	1549
	Arrondi à 0.5	1791	933	425	167	1	884
RI, VS et NA	Simplifié	2057	1864	643	465	1	1842
	Arrondi à 0.5	1725	910	338	228	1	1197
VS, NA et RI	Simplifié	2485	2401	836	481	1	2032
	Arrondi à 0.5	2068	1330	569	287	1	1020
VS, RI et NA	Simplifié	2054	1858	658	483	1	1906
	Arrondi à 0.5	1682	995	377	253	1	940

**Tableau 4.8 : Récapitulatif pour l'étude du côté gauche du tableau**

Étude pour côté gauche		Toutes les conclusions	MM	MA	AI	AF	AP
NA, RI et VS	Simplifié	2525	1993	49	1890	565	<b>750</b>
	Arrondi à 0.5	2206	921	32	743	162	<b>295</b>
NA, VS et RI	Simplifié	2510	1969	47	<b>1713</b>	520	973
	Arrondi à 0.5	1908	1081	<b>25</b>	863	168	477
RI, NA et VS	Simplifié	2572	2003	49	1912	569	753
	Arrondi à 0.5	2304	1006	31	668	150	330
RI, VS et NA	Simplifié	<b>2207</b>	1860	48	2012	543	868
	Arrondi à 0.5	1687	<b>763</b>	31	<b>636</b>	176	482
VS, NA et RI	Simplifié	2420	1992	46	1723	<b>516</b>	825
	Arrondi à 0.5	1820	1081	<b>25</b>	870	159	453
VS, RI et NA	Simplifié	2811	<b>1856</b>	<b>45</b>	2014	535	872
	Arrondi à 0.5	<b>1533</b>	789	<b>25</b>	680	<b>134</b>	469

Les résultats en gras représentent les valeurs minimales. Ainsi, nous retiendrons pour la simplification du tableau les choix de tri suivants :

**Tableau 4. 9 : Choix du tri en fonction des conclusions pour le côté droit du tableau**

Étude pour côté droit	Toutes les conclusions	MM	MA	AI	AF	AP
Simplifié	VS RI NA	VS RI NA	RI VS NA	NA RI VS	RI VS NA	NA RI VS
Arrondi à 0.5	VS RI NA	RI VS NA	RI VS NA	NA RI VS	RI VS NA	NA RI VS

**Tableau 4. 10 : Choix du tri en fonction des conclusions pour le côté gauche du tableau**

Étude pour côté gauche	Toutes les conclusions	MM	MA	AI	AF	AP
Simplifié	RI VS NA	VS RI NA	VS RI NA	NA VS RI	VS NA RI	NA RI VS
Arrondi à 0.5	VS RI NA	RI VS NA	VS RI NA	RI VS NA	VS RI NA	NA RI VS

Ces simplifications nous permettent de conclure que le tableau 1 de Boothroyd peut être représenté par la logique floue et sous forme numérique avec un nombre de valeur faible tout en conservant une information pertinente voir dans l'annexe 2.

## **CHAPITRE 5 : ÉTUDE POUR L'ASSEMBLAGE MANUEL**

Cette étude doit être réalisée par le concepteur si la méthode d'assemblage choisie grâce au tableau 1 de Boothroyd est l'assemblage manuel (MA ou MM).

### **5.1. Principe**

Boothroyd propose une démarche pour faire une analyse de la conception afin de réduire le coût d'assemblage manuel. Dans cette analyse, les principaux aspects de la conception (caractéristiques géométriques et technologiques de la pièce, utilité de la pièce dans l'assemblage, etc.) sont examinés d'une façon systématique et l'efficacité de la conception est calculée. À la fin de la première étude, le concepteur est capable de tirer des conclusions (par exemple suppression de pièces) qui le mèneront à augmenter l'efficacité de conception. Itération par itération, il peut arriver rapidement à un optimum.

### **5.2. Méthode**

Pour chaque composant de l'assemblage, l'analyse comprend deux étapes importantes :

- une décision concernant l'élimination ou non du composant ou sa combinaison avec d'autres composants,
- une estimation de temps nécessaire pour saisir, manipuler et insérer le composant.

Le concepteur peut ensuite déduire le temps d'assemblage total et le comparer avec le temps d'assemblage d'une conception idéale.

Pour parvenir à la décision à prendre dans la première étape, le concepteur doit rechercher parmi les caractéristiques présentées sous forme de tableaux, celles correspondant à la pièce à assembler et à l'opération d'attachement pour en déduire un indice de ligne et un indice de colonne. A l'intersection (ligne-colonne) se trouve l'estimation du temps nécessaire à l'opération. Boothroyd distingue deux opérations dans l'assemblage : la manipulation et l'insertion. Un tableau est associé à chacune de ces opérations (tableau 2 pour la manipulation et tableau 3 pour l'insertion).

Pour déterminer la nécessité du composant dans l'assemblage, le concepteur doit se poser les trois questions qui suivent. Répondre « oui » à une de ces questions démontre la nécessité du composant dans l'assemblage.

- Le composant a-t-il des mouvements relatifs par rapport aux autres composants déjà assemblés ?
- Le composant doit-il être d'un matériau différent ou être isolé de tous les autres composants déjà assemblés ?
- Le composant doit-il être indépendant de ceux déjà assemblés pour permettre leur assemblage ou leur démontage ?

### **5.3 Automatisation de la méthode et utilisation de la logique floue**

#### **5.3.1 Mise en évidence de l'utilité de la logique floue**

A l'observation des tableaux 2 et 3 de Boothroyd, on remarque des écarts importants entre deux valeurs consécutives. Par exemple, pour le tableau 2 ligne 4, la différence entre la valeur de la colonne 0 (Épaisseur > 0.25mm) et celle de la colonne 1 (Épaisseur ≤ 0.25mm) est de 90% : 3.6s pour Épaisseur = 0.26mm et 6.85s pour Épaisseur = 0.25mm. Cette constatation nous a conduit à utiliser la logique floue pour caractériser de manière moins brusque ces transitions. De plus, nous obtenons des résultats continus et plus représentatifs de la réalité car, en considérant l'exemple précédant, il ne faut pas 90% de temps en plus pour manipuler un composant dont l'épaisseur est 0.24mm par rapport à un composant d'épaisseur 0.26mm.

#### **5.3.2 Représentation des tableaux 2 et 3 en logique floue**

Le tableau 2 se présente en quatre parties distinctes. Une première question permet de déterminer lequel des sous-tableaux va être utilisé. Au niveau de la représentation de la base de connaissances, nous avons donc subdivisé ce tableau en quatre (tableau 21, tableau 22, tableau 23 et tableau 24). Nous avons ainsi créé quatre bases de connaissances pour le tableau 2.

La technique de partage du tableau 3 est identique et nous avons créé trois bases de connaissances (tableau 31, tableau 32 et tableau 33).

La seconde problématique posée par ces tableaux concerne les questions qui ne peuvent pas être toutes représentées de manière floue. Par exemple, on distingue les

composants pouvant être manipulés par une seule personne de ceux nécessitant l'intervention de deux personnes (transition du type binaire). Pour ce type de questions, les ensembles flous associés sont des singletons et non pas des trapèzes.

Le tableau 33 est un autre cas particulier car aucune question ne peut être représentée par un ensemble flou. Ce tableau est le seul pour lequel on n'utilise pas de fichier résultat généré par Fuzzy flou.

Un programme, réalisé dans le cadre de cette maîtrise, a été conçu pour automatiser cette méthode. Par un jeu de questions-réponses, l'utilisateur détermine tous les paramètres nécessaires à l'obtention d'un temps de cycle, d'un coût et d'une efficacité de l'assemblage. La représentation par la logique floue des tableaux 2 et 3 est contenue dans le rapport associé à ce travail.

#### 5.4 Représentation des tableaux 2 et 3 dans le système FDSS

Tableau 5.1 : Temps de manipulation avec une main.

UNE MAIN	Composants pouvant être manipulés d'une seule main, sans l'aide d'outils	Composants faciles à manipuler				Composants présentant des difficultés de manipulation (1)					
		Épaisseur > 2 mm		Épaisseur < 2 mm		Épaisseur > 2 mm			Épaisseur < 2 mm		
		15 mm < Diamètre	6 mm < Diamètre < 15 mm	0 mm < Diamètre < 6 mm	Diamètre < 6 mm	15 mm < Diamètre	6 mm < Diamètre < 15 mm	Diamètre < 6 mm	6 mm < Diamètre	Diamètre < 6 mm	
Symétries	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$(\alpha+\beta) < 360^\circ$	0	1,13	1,43	1,88	1,69	2,18	1,84	2,17	2,65	2,45	2,98
$360^\circ \leq (\alpha+\beta) < 540^\circ$	1	1,59	1,89	2,25	2,06	2,55	2,25	2,57	3,06	3,00	3,38
$540^\circ \leq (\alpha+\beta) < 720^\circ$	2	1,80	2,10	2,55	2,36	2,85	2,57	2,90	3,38	3,18	3,70
$(\alpha+\beta) = 720^\circ$	3	1,95	2,25	2,70	2,51	3,00	2,73	3,06	3,55	3,36	4,00

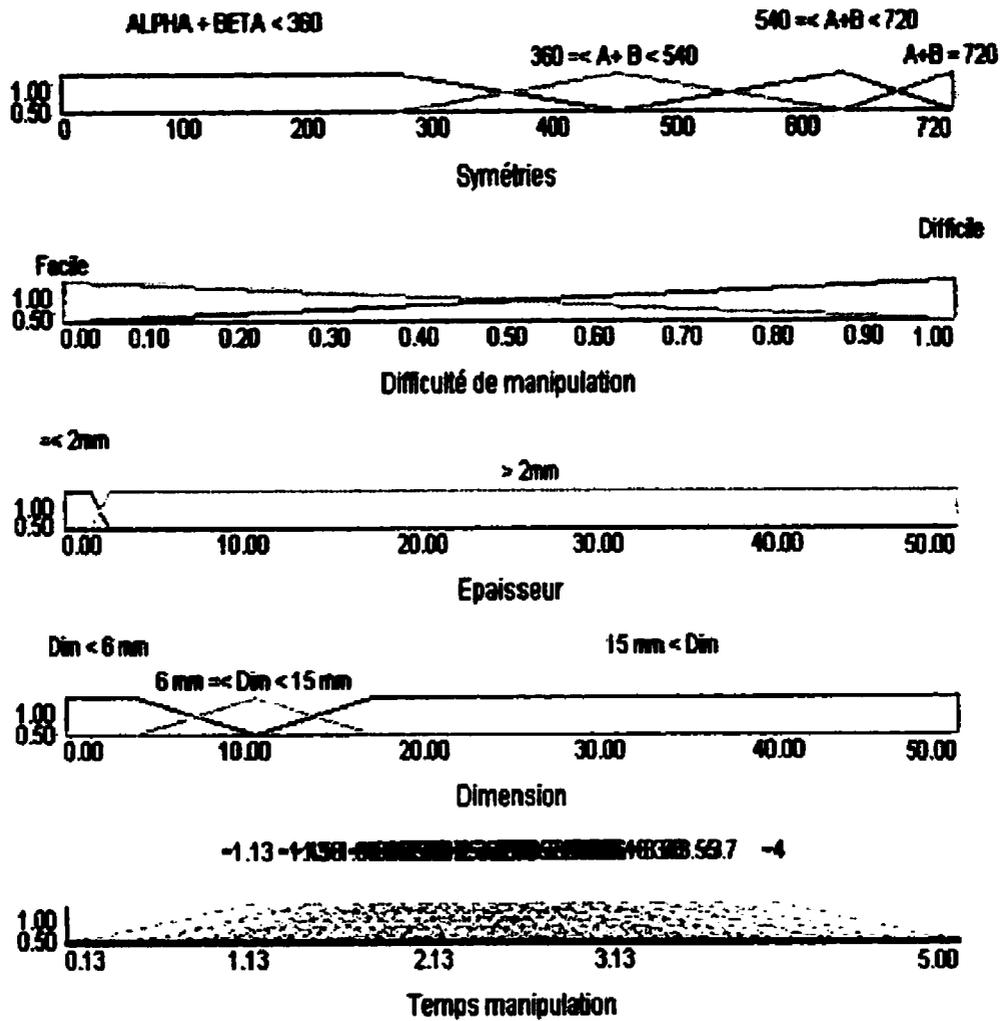


Figure 5.1 : Représentation des ensembles flous.

Tableau 5.2 : Temps de manipulation, une main avec outil.

UNE MAIN AVEC OUTIL  C'opposants peuvent être manipulés d'une seule main, mais nécessitant un outil de saisie.		Composants électroniques des pinces brucelles pour ouvrir et manipuler								Composants nécessitant des outils standards autres que des pinces brucelles	Groupes nécessitant des outils spéciaux pour saisir et manipuler	
		Composants pouvant être manipulés sans grossissement				Composants nécessitant un grossissement optique						
		Composants faciles à saisir et à manipuler		Composants présentant des difficultés de manipulation (1)		Composants faciles à saisir et à manipuler		Composants présentant des difficultés de manipulation (1)				
		Épaisseur > 0,25 mm	Épaisseur < 0,25 mm	Épaisseur > 0,25 mm	Épaisseur < 0,25 mm	Épaisseur > 0,25 mm	Épaisseur < 0,25 mm	Épaisseur > 0,25 mm	Épaisseur < 0,25 mm			
Symétriques		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\alpha \leq 180^\circ$	$\theta \leq \beta \leq 180^\circ$	4	3,60	6,85	4,35	7,60	5,60	8,35	6,35	8,60	7,00	7,00
	$\beta = 360^\circ$	5	4,00	7,25	4,75	8,00	6,00	8,75	6,75	9,00	8,00	8,00
$\alpha = 360^\circ$	$\theta \leq \beta \leq 180^\circ$	6	4,80	8,05	5,55	8,80	6,80	9,55	7,55	9,80	8,00	9,00
	$\beta = 360^\circ$	7	5,10	8,35	5,85	9,10	7,10	9,55	7,85	10,10	9,00	10,00

