HAL
open science

Contribution à la définition d'une modélisation technologique des robots industriels

Patrick Pujo

To cite this version:

Patrick Pujo. Contribution à la définition d'une modélisation technologique des robots industriels. Automatique / Robotique. Université de droit, d'économie et des sciences - Aix-Marseille III, 1994. Français. NNT : . tel-00654466

HAL Id: tel-00654466

https://theses.hal.science/tel-00654466

Submitted on 21 Dec 2011

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

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

Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix Marseille III

Faculté des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme

THESE

présentée par

Patrick PUJO

Agrégé de Génie Mécanique

Pour obtenir le grade de **Docteur en Sciences**

Spécialité : **AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE**

CONTRIBUTION à la DEFINITION d'une MODELISATION TECHNOLOGIQUE des ROBOTS INDUSTRIELS

Soutenue le 16 novembre 1994 devant la commission d'examen :

MM.	Jean Claude	BERTRAND	
	Gérard	BINDER	
	Michel	CAZIN	
	Wisama	KHALIL	Rapporteur
	Jean Paul	KIEFFER	
	Pierre	PADILLA	Rapporteur

Avant Propos

Ce travail a été réalisé au Département d'Informatique, d'Automatique et de Mécatronique (DIAM) de l'Institut Universitaire des Sciences Pour l'Ingénieur de Marseille, dans l'équipe "Systèmes Mécatroniques" et sous la direction de Monsieur le Professeur Jean-Claude Bertrand.

Je tiens, avant tout autre chose, à lui exprimer ici toute ma gratitude pour la pleine confiance qu'il m'a toujours accordée. Qu'il sache que l'apprentissage du métier de chercheur au contact de sa perspicacité, de sa clairvoyance et de son dynamisme est naturel, efficace, voire même évident, et que je l'en remercie.

Je remercie également le Directeur du Département d'Informatique, d'Automatique et de Mécatronique, Monsieur le Professeur Eugène Chouraqui, pour m'avoir accueilli dans son département dans des conditions de travail privilégiées.

Monsieur le Professeur Wisama Khalil, responsable de l'équipe "Robotique" du laboratoire d'Automatique de Nantes, a accepté d'assurer la lourde tâche d'être Rapporteur. Il trouvera ici l'expression de toute ma reconnaissance pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux.

Monsieur Pierre Padilla, Directeur de l'École Nationale d'Ingénieur de Metz, a accepté avec son enthousiasme habituel d'être également Rapporteur de ce mémoire. Pour cette preuve spontanée de l'attention qu'il m'a toujours témoignée et pour les encouragements dont il m'a gratifié, mes remerciements n'en sont que plus appuyés.

C'est un très grand honneur pour moi que Monsieur le Professeur Michel Cazin, éminente autorité en mécanique industrielle et enseignant au Conservatoire National des Arts et Métiers, ait accepté de s'intéresser à mes travaux. Je le remercie vivement pour l'analyse détaillée qu'il a mené sur mon mémoire et qui a contribué à son enrichissement.

Monsieur le Professeur Gérard Binder, Directeur de l'ESSAIM, m'a également fait l'honneur de bien vouloir évaluer mon travail et participer à la commission d'examen malgré son emploi du temps fort chargé. Qu'il soit assuré de ma respectueuse reconnaissance.

Monsieur le Professeur Jean Paul Kieffer, responsable de l'équipe "Conception et Exploitation des Systèmes Automatisés de Production" du DIAM, trouvera également ici l'écho de ma reconnaissance pour sa participation à ce jury. Notre collaboration pédagogique en Génie Industriel a bien souvent débordé sur des aspects scientifiques, les longues discussions philosophiques qui en ont découlé ne sont pas étrangères à certaines orientations méthodologiques qu'il retrouvera dans les travaux présentés ici.

Je remercie ensuite Monsieur Charles Palumbo, Président Directeur Général de la société Cybernétix, qui m'a gracieusement ouvert les portes de son entreprise, le temps de quelques expérimentations sur site industriel. Monsieur Pierre Marty, qui s'est occupé de mon installation, bénéficie tout autant de ma reconnaissance.

Je me dois également de saluer la contribution plus 'indirecte' des membres de la Commission CFAO Robotique de l'AFRI. Lors des réunions de cette commission, j'ai surtout beaucoup écouté et j'ai beaucoup appris. Je remercie donc Messieurs Arnauld Laffaille et Patrick Desmasures qui organisent de telles plates-formes d'échange d'idées et d'informations.

Messieurs Yves Leuwers et Dusan Janda trouveront ici un témoignage de leur collaboration à la réalisation logicielle de notre recherche.

A ce propos, toute ma gratitude va également à Monsieur Gérard Massé, pour sa participation active aux travaux présentés ici. Au-delà d'une simple reconnaissance de son sérieux et de sa gentillesse, qu'il veuille bien trouver là l'expression de toute ma plus sincère amitié.

Je ne peux oublier l'ensemble des personnels administratifs et techniques de l'IUSPIM, pour leur dévouement au bon fonctionnement de notre établissement.

En particulier, que Madame Pascale Gerbail accepte tous mes remerciements pour sa lecture très approfondie de ce mémoire.

Je n'oublierai pas les prestations éclairs, mais néanmoins fondamentales de Messieurs Nicolas Broissin, Laurent Granier et François Christofaro.

Je ne saurais conclure ces remerciements sans y associer l'ensemble de mes collègues, chercheurs et enseignants, actuels ou anciens, qui de près ou de loin m'ont encouragé et soutenu au cours de ce travail.

Une dernière fois, merci à tous...

"La force d'un homme se mesure à la somme d'incertitudes qu'il peut porter. "

Nietzsche

A mes proches...

SOMMAIRE

INTRODUCTION 1

Chapitre I **MODELISATION et PERFORMANCES des ROBOTS INDUSTRIELS** 5

1. *Modélisation des robots industriels* 6
2. *Caractérisation technologique des robots industriels* 30
3. *Conclusion* 70

Chapitre II **MODELISATION du COMPORTEMENT TECHNOLOGIQUE des ROBOTS INDUSTRIELS** 71

1. *Proposition d'un modèle incluant les caractéristiques technologiques des robots industriels* 72
2. *Identification des paramètres du modèle technologique d'un robot industriel* 116
3. *Conclusion* 127

Chapitre III **MISE en OEUVRE et VALIDATION du MODELE PROPOSE** 128

1. *Réalisation d'un simulateur du comportement technologique des robots industriels* 129
2. *Applications de la modélisation technologique des robots industriels* 147
3. *Conclusion* 168

CONCLUSION GÉNÉRALE 169

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 172

TABLE des MATIERES 186

TABLE des ILLUSTRATIONS 191

INTRODUCTION

Les performances des robots industriels ont une très grande importance dans le développement de l'automatisation de l'industrie manufacturière. En effet, cette industrie se modernise et donc modifie et développe rapidement ses structures opérationnelles ainsi que ses techniques de production. Nous observons plus particulièrement à l'heure actuelle une tendance à la rationalisation des méthodes employées et une recherche accrue de la productivité. Un des principaux soucis est d'augmenter l'automatisation des systèmes de production, mais surtout de mieux utiliser les machines et leurs personnels. Dans ce contexte, l'utilisation de robots industriels est sujette à de nouvelles contraintes dont l'objectif vise à simplifier leur mise en oeuvre. Une meilleure connaissance du comportement de la partie mécanique va nous permettre d'aller dans ce sens, en mieux simulant hors ligne les tâches robotisées et en diminuant donc les phases non productives de mise au point en ligne.

Thème et intérêt de l'étude

Les robots industriels actuels sont constitués de structures mécaniques fortement rigides de type poutre, articulées les unes aux autres par des liaisons supposées parfaites. Cela permet généralement de simplifier les problèmes de commande en négligeant les phénomènes de déformations élastiques des différents constituants mécaniques internes : poutres, liaisons partielles et chaînes cinématiques... Or, ces machines sont réputées moins précises que d'autres machines pilotées numériquement (Machines Outils à Commande Numérique, Machines à Mesurer Tridimensionnelles).

Nous proposons de traiter de l'influence de ces défauts élémentaires sur la trajectoire finale de l'extrémité du robot, afin d'évaluer l'écart géométrique de forme entre cette trajectoire et la trajectoire idéale initialement programmée. En effet, si faire un relevé métrologique permet la qualification

d'une machine à axes orthogonaux, puis de corriger les défauts constatés, il reste difficile, dans le cas des robots industriels, de transformer directement des défauts observés dans l'espace géométrique de la scène de travail en des défauts dans l'espace articulaire de commande, ceci afin d'envisager une amélioration de la trajectoire réelle.

Ceci n'est actuellement pas réalisé sur les systèmes robotiques. Pourtant, l'utilisation de systèmes de pilotage numériques offre des possibilités très larges de correction pour l'élaboration des consignes articulaires. Ces possibilités ne sont pour l'instant utilisées que pour la correction de comportements liés aux asservissements. Nous allons, lors des travaux que nous exposons ici, permettre l'émergence de tels mécanismes de correction, associés à leurs contextes d'application.

Nous articulerons donc notre étude en trois temps.

Le premier sera naturellement consacré à une mise en situation détaillée des problématiques que nous venons de présenter très succinctement.

Dans le second, nous proposerons une approche technologique permettant la prise en compte de certains phénomènes sur la base d'une modélisation plus fine, et donc plus proche du comportement réel du robot.

Enfin, le dernier sera consacré d'une part à la présentation d'une réalisation logicielle mettant en oeuvre cette approche et de sa validation expérimentale, et d'autre part à un rapide aperçu des applications envisageables. Ce logiciel sera suffisamment générique pour permettre le test de ces applications sur toutes sortes de robots industriels.

Chronologie du mémoire

Nous débuterons ce mémoire, afin de situer exactement notre étude, par une synthèse sur le thème des robots utilisés en situation de production industrielle. Nous insisterons en premier lieu sur une présentation matérielle des systèmes robotiques, que nous prolongerons par un inventaire des différentes théories de modélisation des systèmes mécaniques articulés utilisées par les roboticiens. Dans un second temps, nous constaterons la réalité des performances obtenues en ce qui concerne la qualité métrologique des trajectoires, nous décrirons les systèmes de mesurage existants et nous mettrons en évidence que le différentiel entre les trajectoires réellement observées et celles initialement prévues provient d'une mauvaise adéquation

entre le comportement technologique du robot et sa modélisation opérationnelle.

Fort de cette analyse, nous allons ensuite présenter une méthode dont l'objectif est de pouvoir prendre en compte et identifier l'importance relative des différents facteurs d'influence mécaniques sur le comportement global d'un bras de robot donné, à l'aide d'une modélisation simple du comportement technologique de chaque composant élémentaire. Ceci donnera lieu dans notre deuxième chapitre à l'établissement d'une modélisation spécifique à cette problématique.

L'objectif poursuivi sera de nous donner, après une description cinématique et technologique du robot, la possibilité d'effectuer la simulation d'une trajectoire sous des conditions de charges données.

Le principe général est le suivant : une fois cette trajectoire échantillonnée, la posture du robot est déterminée pour chacun des points échantillonnés. A partir de chaque posture, nous en déduisons les torseurs d'interefforts liant et sollicitant les segments constituant le bras du robot. Le comportement de chaque composant peut être étudié séparément et les déformations élémentaires résultantes sont obtenues simplement. Chaque liaison est alors dotée d'un torseur de petits déplacements, résultat de la somme de tous les défauts intervenant au niveau de chaque poutre. La prise en compte cumulée de ces défauts le long de la chaîne cinématique du robot permet de reconstituer l'écart estimé entre la position géométrique théorique et la position obtenue par simulation des comportements technologiques. Cette dernière est en effet très proche de la position réellement atteinte par le bras du robot lorsque les paramètres de notre modélisation sont bien ajustés. Les conditions pour réaliser cet ajustement constitueront la conclusion de notre second chapitre.

Enfin, le dernier chapitre sera consacré aux applications industrielles potentielles de nos travaux.

Nous présenterons tout d'abord une réalisation logicielle mettant en oeuvre la modélisation technologique que nous proposons. Nous montrerons que, grâce à notre souci constant d'ouverture du produit sur de futures évolutions, cette modélisation peut être appliquée actuellement sur toute la famille des robots qui ont une structure de chaîne non fermé et dont les liaisons cinématiques ne comportent qu'un seul degré de liberté.

Nous examinerons en premier comment nos travaux se situent dans le cadre de la CFAO Robotique et comment ils viennent en complément de

programmes de recherche en cours. Nous effectuerons ensuite un rapide panorama des perspectives d'utilisation, que nous pouvons regrouper en quatre types distincts :

- l'analyse des caractéristiques métrologiques d'un robot en cours de conception par simulation de son comportement sous sollicitation,

- l'aide à l'interprétation des relevés métrologiques effectués sur une partie opérative existante, et par là même, la recherche des défauts locaux ayant le plus d'influence globalement, en vue de leur réduction et en définitive de l'optimalisation mécanique du robot,

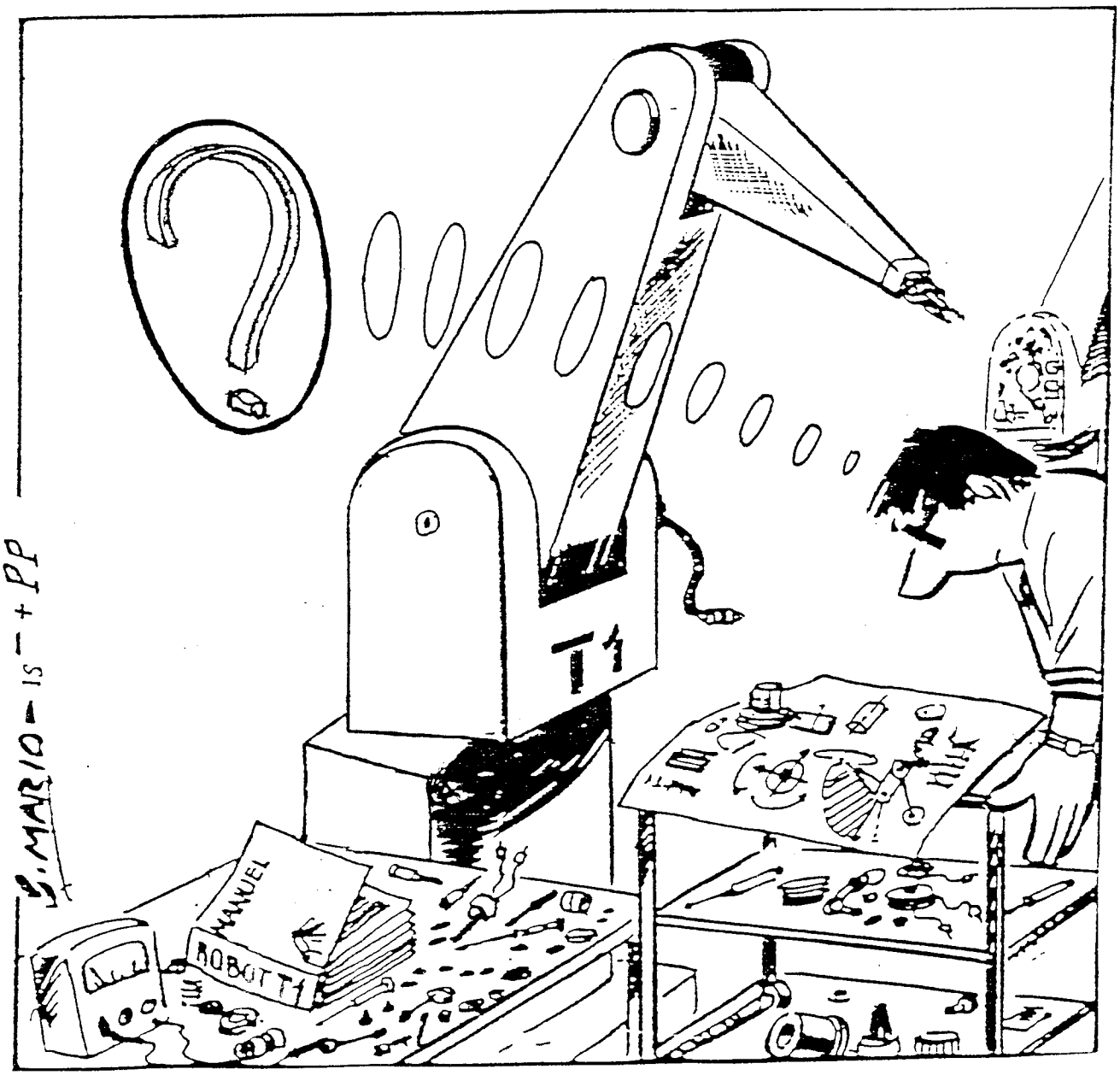
- la recherche de politiques de commande permettant de compenser les défauts observés par ajustement des consignes, dans le cadre d'un robot imprécis tout en ayant une résolution adéquate à l'exécution d'une tâche donnée trop précise,

- puis à terme, l'application de ces politiques de commande à des structures mécaniques à moyenne rigidité permettant, pour une qualité de trajectoire équivalente, de modifier profondément la structure mécanique des robots, par une diminution de la masse des bras entraînant en parallèle une diminution de la masse des actionneurs et une plus grande sophistication de leur commande.

Ce dernier aspect sera fondamental dans l'exploitation de tous les avantages qu'apporte l'introduction des techniques mécatroniques en robotique.

Nous conclurons notre propos par l'évaluation des limites de nos propositions et l'inventaire non exhaustif des perspectives de nouvelles recherches offertes par ces travaux.

Chapitre I
MODELISATION et PERFORMANCES des ROBOTS INDUSTRIELS



1. MODELISATION des ROBOTS INDUSTRIELS

1.1. Analyse fonctionnelle d'un robot industriel

1.1.1. Définition d'un robot industriel

Il est très fréquent dans un ouvrage ou un mémoire de commencer le propos par une définition du système étudié. Cette définition doit faire référence afin de refléter l'opinion de la très large majorité des spécialistes du domaine. Bien que les robots soient des machines relativement récentes dans l'univers des systèmes industriels de production, ils sont parfaitement définis par l'Association Française de Normalisation : "Un robot industriel est un manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il prend souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise notamment un dispositif de mémoire et, éventuellement, de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique. Elles peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel.".

Nous constatons bien au travers de cette définition qu'un robot industriel est un système complexe, notamment par ses aspects pluritechnologiques. En réalité, cette définition, qui semble complète et précise, est face à cette complexité en définitive assez imparfaite. En effet, elle témoigne plus de l'état d'avancée technologique d'un produit appelé robot industriel que du rôle et des fonctions primaires de ce produit. Ainsi, cette définition est mal positionnée vis à vis de toutes les dernières avancées scientifiques dans le domaine de la robotique. Nous pourrions évoquer par

exemple la commande en force développée par Khatib [KHA87] à Stanford, en opposition avec la commande 'en position', ou la décentralisation de cette commande prônée par Bertrand et Brun-Picard [BRU88], 'son unité de commande' sous-entendant plutôt une solution centralisée.

Les problèmes que nous évoquons là viennent sans aucun doute du fait que cette définition tente de dresser une liste exhaustive des différentes composantes ou parties d'un robot, relevant chacune de disciplines scientifiques différentes, telles que la mécanique, l'électrotechnique et l'électronique de puissance, l'électronique numérique et la micro-informatique, l'automatique et les asservissements, la surveillance et la sûreté de fonctionnement, la supervision et la programmation de tâches, l'informatique et l'intelligence artificielle...

Pourtant, certains auteurs donnent des robots une définition plus conceptuelle et moins contraignante. Ainsi, par exemple, Lopez définit un robot comme étant "un système artificiel ayant une action 'intelligente' sur l'univers (environnement local ou global, objet sur lequel le robot doit agir, robot lui-même)" [LOP86].

Cette nouvelle définition a le mérite d'englober toutes les déclinaisons de robots que nous puissions imaginer, que ce soit en terme d'applications, en partant par exemple du robot industriel pour aller jusqu'au robot ménager en passant par les applications dans l'agriculture et dans l'espace, ou que ce soit en terme d'architecture, les robots n'ayant plus de caractère anthropomorphe obligatoire. Cet aspect de la définition normalisée précédente est d'ailleurs surprenant, puisque, si les robots industriels d'allure anthropomorphe constituent la classe de robot la plus importante, ils n'en constituent pas la majorité pour autant [DEL87]. De plus, un robot industriel n'est rien de plus qu'un robot employé dans l'industrie, sans, a priori, aucune caractéristique supplémentaire.

Ainsi, sans vouloir créer un embryon de controverse, il semble donc que la définition normalisée d'un robot ne soit pas la meilleure possible. Aussi, nous nous sommes intéressés à des définitions plus pédagogiques.

Selon [BER87], "un robot est un appareil automatique, adaptable à un environnement complexe, remplaçant ou prolongeant une ou plusieurs fonctions de l'homme et capable d'agir sur son environnement". Cette définition présente l'avantage de préciser la contrôlabilité du fonctionnement

de ce type de machine, la flexibilité de son utilisation, ses objectifs et ses capacités.

Cette définition a tendance à l'heure actuelle à s'enrichir de notions liées à la connaissance et à la décision, et Coiffet [COI93] caractérisait récemment un robot par les trois primitives suivantes : l'action physique sur un environnement physique, la versatilité de ce type de machine et l'autoadaptativité aux variations de l'environnement.

Dans la même communication, il établit clairement le constat que ces trois primitives ne sont pas, à des degrés divers, complètement cernées et maîtrisées.

La qualité de l'action physique dépend essentiellement de la qualité du modèle de comportement de la machine. Or, ce modèle, tout en étant complexe car non linéaire, n'est qu'approximatif.

La flexibilité s'exprime de deux façons : tout d'abord, il existe plusieurs manières possibles pour accomplir une tâche de production, c'est ce que nous appellerons la flexibilité opérationnelle, et ensuite plusieurs tâches de production peuvent être mises en oeuvre à l'aide de la même machine, et ceci constitue la flexibilité opératoire. Ces deux aspects ne sont pas complètement abordés dans la robotique actuelle.

Enfin, l'autoadaptivité, qui est la caractéristique la plus récemment identifiée et la moins développée actuellement, a comme objectif de permettre une plus grande latitude dans la description des modes d'exécution de la tâche. A ce titre, elle s'inscrit parfaitement dans la logique de développement de la robotique, qui vise progressivement un désengagement de l'homme vis à vis de son environnement, en le remplaçant par une machine.

Il faut toutefois reconnaître que cette dernière caractéristique est particulièrement difficile à obtenir tant que les deux premières ne sont pas acquises parfaitement.

En définitive, comprendre ce qu'est un robot consiste à parfaitement le situer vis à vis des deux éléments avec lesquels il interagit : l'homme qui le pilote et l'environnement de travail sur lequel ses actions ont un effet. Nous avons alors un système robotique.

Nous pouvons remarquer que la grande majorité des travaux de recherche liés à la robotique industrielle vise à accroître l'efficience de l'une ou l'autre de ces deux interactions.

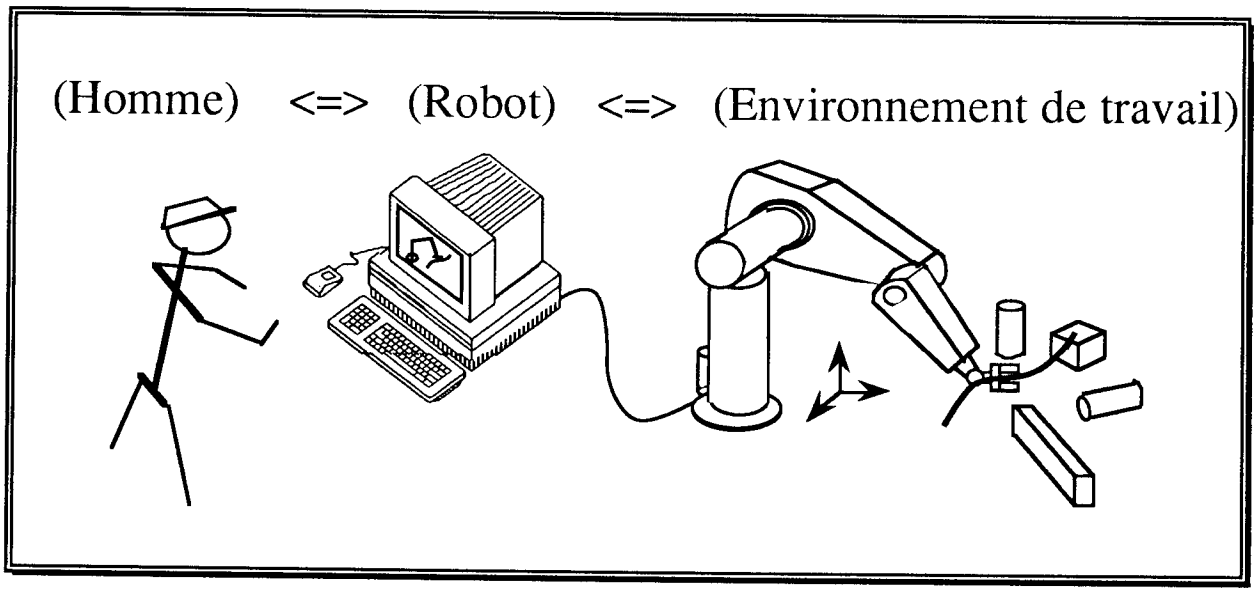


Figure I-1 : interactions du robot avec le reste de l'univers

D'un coté, la relation homme-robot est un axe fondamental de recherche, puisqu'il s'agit d'améliorer et de faciliter la communication entre eux. Ces deux systèmes doivent se comprendre et se coordonner autour d'objectifs communs caractérisant la tâche à accomplir. Pour ce faire, ils doivent utiliser des logiques de prise de décision différentes, celle du robot étant artificielle, essentiellement déductive (déclarative ou procédurale), alors que celle de l'homme est plus inductive, voire intuitive, soumise à de nombreux facteurs d'influence irrationnels du type psychologique (les motivations), physiologique (la fatigue, l'accoutumance...) ou cognitif (la connaissance et l'expérience du système piloté). Pour faciliter cette communication, les développements principaux gravitent d'une part autour de l'ergonomie du poste de supervision (cohérence, contrôlabilité, tolérance aux erreurs...) et de l'utilisation de la représentation graphique comme langage de relation [FOR89], et d'autre part autour de la classification des prises de décision, de leur répartition entre homme et robot et des responsabilités qui leur sont affectées [MIL87].

De l'autre coté, la relation robot-environnement de travail fait l'objet de très nombreuses études, avec des approches totalement différentes, mettant petit à petit en évidence tous les problèmes de fonctionnement réel. En effet, les utilisateurs de robot ont très vite constaté des écarts significatifs entre les résultats obtenus et les résultats attendus et ont cherché à y remédier. Ainsi, différents travaux [RIS81], [PAY85], [MIT92], [CAE93] ont contribué à affiner les modélisations du robot, de ses asservissements, de la génération de ses trajectoires et du comportement dynamique et vibratoire de la structure

mécanique, le tout visant à l'évaluation et la réduction de l'écart entre trajectoire programmée et trajectoire réalisée... L'objet de ce mémoire étant d'ailleurs de développer en le complétant l'un de ces aspects, nous reviendrons largement en détail sur ces recherches.

Nous remarquerons pour conclure ce paragraphe que, dans les deux approches de l'efficience des systèmes robotiques, il n'y a qu'une seule et même constance, au centre de la problématique : la tâche à accomplir par le robot.

1.1.2. Définition d'une tâche robotisée

1.1.2.1. Définition et classification d'une tâche robotisée

Nous avons analysé et formalisé le concept de tâche de production dans [PUJ93b] par une décomposition hiérarchisée, et cela nous a amené à définir la notion de "macro-tâche" comme étant l'ensemble des éléments d'action de production d'une pièce se déroulant consécutivement sur une même machine. Parmi les tâches robotisées, nous avons identifié trois classes de macro-tâches :

- la classe des macro-tâches de transitique, comprenant les macro-tâches de stockage (avec comme parties opératives les robots de stockage, les transgerbeurs ou les magasins robotisés...), les macro-tâches de manutention (avec comme parties opératives les robots mobiles, les convoyeurs à palettes...) et les macro-tâches de distribution, qui gèrent localement l'interface entre le sous système de transitique d'un système de production et d'autres sous systèmes (machines, stocks),

- la classe des macro-tâches de transformation, qui comprend les macro-tâches d'usinage (avec, comme parties opératives, des robots équipés d'effecteurs-outils travaillant sur des pièces immobiles), les macro-tâches de lavage (avec des robots à laver) et les macro-tâches de mesurage (avec les robots de mesure),

- la classe des macro-tâches de manipulation, qui inclut d'une part les macro-tâches de service d'une machine (chargement-déchargement d'un poste ou contrôle du mouvement d'une pièce devant un effecteur-outil à poste fixe), et d'autre part les macro-tâches d'assemblage (les parties opératives associées à cette classe seront essentiellement constituées de robots polyvalents et de manipulateurs, associés à des équipements périphériques adéquats).

Ce début de classification des macro-tâches a été établi en partant de l'observation de la relation entre la valeur ajoutée apportée au produit et l'action du robot. Nous sommes donc bien dans l'esprit de la définition initiale de la macro-trajectoire [FOR89], qui permet la description de l'aspect géométrique de la tâche robotisée, au travers de la trajectoire volumique de l'objet à déplacer, et en faisant abstraction du robot.

1.1.2.2. Analyse de la robotisabilité

Ce type de définition a donc le mérite de définir la tâche robotisée indépendamment des ressources que sont le robot et l'environnement de travail. Par exemple, [OWE90] relève que les tâches robotisées d'assemblage concernent essentiellement des charges légères, mais nécessitent le plus souvent une grande précision, alors que les tâches robotisées de soudage par point impliquent des charges importantes et un mouvement moins précis, mais soumis à une forte dynamique.

A partir de cette définition, nous pouvons chercher à définir l'adéquation entre la tâche que l'on souhaite confier à un robot et les performances de ce robot. Dans cet esprit, [COC87] appelle "*robotisabilité* l'ensemble des paramètres qui vont définir l'aptitude d'une opération, ou d'un ensemble d'opérations, à être robotisés". L'évaluation de cette robotisabilité doit s'envisager d'un double point de vue économique et technologique, et doit être appréciée aux niveaux du produit, du robot et de la tâche.

	Technologique	Economique
produit	(1)	(2)
robot	(3)	(4)
tâche	(5)	(6)

Figure I-2 : analyse de la robotisabilité.

L'analyse des aspects économiques permet d'évaluer (2) des seuils sur l'importance des séries de pièces concernées en dessous desquelles l'opération de robotisation n'est plus rentable (prise en compte des coûts fixes de programmation et de mise au point), de chiffrer (4) l'augmentation résultante de productivité et d'estimer (6) l'impact social. L'analyse technologique vise tout d'abord à vérifier et à améliorer l'aptitude du produit à être saisi, manipulé... et peut amener à une reconception du produit (1). Ensuite, il faut étudier la tâche que l'on souhaite robotiser, généralement à l'aide d'une analyse

descendante et d'une prise en compte de l'expérience de l'exécution manuelle de la tâche (5). Enfin, il faut analyser les performances du robot et vérifier l'adéquation à la tâche envisagée (3). Cette approche nous apporte donc des éléments de stratégie pour l'élaboration d'une méthodologie d'amélioration de la diffusion et de la pénétration de la robotique dans les entreprises, en particulier pour les PMI.

Les six cases de la figure I-2 font l'objet chacune de méthodes scientifiques, les cases paires étant du domaine exclusif des économistes. Coté technologie, la case (1) utilise essentiellement les techniques d'analyse de la valeur et la case (5) l'analyse descendante structurée par décompositions successives, selon des techniques directement héritées du Taylorisme [PEH60]. Seule, la case (3) utilise des approches théoriques qui idéalisent le comportement réel du robot et qui faussent l'étude de l'adéquation entre les performances du robot et les caractéristiques souhaitées de la tâche. C'est donc là que des améliorations sont nécessaires.

Mais analysons tout d'abord la structure d'un système robotique.

1.1.3. Architecture d'un robot industriel

1.1.3.1. Architecture générale d'un système robotique

Nous allons dans ce paragraphe étudier l'architecture d'un robot à partir de la structure proposée à la figure I-1. Il semble en effet difficile d'analyser les différents éléments constituant un robot ainsi que leurs interactions sans les situer fonctionnellement à l'intérieur d'un système robotique complet. Cette étude sera illustrée par la figure I-3, page suivante.

Un robot peut être dissocié en deux parties, la partie informative et la partie opérative.

La partie informative, également appelée unité de pilotage, comprend l'ensemble des équipements supportant les fonctions de supervision et d'exécution. Les fonctions de supervision permettent tout d'abord de gérer l'interaction avec l'homme, qu'il soit l'opérateur du site, chargé de la conduite de l'installation, ou bien le préparateur de tâches, dont la mission est de programmer hors ligne le robot. Elles comportent donc les fonctions de relation, c'est à dire toutes les fonctions de dialogue et de visualisation nécessaires aux primitives de conduite, de surveillance et de programmation. Cet ensemble de fonctions de supervision permet ensuite de créer des séquences d'ordres à destination de la commande.

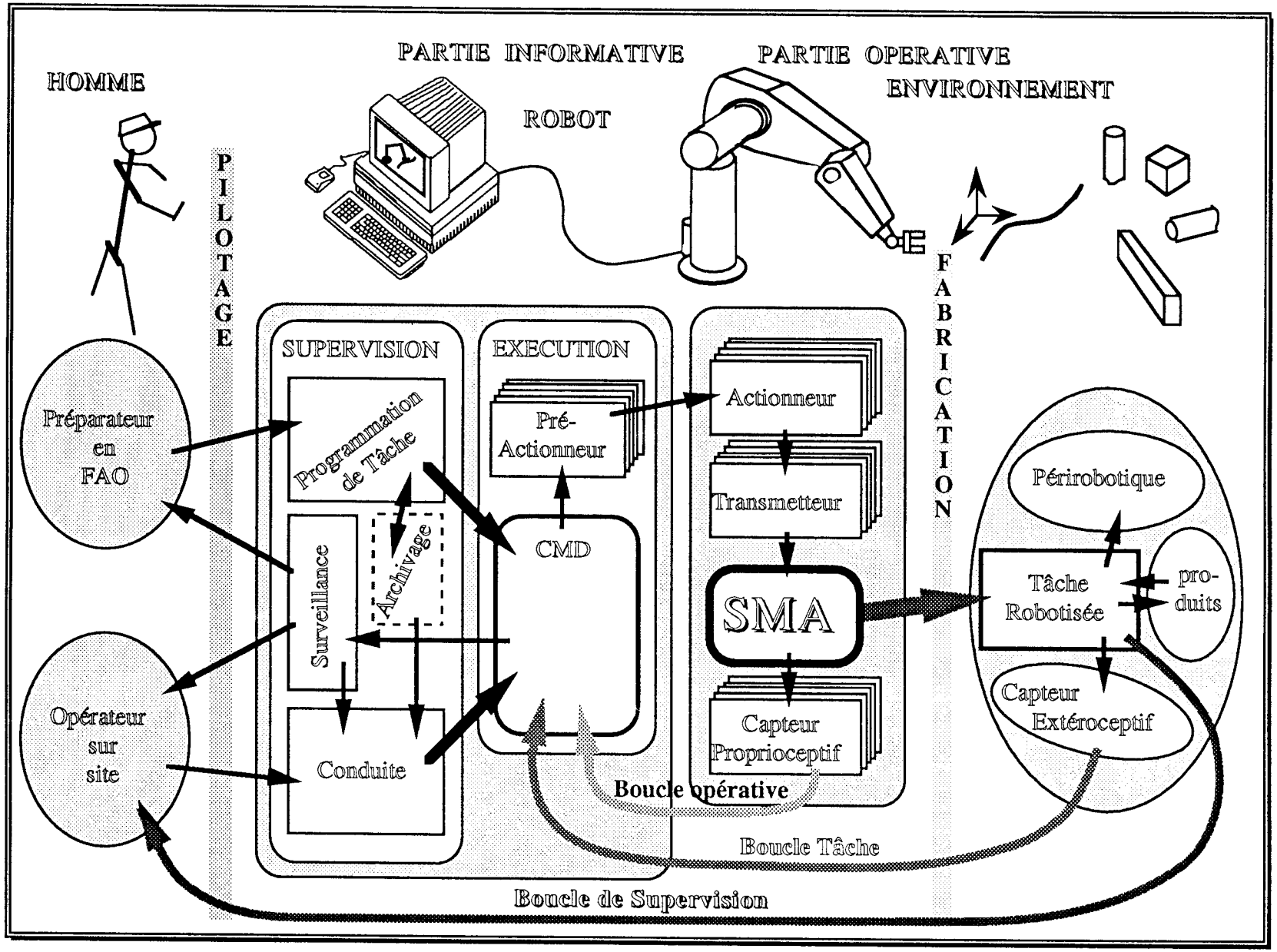


Figure I-3 ; architecture générale d'un système robotique (inspiré de [COI93])

Cela signifie les générer, les stocker et gérer leur transfert à destination des fonctions d'exécution. Ces dernières, en fonction de l'état de la partie opérative et de celui de l'environnement de travail, vont générer des actions de commande sur la partie opérative.

La partie opérative est constituée en effet d'un mécanisme déformable dont la cinématique est contrôlée par l'intermédiaire d'une motorisation. Les possibilités d'évolution du mécanisme doivent être suffisantes pour permettre l'exécution d'une tâche robotisée donnée. En fonction de la macro-tâche envisagée et des performances requises pour son exécution, la problématique de conception (ou de choix) d'un robot peut être radicalement différente et c'est pour cela qu'une très grande variété de type de parties opératives ont été conçues.

D'une manière générale, nous constatons que les robots sont des machines automatisées où l'essentiel de la structure mécanique se situe hors de l'espace de la tâche robotisée, à l'inverse des Machines-Outils à Commande Numérique (MOCN) où la mécanique est le plus souvent construite autour de la tâche d'usinage. Dans le cas des MOCN, des structures extrêmement massives et rigides sont souvent utilisées pour éviter autant que faire se peut tout phénomène de déformation élastique. Cette solution n'est pas applicable en robotique (ou donne alors naissance à des "monstres"), puisque la recherche en priorité de la diminution des masses et des inerties doit être favorisée, afin de réduire la puissance de la motorisation et/ou d'augmenter les performances en fonctionnement dynamique. Cette politique est appliquée à un Système Mécanique Articulé (SMA), c'est à dire une chaîne de solides reliés l'un à la suite de l'autre par des liaisons partielles, le tout pour former une structure élancée, donc peu rigide en comparaison avec les MOCN.

Dans le cas où ce SMA possède une morphologie anthropomorphique, nous appellerons bras du robot l'ensemble de la partie opérative.

1.1.3.2. Architecture mécanique d'un bras de robot

Le bras d'un robot est constitué d'un porteur, d'un poignet et d'un effecteur.

Par hypothèse, les SMA envisagés auront tous des liaisons partielles à 1 degré de liberté (ddl), du type guidage en rotation (liaison rotoïde ou pivot) ou en translation (liaison prismatique ou glissière). Si cette hypothèse n'est pas vérifiée pour un type donné de robot, nous pouvons toujours décomposer une

liaison partielle à m ddl en une suite de m corps fictifs deux à deux guidés par une liaison partielle à 1 ddl (m ddl = m x 1 ddl).

Nous pouvons associer un graphe des liaisons à tout mécanisme. Si celui d'un SMA est un graphe sans noeud de divergence, nous parlerons alors de chaîne simple ouverte. Nous qualifierons les robots associés à ce type de mécanisme de robots polyarticulés et nous appellerons segment de ce type de robot le sous ensemble constitué d'un des solides, de la liaison autour de laquelle il est articulé et de la transmission mécanique le reliant à l'actionneur.

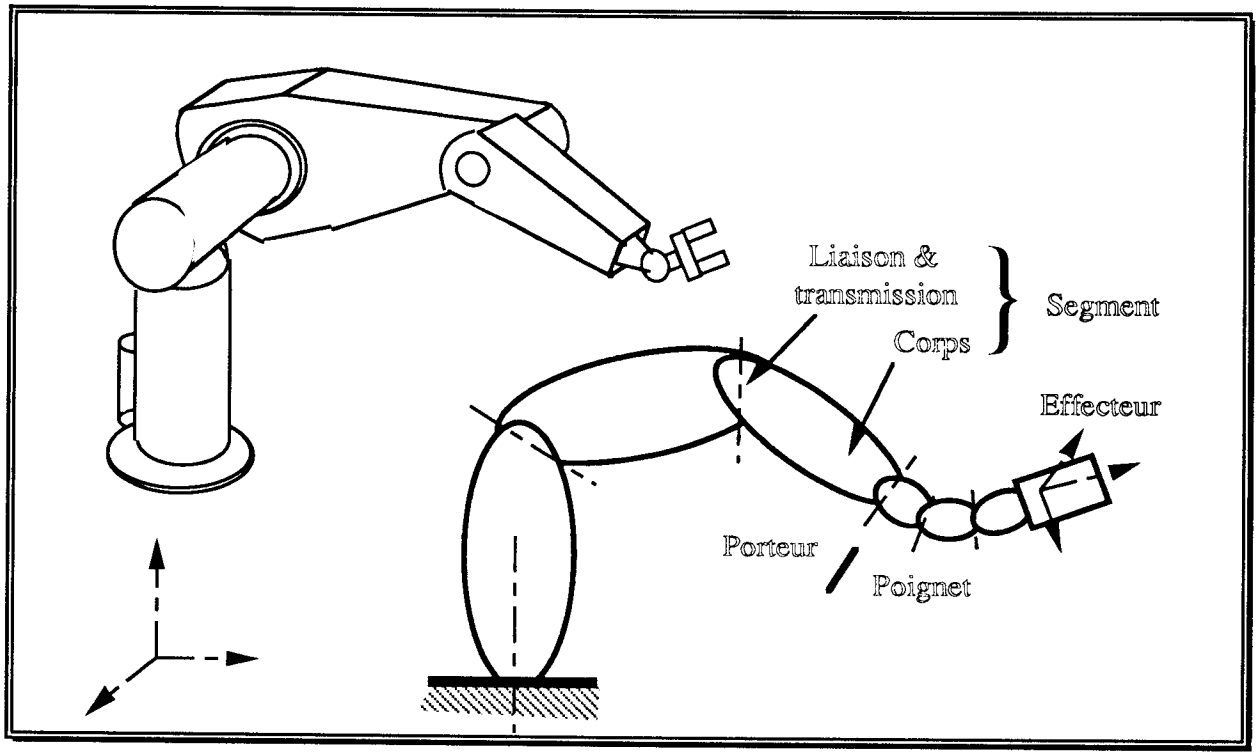


Figure I-4 : modélisation d'un robot polyarticulé
par une chaîne simple de segments

L'effecteur est l'organe terminal du robot, en interaction directe avec l'environnement de travail. Il constitue soit le système de préhension du produit (par exemple, une pince), soit l'outillage de transformation (exemple, une buse de soudage). Dans tous les cas, il est l'interface du robot avec la tâche et/ou le produit.

Le porteur, structure de base assurant le lien avec l'environnement, a comme fonction de base d'assurer le positionnement de l'effecteur. Cette position pourra être exprimée en coordonnées cartésiennes, polaires ou sphériques. Ce choix de coordonnées pourra être judicieux selon l'architecture du porteur, pourtant il ne changera rien au problème de rigidité évoqué ci-devant. C'est essentiellement le porteur qui constituera la partie la plus élancée

du robot. Il existe 5 types principaux d'architecture de porteur, décrit dans la figure I-5.

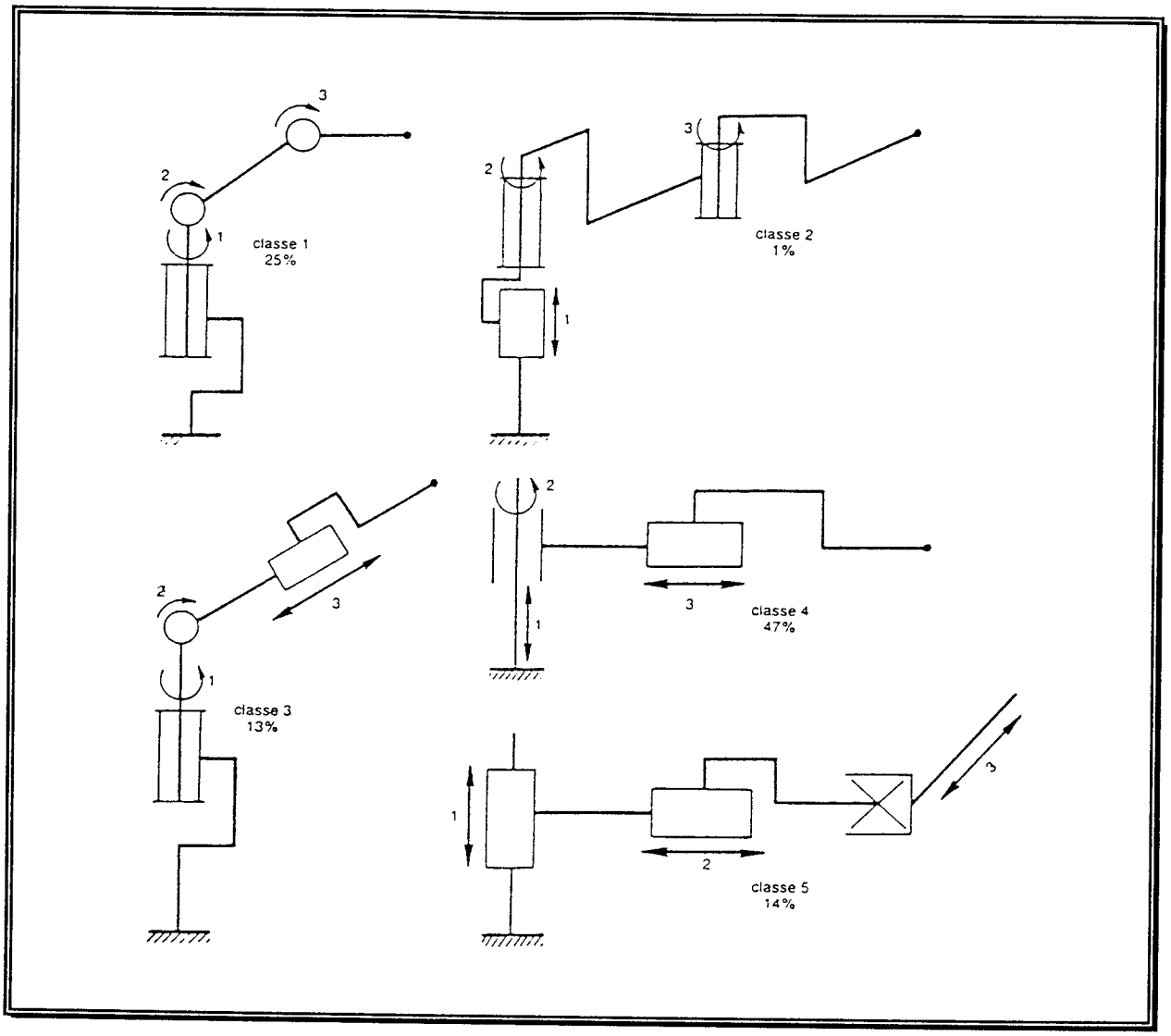


Figure I-5 : types principaux de porteur (d'après [MIL83])

Le poignet doit permettre l'orientation de l'effecteur, à partir de la position définie par le porteur. Il est petit devant les dimensions du porteur et ne permet pas forcément trois ddl.

En effet, selon la tâche à accomplir, un seul ddl pour l'orientation peut s'avérer suffisant. Selon l'Association Française de Robotique Industrielle, près de 80 % des robots industriels ont cinq ou six ddl.

Dans ce cas, le poignet a deux ou trois ddl, toujours réalisés à l'aide de guidages en rotation, concourants ou non.