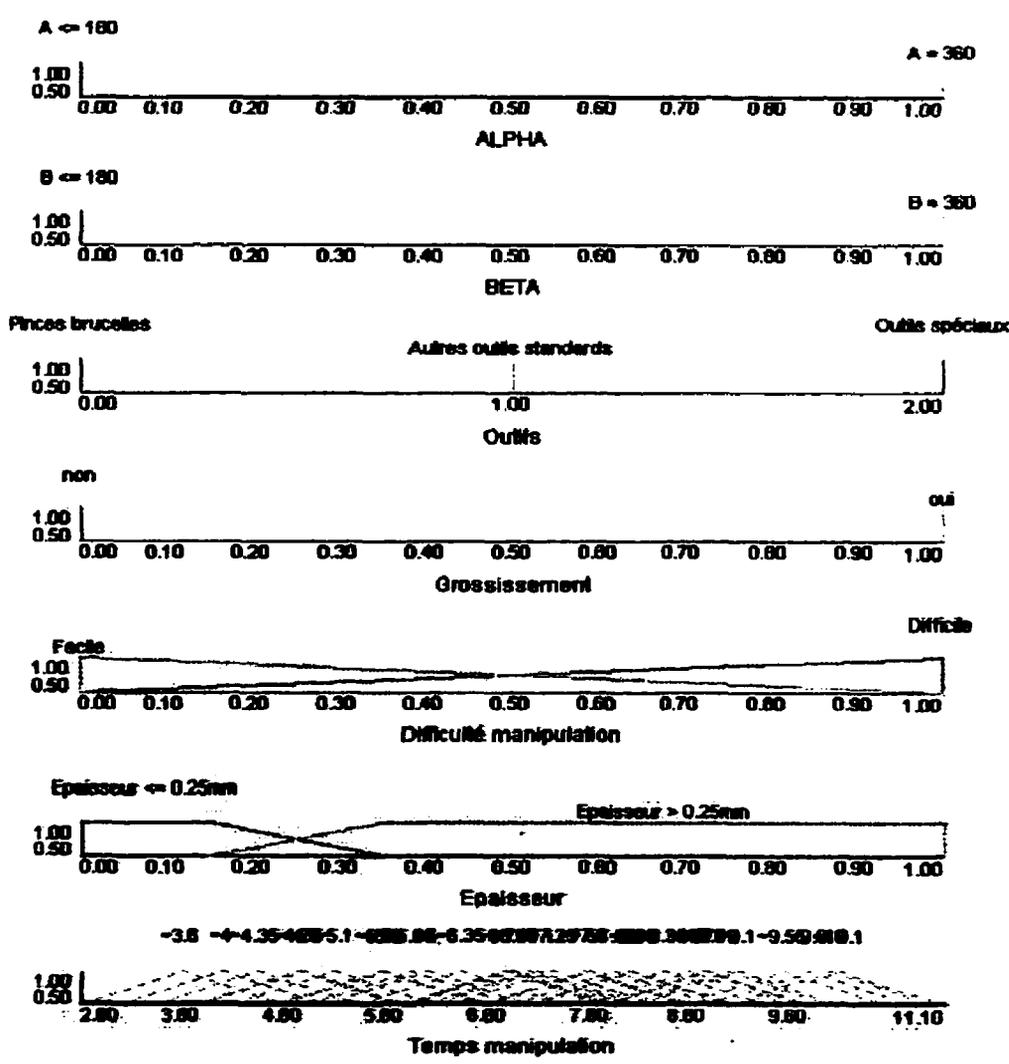
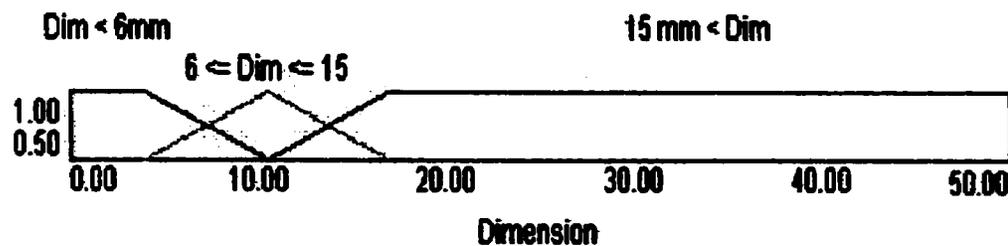
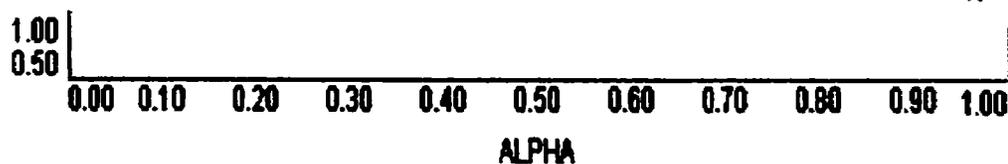


Tableau 5.3 : Temps de manipulation avec deux mains.

DEUX MAINS POUR MANIPULER Composants s'emboîtant ou s'attachant fermement ou flexibles, mais pouvant être saisis et soulevés par une seule main (à l'aide d'outils si nécessaire) (2)	Composants avec une difficulté de manipulation supplémentaire					Composants avec difficultés supplémentaires (collants, déform., pliants)				
	$\alpha \leq 180^\circ$			$\alpha = 360^\circ$		$\alpha \leq 180^\circ$			$\alpha = 360^\circ$	
	15 mm < Dimension	6 mm < Dimension ≤ 15 mm	Dimension < 6 mm	6 mm < Dimension	Dimension ≤ 6 mm	15 mm < Dimension	6 mm < Dimension ≤ 15 mm	Dimension < 6 mm	6 mm < Dimension	Dimension ≤ 6 mm
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	4.10	4.50	5.10	5.60	6.75	5.00	5.25	5.85	6.35	7.00

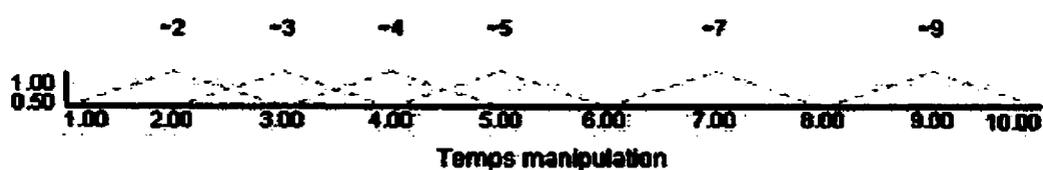
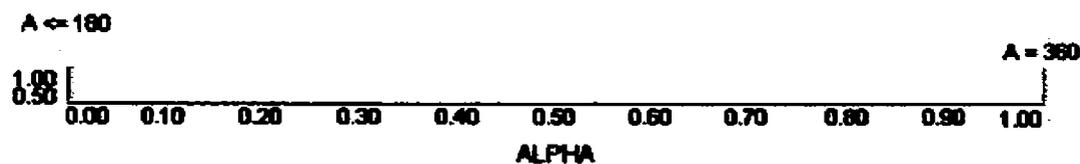
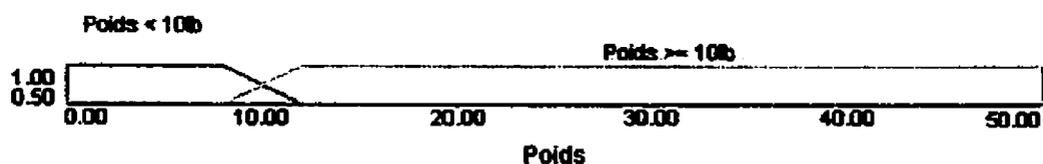
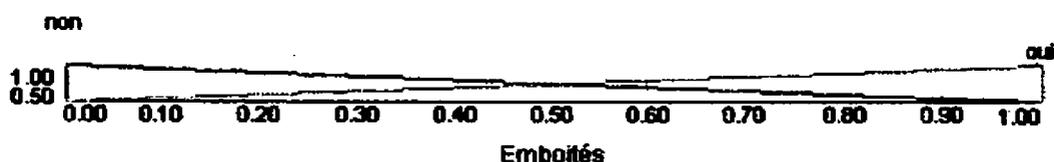
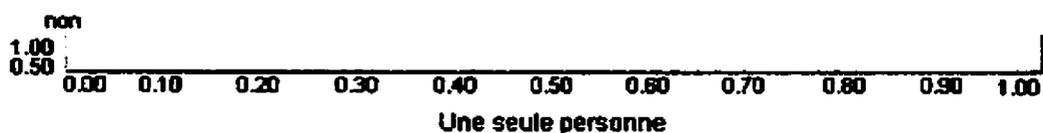
 $\alpha \leq 180$ 

~4.1 ~4.5 ~5.1-5.25 ~5.6-5.85 ~6.35 ~6.75-7



**Tableau 5.4 : Temps de manipulation, deux mains avec assistance nécessaire.**

<b>DEUX MAINS OU ASSISTANCE NÉCESSAIRE POUR LES GRANDES DIMENSIONS</b>  Deux mains, deux personnes ou assistance mécanique nécessaire pour saisir et transporter le composant	Composants pouvant être manipulés par une personne, sans assistance mécanique								Deux personnes ou assistance mécanique: nécessaires pour manipuler le composant	
	Composants si emboîtés ou attachés fermement, et non flexibles									
	Poids de composant < 10 lb				Poids de composant ≥ 10 lb					
	Composants faciles à saisir et manipuler		Présence d'autres difficultés de manipulation (1)		Composants faciles à saisir et manipuler		Présence d'autres difficultés de manipulation (1)			
	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 360^\circ$		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	2,00	3,00	2,00	3,00	3,00	4,00	4,00	5,00	7,00	9,00



**Tableau 5.5 : Temps d'insertion pour un composant non fixé.**

COMPOSANT AJOUTÉ MAIS NON FIXÉ	Après assemblage immobilisation facile pour passer la pièce en place (3)				Immobilisation nécessaire pendant les opérations suivantes pour maintenir l'orientation de la pièce en place (3)				
	Facile à aligner et à positionner pendant l'assemblage (4)		Difficile à aligner ou à positionner pendant l'assemblage		Facile à aligner et à positionner pendant l'assemblage (4)		Difficile à aligner ou à positionner pendant l'assemblage		
	Aucune résistance à l'insertion	Résistance à l'insertion (5)	Aucune résistance à l'insertion	Résistance à l'insertion (5)	Aucune résistance à l'insertion	Résistance à l'insertion (5)	Aucune résistance à l'insertion	Résistance à l'insertion (5)	
	0	1	2	3	6	7	8	9	
Le composant est l'outil utilisé (y compris les outils) pour assembler facilement	0	1,50	2,50	2,50	3,50	5,50	6,50	6,50	7,50
Composant et outil associés (y compris les outils) ne peuvent pas être assemblés facilement	1	4,00	5,00	5,00	6,00	8,00	9,00	9,00	10,00
	2	5,50	6,50	6,50	7,50	9,50	10,50	10,50	11,50

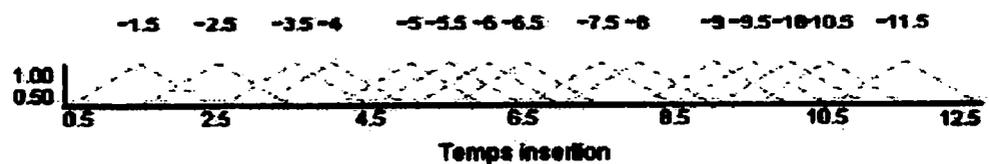
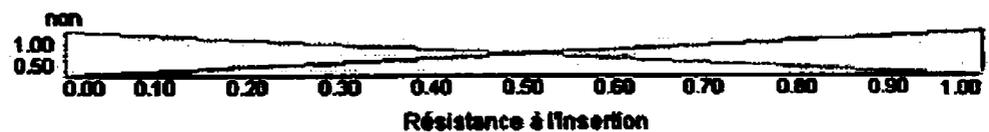
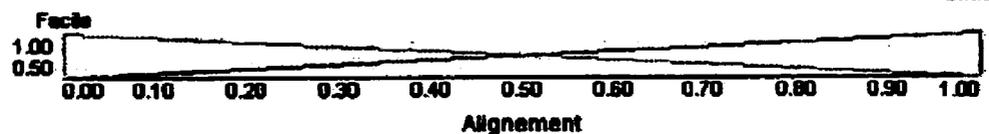
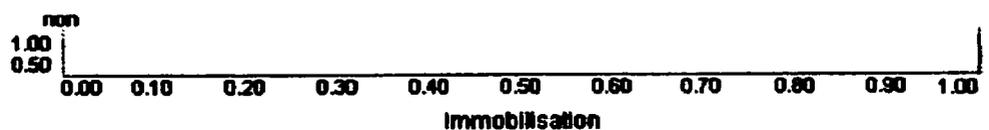
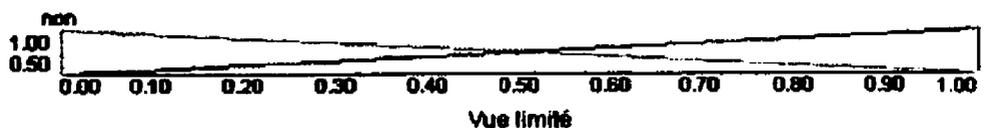
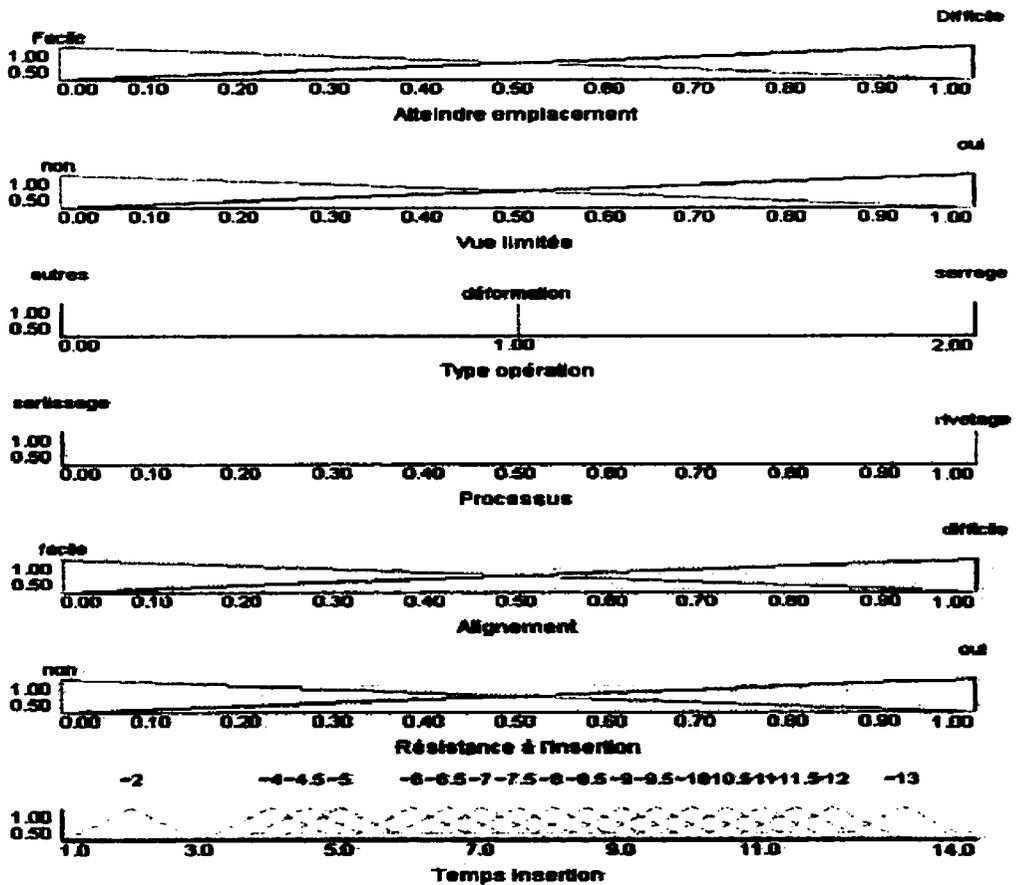


Tableau 5.6 : Temps d'insertion pour un composant fixé immédiatement.

COMPOSANT FIXÉ IMMÉDIATEMENT	Appart d'un composant (1) où ni le composant lui-même ni d'autres composants sont fixés définitivement immédiatement	Aucune opération de vissage ou dévissage plus que simple après insertion (éclipsage, serrage sans clé, clips, etc...)		Différentiel physique immédiatement après insertion						Serrage de vis immédiatement après insertion		
		Serrage			Rivage ou opération similaire							
		Facile à aligner et à positionner dans l'emplacement (4)	Difficile à aligner et à positionner dans l'emplacement (5)	Facile à aligner et à positionner dans l'emplacement (6)	Difficile à aligner ou à positionner pendant l'assemblage		Difficile à aligner ou à positionner pendant l'assemblage				Facile à aligner et à positionner dans l'emplacement (7)	Difficile à aligner et à positionner dans l'emplacement (8)
					Alignement et insertion (3)	Résistance à l'insertion (2)	Alignement et insertion (3)	Résistance à l'insertion (2)	Alignement et insertion (3)	Résistance à l'insertion (2)		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Composant et outil associés (y compris les mains) peuvent atteindre facilement l'emplacement désiré et l'outil se peut être manœuvré aisément	3	2,00	5,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	6,00	8,00	
Composant et outil associés (y compris les mains) ne peuvent atteindre facilement l'emplacement désiré et l'outil ne peut être manœuvré aisément	4	4,50	7,50	6,50	7,50	8,50	9,50	10,50	11,50	8,50	10,50	
	5	6,00	9,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	10,00	12,00	



**Tableau 5.7 : Temps d'insertion pour opérations séparées.**

Aucune question ne peut être représentée de manière floue. Les données utilisées sont donc celles du tableau.