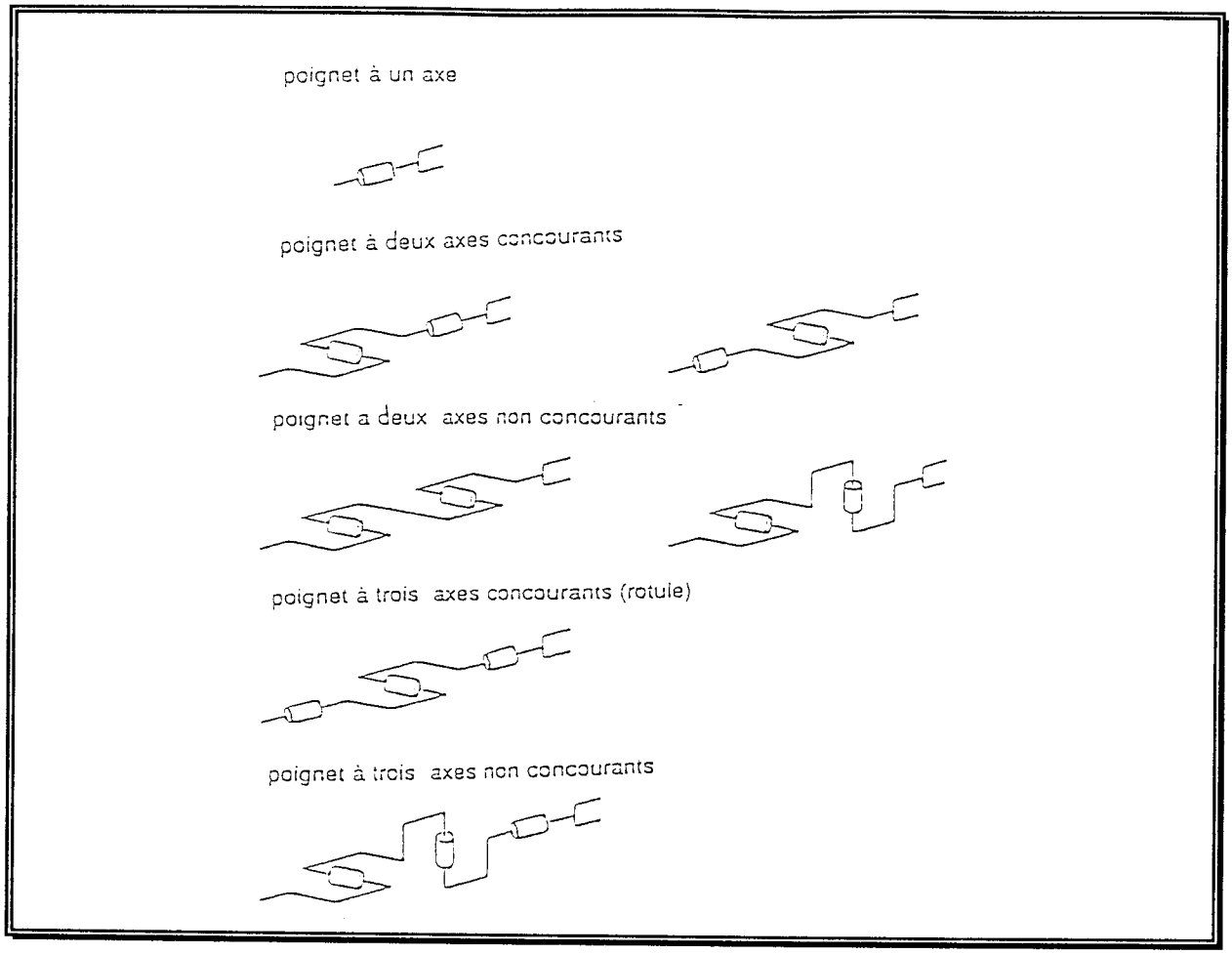


Figure I-6 : types principaux de poignets (d'après [DEL87])

Le seul examen de la structure purement mécanique du robot sera insuffisant pour aborder dans son ensemble la problématique présentée. Il nous faut donc examiner le fonctionnement d'un sous ensemble de la partie informative ainsi que les liens entre partie informative et partie opérative.

1.1.3.3. Analyse de la partie informative et des liens PI-PO

Comme annoncé précédemment, la partie informative inclut les fonctions d'exécution de tâches. Ces dernières se déclinent en terme de surveillance et de sûreté de fonctionnement ou en terme de commande.

Il existe plusieurs niveaux de commande : les niveaux supérieurs raisonnent sur des modèles théoriques de comportement géométrique et/ou cinématique du SMA, alors que le niveau inférieur, utilisant les techniques d'asservissement, gère son comportement dynamique.

Les liens entre parties informative et opérative se font, dans le sens PI-PO, par l'intermédiaire de la chaîne d'action, qui comprend le préactionneur,

l'actionneur et le transmetteur, et le sens PO-PI grâce à une chaîne de compte rendu composée d'un capteur proprioceptif et d'une électronique d'acquisition.

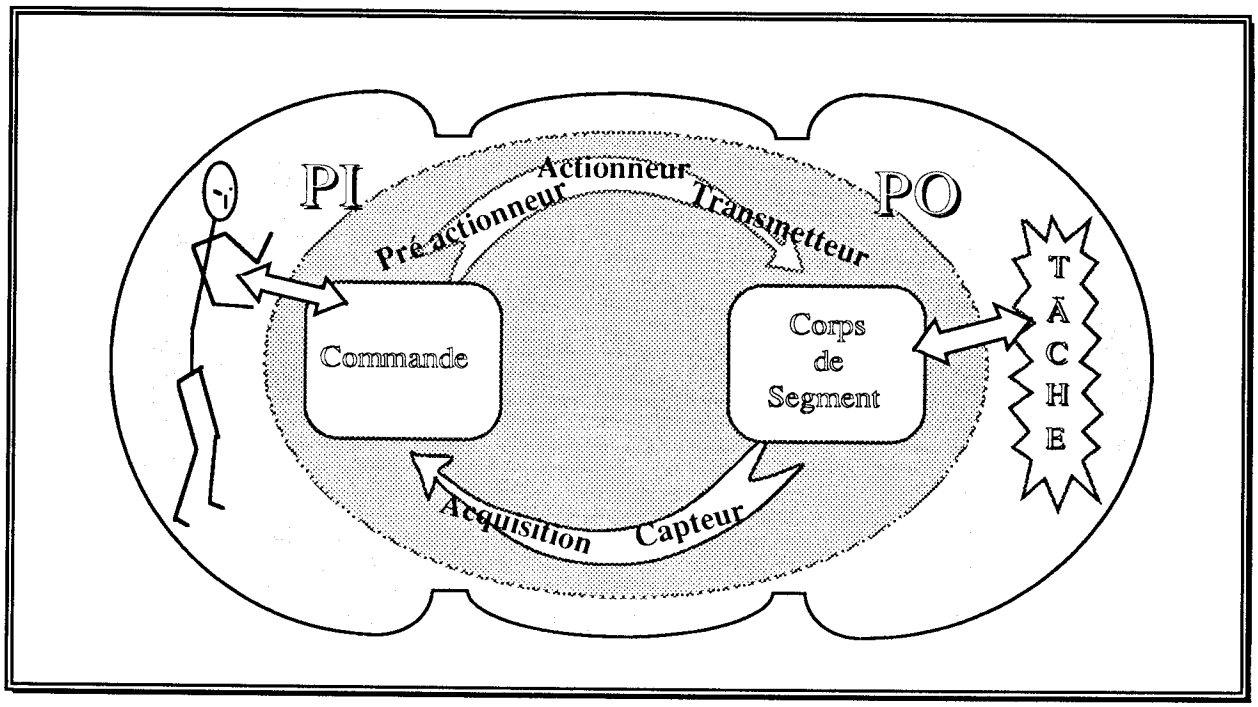


Figure I-7 : interactions PI-PO

Ce schéma représentant les interactions entre la partie informative et la partie opérative correspond à un axe du robot. Il se retrouve donc dupliqué pour chaque degré de liberté du SMA

1.1.3.4. Décomposition hiérarchisée d'un robot et niveaux de description d'un modèle

Pour conclure ce premier paragraphe, et avant de passer à l'étude des différentes modélisations utilisées en robotique, nous pouvons constater que la décomposition hiérarchisée que nous avons proposée peut être détaillée sous forme d'une nomenclature des différents constituants d'un robot. C'est ce que présente la figure I-8, page suivante.

Nous remarquerons que nous pouvons associer à cette nomenclature un niveau de description des modèles que nous ferons de ces robots.

Nous retrouvons dans cette nomenclature qu'un robot industriel, comme toute machine automatisée, est scindé en deux :

- d'une part, son aspect matériel sous la forme de la partie opérative qui accomplit les actions, et

- d'autre part, la partie informative qui supporte son aspect immatériel et qui assure le contrôle des opérations.

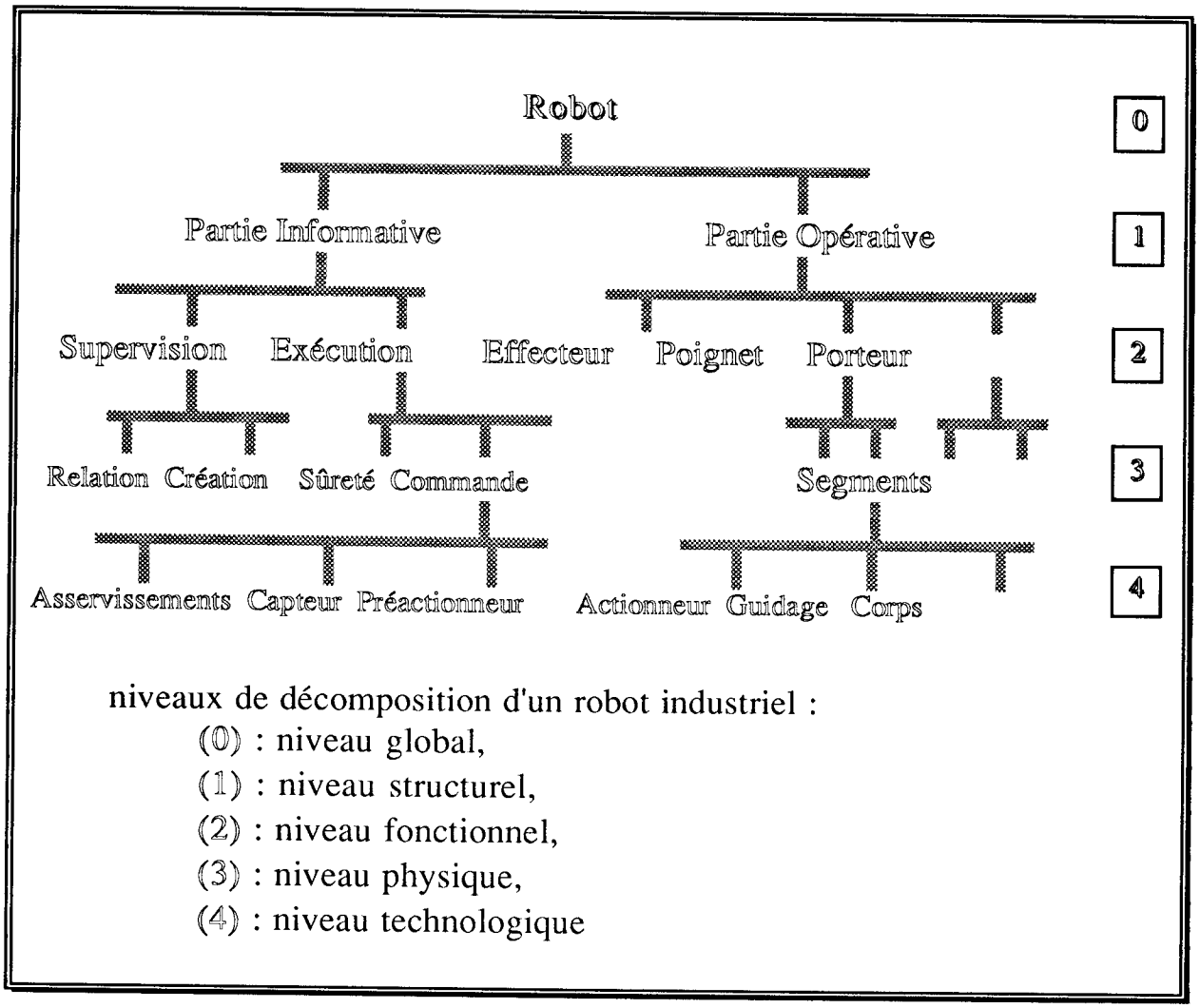


Figure I-8 : nomenclature d'un robot et niveaux d'éclatement de cette nomenclature

Pour pouvoir assurer un bon fonctionnement du robot, cet aspect immatériel doit posséder une représentation suffisamment exacte de l'aspect matériel (états du robot, modes de comportement...).

Aussi, nous allons nous intéresser maintenant aux différents types de modélisation couramment employés en Robotique.

1.2. Grandes classes de modélisation de la commande en robotique

Une modélisation est une technique scientifique visant à doter un ensemble de phénomènes réels et observés d'une structure formalisée et servant à expliciter de manière théorique leur comportement. Dans le cadre d'une modélisation en robotique, cela se traduit essentiellement par une formulation mathématique de ces phénomènes. Le principal problème en robotique provient du fait que les expressions mathématiques correspondant à la description de la trajectoire, au sens de la mécanique générale (géométrie, cinématique et dynamique de la trajectoire), ne peuvent pas être directement utilisées pour la génération des consignes à destination des actionneurs et il faut généralement passer par une fonction de transformation. De plus, le comportement réel du robot influe sur l'expression de cette transformation, par exemple pour la prise en compte de phénomènes dynamiques ou, à un niveau plus détaillé d'analyse, de comportements technologiques. Nous allons ici inventorier les principales modélisations des robots industriels.

1.2.1. Espace de coordonnées

1.2.1.1. Espace opérationnel

Nous définirons l'espace opérationnel comme étant l'espace de la scène de travail. Nous considérerons donc le site robotisé comme étant pourvu d'un repère galiléen, dans lequel seront exprimées les coordonnées des différents points de la trajectoire. Généralement, ce repère Ro est un repère orthonormé direct dans lequel la trajectoire est décrite au travers des coordonnées cartésiennes $[x(t), y(t), z(t)]$. Toutefois, selon l'architecture du porteur ou la disposition des équipements périrobotiques, il est judicieux d'utiliser des coordonnées cylindriques $[\rho(t), \theta(t), z(t)]$ ou sphériques $[\rho(t), \theta(t), \phi(t)]$.

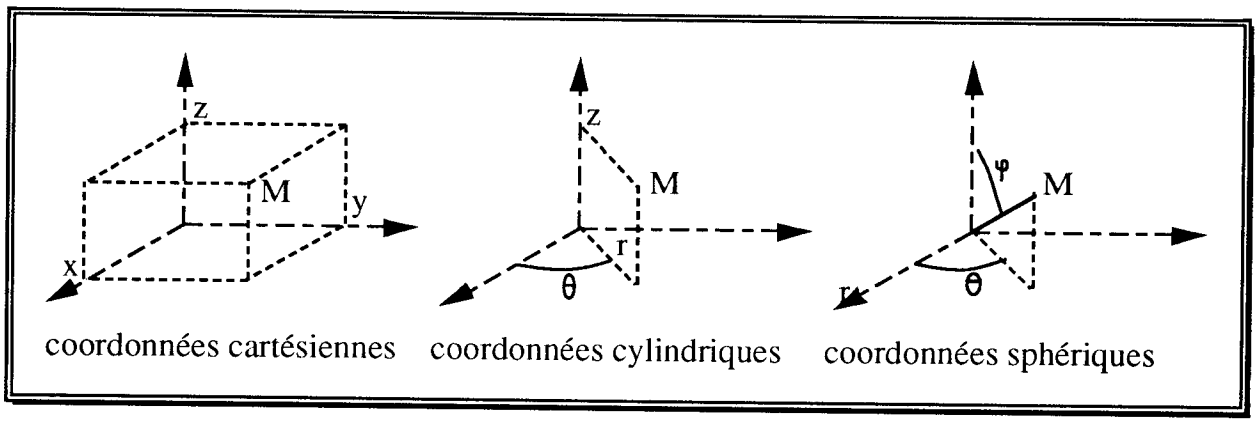


Figure I-9 : systèmes de coordonnées de l'espace opérationnel Ro

Ces trois variables de position sont complétées par trois variables d'orientation, pour correspondre aux six ddl possibles dans un repère galiléen. Ces trois orientations peuvent être définies selon différents formalismes (cosinus directeurs, angles d'Euler, angles de Briant...) [COI86].

Nous appellerons $\mathbf{X} = [x_i,\ 1 \leq i \leq 6]^T$ le vecteur opérationnel de description du couple position-orientation d'un objet dans Ro.

1.2.1.2. Espace articulaire

Nous appellerons espace articulaire l'espace des variables de configuration du SMA. Cet espace a pour dimension le nombre n de ddl du SMA. Ces variables représentent des valeurs angulaires pour les liaisons pivots et des valeurs linéiques pour les liaisons glissières, et leur association aux paramètres architecturaux du SMA permet de reconstituer la posture du robot. La connaissance à chaque instant t_i de la valeur de ces variables articulaires est nécessaire pour accomplir une trajectoire donnée.

Nous appellerons $\mathbf{q} = [q_i,\ 1 \leq i \leq n]^T$ le vecteur articulaire de description de la posture du SMA, avec n son nombre de ddl.

1.2.1.3. Transformateurs de coordonnées

Le vecteur **X** est associé à la tâche robotisée et sera utilisé par l'opérateur. Le vecteur **q** concerne, quant à lui, la commande, chaque q_i faisant l'objet d'un servomécanisme et d'une boucle proprioceptive. Le passage de **X** vers **q** est nécessaire pour déterminer les consignes de commande. Il en est de même pour celui de **q** vers **X** afin de pouvoir visualiser l'exécution de la tâche en fonction des données issues des capteurs proprioceptifs.

Ces fonctions de passage de l'espace articulaire à l'espace opérationnel et vice versa sont appelées "transformateurs de coordonnées".

1.2.2. Modélisations géométriques

1.2.2.1. Modèle géométrique direct

Nous définirons le modèle géométrique direct comme étant le transformateur de coordonnées permettant le passage de **q** vers **X** :

$$\mathbf{X} = \mathbf{MGD}\ (\mathbf{q})$$

Les techniques mathématiques permettant d'élaborer cette fonction sont nombreuses. Citons pour mémoire les sommations vectorielles, les opérations matricielles, l'utilisation des représentations duales ou celle des matrices

homogènes. C'est cette dernière méthode que l'on rencontre le plus fréquemment en robotique. Une matrice homogène permet de formaliser le passage, pour un corps C_i supposé indéformable, du repère R_i de la liaison partielle avec le corps C_{i-1} au repère R_{i+1} de la liaison partielle avec le corps C_{i+1}, au travers d'une description formalisée par Denavit et Hartenberg [DEN55] ou par ses variantes [DOM88] :

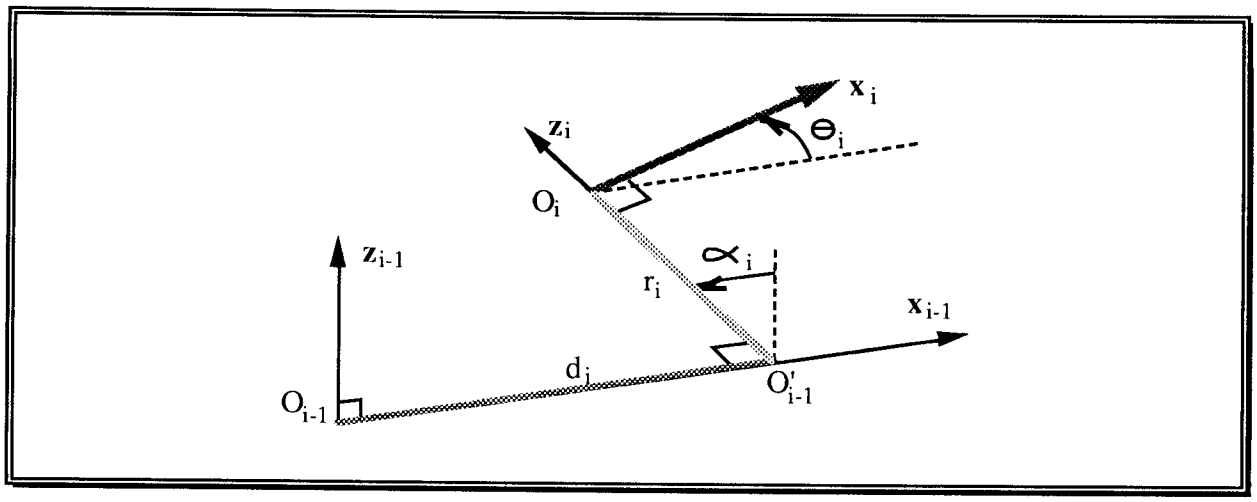


Figure I-10 : paramètres de Denavit-Hartenberg

avec : α_i, l'angle entre les axes z_{i-1} et z_i, correspondant à une rotation autour de x_{i-1},

d_i, la distance entre z_{i-1} et z_i, le long de x_{i-1},

θ_i, l'angle entre les axes x_{i-1} et x_i, correspondant à une rotation autour de z_i,

r_i, la distance entre x_{i-1} et x_i, le long de z_i.

La matrice homogène de passage correspondant à ce formalisme et définissant le repère Ri dans le repère Ri-1 s'écrit alors :

$$
{}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & d_i \\ \cos\alpha_i \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i & -r_i \sin\alpha_i \\ \sin\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \cos\theta_i & \cos\alpha_i & r_i \cos\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

Nous remarquerons que cette matrice est le produit d'une matrice G_{i-1}, fonction des variables d_i et α_i de la schématisation "solide", et d'une matrice M_i, fonction des paramètres r_i et θ_i, dont l'un est "commandé". La variable articulaire est alors soit θ_i (cas de la liaison pivot), soit r_i (cas de la liaison glissière).

Le modèle géométrique direct ${}^{0}T_n$ du robot est alors obtenu par multiplication successive des matrices de passage ${}^{i}T_{i+1}$ entre axes consécutifs Ri et Ri+1 :

$$ {}^{0}T_n = {}^{0}T_1 \, {}^{1}T_2 \, \ldots\ldots {}^{i-1}T_i \, {}^{i}T_{i+1} \, \ldots\ldots {}^{n-1}T_n $$

Ce modèle n'est pas suffisant pour traiter une véritable tâche robotisée industrielle et doit être enrichi par 2 autres matrices de passage. En effet, le repère associé à la base du robot ne correspond pas forcément au repère de référence du site robotisé, et nous utiliserons pour formaliser cela la matrice constante ${}^{site}T_0$. De plus, le robot peut être équipé, si sa tâche l'exige, d'effecteurs interchangeables. A chaque effecteur sera alors associé une matrice constante spécifique ${}^{n}T_{eff}$.