OPÉRATION SÉPARÉE	Processus de fixation mécanique (composants) en place mais non fixés) immédiatement après insertion				Processus de fixation non mécanique (composants) en place mais non fixés) immédiatement après insertion			Autre processus de fixation			
	Autre déformation plastique ou déformation plastique localisée			Déformation plastique dans la zone sans projection importante de composant suite à la déformation plastique que provoque la fixation)	Processus mécaniques		Processus chimique (p.e. bras soudé...)	Manipulation des composants ou sous-ensembles (p.e. réglage orientation ou adaptation de composant...)	Autres processus (p.e. insertion liquide...)		
	Plage ou processus similaire	Rivage ou processus similaire	Serrage de vis ou processus similaire		Aucun aspect de montage n'est requis (p.e. soudure par résistance, pas de fixation...)	Apport de matériel mécanique					
						Processus de serrage				Processus de serrage	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Processus d'assemblage où tous les composants utilisés sont en place	9	4,00	7,00	5,00	12,00	7,00	8,00	12,00	12,00	9,00	12,00

### 5.5 Exemple pour le tableau 2

Considérons le composant « C » suivant :

- « C » est un composant pouvant être manipulé d'une seule main, sans l'aide d'outils présentant une symétrie  $(\alpha+\beta) = 540^\circ$ . Ces deux paramètres classent « C » dans la ligne 2 du tableau 21.
- On évalue à 100% la facilité de manipulation de « C » (0% correspond à la difficulté de manipulation maximale et pour 100%, le composant est facile à manipuler). « C » a une épaisseur de 1.8mm et une dimension de 6mm. Ces paramètres classent « C » dans la colonne 4 du tableau 21.

À l'intersection de la ligne 1 et de la colonne 4, le tableau 21 nous donne comme estimation du temps de manipulation 2.85 secondes.

Avec l'utilisation de la logique floue, nous obtenons 2.42 secondes, soit une différence de 15% qui ne peut pas être considérée comme faible. Le résultat obtenu par la logique floue est plus proche de la réalité parce que :

- une symétrie  $(\alpha+\beta) = 540^\circ$  positionne « C » entre les lignes 1 et 2,
- une épaisseur de 1.8mm positionne « C » entre les blocs de colonnes (0, 1, 2) et (3, 4),
- une dimension de 6mm positionne « C » entre les colonnes 1 et 2 pour le bloc (0, 1, 2) et les colonnes 3 et 4 pour le bloc (3,4).

Notons enfin que cette différence de temps 15% devient plus significative pour n composant que l'opérateur doit manipuler pendant x temps de travail par jour. L'analyse plus détaillée de ce tableau pourrait aboutir à des résultats qui permettront de proposer des temps de manipulation et d'insertion plus réalistes.

Dans l'annexe 2 nous présentons quelques résultats des essais faits avec FDSS qui montrent qu'il y a lieu d'améliorer le tableau no 2 et 3 de Boothroyd. La procédure d'analyse est la même que celle utilisée pour les cas précédents présenté ci-dessus, mais la programmation pour automatiser intégrer les tableaux en entier est difficile à réaliser vu la complexité des informations qu'il faudrait considérer.

## CONCLUSION

L'utilisation des tableaux de Boothroyd permet de choisir une méthode d'assemblage pour un produit donné et dans certains cas de donner une solution alternative. Cependant, cette méthode ne met pas en évidence le passage d'une méthode à l'autre car la plage des valeurs est fixe. Aussi, il faut remarquer que cette procédure est longue et lourde. Souvent la décision est prise suivant l'expérience des personnes, les outils de décision étant encore rares dans ce domaine.

L'utilisation de la logique floue dans la méthode de Boothroyd que nous proposons dans ce mémoire est présenté comme outil d'aide qui pourrait permettre aux utilisateurs de prendre des décisions assistées dans le choix du type d'assemblage approprié à un produit. Il donne les possibilités de choix un peu plus larges, permet de visionner les passages d'une méthode à une autre et d'expérimenter les paramètres d'analyse qui influencent ces variations. Dans l'analyse du tableau no 1 nous avons trouvé que le volume de production (VS), le nombre de composant (NA) et le facteur d'investissement (RI) constituent les paramètres les plus influents sur la variation des méthodes d'assemblages. Les paramètres ND et NT délimitent la partie gauche de la partie droite et comme il n'y a pas beaucoup de variations dans la partie droite, nous n'avons pris en compte ces paramètres. En utilisant différentes valeurs proches des limites des tableaux des paramètres (VS, NA, RI), nous sommes parvenus à observer des cas où les méthodes sont en concurrence et de déceler la zone de variation pour

laquelle il y a chevauchement. Ces résultats obtenus nous permettent de conclure que pour les cas de l'égalité des valeurs, les méthodes concurrentes peuvent se substituer.

Pour les méthodes dont les valeurs sont proches, nous suggérons de procéder à l'analyse économique de chacune des méthodes pour déterminer la mieux indiquée.

Au delà des limites établies pour les paramètres VS (volume de production par quart de travail), NA (nombre de composant) et RI (facteur d'investissement) l'analyse effectuée avec la logique floue n'a pas aboutie à de résultats intéressants. En effet, les conclusions sont les mêmes que celles obtenues pour les valeurs limites et au risque de tomber dans l'erreur nous n'avons pas procédé à l'extrapolation.

L'analyse globale du tableau no1 de Boothroyd nous fait observer que plus le nombre de composant (NA) augmente, moins la méthode d'assemblage manuel est considérée pour un facteur d'investissement (RI) croissant. L'automatisation devient alors un choix de plus en plus judicieux.

Avec la logique floue, nous avons rencontré des cas intéressants où il est difficile de choisir entre l'assemblage manuel et l'assemblage automatisé. C'est le cas par exemple pour RI = 1.4 et VS = 0.63 où MM et AP ne sont pas clairement distincts dès que NA est supérieur à 12. En augmentant le facteur d'investissement (RI = 4) et le volume de production (VS = 0.8) AI(6) n'est pas loin de AF(10). Pour NA = 8, VS = 0.5 et RI = 4.5, AI n'est pas plus important que prévu. Pour un volume de production moyen (VS = 0.35) et un nombre de composant élevé (NA = 14) nous observons qu'il n'y a pas beaucoup de différence entre AP, MM et AI.

Ces exemples sont des cas pertinents qui illustrent les situations rencontrées tout au long de notre analyse où parfois l'influence de certains paramètres est remise en question et par-là, les résultats de Boothroyd mis en doute. Le fait par exemple, qu'il propose d'automatiser dès que le nombre de composant augmente, n'est pas toujours la meilleure solution. En effet, les exemples ci-dessus illustrent des cas où il est parfois problématique de choisir la méthode la plus appropriée entre AP, MM, AI, les résultats avec Fuzzy flou montrant que ces dernières ont des valeurs qui ne sont pas très distinctes pour une zone où une des méthodes devait normalement se démarquer des autres. Ceci explique peut être pourquoi dans des cas pareils les industriels hésitent à automatiser.

Les autres variables considérées dans la méthodologie d'analyse de Boothroyd, comme le nombre de produits différents (NP), sont discrètes et leurs représentations par la logique floue présentent plus de difficultés. En effet, les valeurs qu'on obtient en utilisant la logique floue sont les mêmes que celles proposées par Boothroyd. Cependant, ces résultats confirment que la méthode utilisée pour construire les règles floues est correcte.

L'étude et la simulation entière du tableau no1: « Choix de la méthode d'assemblage » de Boothroyd avec la logique floue est longue, demande beaucoup de calcul et nécessite d'automatiser au maximum l'obtention des résultats. Pour y parvenir, un programme qui génère des fichiers combinatoires pour n variables qui prennent chacune p valeurs a été conçu. Le fichier obtenu est ensuite traité dans le logiciel FDSS

et une macro Excel récupère les résultats et crée automatiquement des graphiques. Cela nous a permis d'avoir une série d'images qui peut représenter le tableau de Boothroyd.

L'analyse des tableaux 2 et 3: «Étude pour l'assemblage manuel» de Boothroyd montre des écarts importants entre les valeurs de temps consécutives. Pour caractériser de manière continue ces transitions, nous avons aussi utilisé la logique floue. Ainsi, nous avons obtenu des valeurs interpolées des temps de manipulation et d'insertion des composants qui seraient proches de la réalité et par conséquent, pourraient améliorer l'analyse de l'assemblage.

Dans ce mémoire, nous avons démontré que l'introduction d'une méthode d'intelligence artificielle enrichissait une méthode de conception en vue de l'assemblage. Ces méthodes modernes sont donc des outils d'aide à la décision efficaces et augmentent l'intérêt des techniques auxquelles elles sont appliquées.

**RÉFÉRENCES**

- 1 Balazinski, M., Bellerose, M., Czogala E., «Application of fuzzy logic techniques to the selection of cutting parameters in machining processes», *Fuzzy Sets and Systems*, 63 (1994),p. 307-317.
- 2 Boothroyd, G., Dewhurst, P., (1986), *Les assemblages – comment optimiser leur conception*, Ed. du CETIM, p. 1-96.
- 3 Boothroyd, G., Dewhurst, P., (1993), *«Design for Assembly»-A Designer's Handbook*, University of Massachussets, Departement of Mechanical Engineering, Amherst, MA.
- 4 Bouchon-Meunier, B., Laurent F., Ramadani M. (1998), *«Logique Floue» Exercices corrigés et exemples d'applications*.
- 5 Brooke, L.(1991 Sept.), «Think DFD», *Automotive Industries*, p. 71 – 73.
- 6 Cambron, M.,(1999) *Ingénierie Simultanée*, notes de cours, École Polytechnique de Montréal.

- 7 Chan, D.S.K., Mo, J.P.T. (1993), «Transformation of Product Design Features for Assembly Analysis», Royal Melbourne Institute of Technology, 1993 International Conference on Assembly, 22-24 November, Adelaide, Australie, p.55-60.
- 8 Dallaire, D.,(1997), «*Module d'analyse économique LOGAM*», projet de fin d'études, École Polytechnique de Montréal.
- 9 DeGuire, B., (1997).« *Étude des systèmes multi – agents pour la recherche de solutions d'assemblage* », Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- 10 Deneux A.B.(1996),«F-CAD:Un prototype de système de CAO Fonctionnelle pour l'Intégration du Calcul dans le Processus de Conception », LAMIN (URA CNRS no 1775)-Université de Valenciennes.
- 11 Dupinet, E., Balazinski M.,(1997),«Tolerance Allocation using fuzzy logic» École Polytechnique de Montréal, Mechanical Engineering.

- 12 Eastman, C.M.(1981) «The Design for Assembly», SAE Technical paper # 8101197.
- 13 Erve, A.H.,(1988) «Generative Computer Aided Process Planning for Par Manufacturing; an Expert System Approach», Ph.D. Thesis, University of Technology, Eindoven.
- 14 Ettlé, J.E., Stoll, H.W., «*Managing the Design-Manufacturing Process*», Mc Graw-Hill Engineering and Technology Managements Series, New York, p.79-87.
- 15 Gabriele, G.A. (GN/D), « The application of Design for Assembly Principles to Design of Aerospace Structures», Rensselaer Polytechnics, Troy, New York.
- 16 Grudzien, L. and Soënen, « A Design Approach that integrates the safety and dependability concept », LAMIN-URA CNRS no1775-Groupe de Recherche en Génie industriel et Logiciel, University of Valenciennes,1996.
- 17 Jabbour, T., «*Intégration de Modèles de caractéristiques à une modélisation géométrique pour supporter l'assemblage*» Thèse de Doctorat, École Polytechnique de Montréal, 1997.

- 18 Jones, R.E., Wilson, R.H., (1996), «A Survey of Constraints in Automated Assembly Planning», Proc. IEEE Intl.Conf. On Robotics and Automation, 1525-1532.
- 19 Kim, S.,(1989), «*An assembly Modeling Systems for Dynamic and Kinematic Analysis*», CAD, 21(1), 2-12.
- 20 Labat, A., Laberge, A., Castellanet, M.,« Le lien CAO/analyse à l'Aérospatiale Cannes : La solution parallèle» Actes de MICAD 92
- 21 Larralde, J.P., «*Résistance des matériaux*». Éd. MASSON 1988.
- 22 Lotter, Bruno, (1989), « *Manufacturing Assembly Handbook* ».
- 23 Masclé C, (1993). «*Conception et méthodes d'assemblage*» Éd. ÉPM, Montréal.
- 24 Narayanin, M.,« La liaison CAO-Calcul». Conférence MICAD 92
- 25 Rolland, C., « Reformuler les démarches de conception des systèmes d'information », Ingénierie des systèmes d'information, Vol.2-no6/1994 pages 719 à 741, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne.

- 26 Sangalli, A., «Une logique floue, floue» *Interface*, 17, no5, Sept-Oct 1996, p.38-46—SDM 9755104.
- 27 Shah, J. J. and Rogers T.M.(1993), «*Assembly Modeling as an Extension of Feature-Based Design*», Mechanical & Aerospace Engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona, USA.
- 28 Shah, J.; Tadepalli, R., (1992) «*Feature Based Assembly Modeling of Mechanical Components*», M.Sc. Thesis, Arizona State University, Tempe.
- 29 Shraft, R.D. (N/D) «*Assembly Oriented Design – Condition for Successful Automation*» (Montargerechte Konstruktion – Die Voraussetzung für eine Erfolgreiche Automatisierung), Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart, West Germany.
- 30 Suh, N.P. (1990); «*The principles of Design*», Oxford Series on Advanced Manufacturing, Oxford University Press.
- 31 Tong – Tong, J.R., «*La logique floue*», HERNES 1995
- 32 Torben L.,(1996), «*The Missing Element in Design for Manufacture*», Inst. For Manufacturing Engineering, Technical University of Denmark, 1996.

- 33 Van der Net, A.J. , de Vries W.A.H., Debressine H.L.M, van der Wolf A.C.H.  
(1996) «*A Relation-Based Product Model Suited for Integrating Design and Manufacturing* », Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands.
- 34 Warnecke, Lörn et Kiener, «*Techniques de montage et d'assemblage*», Édirep, 1<sup>ère</sup> Édition, Paris p. 129-270.
- 35 Wesley, A. ; Lonzano, P.T. et al., «*A Geometric Modeling System for Automated Mechanical Assembly*», IBM J.Res.Dev.24(1), p.64-74.
- 36 Wiendahl, H. P., (1994), «*Decentral Production Scheduling of Assembly Systems with Genetic Alogarithm*»
- 37 Zadeh, L. A., «*Fuzzy Sets*» information and control, 1965 Vol.8 p.338-353.

## **ANNEXE 1 : ÉTUDE POUR ASSEMBLAGE MANUEL ET AUTOMATIQUE.**

### **Partie 1 : Étude du tableau de Boothroyd**

Ci-dessous nous présentons le type de graphique et de tableau simplifié qui peuvent représenter le tableau no 1 de Boothroyd.

La forme graphique est obtenue en fixant une des 3premisses (VS, NA, RI). Pour notre cas VS est fixé à 0.5 et on analyse la variation de MM, de AI et de AP par rapport à NA-RI et nous la visualisons sous forme graphique.

La forme de cellules, que nous proposons pour mettre en évidence les valeurs numériques associées à chaque méthode dans une zone précise du tableau, nous permet de mettre en évidence les zones de croisement et de chevauchement des méthodes. Ces zones sont donc délicates et dans ces cas il faut faire attention avant de décider de la bonne méthode d'assemblage à utiliser pour un produit donné. Dans la zone  $NA=2$  à  $20$  et  $RI=0.2$  à  $10$  MM augmente diagonalement de haut en bas et AP de bas en haut.

Notre exemple est pris dans la partie de gauche du tableau de Boothroyd , et le reste des résultats obtenus.