Le modèle géométrique direct associé à une tâche donnée sera alors représentable par la matrice homogène ${}^{site}T_{eff}$:

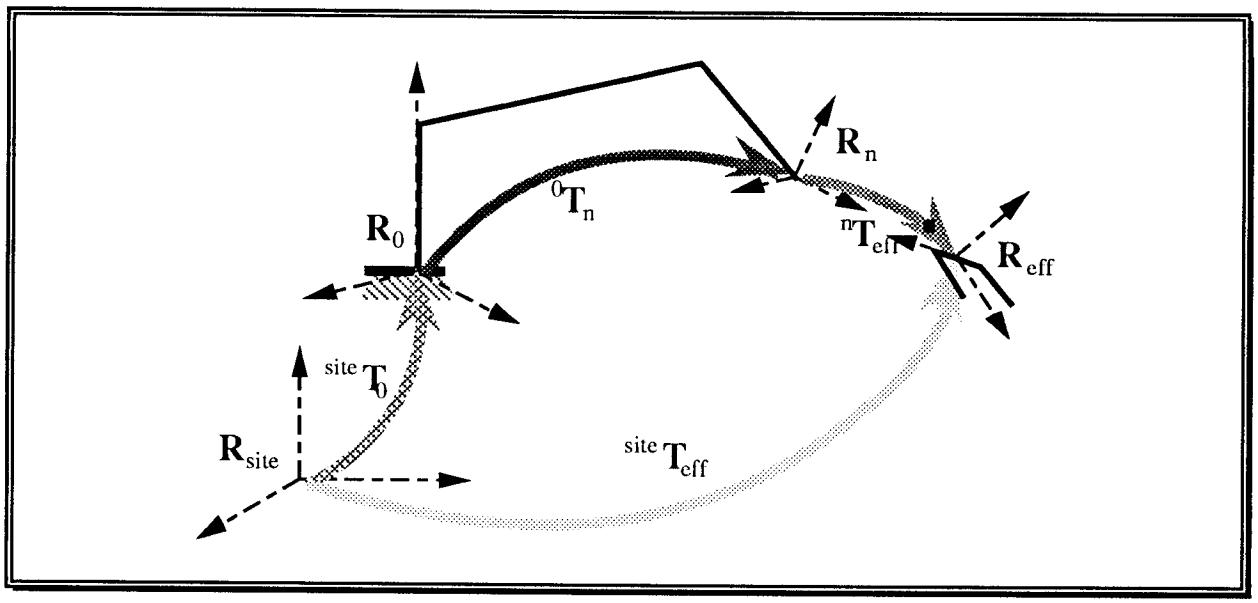


Figure I-11 : transformation géométrique directe d'un robot dans son site et avec son effecteur

avec :

$$ {}^{site}T_{eff} = {}^{site}T_0 \, {}^{0}T_n \, {}^{n}T_{eff} $$

1.2.2.2. Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse permet de déterminer le vecteur articulaire en fonction du vecteur opérationnel. Il s'agit donc de l'opération inverse de celle que nous venons de décrire :

$$q = MGI\ (X)$$

Malheureusement, il s'agit de résoudre un système d'équations non linéaires, pouvant avoir 0, 1, plusieurs ou une infinité de solutions, et pour lequel il n'existe pas de méthode de résolution analytique applicable à toutes les architectures de SMA.

Il y a absence de solutions en **q** lorsque la position décrite par **X** est hors du volume de travail accessible au robot, et une solution **q** lorsqu'elle se situe à ses limites. Un nombre infini de solutions $\mathbf{q_i}$ se trouve dans tous les cas où le robot est redondant par rapport à la tâche. Dans les autres cas, plusieurs postures $\mathbf{q_j}$ du robot peuvent amener à la même position **X**. La posture retenue dépend du choix du programmeur de la tâche robotisée et des conditions de continuité avec les postures précédentes. En effet, il est généralement préjudiciable au bon déroulement d'une tâche que le robot ait brutalement à changer de posture.

Le problème de la recherche automatique et analytique des composantes de la matrice homogène **MGI** a fait l'objet de très nombreux travaux scientifiques. Deux grandes méthodes existent.

La première vise à simplifier le problème en découplant l'aspect mise en position et l'aspect orientation, puis en les inversant séparément. La seconde, élaborée par Paul [PAU81], permet d'isoler et d'identifier l'une après l'autre les variables articulaires, en multipliant successivement les deux membres du modèle géométrique direct par la matrice de passage inverse ${}^{i}\mathbf{T}_{i-1}$, certains calculs pouvant d'ailleurs être menés en parallèle avec ceux du **MGD**.

Une dernière solution consiste à utiliser soit un logiciel de calcul formel, capable d'effectuer des inversions symboliques de matrices et des simplifications symboliques, soit un logiciel spécialisé dans la génération automatique de modèles de robot.

1.2.2.3. Validité du modèle, conditions d'utilisation

Les modèles géométriques sont parfaits pour l'étude d'une posture donnée. Toutefois, leur emploi pour générer des mouvements doit entraîner un minimum de précaution. En effet, si nous échantillonnons à intervalles réguliers la trajectoire à effectuer et que nous affectons une durée élémentaire d'exécution de chaque intervalle, nous pouvons recréer la consigne articulaire de chaque axe, c'est à dire sa loi de mouvement en fonction du temps. Du fait de la non-linéarité du modèle, une petite variation dans l'espace opérationnel

correspondant à un intervalle peut engendrer de grandes variations dans l'espace articulaire, et donc outrepasser les possibilités cinématiques et dynamiques des axes.

1.2.3. Modélisations cinématiques et variationnelles

1.2.3.1. Modèle cinématique direct

Le modèle cinématique direct exprime les vitesses opérationnelles en fonction des vitesses articulaires :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\,\dot{\mathbf{q}}$$

avec : $\dot{\mathbf{X}}$ et $\dot{\mathbf{q}}$ les dérivées par rapport au temps respectivement des vecteurs opérationnel $\mathbf{X}$ et articulaire $\mathbf{q}$,

et $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ le jacobien fonction de la posture $\mathbf{q}$.

$\mathbf{J}(\mathbf{q})$ peut être obtenu par dérivation du MGD, nous obtenons alors :

$$\mathbf{J}ij = \frac{\partial \mathbf{MGD}_i(\mathbf{q})}{\partial q_j}$$

$\mathbf{J}(\mathbf{q})$ peut également être obtenu en utilisant la décomposition matricielle de Renaud [DOM88], qui augmente le nombre de matrices à inverser, mais simplifie considérablement les techniques d'inversion.

1.2.3.2. Modèle variationnel direct

Nous trouverons également le modèle variationnel direct qui exprime les écarts sur les coordonnées opérationnelles en fonction des écarts sur les coordonnées articulaires :

$$\Delta\mathbf{X} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\,\Delta\mathbf{q}$$

avec : $\Delta\mathbf{X}$ et $\Delta\mathbf{q}$ les petits accroissements respectivement des vecteurs opérationnel $\mathbf{X}$ et articulaire $\mathbf{q}$, $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ restant le jacobien défini ci-avant pour le modèle cinématique direct.

1.2.3.3. Modèles cinématique et variationnel inverses

Le modèle cinématique inverse permet d'exprimer les vitesses articulaires en fonction des vitesses opérationnelles :

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\,\dot{\mathbf{X}}$$

avec : $\dot{\mathbf{X}}$ et $\dot{\mathbf{q}}$ les dérivées par rapport au temps respectivement des vecteurs opérationnel $\mathbf{X}$ et articulaire $\mathbf{q}$,

et $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})$ le jacobien inversé, fonction de la posture $\mathbf{q}$.

$\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})$ peut être obtenu par dérivation partielle du MGI ou par inversion du modèle cinématique direct. Ces méthodes laissent subsister les problèmes liés aux singularités de posture, elles ont suscité les travaux de nombreux roboticiens et entraînent des temps de calcul importants.

Nous retrouvons bien entendu une formulation équivalente pour le modèle variationnel inverse :

$$\Delta\mathbf{q} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\,\Delta\mathbf{X}$$

1.2.3.4. Modèle cinématique direct du second ordre

Le modèle cinématique direct du second ordre permet d'obtenir les accélérations $\ddot{\mathbf{X}}$ dans l'espace opérationnel en fonction des vitesses articulaires $\dot{\mathbf{q}}$, des accélérations articulaires $\ddot{\mathbf{q}}$, du jacobien $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ et de la dérivé du jacobien $\dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})$:

$$\ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\,\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\,\dot{\mathbf{q}}$$

1.2.3.5. Validité du modèle, conditions d'utilisation

Une fois élaboré le Jacobien (ou son inverse), les conditions d'utilisation de tels modèles sont simples et rapides, ce qui engendre une bonne aptitude à être utilisable en commande.

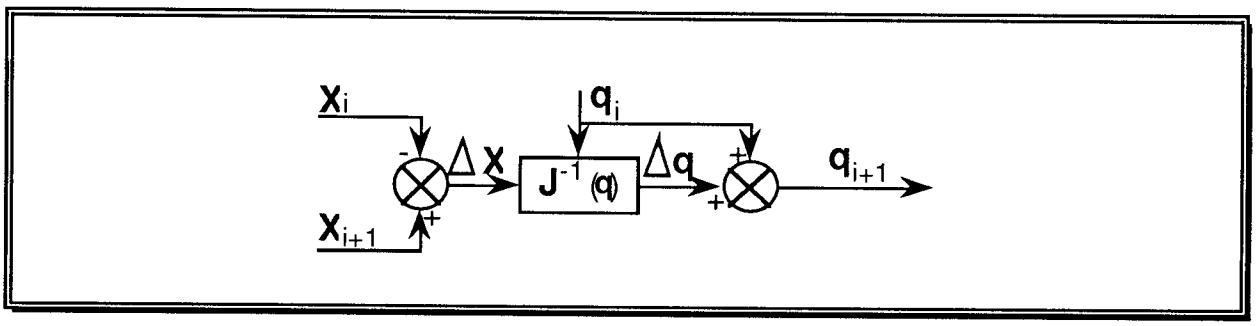


Figure I-12 : calcul du prochain vecteur articulaire en fonction de la position opérationnelle à atteindre, de la position opérationnelle actuelle, du vecteur articulaire actuel et du jacobien, et en utilisant un modèle variationnel inverse.

Cet enthousiasme doit être toutefois pondéré. En effet, l'amplitude des écarts entre chaque itération doit faire l'objet d'un compromis entre le temps

de calcul (plus le nombre d'incréments est réduit, plus ce temps est court) et la précision dans la réalisation de la tâche (plus le nombre d'incréments est réduit, plus l'imprécision finale sera grande). Pour pallier ce dilemme, deux techniques sont utilisées. La première consiste à réduire l'amplitude de l'écart d'entrée du modèle si celle de l'écart de sortie dépasse une certaine valeur au-delà de laquelle l'erreur est trop importante. La seconde consiste à effectuer à chaque itération une correction systématique de la variation d'entrée en tenant compte de l'erreur commise à l'itération précédente.

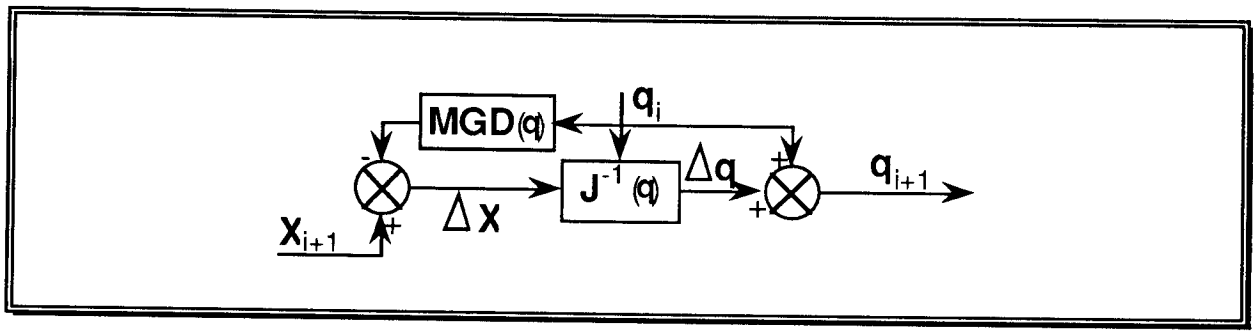


Figure I-13 : calcul du prochain vecteur articulaire, en tenant compte de la position effectivement atteinte à l'itération précédente.

1.2.4. Modélisations dynamiques

L'utilisation d'un modèle dynamique s'impose lorsque des phénomènes considérés comme négligeables dans les modélisations précédemment décrites doivent être pris en compte du fait de l'importance de la vitesse des mouvements. Ces phénomènes sont des frottements, des jeux, des inerties, des déformations élastiques, des vibrations...

Pour appréhender ces problèmes, plusieurs formalismes existent : méthode de Lagrange, méthode des travaux virtuels, méthode de Newton-Euler, méthode des bond-graphs... Ces formalismes traduisent tous le Principe Fondamental de la Dynamique.

1.2.4.1. Modèle dynamique direct

Nous définirons le modèle dynamique direct par la relation :

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{MDD}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \Gamma, \mathbf{F}_f, \mathbf{F}_{ext})$$

avec : Γ : vecteur des couples (et/ou forces) exercés par les actionneurs
$\mathbf{F}_f$ = vecteur des couples (et/ou forces) de frottements
$\mathbf{F}_{ext}$ = vecteur des couples (et/ou forces) extérieurs, à exercer par l'effecteur.

Pour obtenir ce modèle, intéressant en simulation, soit nous utilisons le formalisme de Lagrange, soit nous inversons le modèle dynamique inverse.

1.2.4.2. Modèle dynamique inverse

Le modèle dynamique inverse, utilisé pour la commande, s'exprime sous la forme suivante :

$$\Gamma = \mathbf{MDI}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{F}_f, \mathbf{F}_{ext})$$

Il est généralement obtenu à l'aide soit de la méthode de Lagrange, soit de la méthode de Newton-Euler.

1.2.4.3. Formalisme de Lagrange

Le formalisme de Lagrange permet de déterminer un système de n équations différentielles du second ordre, couplées et non linéaires.

$$\Gamma = \mathbf{A}(\mathbf{q})\,\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q})\,\dot{\mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q})\,\dot{\mathbf{q}}^2 + \mathbf{Q}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_{ext}$$

avec : **A** : matrice d'inertie du robot

B : matrice des termes de Coriolis

C : matrice des termes centrifuges

$\dot{\mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}}$: $[\dot{q}_1\dot{q}_2 \;....\; \dot{q}_1\dot{q}_n \;\; \dot{q}_2\dot{q}_3 \;....\; \dot{q}_{n-1}\dot{q}_n]^T$

$\dot{\mathbf{q}}^2$: $[\dot{q}_1{}^2 \;....\; \dot{q}_n{}^2]^T$

Q : $[Q_1 \;...\; Q_n]^T$, vecteur des forces de gravité,

Les coefficients dynamiques de ces matrices, fonctions des caractéristiques géométriques et inertielles du robot, sont calculés à partir de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle du SMA.

1.2.4.4. Formalisme de Newton-Euler

La méthode de Newton-Euler est basée sur les théorèmes fondamentaux de la mécanique générale, le théorème de composition des vitesses et des accélérations en cinématique et le Principe Fondamental de la Dynamique.

Cette méthode consiste tout d'abord en un parcours avant du SMA, de la base vers l'effecteur, pour déterminer le champ des vitesses instantanées ainsi que celui des accélérations.

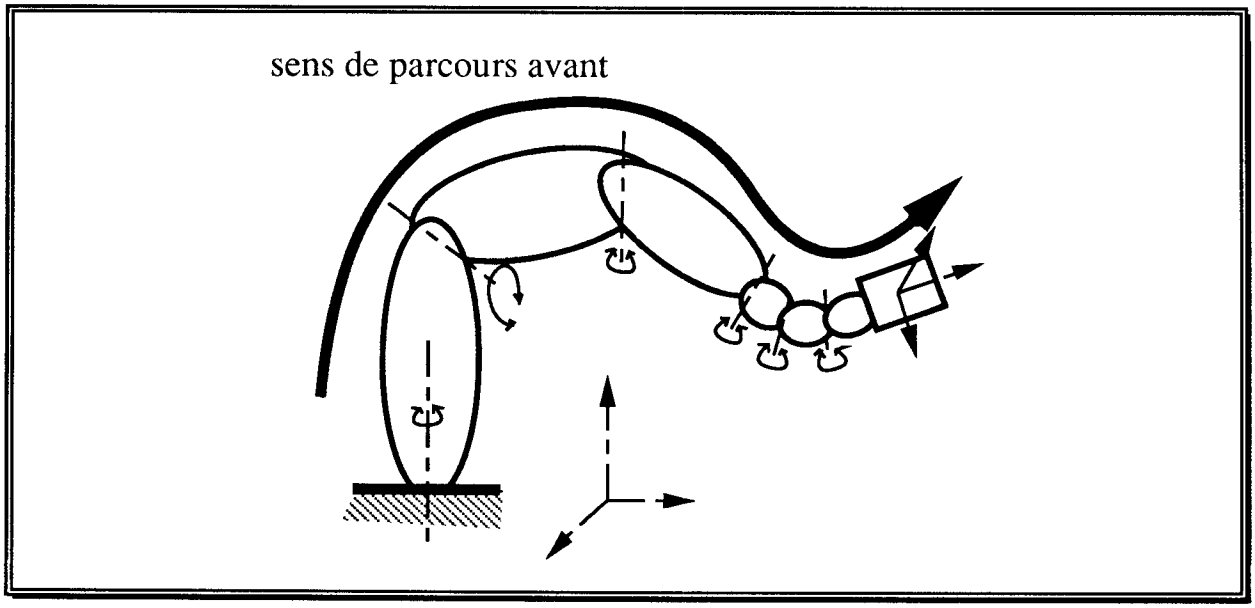


Figure I-14 : détermination des champs de vitesse et d'accélération.

Ensuite, la seconde phase consiste en un parcours arrière du SMA, de l'effecteur vers la base, en effectuant sur chaque segment le bilan des efforts :

- torseur d'interefforts avec le segment précédent,
- torseur d'actions mécanique des forces de gravité et d'inertie,
- torseur des actions extérieures,
- torseur d'interefforts avec le segment suivant.

Nous appliquons à ce bilan le Principe Fondamental de la Dynamique, le seul effort inconnu étant alors le torseur d'interefforts avec le segment suivant.

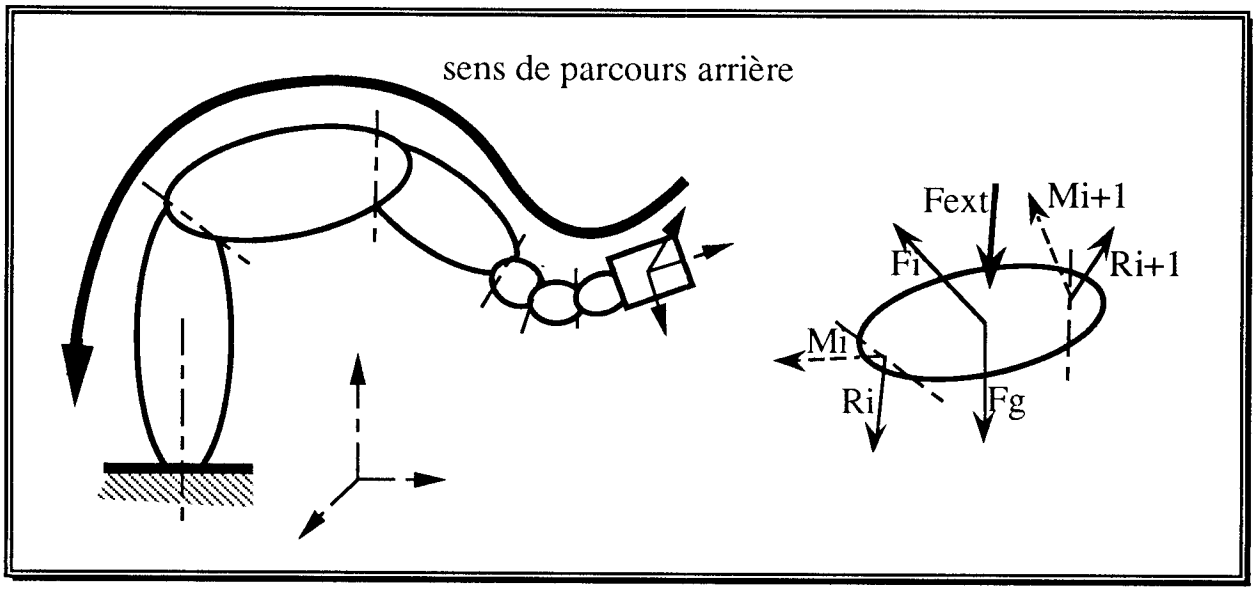


Figure I-15 : détermination des interefforts et équilibre d'un segment.

2. CARACTERISATION TECHNOLOGIQUE des ROBOTS INDUSTRIELS

2.1. Mesurage d'un robot industriel

Si les modèles dynamiques sont plus proches de la réalité, ils nécessitent des temps de calcul très importants et sont fondés sur les mêmes hypothèses que les modèles géométriques et cinématiques, à savoir que les constituants du SMA sont parfaitement rigides, qu'ils n'ont aucun défaut, et qu'ils ne subissent aucune déformation élastique.

L'objet de ce paragraphe est de montrer que ces hypothèses ne sont acceptables que dans le cadre d'une vue sommaire d'un système robotique. Dès que le besoin de précision se fait ressentir, elles constituent une source essentielle de causes de non-appréhension des phénomènes réels dont est issu le comportement final du robot.

2.1.1. Examen de la problématique et surface d'erreur de position

2.1.1.1. Constat industriel

Face aux comportements théoriques exposés ci-devant, nous pourrions croire que la robotique est une science entièrement décrite si l'expérimentation venait les corroborer. Hélas, il n'en est rien, car ces modélisations idéales font abstraction de nombreux phénomènes secondaires qui viennent perturber le fonctionnement théorique.

Ces phénomènes ont plusieurs origines parmi lesquelles nous pouvons citer les erreurs de la génération de trajectoire, les incertitudes des asservissements, les non-linéarités de la chaîne d'action, la non-linéarité du comportement élastique du SMA et ses vibrations, les incertitudes

dimensionnelles liées à la fabrication et à l'assemblage du robot, la discrétisation des informations issues de la chaîne de compte rendu...

Ces phénomènes se ressentent au niveau des applications industrielles, puisque c'est la qualité de la trajectoire finale qui est en cause, et donc enfin de compte la qualité de la tâche. Le problème se posera chaque fois qu'une application de robotique nécessitera une certaine classe de précision comparable à l'écart entre la posture théorique d'un robot industriel et sa posture réelle sous l'effet de la tâche en question. Ce qui est vrai pour une posture à un instant t se retrouve bien sûr tout au long d'une trajectoire.

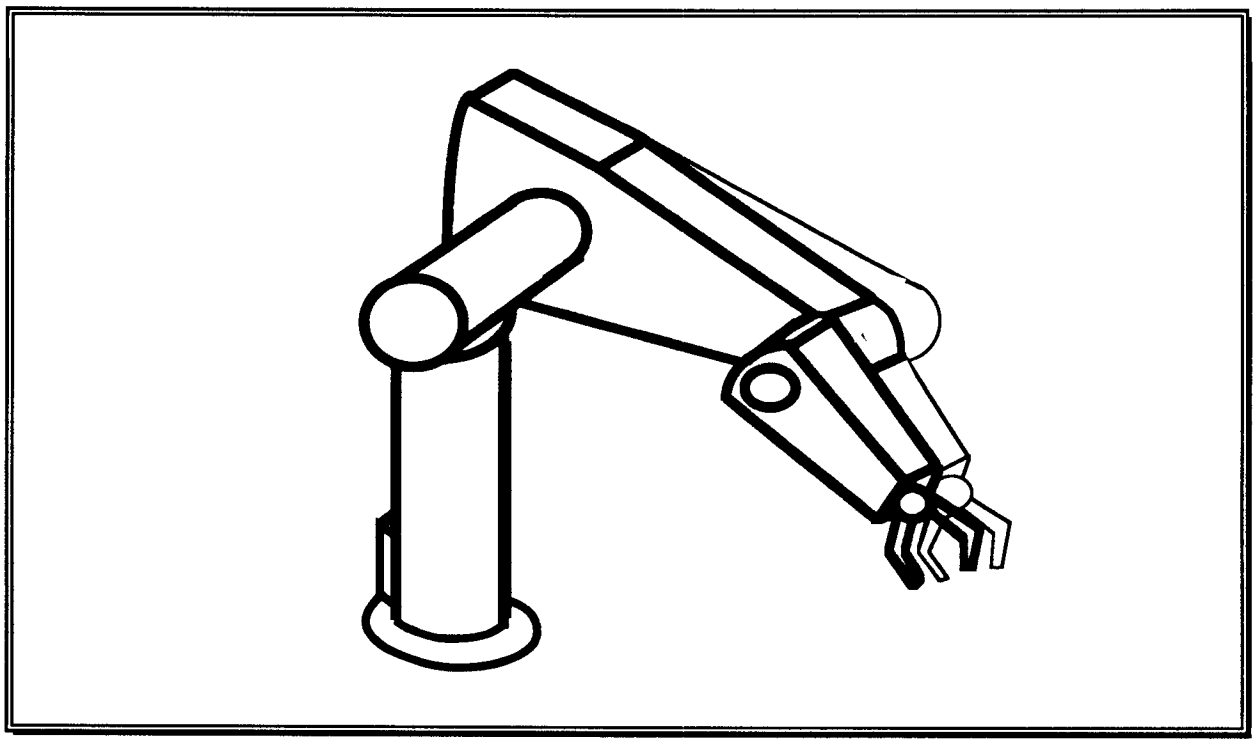


Figure I-16 : posture théorique et posture réelle sous l'effet de sa tâche

2.1.1.2. "Calibration", calibrage, étalonnage ou mesurage d'un robot industriel

Les auteurs de culture anglo-saxonne ayant travaillé sur ce thème de recherche utilisent le mot anglais "calibration".

Ce terme a été généralement repris en France par les roboticiens, chercheurs et industriels. Ils emploient donc un anglicisme qui est en réalité un faux ami. En effet, "calibration" fait immédiatement penser à calibrer, or le calibrage est l'action de trier par classe en fonction de l'observation d'une grandeur mesurable. Cette grandeur n'est pas forcément mesurée, elle peut

être comparée simplement à une référence. Ce type de problème n'a rien de commun avec ce qui nous préoccupe.

La traduction de "calibration" donne calibrage, mais aussi tarage et étalonnage.

Tarage est ici totalement hors contexte, puisqu'il s'agit de précontraindre un ressort, suivant une valeur donnée.

Etalonnage est un mot beaucoup plus intéressant car il a deux définitions. Tout d'abord, l'étalonnage, c'est la vérification, par comparaison à une référence, d'un instrument de mesure et l'établissement de sa graduation. Un robot n'étant généralement pas un instrument de mesure (sauf les machines à mesurer tridimensionnelles à commande numérique, que l'on appelle d'ailleurs des robots à mesurer), cette définition ne convient pas.
Ensuite, l'étalonnage est une notion utilisée en psychologie. Il consiste à appliquer un test à un groupe de sujets de référence puis à chiffrer les résultats obtenus afin d'obtenir une base de comparaison avec d'autres groupes de personne. Cette définition peut être replacée dans notre contexte technique, et nous pouvons imaginer le test d'une trajectoire type, qui peut être comparée avec celles d'autres robots, dont les caractéristiques peuvent être suivies chronologiquement, ou bien qui sert de base pour extrapoler les performances de n'importe quelle trajectoire dans l'espace de la scène de travail.
Malheureusement, la notion d'étalon est associée à la notion de constance dans l'espace et le temps. Or, les performances des robots vont varier en fonction de la tâche à accomplir et du temps (apparition de phénomènes déviants : usures, dérives...).
L'utilisation du mot "étalonnage" en robotique peut donc être très controversé, et doit donc être évité.

Les seules expressions qui ne souffrent d'aucun problème d'interprétation seraient :

"faire un mesurage" (évaluer une grandeur par comparaison à une référence ou à l'aide d'un instrument),

"faire une expérimentation" (acquérir une connaissance pratique sur un sujet), ou encore,

"faire le relevé métrologique" d'un système (faire l'ensemble des mesurages qui permettent d'établir une vue de référence de ce système).

Suite à ces divers constats, nous appellerons dans la suite de ce mémoire :

- étalonnage : les actions de mesurage sur des composants périrobotiques immobiles dans le repère de la scène de travail,

- mesurage : les relevés de mesure sur des composants déformables en fonction des conditions d'utilisation,

- métrologie : l'ensemble des opérations de mesurage et d'étalonnage qui permet de caractériser entièrement les incertitudes de positionnement et d'orientation d'un système robotisé ou d'un de ses sous systèmes. Un tel comportement permettra d'évaluer les performances du système.

2.1.1.3. surface d'erreur en position relative entre tâche réelle et tâche théorique

Au vu des deux paragraphes précédents, la caractérisation de l'écart entre la tâche réelle et la tache théorique correspond à l'étude de l'écart de position entre la trajectoire réelle et la trajectoire théorique.

Cela se traduit, pour chaque instant t, par la recherche de l'écart de position entre l'extrémité du SMA dans sa posture théorique et l'extrémité du SMA dans sa posture réelle. Cet écart dépend des conditions d'exécution de la tâche : charges, vitesse, accélérations, trajectoire...

Nous définissons l'erreur en position comme étant l'écart de position maximal, pour une posture donnée et une direction donnée de trajectoire (le chemin d'approche de la posture), quelles que soient les autres conditions géométriques, cinématiques, dynamiques et technologiques d'exécution de la tâche.

Pour un ensemble de ces conditions données, nous pouvons représenter cet écart par un vecteur dans l'espace, ayant comme origine le point théorique de la trajectoire à l'instant correspondant à la posture en question et comme extrémité son point réel. L'ensemble des points extrémités pour toutes les conditions maximales d'exécution de tâche forme une surface réglée, ce vecteur étant la résultante de phénomènes continus et linéaires.

Nous pouvons imaginer une représentation tridimensionnelle de l'erreur, sous la forme, par exemple, d'un ellipsoïde (voir figure I-17).

Nous remarquerons que cet ellipsoïde présente un axe le long du chemin d'approche plus grand que dans les deux autres dimensions, et décalé vers l'arrière. Cette particularité caractérise les phénomènes d'écarts dus aux asservissements et que l'on appelle couramment l'erreur de traînée. Nous

considérerons que cette erreur entraîne simplement un décalage temporel de la trajectoire, c'est à dire un retard pur sur la définition curviligne de la trajectoire, ce qui ne modifie en rien ses caractéristiques géométriques. En effet, le vecteur écart de traînée est colinéaire au vecteur vitesse si les commandes des différents axes réagissent en même temps et de manière coordonnée.

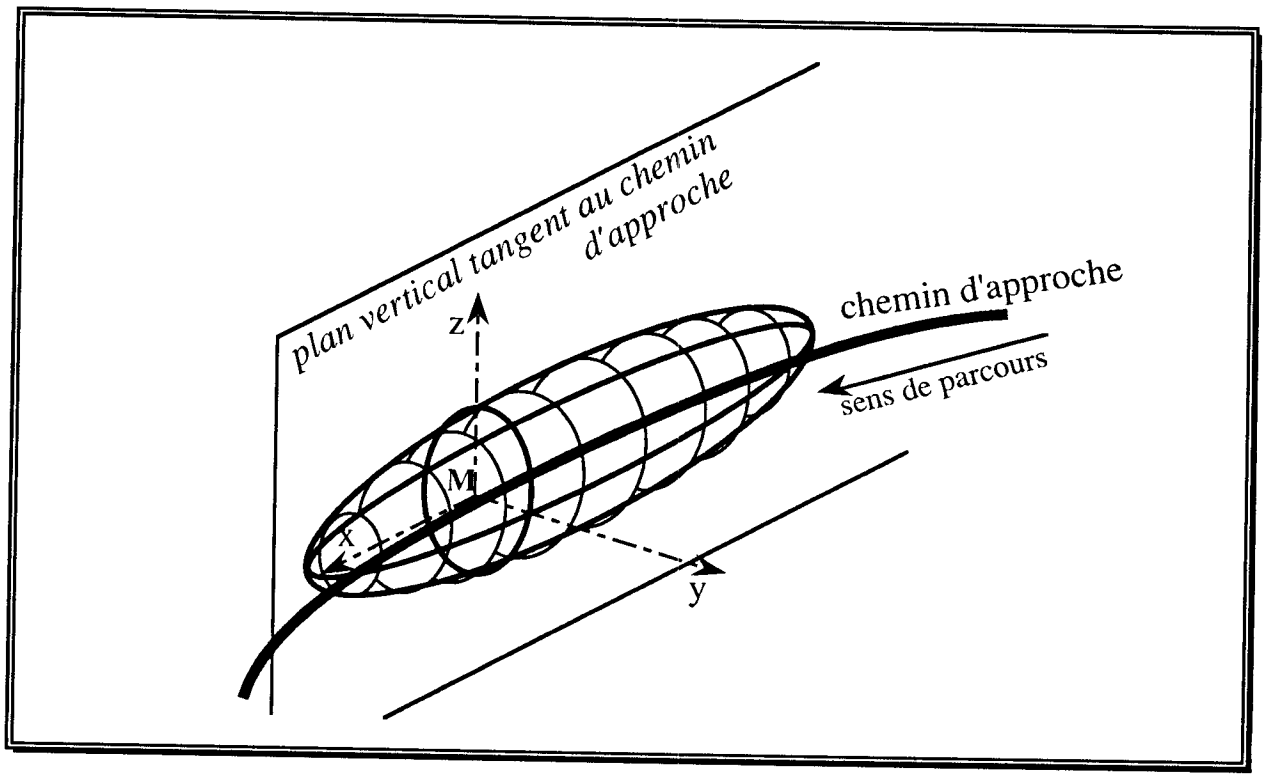


Figure I-17 : surface d'erreur en position pour une posture et une tâche données

L'examen des problèmes liés à l'erreur de traînée montre l'importance de l'influence de la robustesse des asservissements sur la géométrie de la trajectoire et de nombreux travaux de recherche ont été réalisés pour la réduction de cette erreur [BEN88] et pour son observation [IDR90] en vue d'augmenter la sûreté de fonctionnement du système de commande.

Dans le cadre d'une évaluation métrologique des performances d'un robot, notre intérêt sera limité aux défauts de forme de la trajectoire, et pour cela, à l'observation dans un plan perpendiculaire à la direction de la trajectoire de l'écart de position. C'est ce que nous appellerons le défaut radial de la trajectoire.

Ce défaut radial dépend donc lui aussi de la posture du robot et du chemin d'approche, c'est à dire de la trajectoire.

Pour conclure ce paragraphe, la surface d'erreur en position permet de modéliser la performance instantanée du robot, puisqu'elle est construite comme étant le volume au centre duquel se situe le point de la trajectoire théorique et à l'intérieur duquel se situe le point réel de la trajectoire.

2.1.1.4. Notion de capabilité robot

Pour apprécier l'aptitude d'un robot à accomplir une tâche robotisée donnée, il est indispensable de savoir exactement ce dont il est capable dans les conditions de fonctionnement définies par cette tâche.

Il convient tout d'abord de définir la précision d'une tâche : il s'agit de l'intervalle de tolérance sur la forme de la trajectoire du robot à l'intérieur duquel la tâche est correctement réalisée. Cet intervalle de tolérance (IT) fait donc partie du cahier des charges de la tâche. Il peut être défini pour des portions de macro-trajectoire, en fonction du travail à effectuer réellement sur chacune d'entre elles.

Par exemple, une macro-tâche de transfert nécessitera une précision médiocre tout au long de la trajectoire, une macro-tâche de dépose d'un filet de colle nécessitera une bonne précision, une macro-tâche d'assemblage ou une macro-tâche de micro-chirurgie robotisée nécessiteront une très bonne précision.

La capabilité robot sera un indicateur établissant un rapport entre la performance réelle du robot et la performance requise par la tâche.

Si nous modélisons la distribution de l'écart de forme radial d'une suite de trajectoires par une distribution gausienne, nous obtenons deux cas :

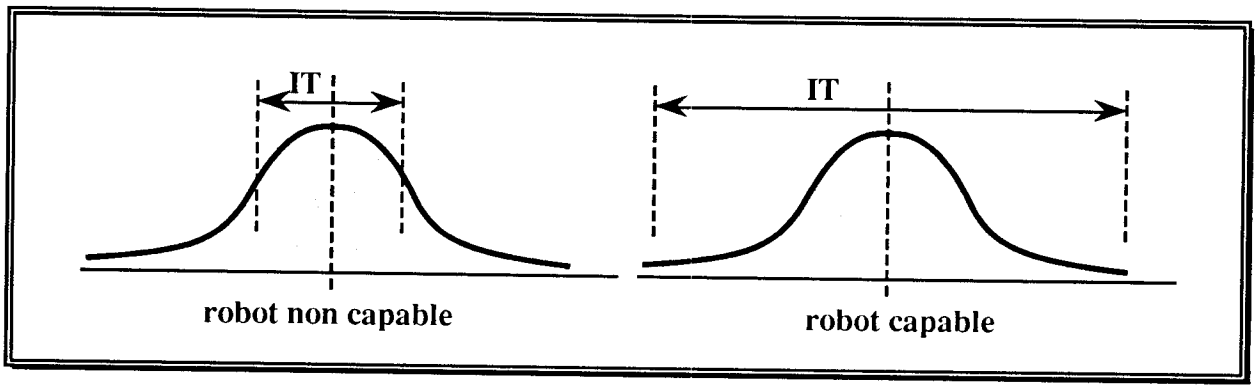


Figure I-18 : adéquation entre la tâche robotisée et la capacité du robot

Toutefois, cette notion est relativement floue, comme le sont souvent les indicateurs de performances, et elle nécessite une formulation mathématique arbitraire afin de pouvoir être utilisable.

Nous poserons donc :

$$\text{capabilité} = \frac{\text{intervalle de tolérance}}{\text{écart de forme de la trajectoire}}$$

Comme il est difficile d'imaginer une capabilité tridimensionnelle, il faut projeter l'intervalle de tolérance et l'écart de forme de la trajectoire sur deux axes orthogonaux appartenant au plan normal à la trajectoire.

Nous distinguerons la capabilité tâche de la capabilité robot.

Pour la capabilité tâche (notée Ct), l'écart de forme de la trajectoire sera évalué en fonction des conditions d'exécution de la tâche en question :

$$Ct = \frac{\text{intervalle de tolérance}}{\text{écart de forme de la trajectoire pour la tâche}}$$

Pour la capabilité robot (notée Cr), l'écart de forme de la trajectoire sera évalué en fonction des conditions courantes d'exécution du robot :

$$Cr = \frac{\text{intervalle de tolérance}}{\text{erreur maximum de position}}$$

La capabilité tâche, plus difficile à évaluer, sera utilisée dans le cas de tâche nécessitant une grande précision.

2.1.2. Analyse critique des modélisations théoriques

Nous constatons que les modélisations décrites au paragraphe 1.2. ne peuvent directement ni prendre en compte les phénomènes décrits ci-avant, ni permettre à l'estimation de critères de performances.

En effet, les phénomènes évoqués ne sont modélisables qu'au niveau $\boxed{4}$ de décomposition de la nomenclature d'un robot industriel (figure I-8), alors que les modèles théoriques ne sont basés que sur une analyse de niveau $\boxed{3}$. Sans cette possibilité de modélisation, il devient impossible d'envisager toute évaluation de critères métrologiques, chaque robot étant parfait.

Les modèles théoriques conventionnels doivent donc être utilisés en toute connaissance de leur validité, c'est à dire en étant conscient des erreurs qui leur sont attachées.

Ainsi, un transformateur de coordonnées ne doit plus être perçu comme une fonction injective donnant des valeurs parfaites, mais comme une fonction entachée d'une erreur et d'une certaine incertitude sur cette erreur.

Or, pour l'instant, la très large majorité des robots est dotée d'une modélisation essentiellement basée sur des lois géométriques, cinématiques, voire dynamiques, mais ne prenant pratiquement jamais en compte les aspects technologiques. Le porteur y est donc assimilé à un système mécanique articulé théorique de type chaîne cinématique ouverte, avec le premier corps articulé en amont à un support fixe et le dernier corps portant en aval l'effecteur.

Les trois hypothèses fondamentales faites lors des modélisations de niveau 3 sont :

- des corps infiniment rigides,
- des articulations sans frottement, sans jeux et sans déformations,
- la non prise en compte des transmissions entre actionneurs et corps...

Ces derniers aspects ne sont pas cependant les seuls à contribuer à créer des erreurs dans ces modèles.

2.1.3. Classification des sources d'erreurs et d'incertitudes dans la définition de la tâche robotisée

2.1.3.1. Analyse du mesurage d'un site robotisé

Pour qu'il y ait véritablement une tâche robotisée, il faut qu'il y ait un mouvement effectué grâce au robot d'un objet (produit, effecteur...) à l'intérieur d'un espace immobile qu'on appelle la scène ou le site de la tâche robotisée.

Lorsque le mouvement est sans contrainte particulière, l'interaction entre le robot et la scène se réduit aux problèmes de non-collision, c'est à dire de détection, d'évitement, de contournement d'obstacles et donc de génération des trajectoires correspondantes.

Par contre, il existe toujours des moments dans la tâche robotisée où l'interaction entre le robot et la scène est fondamentale : il s'agit des micro-tâches d'échanges de l'objet. Elles correspondent aux instants où l'objet est maintenu à la fois par le robot et par un équipement de la scène et qu'il est donc repéré par des systèmes de coordonnées propres à chacun des deux sous-systèmes.

Nous avons vu lors de la description du modèle géométrique direct comment s'insérait le robot au sein du site robotisé et comment était pris en compte son propre outillage.

Il en va de même pour les autres composants du site. Ces derniers sont généralement des matériels de périrobotique : sous-systèmes de transfert, sous-systèmes d'alimentation et de distribution, postes spécialisés divers (postes de dénudage, de sertissage, d'usinage...). A chacun de ces équipements est associé un repère Re_i et il y aura donc pour chaque équipement une matrice de passage homogène ${}^{e_i}\mathbf{T}_{site}$ pour se raccorder au repère Ro.

Le mesurage d'un site robotisé permet d'accorder l'état de la partie opérative et la programmation de la tâche à accomplir. Cette opération, pour être complète, comporte deux aspects, l'étalonnage de la scène et le mesurage du robot.

Ce sont ces opérations de métrologie qu'il convient de détailler ici.

2.1.3.2. Etalonnage de la scène de travail

L'étalonnage de la scène est essentiellement un problème de mesurage statique de la position des objets, volumes et équipements constituant le site où se situe la tâche. Ceci ne va pas sans difficultés. Tout d'abord, comme nous l'avons dit précédemment, il n'existe pas d'appareillage pour faire cette mesure relativement au robot. Ensuite le mesurage par rapport au repère général du site R_{site} pose d'énormes difficultés techniques avec des instruments de métrologie classiques. En effet, il est très difficilement envisageable de pouvoir faire passer une scène sous une machine à mesurer tridimensionnelle.

Aussi, les solutions envisagées sont beaucoup plus pragmatiques et se regroupent aisément en deux grandes classes.

La première classe de réponses à cette problématique fait appel à des artifices technologiques pour compenser l'ignorance dans laquelle nous nous trouvons.

Nous plaçons le robot dans la posture effectivement prise pour le vecteur **q** programmé correspondant de manière théorique à l'instant de la coordination avec l'élément de périrobotique, et nous procédons à un ajustement pour supprimer les écarts de position relative.

Nous parlerons dans ce cas d'étalonnage implicite de la scène. En réalité, il n'y a plus vraiment d'étalonnage, mais il y a conformation de la scène vis à vis des éléments de la programmation théorique de la tâche robotisée ou vice versa.

En effet, un premier type de solution consiste à utiliser des éléments périrobotiques réglables que nous ajusterions à la demande de manière à

supprimer cet écart, tandis qu'un second type vise à effectuer une correction du vecteur **q** afin de recaler la posture du robot sur la position effective de l'élément périrobotique : il y a alors modification en ligne du programme de la tâche.

De plus, pour simplifier l'exécution des tâches, les objets à manipuler sont présentés au robot dans des positionneurs isostatiques qui offrent une grande répétabilité de mise en position. Chaque cycle étant alors identique au précédent, nous pouvons faire abstraction de la connaissance exacte de la scène.

La seconde voie pour obtenir l'étalonnage de la scène de travail consiste à acquérir la scène dans sa globalité à l'aide de capteurs extéroceptifs.

Cette méthode est particulièrement intéressante pour décrire l'enveloppe des objets de l'environnement, que leur situation géométrique soit ou non dépendante du temps. Elle débouche sur une véritable programmation hors ligne de l'espace de la tâche robotisée. Nous parlerons alors d'étalonnage explicite. Plusieurs méthodes de modélisation et d'acquisition sont envisageables.

Tout d'abord, nous pouvons utiliser les langages de types alphanumériques de programmation des robots, qui proposent des instructions symboliques de description du concept <position, orientation> qui peuvent être appliqués aux éléments de l'environnement. Nous avons accès par là même à des éléments de modélisation qui permettent l'utilisation aisée des caractéristiques géométriques de la scène, mais qui restent insuffisants vis à vis de l'acquisition réelle de ces caractéristiques. En effet, cette acquisition se fait par introduction manuelle de données géométriques pouvant provenir de mesures approximatives, de mesures relatives, de relevés d'écarts ou de toutes autres sources d'information relatives à la position et à l'orientation de chaque objet dans le repère absolu $\mathbf{R}_{site}$. Cette phase de la programmation de la scène est facilitée par l'assistance d'une représentation graphique des objets créés.

Pour aller plus en avant dans cette assistance, [MAR92] propose un système d'acquisition à l'aide d'un système de vision, puis d'identification des volumes (position et dimensions) par logiciel graphique interactif, le tout constituant un véritable système de programmation graphique de niveau objet de l'espace de travail du robot. Cette représentation graphique doit être réaliste et doit apporter une correspondance topologique avec l'environnement réel, c'est à dire des informations exploitables sur les positions et orientations relatives des différents constituant de la scène de travail.

La méthode, illustrée par la figure I-19, consiste à acquérir à l'aide d'une caméra une image de la scène qui va constituer la référence de définition des objets dans $\mathbf{R}_{site}$. A l'aide d'un éditeur de primitives graphiques déformables, l'opérateur va venir superposer à un objet de l'image de la scène une instance de l'une de ces primitives (parallélépipède, cône, sphère) et la modifier. Pour cela, il va agir sur la représentation graphique de l'objet, et non sur le modèle géométrique qui le sous tend, pour la translater, l'étirer, la tourner... L'utilisation d'une seule caméra, placée par exemple au-dessus de la scène, simplifie grandement les traitements liés à cette méthode, mais ne délivre pas suffisamment d'informations pour permettre directement la correspondance topologique. Chaque objet devra être sujet à un mesurage partiel afin de compléter les données géométriques de son modèle.