## 1.1. Le générateur de fichiers combinatoires

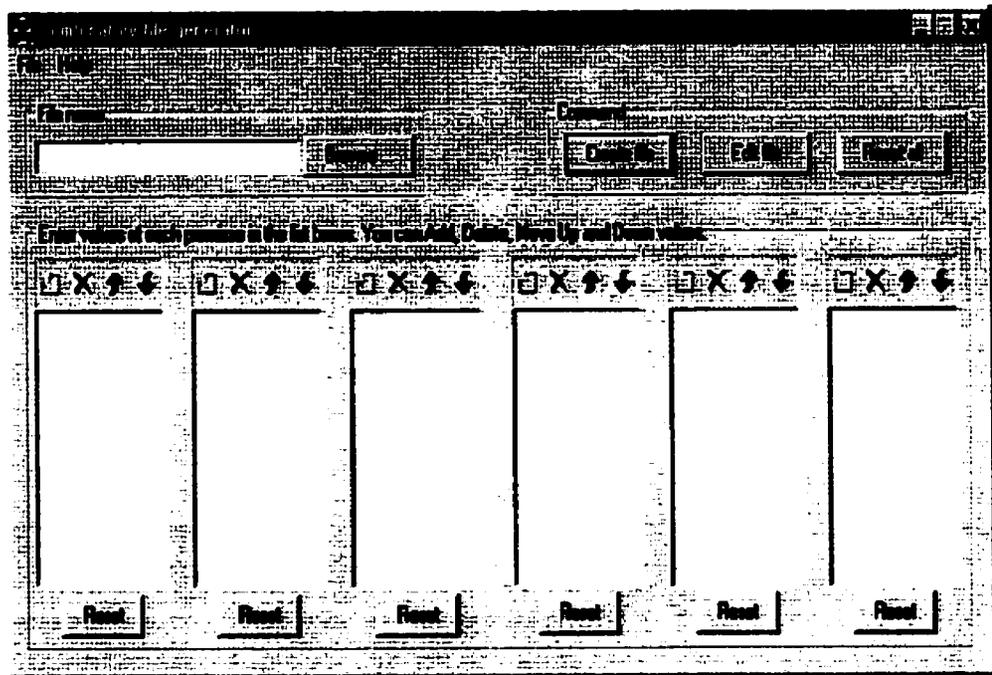


Figure 1.1 : Fenêtre graphique du générateur de fichiers automatiques

### 1.1.1. Fonctionnement de l'application

La plupart des phénomènes réels représentés en logique floue nécessitent moins de six prémisses car au-delà de ce nombre les calculs deviennent longs. De plus, dans le cas de FDSS, des imprécisions apparaissent pour plus de six prémisses. Nous avons donc limité l'interface graphique de notre programme (« `CombinatoryFileGenerator.exe` ») à la saisie de six prémisses. L'utilisateur saisit les prémisses de gauche à droite dans n'importe quelle liste. Il peut ajouter, supprimer, monter ou descendre des valeurs pour

chaque prémisses. A la fin de la saisie, il choisit un nom de fichier (bouton « Browse... ») et peut ensuite créer le fichier correspondant (bouton « Create »).

Le bouton « Edit file » permet de visualiser et d'éditer le fichier. Enfin, l'utilisateur peut réinitialiser tous les champs de la boîte de dialogue s'il veut recréer un fichier.

**Point fort :**

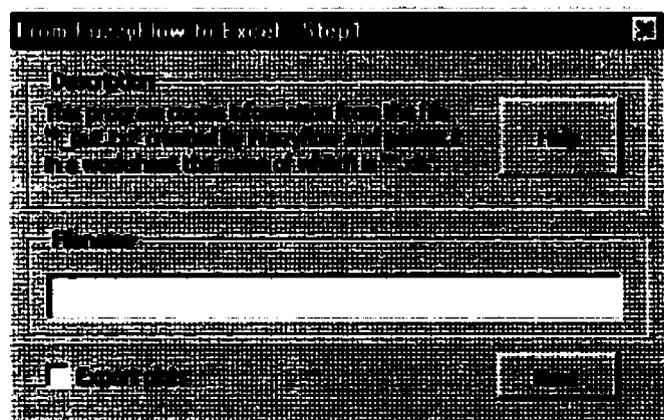
L'interface graphique est simple à utiliser et aide l'utilisateur à saisir ses données grâce aux icônes pour ajouter, supprimer et déplacer un élément de la liste.

**Points faibles :**

Le programme actuel est limité à 6 prémisses et à 50 valeurs par prémisses ce qui est suffisant pour la majorité des applications mais qui peut être considéré comme une limitation. L'utilisateur devra partager son fichier en plusieurs morceaux s'il désire attribuer plus de 50 valeurs à une prémisses.

Dans Fuzzy flou, les valeurs que prennent les prémisses peuvent être elles-mêmes des ensembles flous. Or, « CombinatoryFileGenerator.exe » considère que les valeurs saisies sont des singletons et n'offre pas la possibilité de saisir des triangles ou des trapèzes.

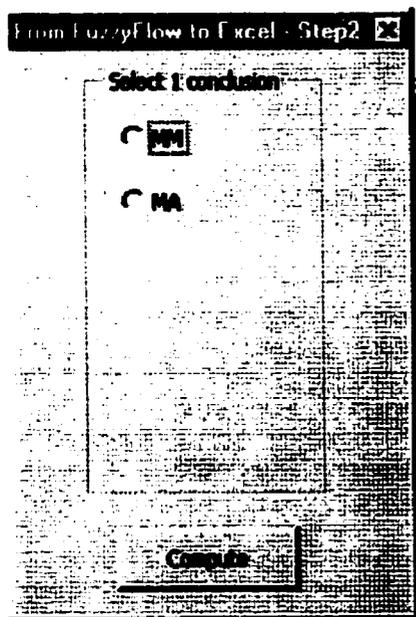
## 1.2. Le générateur de graphiques



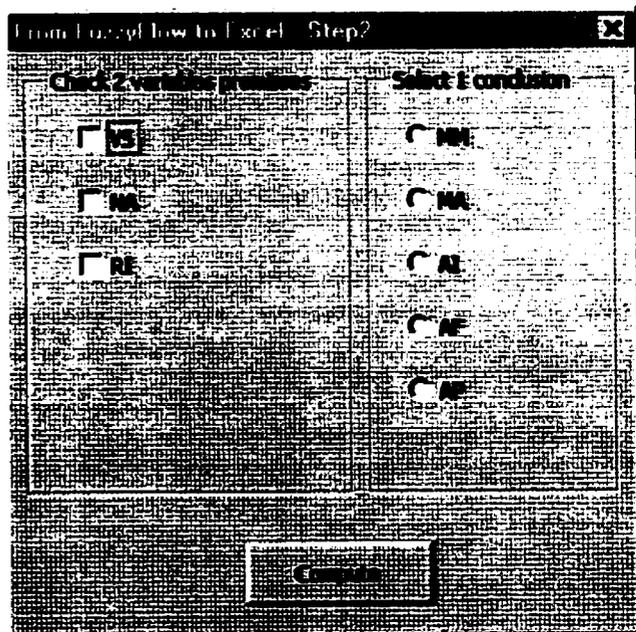
**Figure 1.2 : Première fenêtre du générateur de graphiques (macro Excel)**

Fuzzy flou génère un fichier de résultats. Celui-ci est un fichier texte dont il est difficile d'extraire une quelconque conclusion. Le fichier Excel « *From\_FuzzyFlow\_To\_Excel.xls* » contient une macro qui permet de créer automatiquement les graphiques. A l'ouverture de ce classeur, l'utilisateur clique sur le bouton et la première fenêtre apparaît à l'écran.

L'utilisateur entre le nom complet du fichier à traiter et choisit si les graphiques vont être exportés (au format jpg) ou non. Quand il clique sur « *Next* », une des 2 fenêtres suivantes apparaît dépendamment du nombre de prémisses.



**Figure 1.3 : Fenêtre suivante si  
seulement 2 prémisses  
si plus de 2 prémisses**



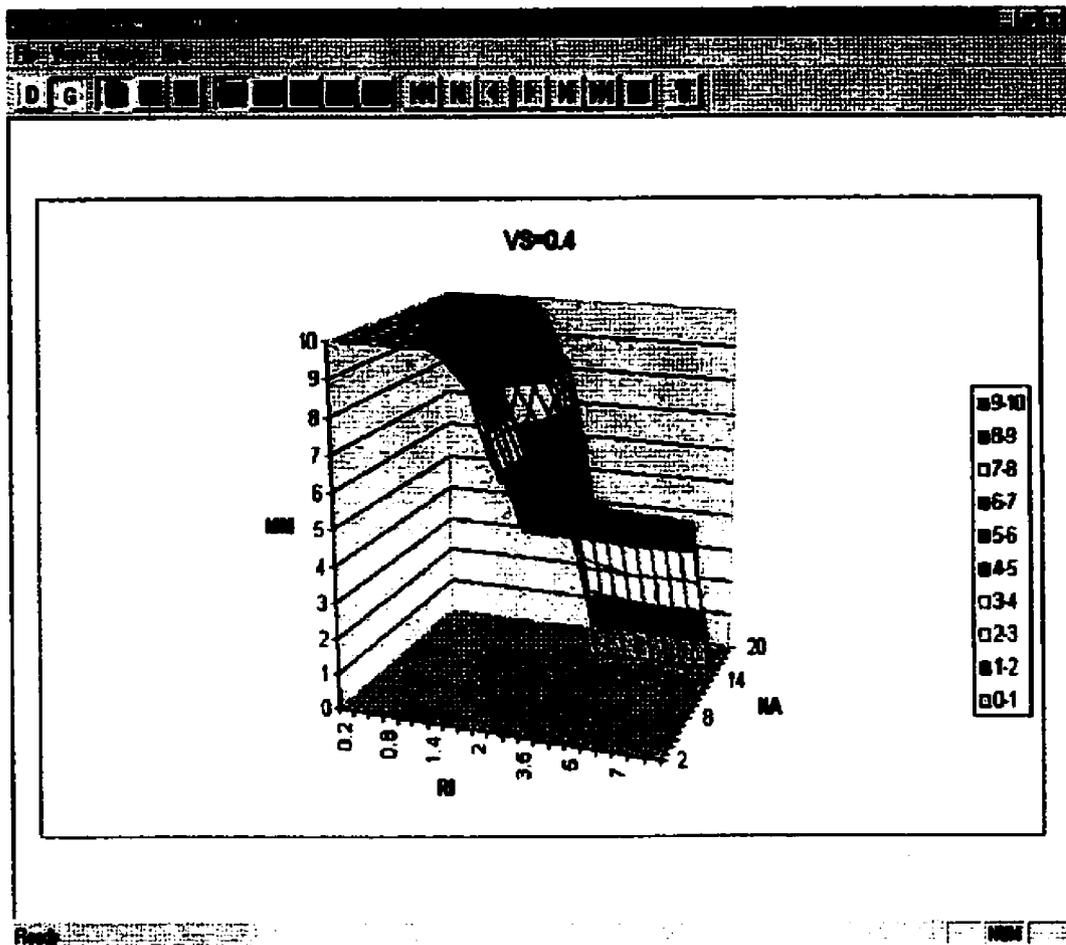
**Figure 1.4 : Fenêtre suivante**

La représentation graphique en 3 dimensions est faite à partir des valeurs de 2 variables (axe X et axe Y) et de 1 conclusion. S'il y a seulement 2 prémisses, il n'y a aucune ambiguïté quant à l'attribution des axes X et Y ; la macro ne génère qu'un graphique. Par contre, s'il y a plus de 2 prémisses, l'utilisateur est invité à choisir 2 prémisses (pour déterminer les axes X et Y) ; il y a autant de graphiques que de combinaisons entre les autres variables. Dans tous les cas, l'utilisateur doit sélectionner une conclusion. Le bouton « Compute » lance les calculs. Quand l'exécution est terminée, un classeur créé contient :

- dans la première feuille → les résultats
- les feuilles suivantes portent le nom de la combinaison des variables fixes et contiennent les données nécessaires à la construction du graphique correspondant.

Par exemple, en utilisant le « *Viewer* » :

- on choisit une partie du tableau à visualiser (partie gauche « G »),
- dans notre cas, il y a 3 prémisses → il faut en fixer une constante : « VS », puis fixer la valeur de cette constante (VS=0.4),
- on choisit une conclusion parmi les 5 : « MM ».



Figurel. 5 : Fenêtre graphique du "viewer"

**Limitations de cette macro :** Comme le générateur de fichiers combinatoires, elle supporte au maximum 6 prémisses et 6 conclusions.

### 1.3. Le visualisateur de graphiques

L'exemple précédent a mis en évidence l'intérêt du « viewer » (fichier « *Viewer.exe* »). C'est un moyen utile de visionner rapidement et facilement notre représentation du tableau 1 de Boothroyd.

L'utilisateur sélectionne la partie du tableau (droite ou gauche), la variable fixe et la conclusion qu'il désire visionner. Les touches de fonctions permettent de se déplacer parmi les différentes valeurs de la variable fixe. Un mode de défilement continu (sens croissant ou décroissant des valeurs) est prévu. La période de pause entre chaque image est réglable par l'utilisateur (menu Options). Par défaut, elle est de 3 secondes.

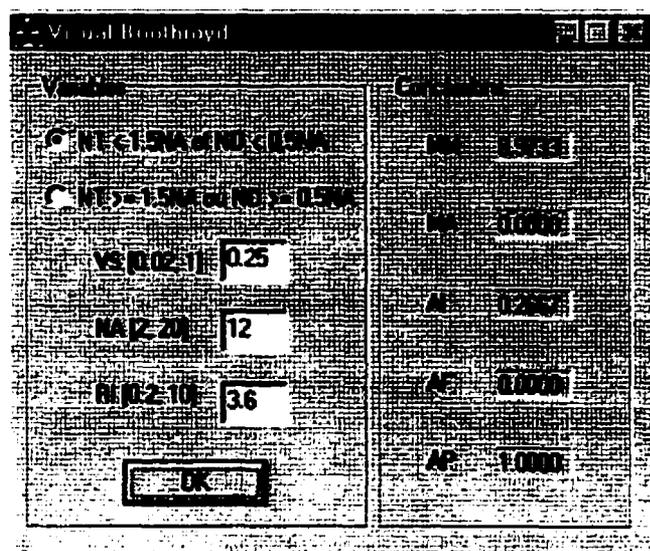
Ce programme visionne les images contenues dans le répertoire « C:\Boothroyd\Images ». Si, pour une raison quelconque, les images changent de répertoire, l'utilisateur est informé que le programme ne trouve pas les images et demande de sélectionner leur répertoire.

**Limitations de ce programme :** Il ne fonctionne que pour notre étude à cause des noms de fichiers spécifiques.

A ce stade de l'étude, l'utilisateur pointilleux peut exiger de connaître les résultats pour une valeur de prémisse non saisie au début de l'étude. Pour répondre à cette exigence, nous avons créé un utilitaire qui interpole les valeurs intermédiaires.

#### **1.4. Interpolation des résultats**

Le programme « **Boothroyd.exe** » demande la partie du tableau étudiée et la valeur désirée de chacune des 3 prémisses. Il calcule alors par interpolation la valeur des 5 conclusions.



La méthode d'interpolation est la suivante : le programme détecte les 2 valeurs qui encadrent RI puis les 2 valeurs qui encadrent VS. Pour chaque valeur de VS, il interpole (linéairement) la valeur des 5 conclusions en fonction des 2

valeurs de RI. Puis, il fait une autre interpolation (en fonction des 2 valeurs de VS) pour obtenir le résultat final.

**Figure 1. 6 : Fenêtre graphique du programme d'interpolation des résultats**

**Point fort :** obtention rapide et facile des valeurs des conclusions

**Point faible :** les valeurs ne sont pas exactes. Il faudrait utiliser FDSS pour obtenir une meilleure précision.

## 2. Interprétation des résultats

Pour réaliser une étude complète, nous avons simulé séparément les 2 parties du tableau.

Nous avons généré le fichier combinatoire suivant (13965 combinaisons) :

- VS varie de 0.02 à 1 en utilisant 35 valeurs,
- NA varie de 2 à 20 avec un pas de 1 (19 valeurs),

- RI varie de 0.2 à 10 en utilisant 21 valeurs.