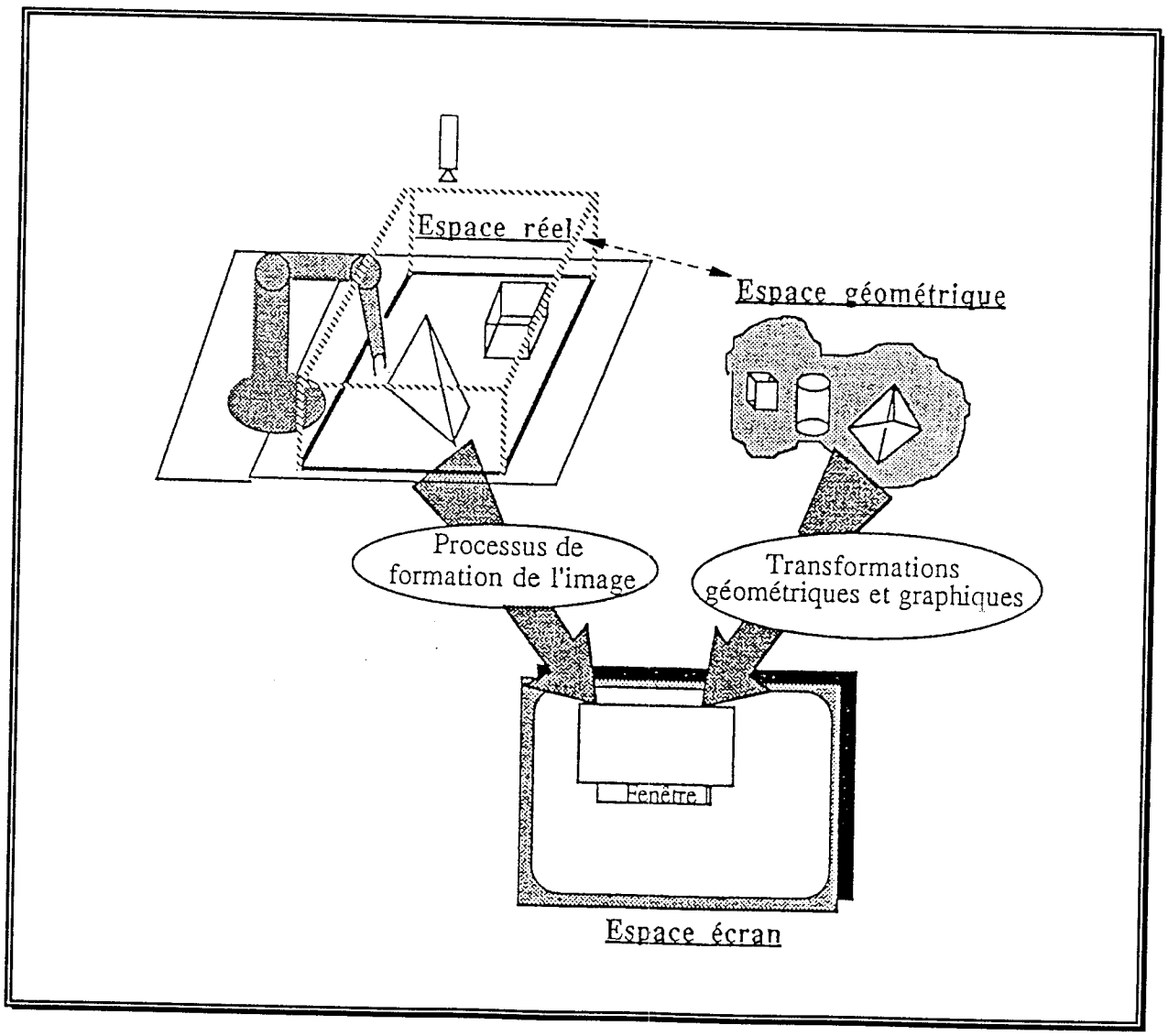


Figure I-19 : programmation graphique de l'environnement de travail (inspirée de [MAR92])

D'autres auteurs [HAS82], [LIU91], [TAK93] recommandent l'utilisation de la vision stéréoscopique ou de principes équivalents, dans le but d'augmenter l'aptitude à la correspondance topologique directe par la reconstitution de la troisième dimension.

Les systèmes de vision stéréoscopique nécessitent les algorithmes de traitement complexes, l'acquisition des mêmes détails à partir des deux points de vue correspondant aux deux caméras et la mise en correspondance des deux représentations de chaque détail. Cette méthodologie n'est donc pas simple à mettre en oeuvre.

Un autre système, plus performant, consiste à utiliser un système de vision mono caméra, complété par un pointeur laser monté sur un robot deux axes. En relevant les coordonnées du pixel correspondant à la tâche du rayon lumineux sur un objet de la scène et en connaissant les deux orientations du pointage du rayon, nous pouvons, par triangulation, calculer les trois coordonnées du point ainsi éclairé. En effet, ce point est situé à l'intersection de deux droites de directions connues :

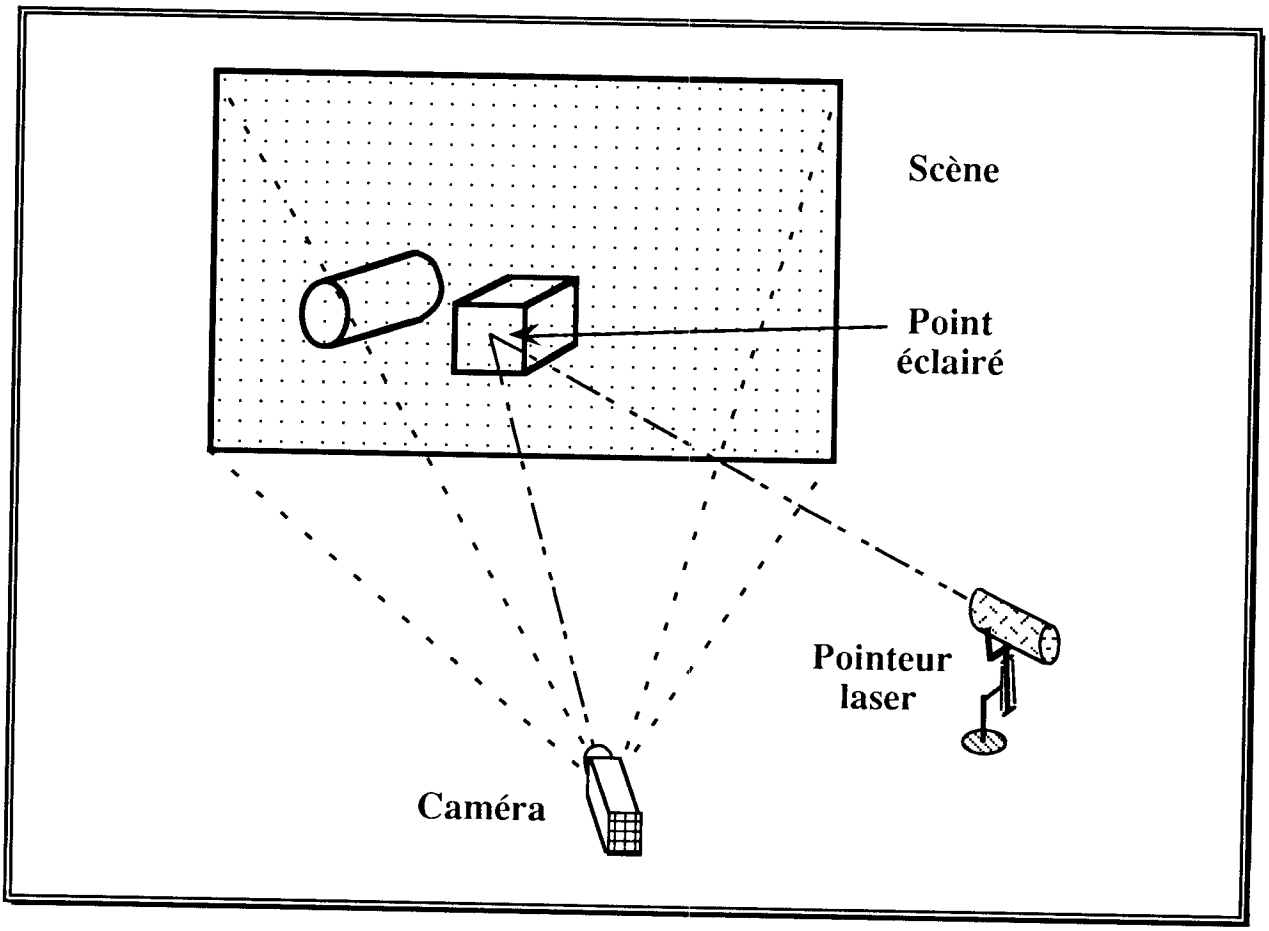


Figure I-20 : scannérisation d'une scène
par balayage laser et acquisition vidéo

Nous pouvons donc, par balayage, reconstituer l'intégralité de l'enveloppe visible des objets constituant la scène de travail du robot.

2.1.3.3. Mesurage du robot

Le mesurage du robot est véritablement le problème central qui nous préoccupe. Sachant qu'il n'existe pas d'instruments métrologiques parfaitement satisfaisants pour la mesure sur site, la mesure en laboratoire est actuellement la plus pratiquée.

Pour effectuer ce mesurage, trois politiques sont possibles :
- considérer le robot comme une boite noire, et effectuer une métrologie exhaustive de son comportement global, mais cela est très difficile du fait de la variété des paramètres influants et des différentes conditions d'utilisation du robot (géométrie de la trajectoire, vitesse, charge...),
- rester dans l'optique précédente, mais réduire la métrologie aux seuls cas d'utilisation prévus pour le robot en question,
- chercher à identifier les sources d'erreurs internes du robot pour reconstituer un modèle de comportement global à partir de comportements locaux.

Nous verrons, à l'issue de notre étude, que ces politiques doivent être complémentaires.

2.2. Etude des techniques d'expérimentation et de métrologie

Nous proposons dans ce paragraphe un inventaire des différentes méthodes de mesure utilisables pour l'expérimentation et le relevé de caractéristiques métrologiques sur les robots industriels. Nous commencerons par, d'une part, les méthodes faisant référence à l'heure actuelle, et d'autre part, par une méthode couramment pratiquée sur les sites robotisés. Nous enchaînerons ensuite sur quelques méthodes, dont certaines sont en cours de développement et d'industrialisation.

2.2.1. métrologie à l'aide de théodolites

2.2.1.1. principe de mise en oeuvre

La métrologie tridimensionnelle à base de théodolites fonctionne par triangulation entre deux systèmes de visée (les 2 théodolites) qui suivent en permanence le même point du SMA durant son mouvement. Nous mesurons de manière synchrone sur ces deux appareils les deux angles d'orientation de la ligne de visée. Le calcul trigonométrique présenté à la figure suivante permet de déterminer le point d'intersection des deux lignes de visée, et donc les coordonnées des différents points successivement observés sur la trajectoire.

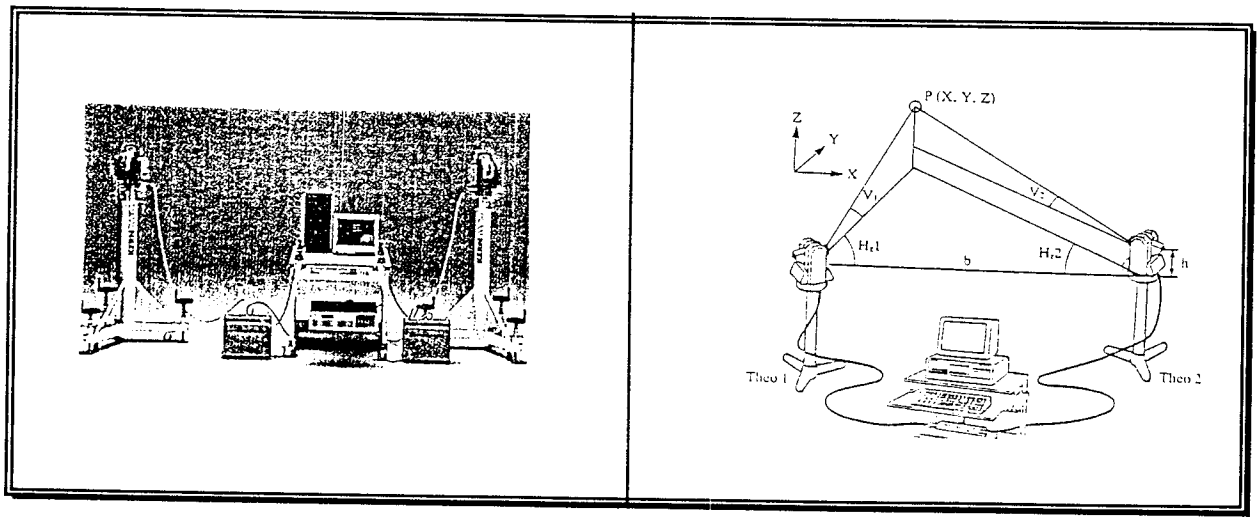


Figure I-21 : mesure 3D par théodolites : description et méthode de calcul (document LEICA)

2.2.1.2. avantages et inconvénients de la méthode

Cette méthode offre une bonne précision (autour de 0,02 mm), ce qui est très largement suffisant au vu des performances géométriques actuelles des robots.

Une précaution à prendre est de s'assurer que les deux rayons ne seront pas interrompus par des éléments de la scène lors du déplacement du point de visée correspondant à la tâche. Cela peut signifier que la trajectoire ne sera mesurable que par morceaux, et qu'il faudra envisager plusieurs configurations de mesurage, accompagnées des actions de raccordement des mesures correspondantes.

Le coût d'un tel équipement et de son exploitation sont relativement élevés (environ 650 KF) et son utilisation reste assez sophistiquée et assez lente, car elle nécessite une bonne coordination des deux opérateurs.

Une autre solution, entraînant un coût initial plus élevé (environ 1,2 MF), consiste à robotiser les deux axes d'orientation des deux théodolites. La précision de la mesure reste la même, la fréquence d'acquisition passant à une acquisition toutes les 5 à 7 secondes (projet Esprit CAR 5220).

2.2.2. métrologie à l'aide d'un robot à mesurer par interféromètre dynamique 3D

Pour réduire la somme des inconvénients évoqués ci-devant, des travaux de recherche ont permis la conception d'un nouveau type d'instrument de mesure tridimensionnelle. Il s'agit en fait d'un seul théodolite robotisé à deux axes concourants, équipé d'un laser interférométrique. Cette caractéristique permet de pouvoir mesurer la longueur du rayon entre l'appareil et la cible à mesurer.

2.2.2.1. principe de mise en oeuvre

La figure I-22 montre le robot interférométrique 3D in situ. La cible à mesurer est dotée d'un réflecteur à oeil-de-chat, qui présente l'avantage d'un grand angle utile de renvoi du rayon (± 60 °). Le rayon reflété parallèlement au rayon incident retourne d'une part vers l'interféromètre et d'autre part vers une cellule photoélectrique biaxiale (PSD) qui indique l'erreur de pointage du laser vers le centre du réflecteur. Cette erreur de poursuite est réduite par les asservissements qui pilotent les deux axes du robot à mesurer, jusqu'à sa réduction maximale.

Nous retrouvons toutes les fonctions associées à un robot, sauf qu'il n'y a pas de programmation de tâche, mais au contraire compliance totale vis à vis de la tâche : c'est elle qui pilote le robot.

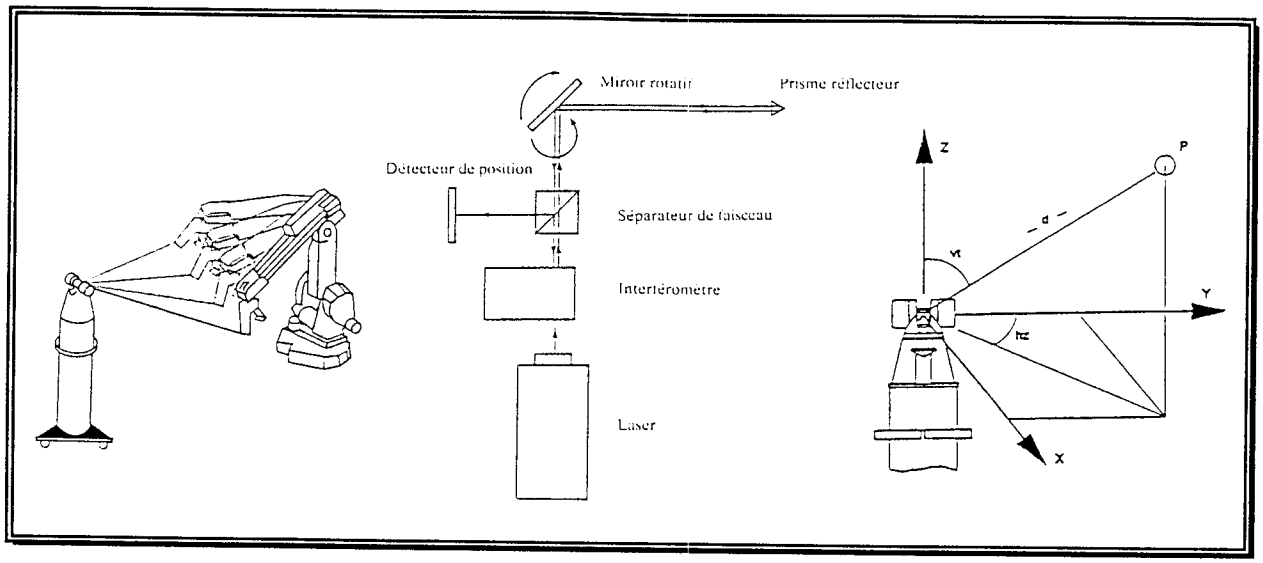


Figure I-22 : illustration et schéma de principe d'un robot interférométrique 3D (document LEICA)

2.2.2.2. avantages et inconvénients de la méthode

L'appareil permet une très grande précision, une grande dynamique, une très grande fréquence d'échantillonnage (jusqu'à 1000 mesures par seconde), il est facile d'utilisation et son accessibilité à la scène est plus grande, puisqu'il n'y a plus qu'un seul rayon. Son coût reste du même ordre que précédemment (environ 1,2 MF), le surcoût de l'interféromètre étant compensé par la suppression d'un théodolite robotisé.

2.2.3. méthode empirique d'approximation par "mise en correspondance de pointes".

Cette méthode, pragmatique et peu onéreuse à mettre en oeuvre, est utilisée par les opérateurs sur site pour acquérir des données nécessaires pour pouvoir compenser les erreurs de modèles théoriques sans pour autant faire de véritables mesures sur le robot [CRA93].

2.2.3.1.. description de la méthode

A l'origine, cette méthode permet de définir de manière suffisante les jauges des effecteurs, c'est à dire les cotes propres à chaque effecteur. Ces dimensions ont la particularité d'être paramétrables sur la plupart des baies de commande des robots industriels actuellement en service.

Il s'agit de mettre en correspondance une pointe fixe, liée à la scène de travail et représentant la pièce ou un point M, avec une pointe mobile, liée à l'extrémité du robot ou à l'effecteur.

Cette correspondance se fait au jugé visuel, elle demande une bonne accessibilité à la scène. La précision maximale est alors d'un demi-millimètre. Une fois que nous sommes dans la bonne position, nous relevons les positions articulaires réelles, c'est à dire le vecteur $\mathbf{q}_{Mk}$ correspondant à la posture en question. Certaines baies de commande intègrent des fonctions de lecture des valeurs numériques fournies par les capteurs proprioceptifs.

Nous appliquons alors le modèle géométrique direct pour trouver le point M_k théoriquement atteint dans cette posture :

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{MGD}(\mathbf{q}_{Mk})$$

En répétant un certain nombre de fois l'opération pour une variété de postures différentes, mais pour un unique point M, nous obtenons un nuage de points M_k, lesquels se situent, aux incertitudes de relevé près, sur un ellipsoïde dont le centre est précisément le point M théorique.

Par des méthodes itératives, il est possible de déterminer ce centre, ce qui débouche sur la détermination des bonnes jauges de l'effecteur et sur la déduction de l'écart entre le point M théorique et le point M réel.

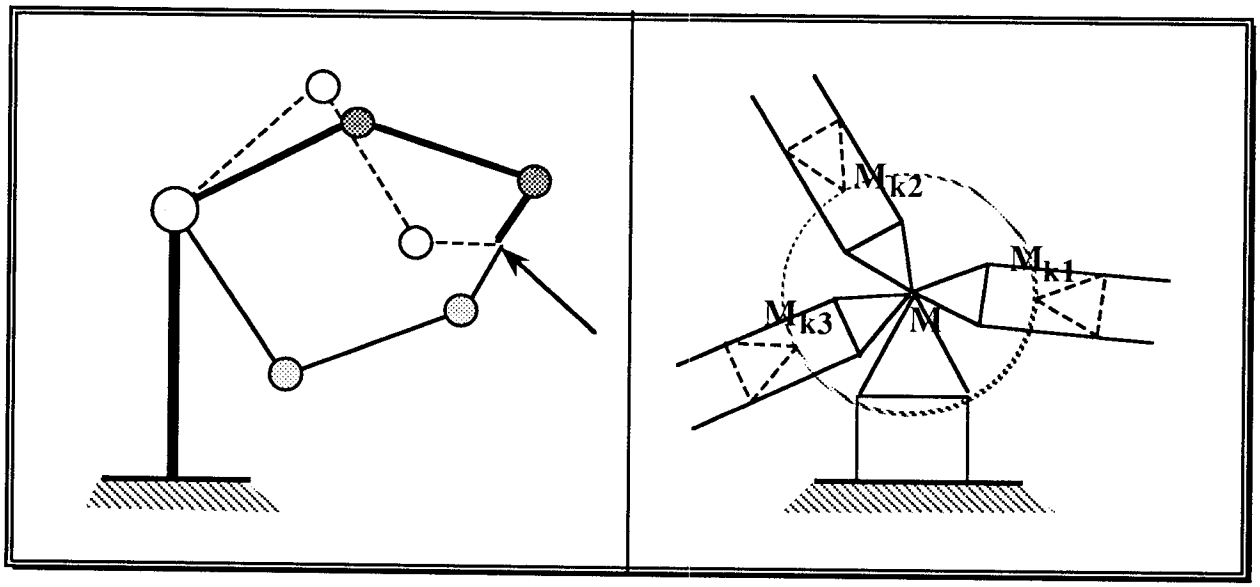


Figure I-23 : principe de l'acquisition "par correspondance de pointes"

2.2.3.2. avantages et inconvénients de la méthode

Il est évident que le mode opératoire décrit ci-devant engendre un manque de précision notoire. Cependant, face à la précision requise de certaines tâches et aux incertitudes très importantes constatées sur certains robots, cette méthode présente un intérêt évident au regard de sa simplicité. De plus, le coût de l'équipement est extrêmement réduit, et si le relevé des

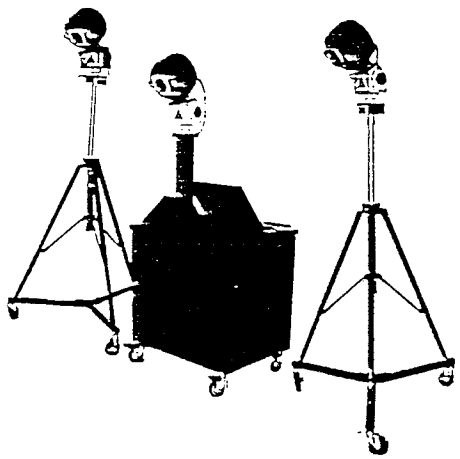
configurations articulaires prend un peu de temps (au moins un quart d'heure par point M), il est possible d'importer les valeurs articulaires collectées dans des logiciels de CFAO Robotique qui sont dotés de toutes les primitives mathématiques pour le calcul de transformation directe de coordonnées, puis pour la réduction du nuage de points obtenu en un seul point. La trajectoire peut alors être corrigé pour tenir compte des écarts observés directement dans la programmation de tâches.

2.2.4. métrologie par caméras

Entre ces méthodes extrêmes se situent d'autres méthodes présentant d'autres critères de précision et de coût. Nous détaillerons par exemple les méthodes utilisant des caméras numériques.

2.2.4.1. principe de mise en oeuvre

Il s'agit de procédés par stéréovision déjà évoqués lors du problème de l'étalonnage du site. Il s'agit d'acquérir simultanément deux images de la posture du robot, provenant de deux points de vue différents. Les deux images sont relevées en temps réel, elles sont analysées pour identifier sur chacune d'elles les marqueurs spécifiques attachés à l'extrémité du robot et donc leur position. Puis, toujours en temps réel, un traitement final permet de reconstituer la troisième dimension, par une recomposition de l'effet de stéréovision.



Mesurage en temps réel :
plus de 10 points par seconde

Jusqu'à 6 caméras simultanément

Résolution :
de 1:40000 à 1:100000

Figure I-24 : acquisition de situation géométrique par caméras

2.2.4.2. avantages et inconvénients de la méthode

Les systèmes de stéréovision par caméras numériques présentent une certaine équivalence sur l'aspect purement du coût avec les systèmes basés sur l'utilisation de deux théodolites (environ 650 KF) et sur l'aspect de l'accessibilité du champ de vision autour du robot.

Les différences se situent essentiellement au niveau d'une moins bonne précision, ± 0,2 mm à une distance de 1 m, et d'une plus grande fréquence d'échantillonnage, jusqu'à dix mesures par seconde.

2.2.5. définition d'une méthode de mesurage réduit

La méthodologie que nous avons décrite au paragraphes précédants nous permet d'évaluer par simulation les performances métrologiques d'un robot, quelle que soit la tâche envisagée (trajectoire et charge quelconques).

Toutefois cette modélisation dépend de la valeur des paramètres technologiques du robot. Ces derniers peuvent être :

- soit estimés par modélisation du comportement théorique de chaque composant,
- soit déduits à partir d'acquisitions expérimentales,
- soit affinés en fonction d'acquisitions expérimentales et en partant de valeurs initiales estimées par modélisation du comportement théorique de chaque composant.