Grâce à Fuzzy flou, nous avons obtenu les valeurs des 5 conclusions pour chacune de ces combinaisons. La représentation graphique est faite pour une des 3 prémisses fixe (les 2 autres représentant les axes X et Y du graphique) et pour la sortie sélectionnée. Au total, nous avons 750 graphiques pour représenter le tableau I de Boothroyd.

A ce niveau, il faut remarquer que nous avons tout généré alors qu'à la lecture du tableau, il paraît évident que certaines zones ne sont pas intéressantes à étudier. Ces zones sont, par exemple, celles où la conclusion ne varie pas d'une case à l'autre. Il nous a semblé utile de tout représenter pour bien mettre en évidence les transitions entre les conclusions. De plus, l'utilisateur peut tout visualiser avec le "Viewer".

La mise en évidence des transitions est réussie et les résultats sont cohérents. Par exemple, pour  $VS = 0.4$  dans la partie gauche du tableau nous obtenons les résultats suivants :



## **Partie II : Étude pour assemblage manuel**

Cette étude doit être réalisée par le concepteur si la méthode d'assemblage choisie grâce au tableau 1 de Boothroyd est l'assemblage manuel (MA).

### **2.1. Principe**

Boothroyd propose une démarche pour faire une analyse de la conception afin de réduire le coût d'assemblage manuel. Dans cette analyse, les principaux aspects de la conception (caractéristiques géométriques et technologiques de la pièce, utilité de la pièce dans l'assemblage, ...) sont examinés d'une façon systématique et l'efficacité de la conception est calculée. A la fin de la première étude, le concepteur est capable de tirer des conclusions (par exemple suppression de pièces) qui le mèneront à augmenter l'efficacité de conception. Itération par itération, il peut arriver rapidement à un optimum.

### **2.2. Méthode**

Pour chaque composant de l'assemblage, l'analyse comprend deux étapes importantes :

- une décision concernant l'élimination ou non du composant ou sa combinaison avec d'autres composants,
- une estimation de temps nécessaire pour saisir, manipuler et insérer le composant.

Le concepteur peut ensuite déduire le temps d'assemblage total et le comparer avec le temps d'assemblage d'une conception idéale.

### 2.3. Solution 1 : automatisation du calcul

Pour simplifier le travail du concepteur, nous avons réalisé le programme « AsmManu.exe » qui grâce à un jeu de question-réponses déduit les codes de manipulation et d'insertion manuelle et l'efficacité de la conception. De plus, le programme ne pose que les questions nécessaires. Par exemple, la taille du composant (très petit, petit ou grand) est déduite à partir des dimensions saisies.

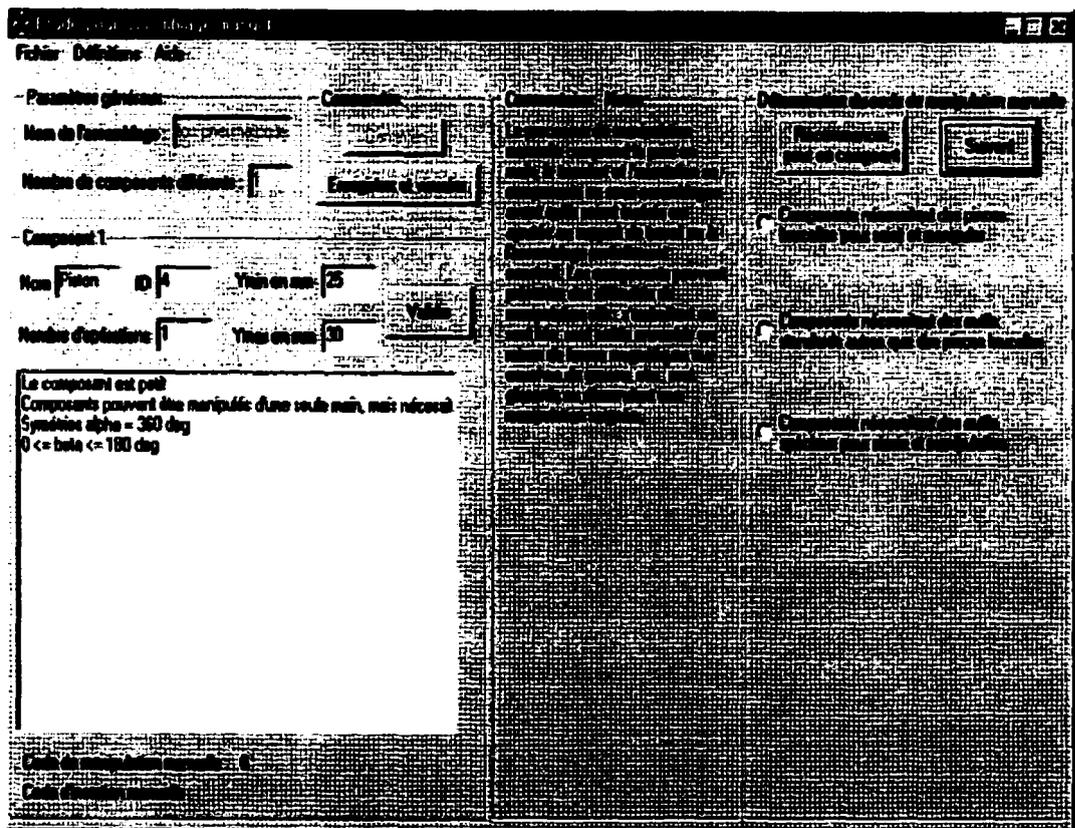


Figure 1. 8 : Fenêtre graphique du programme d'étude d'assemblage manuel

**Le programme fonctionne de la manière suivante :**

1. l'utilisateur saisit d'abord le nom de l'assemblage et le nombre de composants différents. Il clique ensuite sur l'unique bouton visible :  
« Démarrer »
2. l'utilisateur est ensuite invité à saisir le nom, l'ID, le nombre d'opérations et les dimensions mini et maxi du composant 1 et clique sur « Valider »,
3. puis il répond aux questions qui le guident vers l'obtention des codes de manipulation et d'insertion manuelle. En cas d'erreur de saisie, il peut cliquer sur "Recommencer pour ce composant" qui réinitialise tous les champs du composant (on retourne alors à l'étape 2),
4. quand le programme a assez d'informations pour déduire ces codes, le message « Composant 1 OK » apparaît à l'écran et le processus reprend à l'étape 2 jusqu'à ce que tous les composants soient saisis,
5. à la fin de la saisie, le message « La saisie est terminée et les calculs sont en cours. Il ne vous reste plus qu'à enregistrer et visualiser les résultats ! » indique la démarche à suivre.

A tout moment, l'utilisateur est guidé par des notes et des commentaires spécifiques aux questions. De plus, le menu "Définitions" constitue une aide précieuse et contient de nombreuses définitions relatives aux composants et au vocabulaire spécifique.

Le fichier résultats contient les informations concernant l'assemblage, toutes les informations des réponses aux questions pour chaque composant et un tableau présentant les résultats.

## **2.4. Solution 2 : Automatisation de la méthode et utilisation de la logique floue**

### **2.4.1. Mise en évidence de l'utilité de la logique floue**

A l'observation des tableaux 2 et 3 de Boothroyd, on remarque des écarts importants entre deux valeurs consécutives. Par exemple, pour le tableau 2 ligne 4, la différence entre la valeur de la colonne 0 (Épaisseur > 0.25mm) et celle de la colonne 1 (Épaisseur ≤ 0.25mm) est de 90% : 3.6s pour Épaisseur = 0.26mm et 6.85s pour Épaisseur = 0.25mm. Cette constatation nous a conduit à utiliser la logique floue pour caractériser de manière moins brusque ces transitions.

### **2.4.2. Représentation des tableaux en logique floue**

Le tableau 2 se présente en quatre parties distinctes. Une première question permet de déterminer lequel des sous-tableaux va être utilisé. Au niveau de la programmation, nous avons donc subdivisé ce tableau en quatre (tableau21, tableau22, tableau23 et tableau24).

La technique de partage du tableau 3 est identique et nous avons créé trois tableaux (tableau31, tableau32 et tableau33).

La seconde problématique posée par ces tableaux concerne les questions qui ne peuvent pas être toutes représentées de manière floue. Par exemple, on distingue les composants

pouvant être manipulés par une seule personne de ceux nécessitant l'intervention de deux personnes (transition du type binaire). Pour ce type de questions, les ensembles flous associés sont des singletons et non pas des trapèzes.

Le tableau 33 est un autre cas particulier car aucune question ne peut être représentée par un ensemble flou. Ce tableau est le seul pour lequel on n'utilise pas de fichier résultat généré par Fuzzy flou.

### **2.4.3. Technique de programmation**

Pour obtenir les résultats des bases de connaissances associés à chaque tableau nous avons deux possibilités :

- programmer le moteur d'inférence,
- générer des fichiers combinatoires comme fichiers d'entrée de FDSS, obtenir des fichiers de résultats et chercher dans ces fichiers la valeur la plus proche correspondant à la combinaison des prémisses.

Nous avons opté pour la seconde solution qui permet d'utiliser les programmes précédents et qui était plus rapide à mettre en œuvre. De plus, pour une question de simplification de programmation, nous choisissons dans le fichier, pour chaque prémisses, la valeur par excès plutôt que de faire une interpolation linéaire entre les deux valeurs les plus proches. Cette technique propose tout de même une bonne précision car le pas choisi entre deux valeurs d'une prémisses est adéquatement choisi.

Le programme réalisé utilise la même interface que le précédent. Seules les questions et les algorithmes de calcul sont modifiés.



Le programme fonctionne suivant le même principe que celui pour l'assemblage manuel.

Cependant, suivant les codes de manipulation et d'insertion, un composant peut requérir l'assemblage manuel. Par exemple, des composants qui s'emboîtent ou s'entremêlent sévèrement sont difficiles à manipuler de manière automatique. Un cas analogue se présente lorsque le composant possède des caractéristiques faiblement asymétriques ou de faibles dimensions. Dans de tels cas, le programme détecte le besoin de faire intervenir l'assemblage manuel dans le processus global d'assemblage du produit. L'utilisateur va alors devoir répondre à un ensemble de questions pour déterminer les codes d'assemblage manuel. Cela dit, son travail est simplifié car certaines questions sont similaires et les codes sont déduits rapidement en utilisant les informations de l'assemblage automatique. Ainsi, l'utilisateur répond au nombre minimal nécessaire de questions pour déduire tous les codes.

A la fin de la saisie, le fichier de résultats contient les informations concernant l'assemblage et toutes les informations des réponses aux questions pour chaque composant. Pour les composants requérant l'assemblage manuel, un tableau associé est créé. Puis, le tableau présentant les résultats de l'assemblage automatique est présenté. Enfin, l'estimation du coût d'assemblage, du nombre minimal théorique de composants et l'efficacité de l'étude est calculée.

## **ANNEXES 2 : REPRÉSENTATION GRAPHIQUE ET NUMÉRIQUE**

### **2.1 Représentation graphique du tableau de Boothroyd**

Ci dessous nous présentons le type de graphique et de tableau simplifié qui peuvent représenter le tableau no1 de Boothroyd.

La forme graphique est obtenue en fixant une des 3 prémisses (VS, NA, RI). Pour notre cas VS est fixé à 0.5 et on analyse la variation de MM, de AI et de AP par rapport à NA-RI et nous la visualisons sous forme graphique.

La forme de cellules que nous proposons pour mettre en évidence les valeurs numériques associées à chaque méthode dans une zone précise du tableau, nous permet de mettre en évidence les zones de croisement et de chevauchement des méthodes. Ces zones sont donc délicates et dans ces cas il faut faire attention avant de décider de la bonne méthode d'assemblage à utiliser pour un produit donné. Dans la zone  $NA=2$  à 20 et  $RI=0.2$  à 10 MM augmente diagonalement de haut en bas et AP de bas en haut.

Notre exemple est pris dans la partie de gauche du tableau de Boothroyd , et le reste des résultats obtenus.

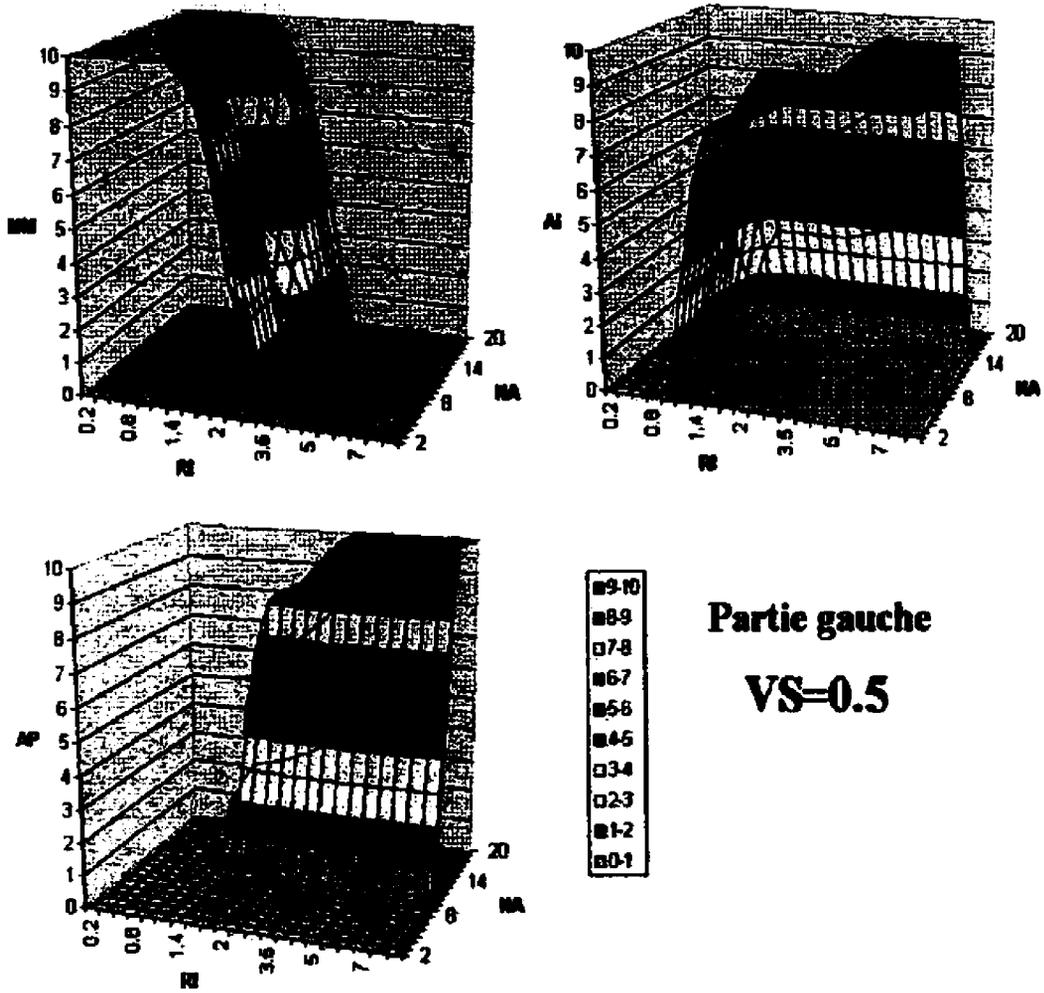


Figure 2.1.1 : Représentation graphique du tableau de Boothroyd.

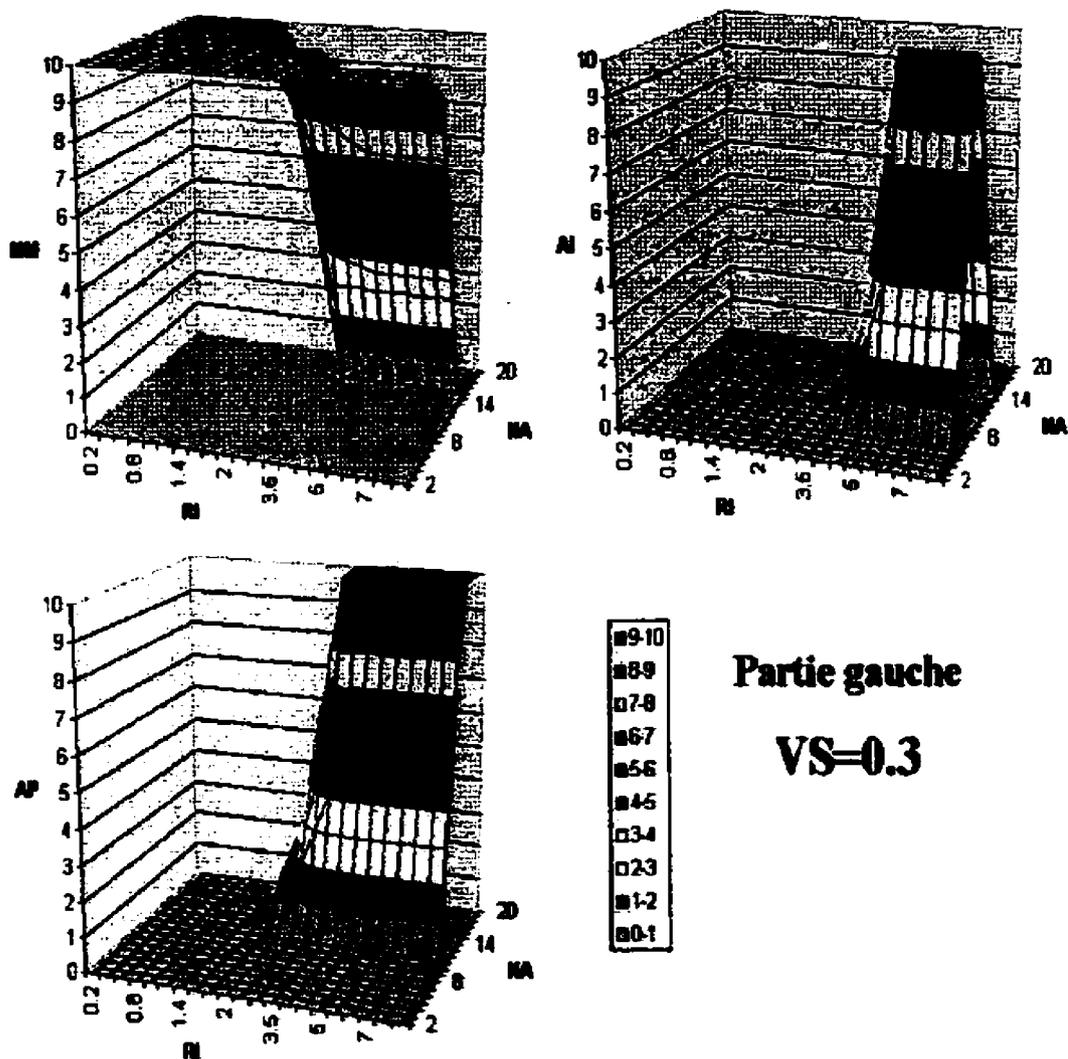


Figure 2.1.2 : Représentation graphique de la partie gauche pour VS=0.3

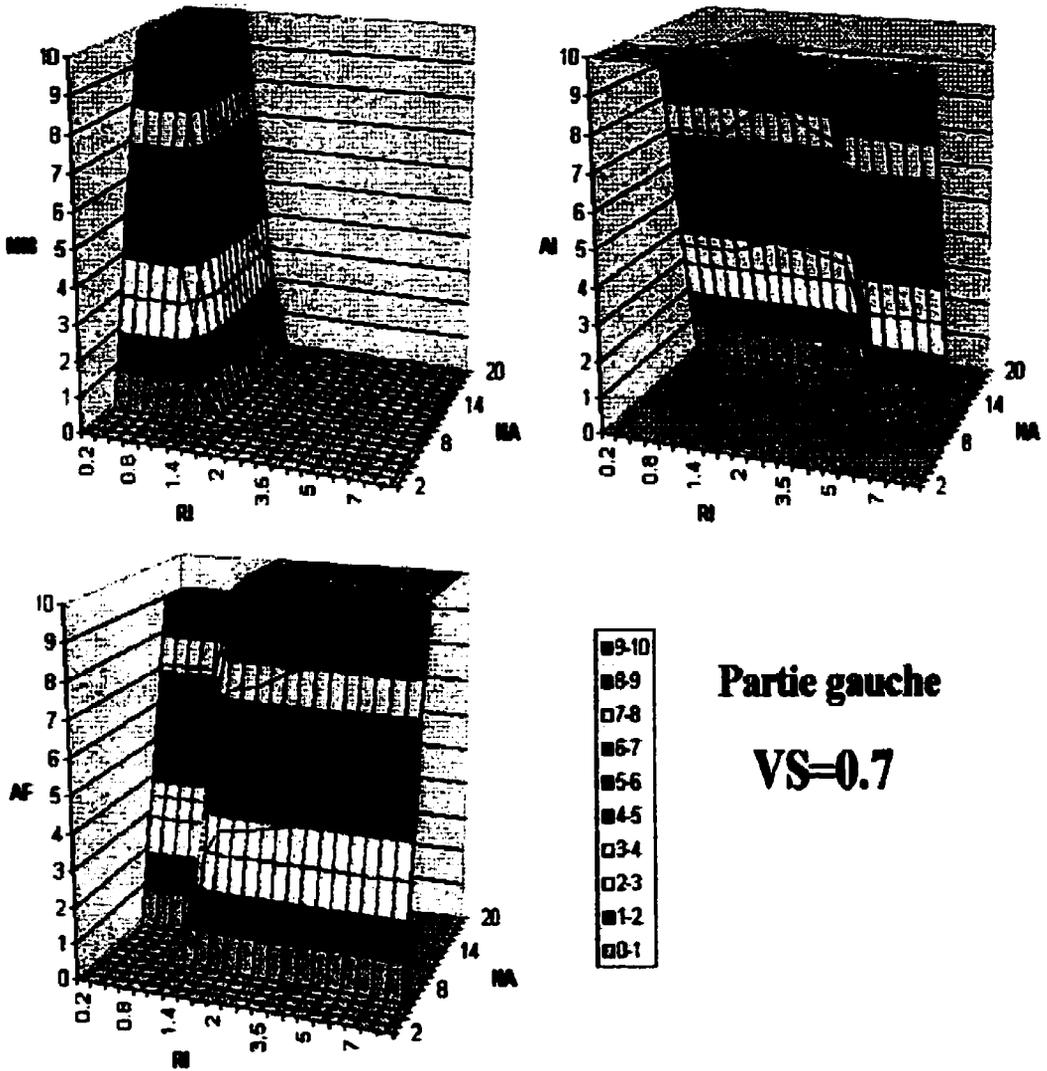


Figure 2.1.3 : Représentation graphique de la partie gauche pour VS=0.7

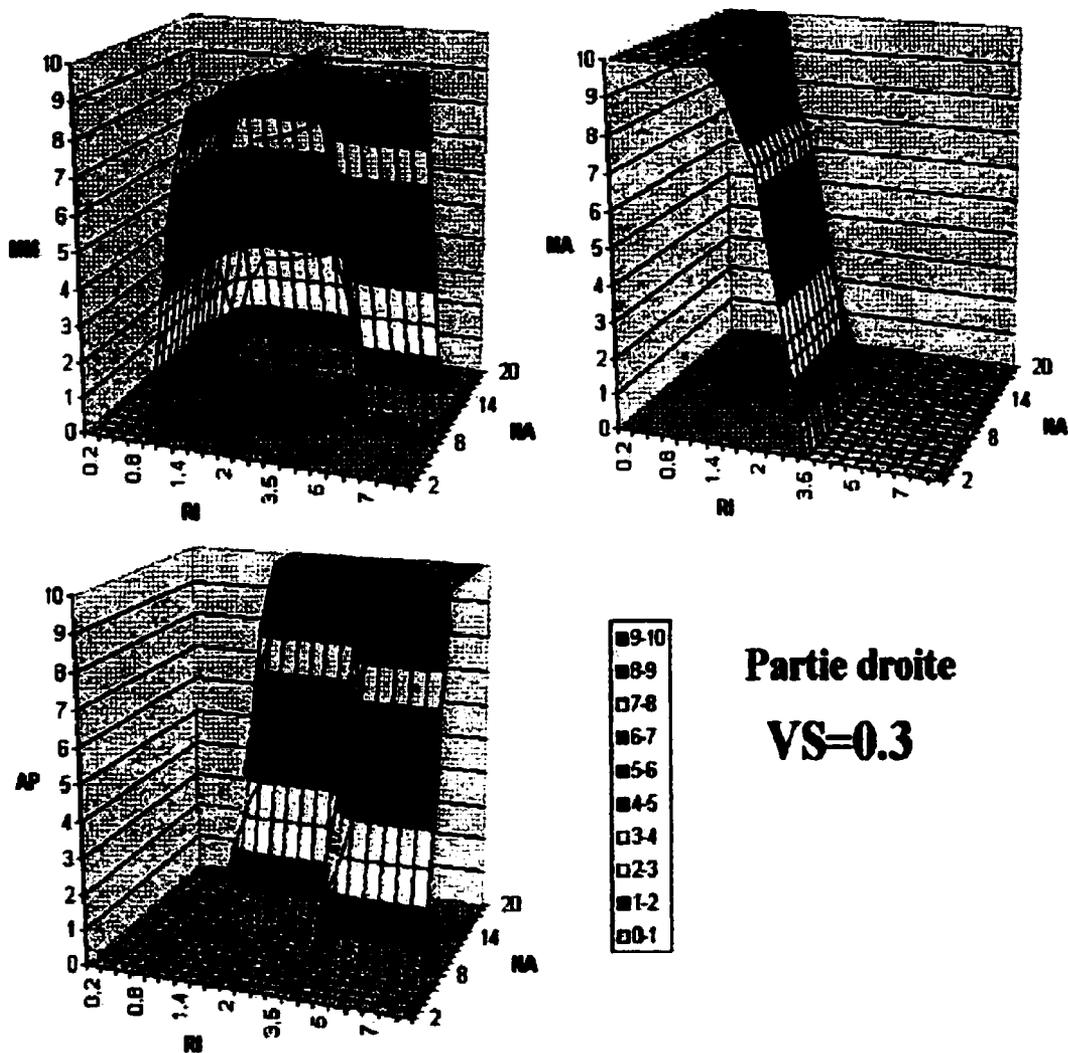
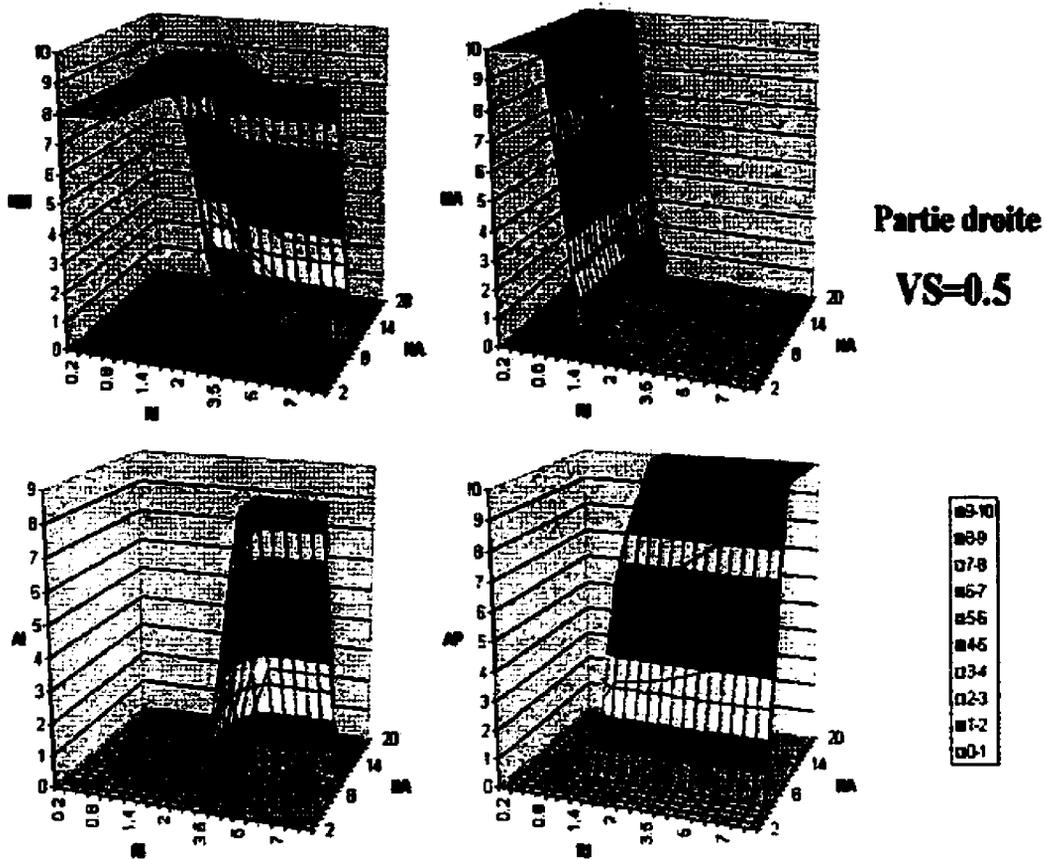
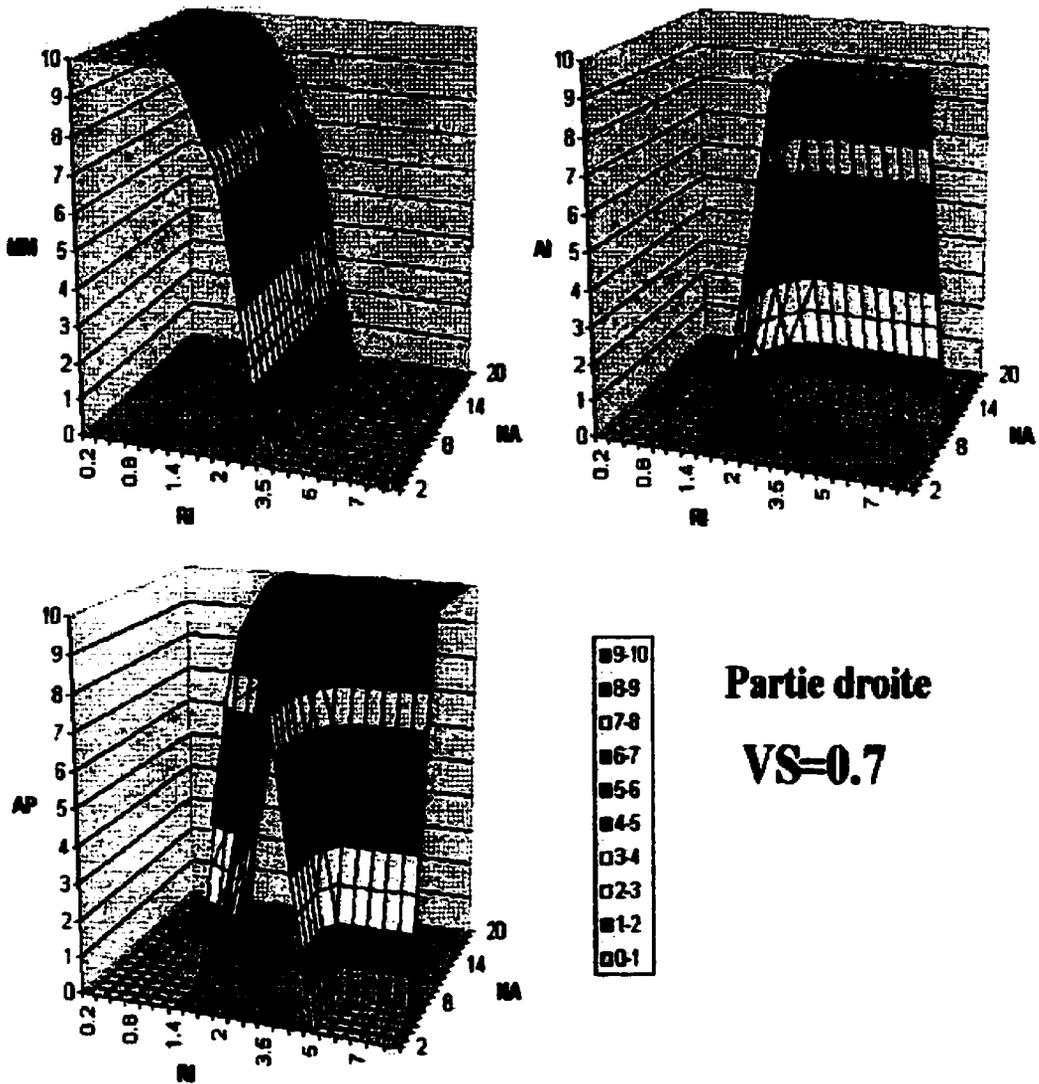