Dans les trois cas, le comportement technologique final du robot devra être en concordance avec les résultats métrologiques obtenus lors de l'expérimentation.

Dans ces conditions, rien n'oblige à utiliser systématiquement des systèmes de mesurage couvrant l'intégralité ou une très large zone du volume de travail du robot et nous pouvons définir une tâche d'essai réduite à partir de laquelle nous pourrons déterminer les paramètres du modèle technologique.

Nous pouvons ainsi nous limiter, par exemple, à la métrologie de la rectitude d'une trajectoire linéaire.

2.2.5.1. méthode de calcul de l'écart de rectitude

Soit une série de points Mr_i relevés à l'extrémité d'un robot industriel et correspondant à une trajectoire linéaire. Nous allons calculer par régression linéaire la droite passant au mieux au milieu du nuage formé par ces points, puis nous caractériserons ce nuage par rapport à cette droite et la position de cette droite par rapport à la trajectoire initialement programmée.

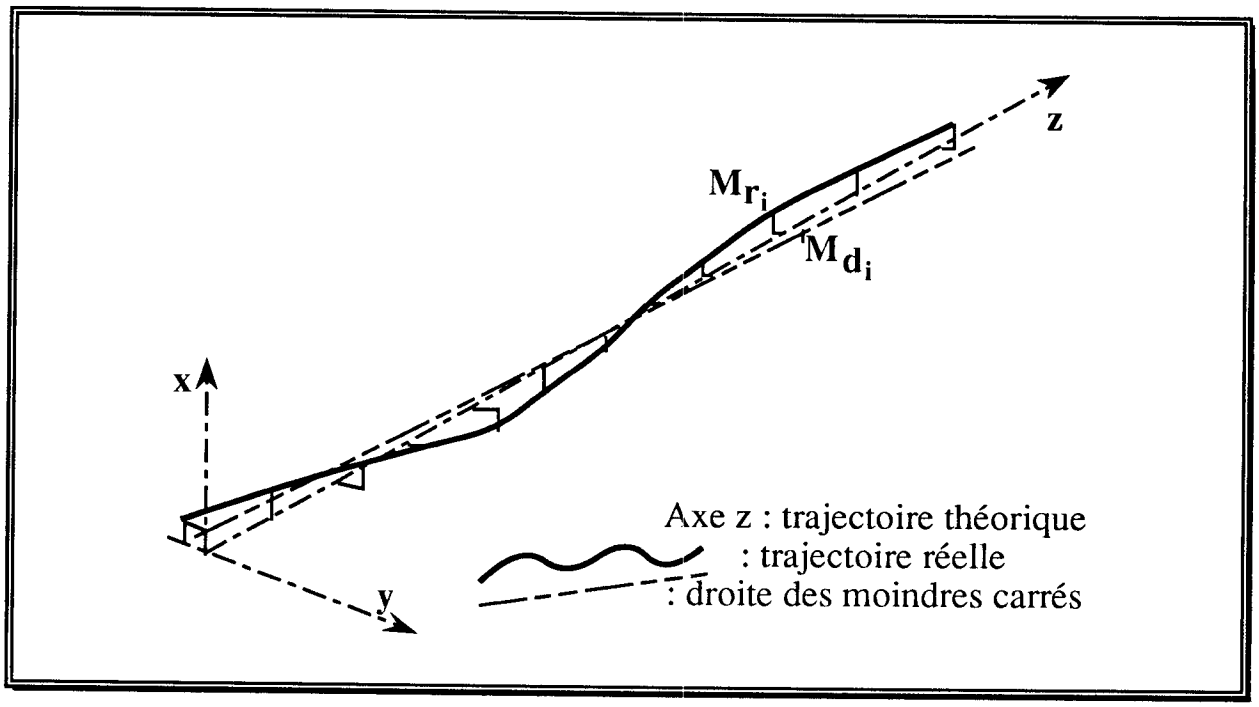


Figure I-25 : trajectoire théorique, trajectoire réelle et droite des moindres carrés

Nous définirons par ses projections planes la droite passant au mieux par l'ensemble de points relevés lors de la mesure :

$$\begin{cases} x_i = a_x z_i + b_x \\ y_i = a_y z_i + b_y \end{cases}$$

Les points relevés M_{ri} auront comme coordonnées (x_{ri}, y_{ri}, z_{ri}).

Nous appellerons e_i l'écart entre le point réellement mesuré M_{ri} et le point correspondant sur la droite M_{di}. Nous avons, pour $z_i = z_{ri}$, :

$$e_i = \sqrt{e_{xi}^2 + e_{yi}^2} = \sqrt{(x_{ri} - x_i)^2 + (y_{ri} - y_i)^2}$$

Soit W, la somme des carrés des écarts entre la droite et les points relevés :

$$W = \sum_{i=1}^{n} e_i^2$$

Le critère de Gauss définit la droite des moindres carrés comme étant définie par :

$$\frac{\partial W}{\partial a_x} = 0 \ \& \ \frac{\partial W}{\partial b_x} = 0 \ \& \ \frac{\partial W}{\partial a_y} = 0 \ \& \ \frac{\partial W}{\partial b_y} = 0$$

Il ne s'agit plus que de chercher le plus grand e_i pour avoir l'erreur de rectitude de la trajectoire, puis de calculer la distance et les deux angles d'orientation entre les deux droites (droite des moindres carrés et trajectoire rectiligne).

2.2.5.2. avantages et inconvénients de la méthode

Cette méthode présente l'avantage de caractériser parfaitement le défaut géométrique de forme de la trajectoire et permet de concentrer l'analyse sur certains points particuliers (exemple : analyse dans le plan vertical). Elle est donc particulièrement bien adaptée pour l'étude et l'identification des paramètres du modèle technologique du robot.

Toutefois, avant de passer à l'utilisation de ce modèle technologique comme s'il était une véritable représentation virtuelle du robot et de pouvoir ainsi émuler le comportement du robot quelle que soit la tâche envisagée, il faut obligatoirement valider le modèle. Cela doit se faire au travers d'une campagne d'essais diversifiés, en faisant varier la tâche, c'est à dire la trajectoire et la charge. Plusieurs méthodes sont utilisables pour mesurer cette rectitude, et certaines présentent l'avantage indéniable de la simplicité de mise en oeuvre.

2.2.5.3. inventaire des méthodes de mesure d'une linéarité

Nous distinguerons deux grandes classes de méthodes de mesure :

- la première consiste à accrocher à l'extrémité de la machine à instrumenter un pantographe, c'est à dire un SMA de construction légère et capable de mesurer des informations liées à la géométrie de la trajectoire. Nous développerons comme exemple le cas du "Ball-Bar".
- la seconde regroupe toutes les méthodes utilisant une référence étalon et nous présenterons des méthodes n'entraînant pas de contact entre le capteur et cet étalon.

2.2.6. métrologie à l'aide d'un Ball-Bar

Le "Ball-Bar" est un instrument de mesure utilisé pour qualifier la géométrie des machines outils à commande numérique. Le développement d'une version permettant des mesures de grandes amplitudes permet d'envisager son utilisation dans le mesurage des robots.

2.2.6.1. principe de mise en oeuvre

Il s'agit d'un capteur de déplacement linéaire monté à ses deux extrémités sur deux rotules à trois points de contact magnétiques. C'est le pantographe le plus simple que nous puissions imaginer.

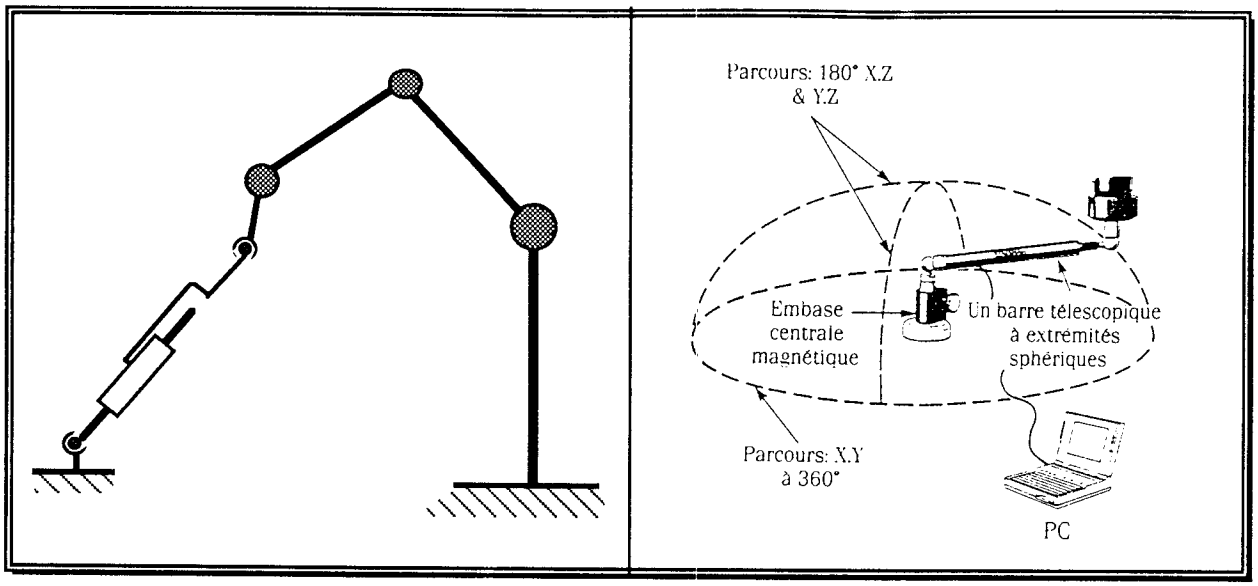


Figure I-26 : principe et mise en oeuvre d'un capteur "Ball-Bar"

La résolution dépend de l'étendue de la mesure et de la résolution permise par la chaîne d'acquisition. Par exemple, pour un capteur "Ball-Bar" de course ± 20 millimètres et une chaîne d'acquisition équipée d'un convertisseur A/N 12 bits, la résolution finale est d'un centième de millimètre.

2.2.6.2. méthode de calcul d'un point d'acquisition de la trajectoire

L'information fournie par le capteur correspond à la distance entre les deux rotules, c'est à dire au rayon de la sphère dont la rotule fixe est le centre. Cela est tout à fait insuffisant pour déterminer les coordonnées de l'extrémité du robot. Deux solutions existent : soit nous faisons un seul relevé avec trois capteurs en parallèle, soit nous faisons trois relevés en changeant à chaque fois le capteur de position.

Cette méthode est illustrée par la figure I-27 (page suivante) et donne le système d'équations :

$$\begin{cases} (x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 + (z_i - z_a)^2 = a_i^2 \\ (x_i - x_b)^2 + (y_i - y_b)^2 + (z_i - z_b)^2 = b_i^2 \\ (x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 + (z_i - z_c)^2 = c_i^2 \end{cases}$$

qui admet deux solutions symétriques par rapport au plan des points ABC.

Le fait de tester des trajectoires linéaires sur des calottes sphériques pose le problème de la limitation en longueur de ces trajectoires.

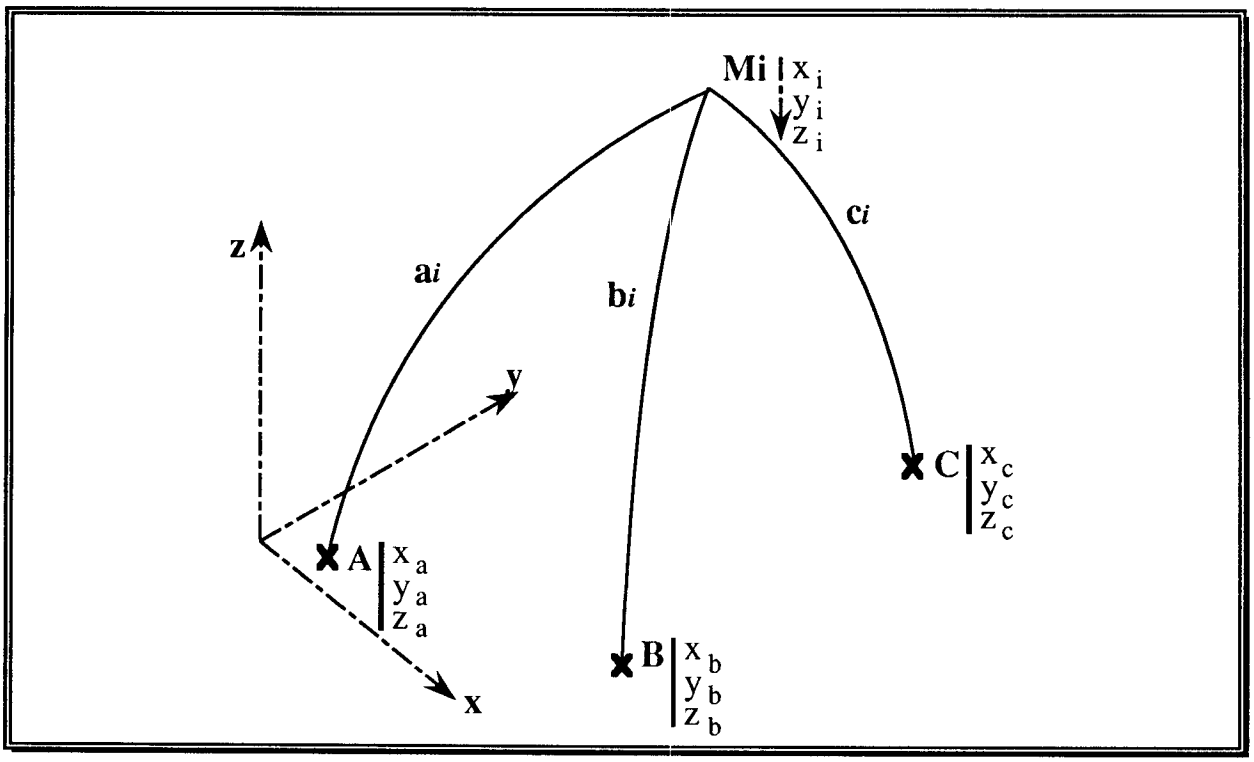


Figure I-27 : problématique de calcul de (x_i, y_i, z_i)

2.2.6.3. limitation de la trajectoire d'essai

Sur la figure suivante, nous trouverons e, l'écart maximal supposé de rectitude, c, la course du capteur, r, le rayon moyen de la sphère et l, la longueur de la trajectoire rectiligne.

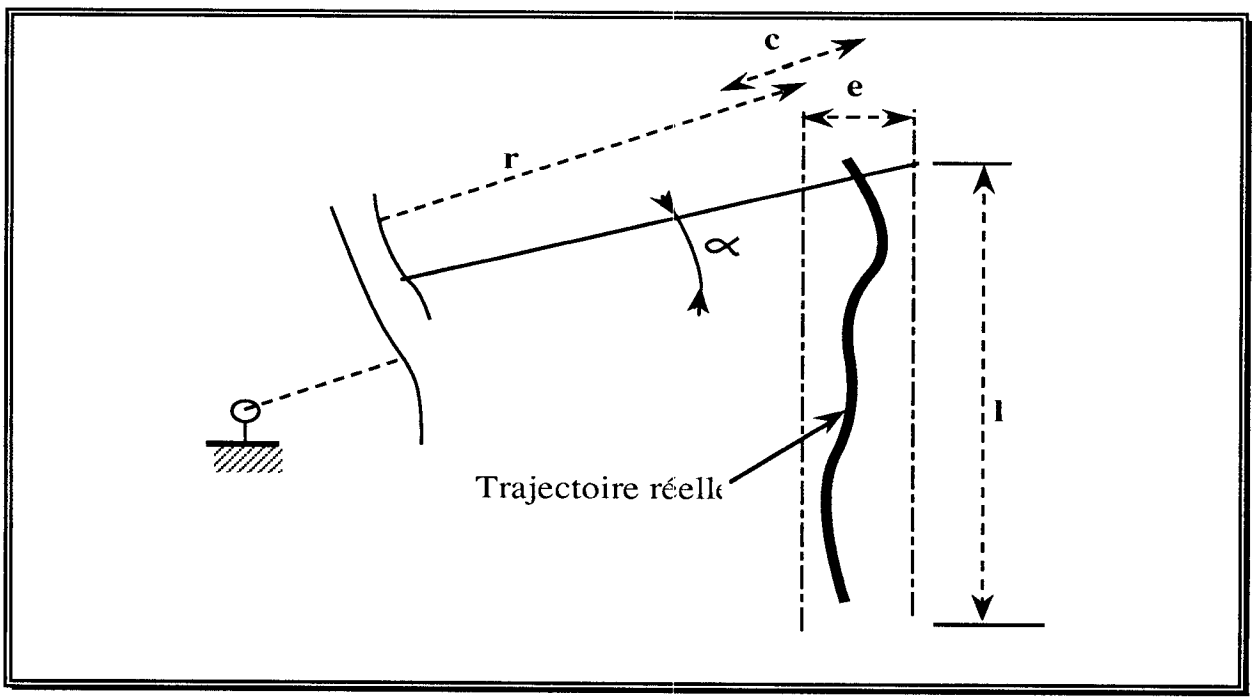


Figure I-28 : calcul de la longueur maximale de la trajectoire rectiligne

Sur cette figure, nous remarquons que :

$$\left| \begin{array}{l} (r + \frac{c}{2}) \cos \alpha = r - \frac{c}{2} + e \\ (r + \frac{c}{2}) \sin \alpha = \frac{l}{2} \end{array} \right.$$

ce qui donne :

$$l \leq 2 \sqrt{(2\,r + e)} \sqrt{(c - e)}$$

AN : c = 40 mm
r = 200 mm
e = ± 5 mm = 10 mm

alors $l \leq 2 \sqrt{(2 \times 200 + 10)} \sqrt{40 - 10}$ # 222 mm.

Nous constatons bien cette longueur est suffisamment grande pour pouvoir être exploitable lors de l'opération de mesurage.

2.2.6.4. méthode simplifiée d'acquisition de la trajectoire

Nous pouvons limiter l'acquisition à une seule dimension, ce qui présente l'avantage de réduire considérablement la manipulation.

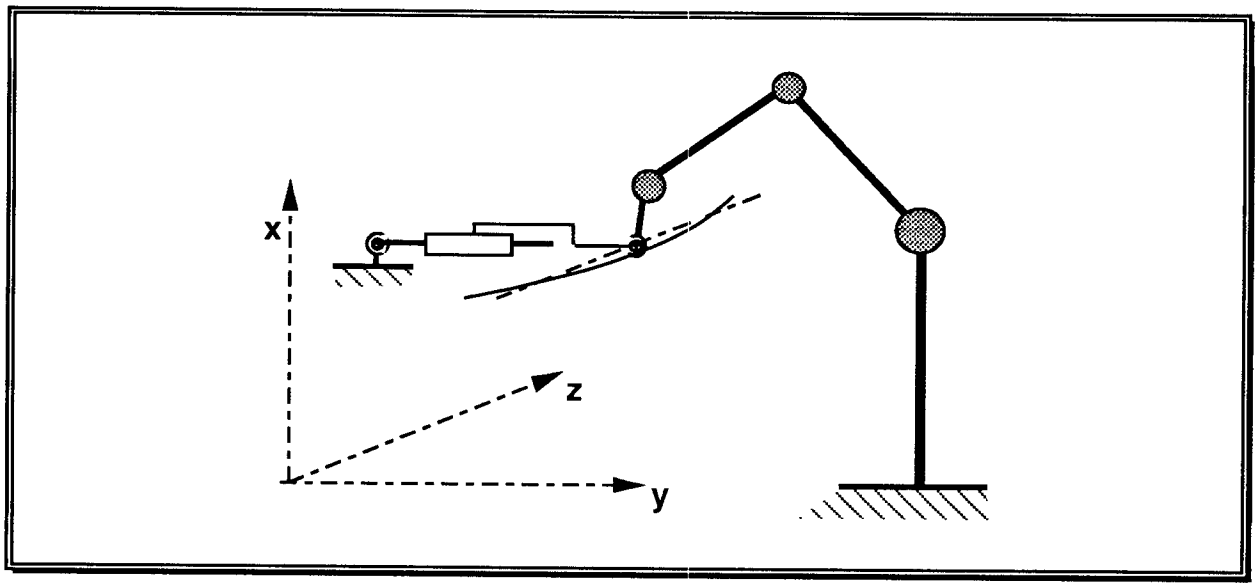


Figure I-29 : exemple de mesure dans le plan horizontal (xOz)

Dans ce cas, les informations issues du capteur doivent être corrigées pour compenser le défaut de 'parallaxe' entre la direction de la mesure et celle du capteur Ball-Bar.

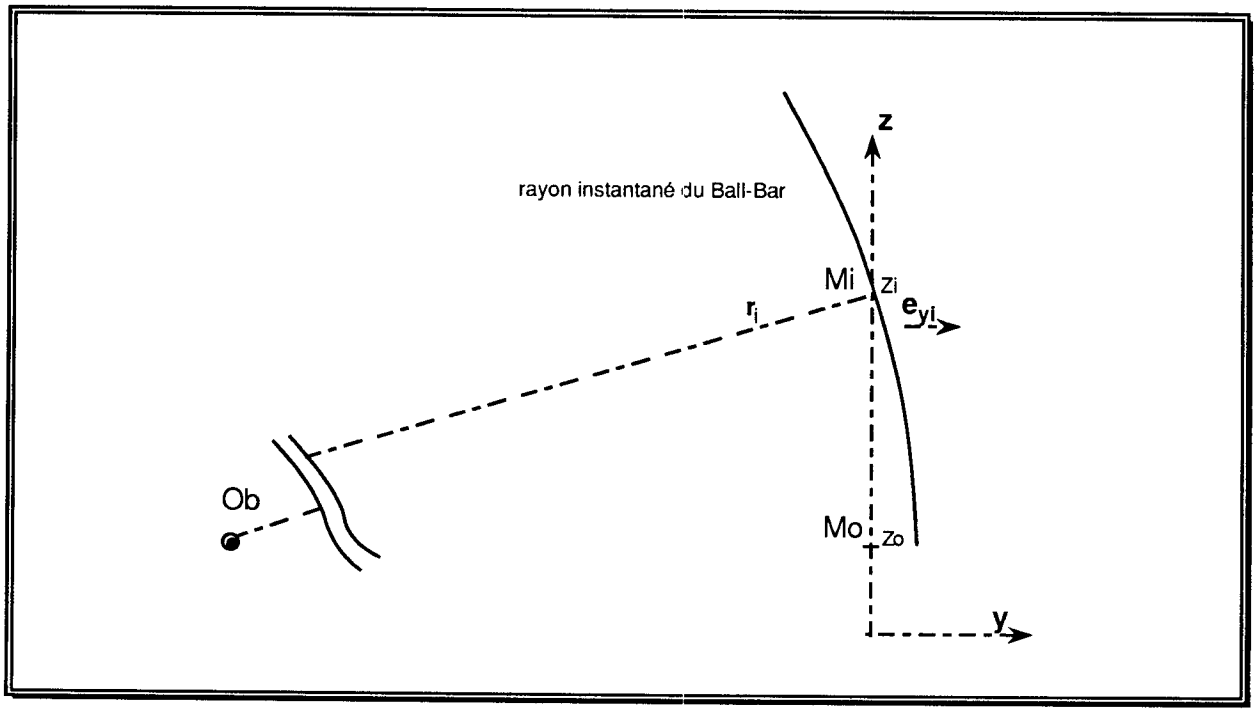


Figure I-30 : correction de la mesure dans le plan horizontal (**xOz**)

Nous avons alors :

$$r_i \cos \alpha = d(\mathbf{O_b M_o})$$
$$r_i \sin \alpha = d(\mathbf{M_o M_i}) = z_i - z_o$$

en considérant que z_i, la coordonnée de la trajectoire du robot au point M_i est une bonne approximation au regard des calculs qui suivent.