Figure 2.1.4 : Représentation graphique de la partie droite pour  $VS=0.3$



**Figure 2.1.5 : Représentation graphique de la partie droite pour VS=0.5**



**Figure 2.1.6 : Représentation graphique de la partie droite pour VS=0.7**

2.2 Représentation numérique du tableau de Boothroyd

Figure 2.2.1 : Représentation numérique de la partie gauche pour VS=0.3

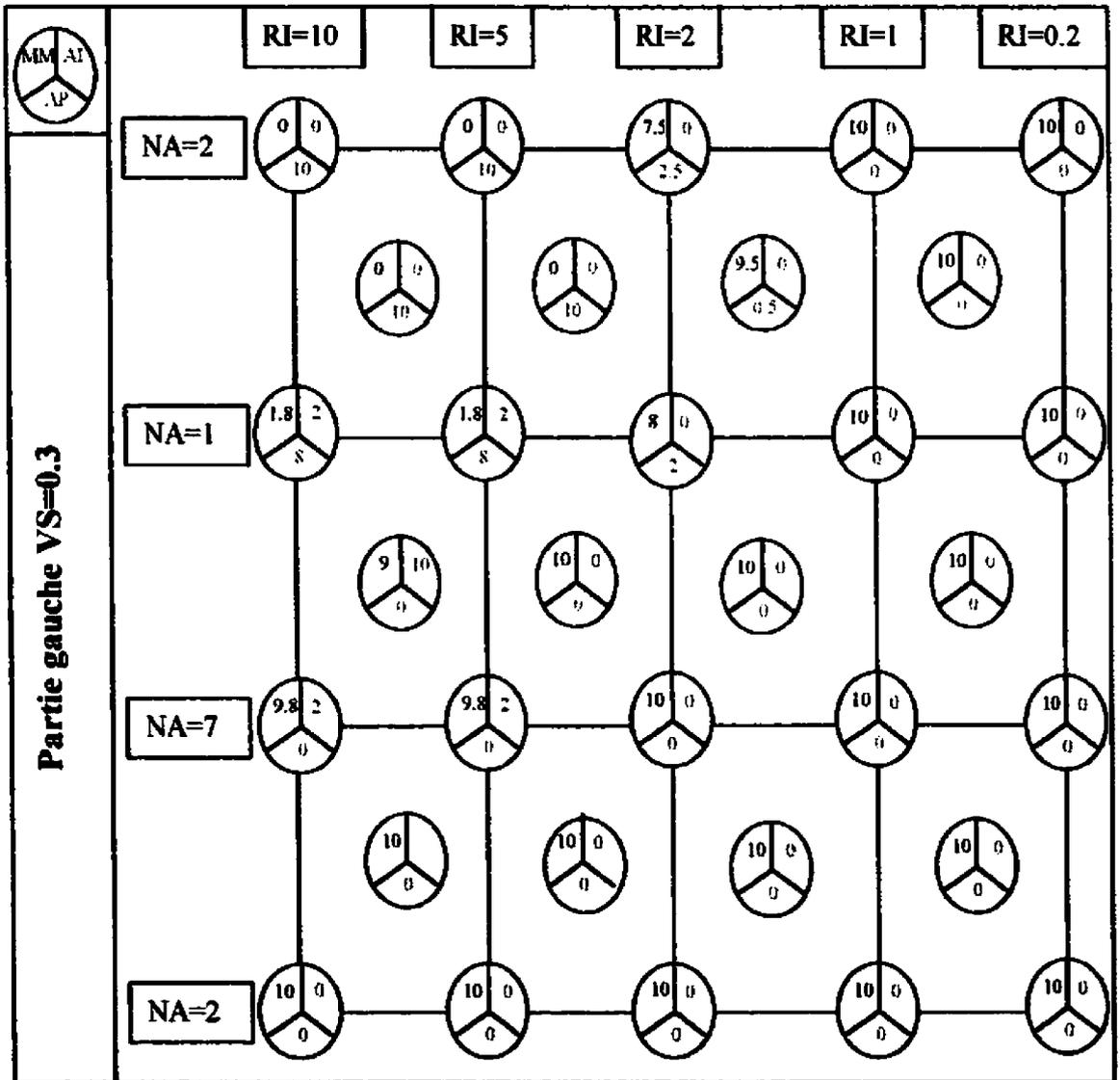


Figure : 2.2.2 : Représentation numérique de la partie gauche pour VS=0.5

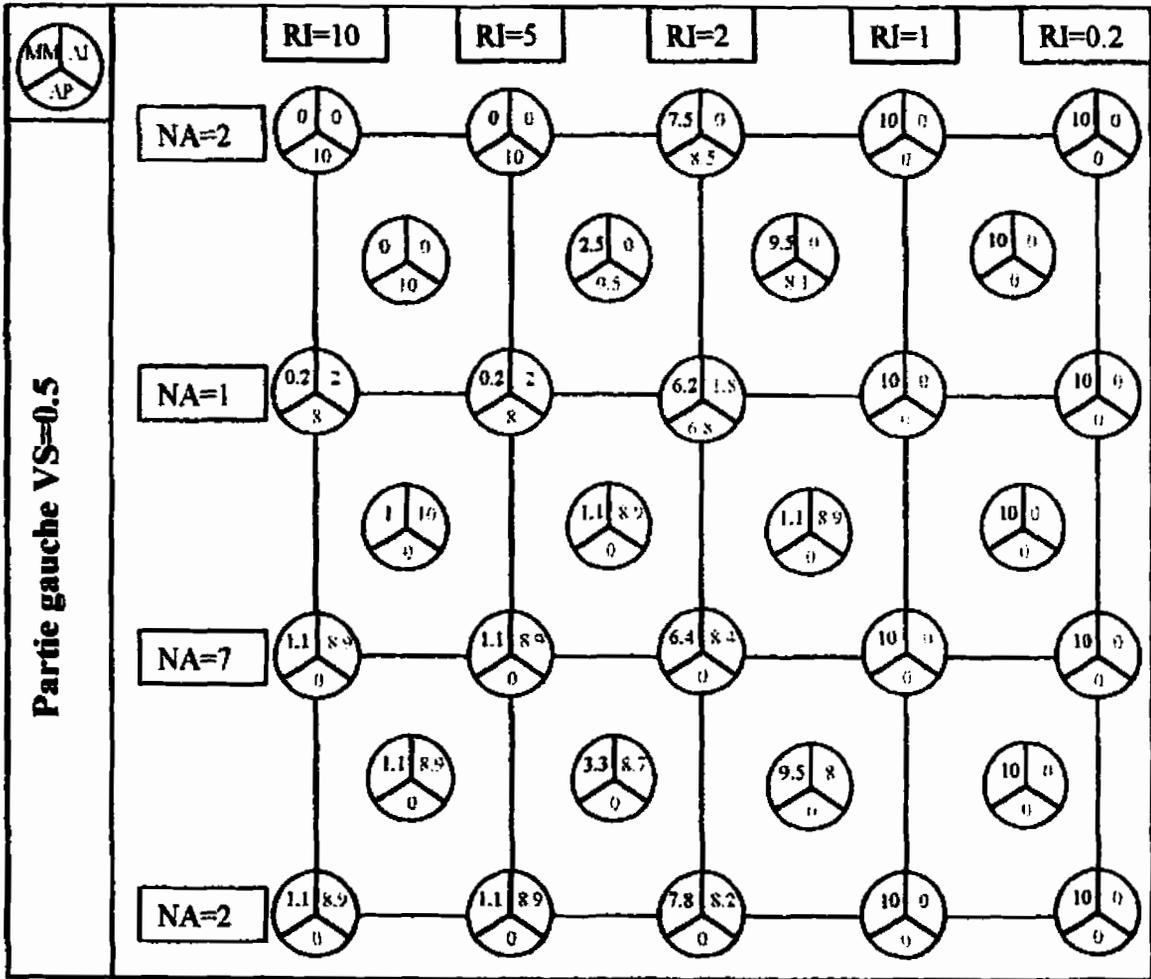




Figure 2.2.4 : Représentation numérique de la partie droite pour VS=0.3

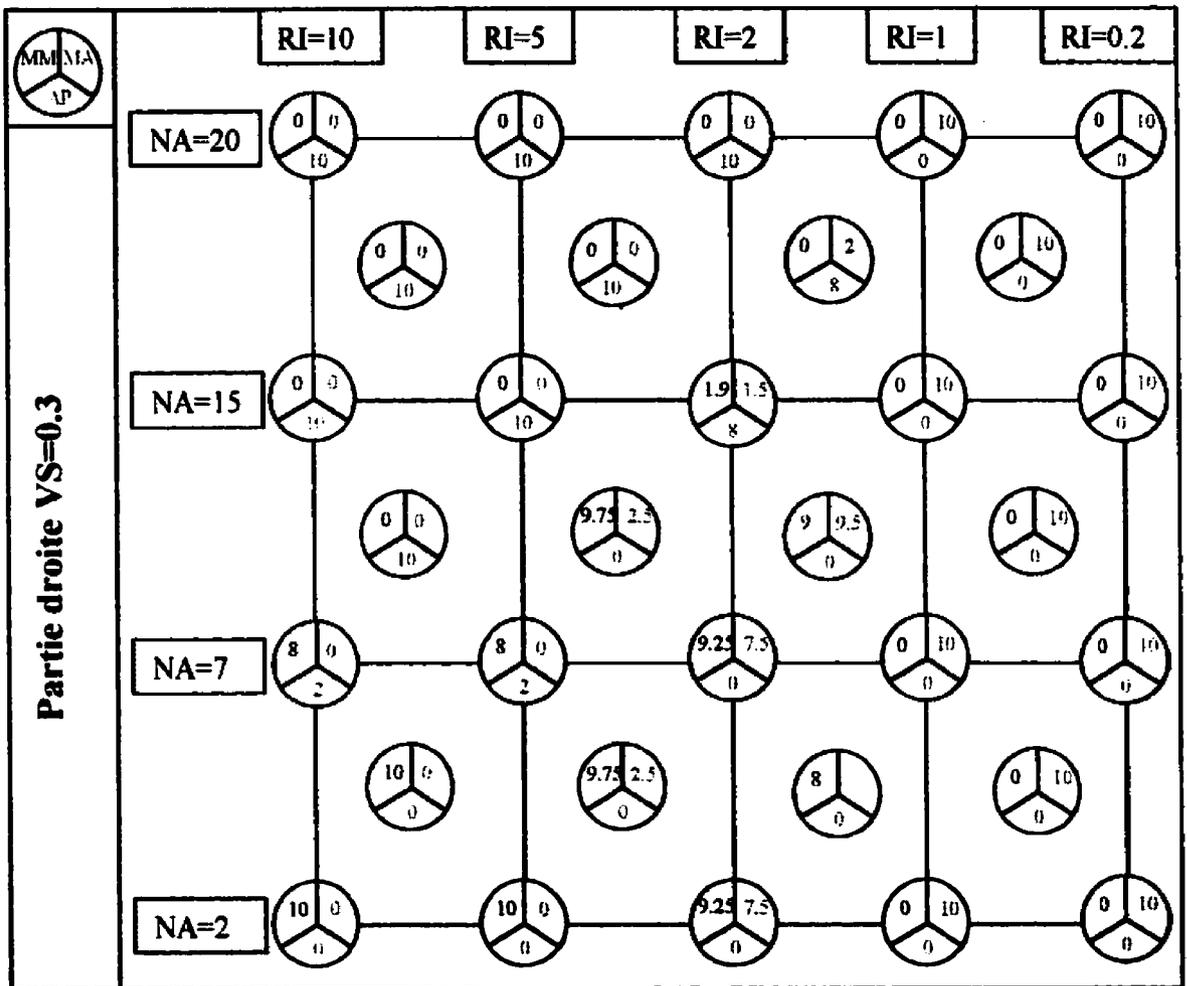


Figure 2. 2.5 : Représentation numérique de la partie droite pour VS=0.5

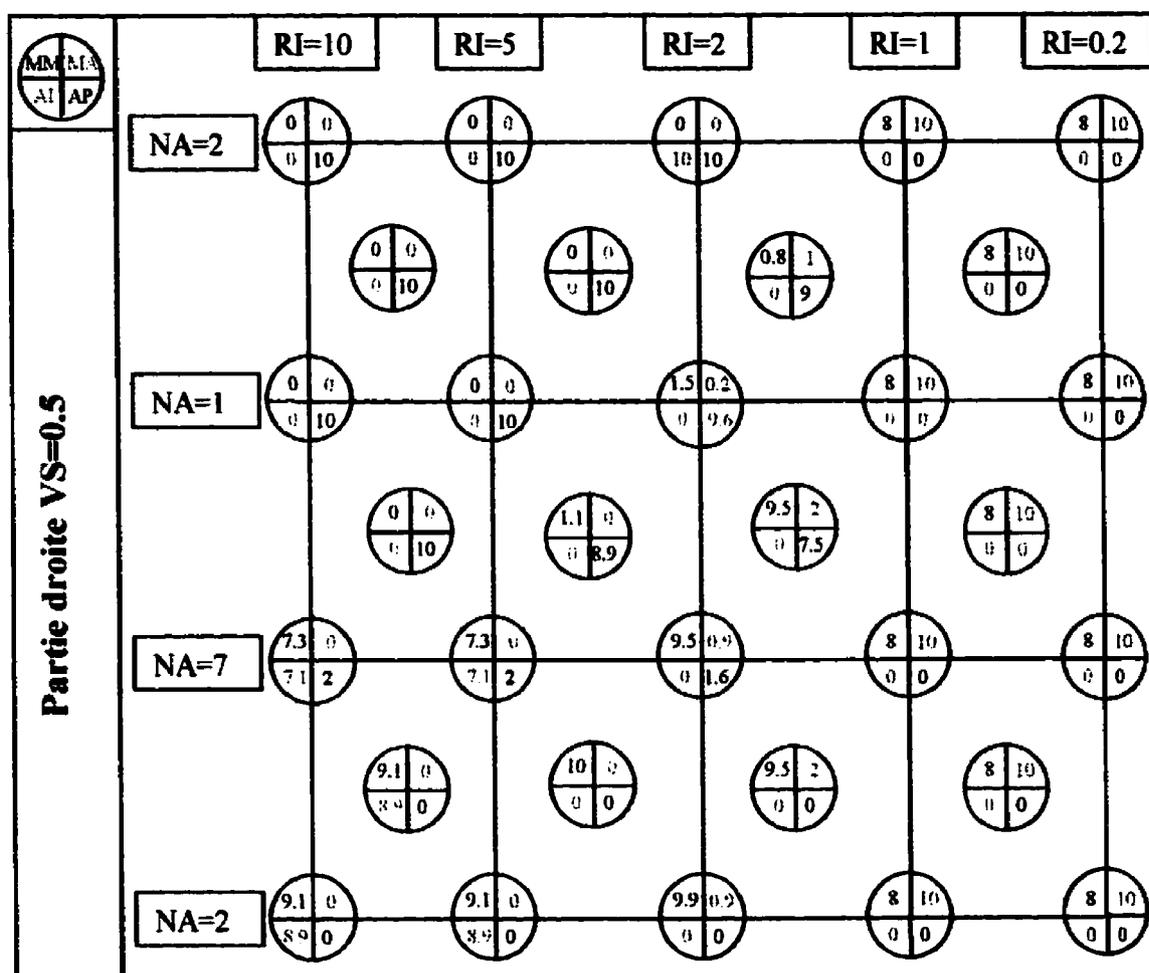
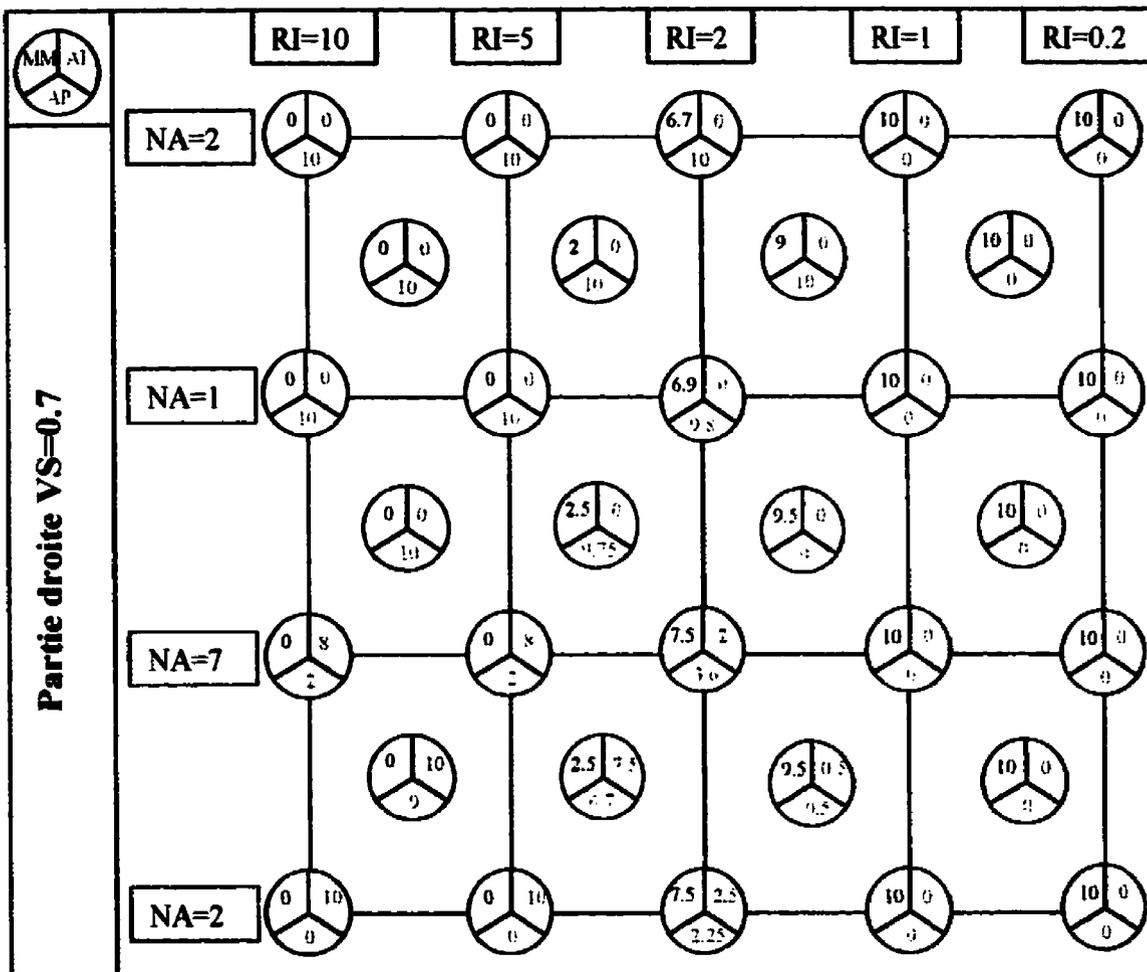


Figure 2.12 : Représentation numérique de la partie droite pour VS=0.7





Temps calculé : 2.63 minutes

Temps dans le tableau : 3.18 minutes

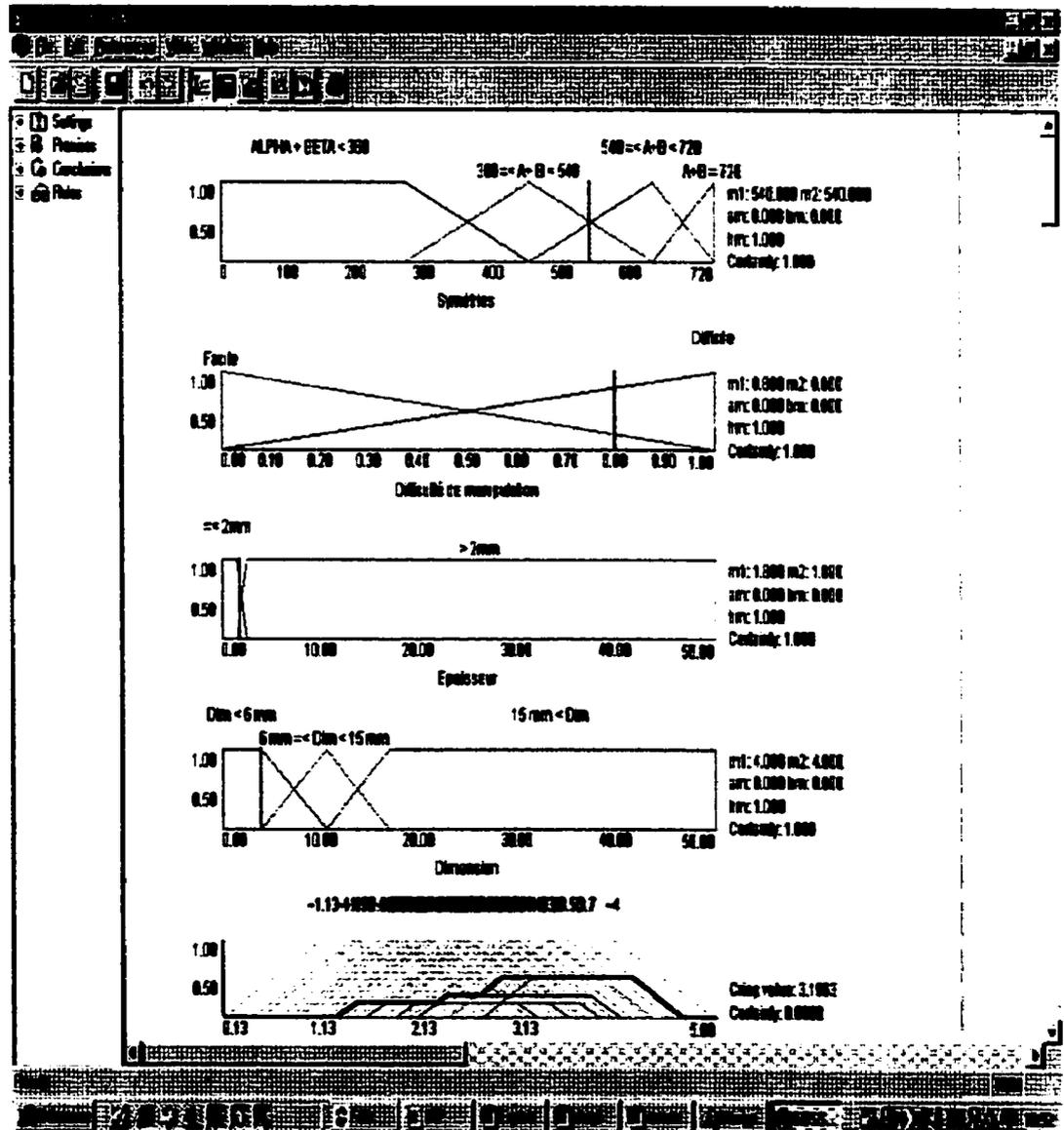


Figure 2.2.8 Résultats no 2 avec FDSS

**Angle de symétrie : 540 degré**

**Degré de difficulté : 0.8**

**Épaisseur : 1.8 mm**

**Dimension : 4 mm**

**Temps calculé : 3.19 minutes**

**Temps dans le tableau : 3.70 minutes**

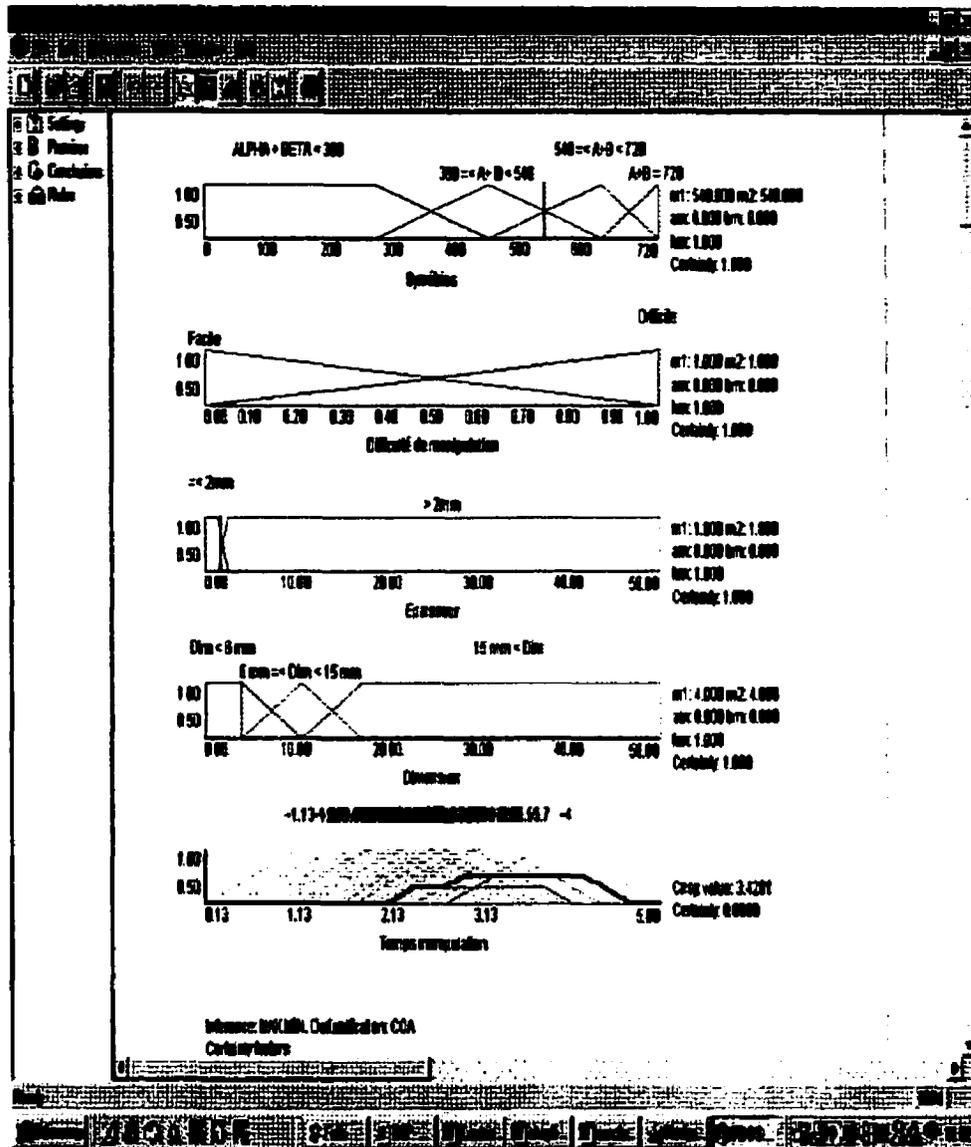


Figure 2.2.9 Résultats no 3 de FDSS

Degré de difficulté : 0.8

Épaisseur : 1.8 mm

Dimension : 4 mm

Temps calculé : 3.42 minutes

Temps dans le tableau : 3.70 minutes

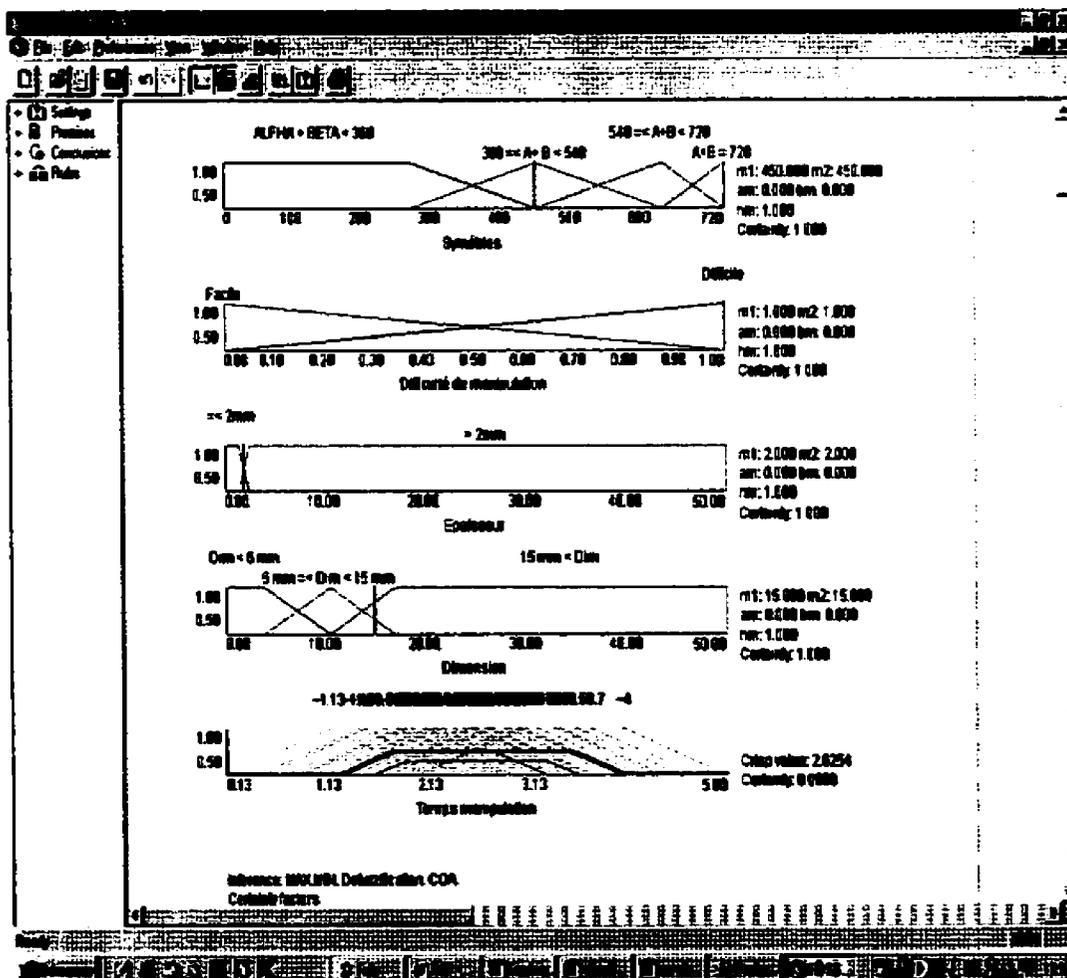


Figure 2.2.10 : résultats no3 avec FDSS

Degré de difficulté : 1

Épaisseur : 2 mm

Dimension : 15 mm

Temps calculé : 2.82 minutes

Temps dans le tableau : 3.70 minutes

A l'analyse de ses résultats, on remarque qu'au fur et à mesure que l'on augmente un des variables tout en restant dans un même intervalle, le FDSS nous donne un temps calculé qui augmente progressivement. Il y a lieu donc, de faire une interpolation et proposer des temps qui approchent de la réalité.

Dans les tableaux no 2 et 3 de Boothroyd, les temps changent d'une façon brusque et des fois on se demande si les grandes différences qui existent d'une case à l'autre sont justifiées.