Nous en déduisons : $\operatorname{tg} \alpha = \dfrac{z_i - z_o}{d(\mathbf{O_b M_o})}$

En projetant l'écart entre le rayon mesuré R_i et le rayon théorique r_i sur la direction **y**, nous obtenons finalement :

$$e_i = (R_i - r_i) \cos \alpha = R_i \cos \left(\operatorname{Arctg} \frac{z_i - z_o}{d(\mathbf{O_b M_o})}\right) - d(\mathbf{O_b M_o})$$

d'où :

$$e_i = (R_o + m_i) \cos \left(\operatorname{Arctg} \frac{z_i - z_o}{d(\mathbf{O_b M_o})}\right) - d(\mathbf{O_b M_o})$$

avec m_i la grandeur mesurée sur le capteur.

2.2.6.5. avantages et inconvénients de la méthode

Le principal inconvénient de cette technique de mesurage est qu'il faut de la place pour faire passer le corps du capteur au milieu du site, ce qui n'est pas toujours facile. A ce sujet, il faut remarquer que les liaisons magnétiques au niveau des rotules constituent un véritable gage de non-détérioration de l'instrument.

Sa facilité de mise en oeuvre constitue son intérêt, pour peu que la méthodologie soit bien traitée mathématiquement. Ce système est en cours d'industrialisation, mais lors de sa commercialisation, le coût du système complet sera très nettement inférieur à tous les systèmes présentés auparavant.

2.2.7. métrologie à la règle

Le mesurage à la règle est le réflexe normal de tout métrologiste pour mesurer une rectitude.

2.2.7.1. principe de mise en oeuvre

Il s'agit d'utiliser une référence matérielle étalon, une règle étalon en marbre par exemple, de la placer parallèlement à la trajectoire à caractériser, puis de mesurer la distance entre les points de la trajectoire et les points correspondants sur la référence.

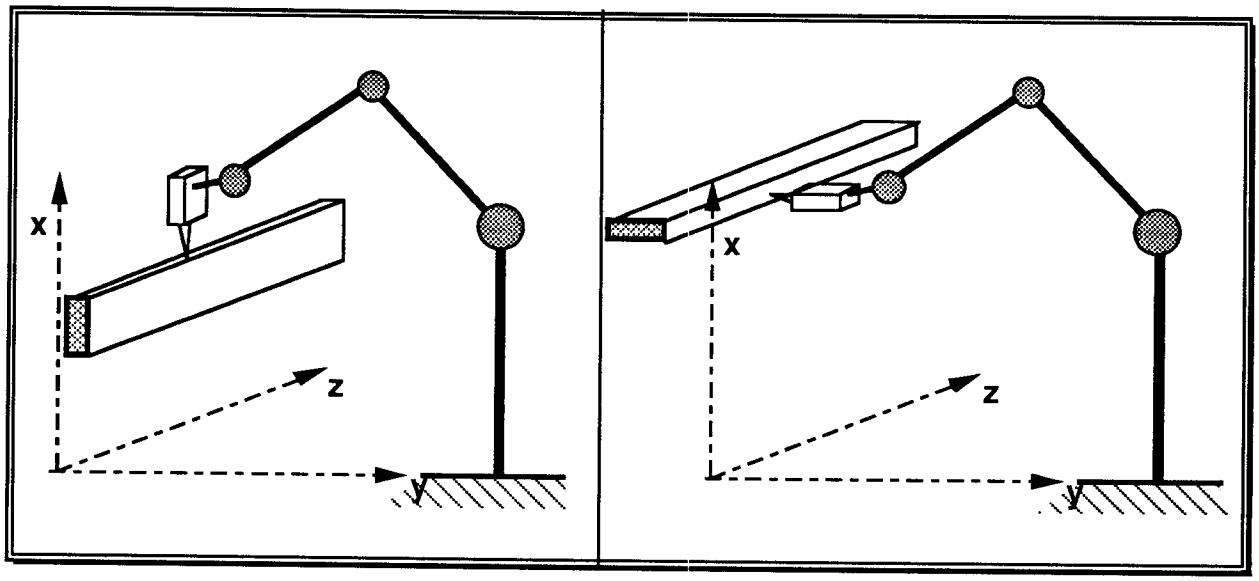


Figure I-31 : mesure à la règle étalon et au capteur laser

2.2.7.2. avantages et inconvénients de la méthode

Ce système n'est pas commercialisé en l'état et il faut acheter les composants séparément.

Le relevé peut correspondre directement selon le positionnement de la règle aux valeurs des e_{xi} et e_{yi}. Le calcul des défauts de rectitude est donc dans ce cas extrêmement simple. Néanmoins, il faut pouvoir installer la règle au sein du site robotisé, ce qui d'une part n'est pas facile et d'autre part peut engendrer des risques de collision avec le SMA.

2.3. Approche technologique de la modélisation des robots industriels

Dans ce paragraphe, nous allons introduire les fondements de la modélisation vers laquelle nous allons tendre. Pour cela, nous partirons d'une analyse de la pertinence des éléments actuellement utilisés pour caractériser les performances des robots. Puis, nous ferons un rapide tour d'horizon des très nombreux et très différents travaux consacrés à des modélisations plus fines du comportement des robots. Enfin, nous dégagerons au travers d'une analyse les différents types de composants locaux dont nous simulerons le comportement technologique, source de différentes erreurs.

2.3.1. Performances actuelles des robots industriels

2.3.1.1. Définition traditionnelle de leurs performances

Les performances d'un robot industriel sont abordées sous leurs aspects techniques, humains et économiques. Nous laisserons de coté les deux derniers, sans rapport direct avec notre problématique, pour nous intéresser uniquement à l'aptitude technique d'un robot à effectuer une tâche robotisée. Nous distinguerons 8 caractéristiques usuellement rencontrées :

a : le volume atteignable

Il s'agit de l'ensemble des points de l'espace que les différentes combinaisons de mouvement des segments du SMA permettent d'atteindre. Ce volume est toujours défini par ses limites, qui se trouvent le plus souvent être des positions extrêmes : positions de fin de courses, positions à élongation maximale... Les objets à manipuler et la trajectoire associée à la tâche doivent être intégralement à l'intérieur du volume atteignable.

b : l'aptitude à l'orientation de l'effecteur

Selon les postures, et même pour les SMA à 6 ddl, l'ensemble des orientations de l'effecteur n'est pas possible (problème de courses limitées sur certains axes, par exemple). A l'inverse, il y a des zones volumiques où plusieurs postures sont envisageables pour une même association <position, orientation> imposée par la tâche.

c : la charge utile

Elle dépend elle aussi de la posture. Si elle est indiquée pour une posture correspondant à l'élongation maximale du robot, elle peut être généralement dépassée lorsque le robot travaille en posture repliée, et vice versa.

d : la précision en position

C'est la caractéristique pour laquelle les constructeurs de robot sont le plus évasifs. Nous trouvons deux solutions : soit l'indication de la plus mauvaise surface d'erreur en position, soit un relevé topographique de ces surfaces. Les résultats annoncés sont généralement médiocres, et correspondent le plus souvent à des valeurs moyennes.

Pour donner une image plus satisfaisante de leurs machines, les constructeurs de robots préfèrent généralement indiquer la précision de répétabilité, qui, elle, est excellente, souvent très proche de la résolution.

e : la résolution

C'est la plus petite modification du SMA à la fois observable et contrôlable par le système de commande. Beaucoup d'auteurs l'assimilent à la résolution des capteurs, mais cela dépend en réalité de l'allure de la boucle proprioceptive. Cela est exact dans le cas où les capteurs mesurent effectivement la position des segments en rotation, mais c'est faux lorsque les capteurs sont placés sur l'actionneur. L'ensemble transmission et segment fonctionnent alors en boucle ouverte, et leurs phénomènes internes (jeu, frottements, stip slick, déformations...) ne sont pas pris en compte :

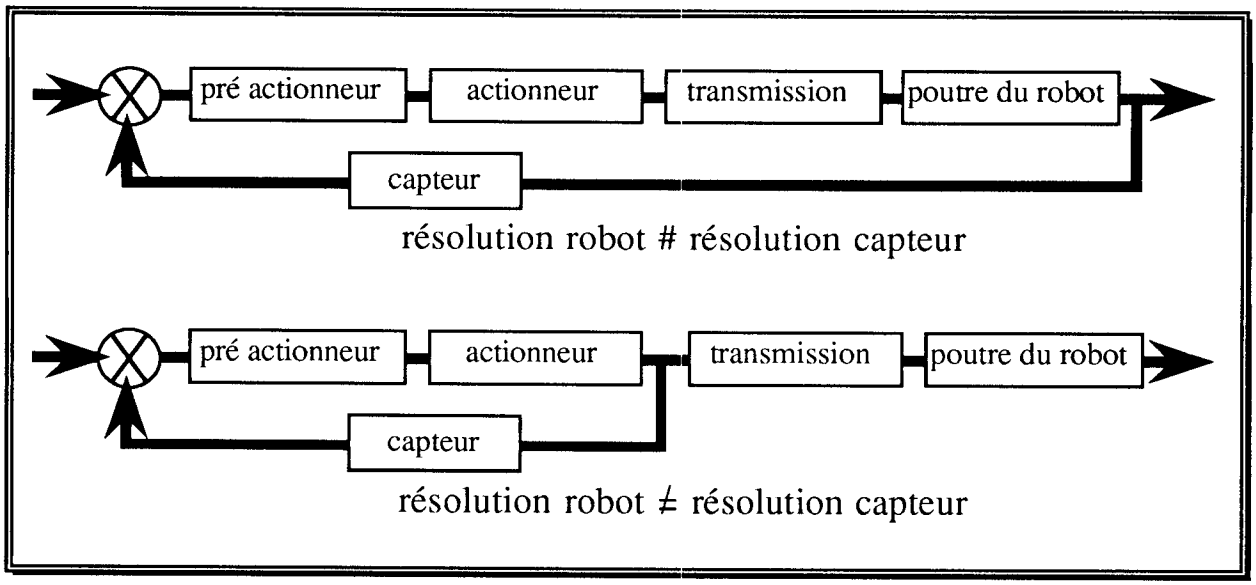


Figure I-32 : résolution robot et résolution capteur

f : la vitesse

C'est un facteur de productivité, puisque le temps de réalisation de la tâche donne la cadence de travail. Elle est donnée pour l'effecteur de manière absolue dans le repère Ro du robot.

g : la fiabilité

Il s'agit du taux de pannes, généralement sous la forme d'un pourcentage du temps de fonctionnement.

h : l'aptitude à la synchronisation :

Elle est définie par les possibilités de communication du système robotisé avec son environnement.

Nous remarquerons qu'aucune des caractéristiques que nous venons de définir ne recouvre les notions de performances métrologiques ou de capabilité, la précision n'étant pas suffisamment définie.

2.3.1.2. Performances mesurées actuellement au sens de la métrologie dimensionnelle sur les robots industriels

Nous baserons cette analyse sur les résultats d'une étude présentée par [CLU93], en la considérant comme représentative de performances similaires constatées par les autres constructeurs de robots industriels.

trajectoire	point à point	continue	point d'arret
loi de mouvement	10 mm à 500 mm	0 mm à 100 mm	0 mm
transcodage	0,001 mm	0,001 mm	0,001 mm
modèle du bras théorique	0 mm à 10 mm	0 mm à 10 mm	0 mm à 10 mm
asservissements	1 mm à 10 mm	1 mm à 5 mm	0 mm
résolution des capteurs	0,05 mm	0,05 mm	0,05 mm
outil	0,1 mm à 0,5 mm	0,1 mm à 0,5 mm	0,1 mm à 0,5 mm
position pièce "brute"	< 50 mm	< 50 mm	< 50 mm
position pièce "calée"	0,5 mm à 1 mm	0,5 mm à 1 mm	0,5 mm à 1 mm
géométrie pièce	< 10 mm	< 10 mm	< 10 mm

Figure I-33 : bilan des sources d'erreurs (d'après [CLU93])

Si nous analysons ce tableau, il ressort que c'est sur le modèle du bras théorique que les progrès en ce qui concerne la précision peuvent être les plus significatifs.

En effet, la méconnaissance des lois de mouvement lors de la programmation hors ligne (en CFAO) entraîne des erreurs très importantes : pour une même trajectoire programmée, les mouvements effectués par des robots différents peuvent n'avoir rien de commun. Ces erreurs disparaissent dès que le système de CFAO intègre un post processeur capable de reproduire le comportement exact de la baie de commande face à une trajectoire donnée.

Ce problème fondamental de l'interprétation des programmes et de leur traduction en éléments de commande a fait l'objet d'une action d'harmonisation entre constructeurs de robots industriels, fournisseurs d'équipements de CFAO Robotique et utilisateurs, les premiers communiquant aux seconds les post processeurs adéquats correspondant à leur matériel. Nous pouvons donc à terme espérer voir se réduire cette source d'erreurs.

Le transcodage, c'est à dire la traduction du programme élaboré et simulé en CFAO Robotique dans un langage sémantiquement et syntaxiquement compréhensible par le système de commande, ne pose aucun problème.

Les asservissements sont quant à eux une cause importante d'incertitude, et cela ne vient pas d'un manque de précision des capteurs proprioceptifs. Si nous nous référons aux remarques que nous avons énoncées au paragraphe 2.1.1., ceci constitue un faux problème au regard de la géométrie finale de la trajectoire. De plus, les chiffres annoncés dépendent essentiellement de l'adéquation entre les conditions d'utilisation et les réglages des paramètres des asservissements.

Les autres sources d'erreurs sont intimement liées au procédé et à l'outillage (pièces, outils, systèmes de positionnement et de maintien en position). Vu le domaine d'application traité par cet auteur (mécano soudage sur des pièces en tôle de grande dimension), les chiffres annoncés n'ont rien d'étonnant.

Enfin, nous constaterons que sur les points d'arrêt, seules subsistent les erreurs dues au modèle théorique du bras.

D'autres auteurs issus de l'industrie, [GAR93] ou [CHA93] par exemple, citent des chiffres tout à fait comparables.

2.3.1.3. Analyse métrologique de la précision des robots industriels

Toujours d'après la même étude [CLU93], pour un même robot, 60 % des points de soudure ont une précision inférieure à ± 3 mm, alors qu'elle est supérieure à ± 10 mm pour 10 % d'entre eux.

Nous constatons que cette imprécision est plus due à un manque de justesse qu'à un manque de fidélité. En effet, la précision, qui est l'aptitude du robot à être lors du fonctionnement dans des positions réelles proches des positions souhaitées et programmées, est la résultante de la justesse et de la fidélité. La justesse caractérise, pour une même position programmée,

l'aptitude de l'ensemble des positions observées successivement à être réparties de manière centrée autour de la position programmée, alors que la fidélité caractérise la largeur de cette dispersion.

Pour un triplet constant (trajectoire, posture, charge) de fonctionnement, la fidélité d'un robot est excellente. Cela est dû à la très bonne répétabilité des asservissements et des composants mécaniques. C'est cette qualité qui a permis à la robotique industrielle de s'implanter profondément dans les systèmes de production.

Aussi, le mesurage d'un robot doit servir essentiellement à quantifier, voire à modéliser sa justesse.

2.3.1.4. Positionnement de ces performances vis à vis du mode de programmation

Nous allons resituer cela, dans un contexte industriel, vis à vis de la programmation de tâches robotisées dont nous définirons tout d'abord la problématique.

Avant d'atteindre la phase d'exécution, deux phases de préparation sont nécessaires : une préparation en temps masquée, hors site, appelée la programmation hors ligne (PHL), et une préparation sur site, qui constitue la phase de mise au point. La diminution de l'une des deux entraîne forcément l'augmentation de l'autre. De plus, lorsque l'effectif de la série diminue, alors le prix unitaire de la PHL augmente. Lorsque l'effectif des lots diminue, alors le prix unitaire de la mise au point augmente... Cela dit, le coût horaire de la mise au point sur site est nettement plus important que celui d'un poste de CFAO Robotique.

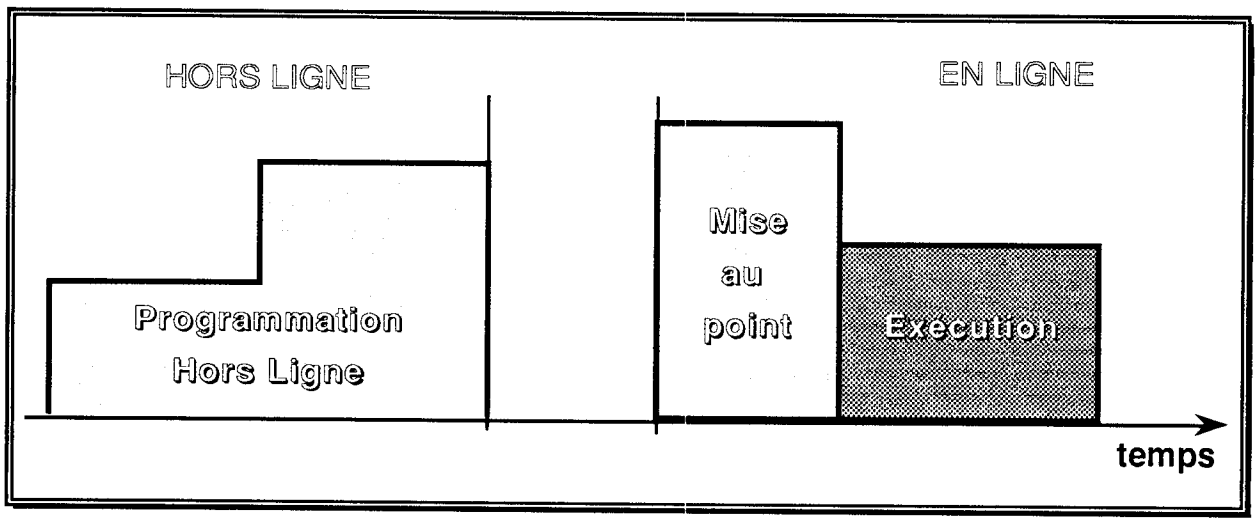


Figure I-34 : préparation des tâches robotisées

Pour programmer les tâches robotisées, il existe l'apprentissage manuel et l'utilisation de langages de programmation textuels ou graphiques.

L'apprentissage manuel, qu'il soit à base de manipulation directe du robot à la main ou à base de télémanipulation (à l'aide d'un syntaxeur ou d'une boite à bouton), consiste à enregistrer des positions et des points de passage caractéristiques de la tâche à exécuter, afin de pouvoir les faire répéter au robot. Il présente l'avantage de prendre en compte intrinsèquement tous les problèmes technologiques, en tout cas tant que l'on n'accélère pas inconsidérément le rythme d'exécution des cycles de travail.

Pour des considérations économiques évoquées ci-avant, les industriels ont cherché à développer des techniques de programmation hors site.

Il n'en est pas de même pour la programmation par langage, qui nécessite une formulation mathématique et donc théorique de la tâche à accomplir pour pouvoir visualiser le mouvement de l'objet manipulé. Cela est le cas des systèmes graphiques interactifs de programmation des robots, qu'ils soient intégrés à de gros systèmes de CFAO ou qu'ils restent dédiés, tels "Prographix" [FOR90], à la supervision d'un seul robot.

Le problème est que les imprécisions du modèle théorique du robot, ou plus exactement la non prise en compte des caractéristiques technologiques propres à chaque robot, font qu'il n'y a pas adéquation parfaite entre la tâche vue par le système de CFAO et la tâche réellement exécutée.

La seule solution consiste alors à recaler chaque point caractéristique initialement programmé sur le point réel du site robotisé, c'est à dire à compliquer sensiblement par une phase de mise au point manuelle une méthode qui était au contraire censée simplifier le travail de programmation !

Nous défendrons dans ce mémoire l'idée qu'une modélisation plus précise du comportement réel des robots industriels doit permettre de supprimer cet inconvénient majeur et donc d'atteindre les objectifs initiaux de la programmation hors ligne des tâches robotisées.

2.3.1.5. Autres types de solutions pour contourner le problème

De très nombreuses solutions ont été mises en oeuvre pour suppléer à ce problème, en compensant les erreurs. Nous nous contenterons de citer ici les deux principes les plus importants : la commande référencée capteur et les effecteurs compliants.

La commande référencée capteur utilise un capteur extéroceptif monté sur l'extrémité même du robot. Cela peut être un capteur de distance sans contact ou une caméra. Les informations issues de ce capteur sont utilisées pour effectuer une correction en ligne des consignes de commande des axes du robot. Ces techniques sont utilisées pour effectuer par exemple du suivi de joint en soudure.

Les effecteurs compliants consistent à laisser des ddl entre l'extrémité du robot et l'outil. Cette compliance peut être passive, nous trouvons alors une liaison élastique et donc déformable, ou au contraire active. Dans ce dernier cas, un préhenseur "intelligent" génère des micromouvements de compensation des erreurs, à partir d'informations issues de capteurs d'efforts, et nous avons un comportement similaire à une compliance passive, ou issues de capteurs extéroceptifs. Nous nous retrouvons dans une situation proche de la commande référencée capteur.

2.3.2. Etat des recherches

De très nombreux travaux ont été menés à l'échelle mondiale sur le problème des écarts entre le comportement réel des robots industriels et leur comportement théorique. Ces travaux se caractérisent par des approches diffluentes et complémentaires. Nous nous restreindrons dans le cadre de ce mémoire à faire le bilan des travaux menés en France, tant sur le plan universitaire (une demi-douzaine de thèses de Doctorat : [RIS81], [PAY85], [BRI87], [YAZ88], [MIT92] et [CAE93]) que dans l'industrie, tant chez les constructeurs de robots [CHA93], [CLU93] que chez des utilisateurs [GAR93]. En ce qui concerne les travaux étrangers, ils sont d'origines diverses, répartis dans plusieurs pays, en Europe [HEN88], [KOS91], en Israël [WEI91], en Australie [TRE87] et dans le sud-est asiatique [BOR91]. La très large majorité de ces travaux restent néanmoins d'origine américaine [HAY85], [WHI86], [ROT87], [SHA87], ou liés à des universités américaines [CHE87]. Le lecteur trouvera d'excellentes bibliographies concernant ces travaux chez [CAE93] ou chez [MIT92] pour l'aspect spécifiquement dynamique.

2.3.2.1. Etat des recherches universitaires en France

A notre connaissance, G. Ris a présenté en 1981 la première thèse française sur ce thème [RIS81]. Le problème de fond concerne l'interchangeabilité des parties opératives en cas de pannes. Le système de production envisagé est constitué d'un ensemble de robots industriels de soudure $\{R_1, R_2, ..., R_n\}$ travaillant à la chaîne et exécutant donc

successivement des tâches différentes $\{T_1, T_2, ..., T_n\}$. Pour préserver la productivité d'une telle installation, il est nécessaire que sa non-disponibilité totale soit très inférieure au cumul des non disponibilités de chacun de ses constituants. Aussi, la politique de maintenance curative choisie consiste à retirer le plus rapidement possible un robot R_k en panne de la chaîne de production pour le remplacer par un robot de secours R_s. La réparation est ainsi effectuée hors ligne et le robot R_k devient, lorsqu'il est réparé, le nouveau robot de secours R_s'. Malheureusement, chaque robot R_i a des caractéristiques géométriques sensiblement différentes et le programme P_k prévu pour la tâche T_k et le robot R_k donnera un autre résultat sur le robot de secours. Le but poursuivi est alors d'adapter de manière préventive l'ensemble des programmes P_i aux caractéristiques du robot de secours. Ris énumère un grand nombre de sources d'erreurs non prises en compte dans les modèles théoriques, et proposent cinq méthodes d'identification basées sur la minimisation de la norme des écarts au sens des moindres carrés. Le tout est basé sur un opérateur mathématique $\oplus$ qui permet de cumuler translation t et rotation r :

Soit $M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ t_1 & r_1 \end{bmatrix}$ et $M_2 = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ t_2 & r_2 \end{bmatrix}$, alors $M_1 \oplus M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ t_1+t_2 & r_1 \cdot r_2 \end{bmatrix}$

Les changements de repère entre chaque axe se font alors grâce à des matrices M_i avec $M_i = M_i \oplus e_i$, M_i étant la matrice théorique et e_i la matrice de correction. L'ensemble des e_i permet de constituer une carte d'identité pour chaque robot. En fin de compte, cette étude est très intéressante, car elle intègre l'ensemble des concepts de base pour résoudre ce type de problématique, mais elle est insuffisante, n'étant mise en oeuvre que pour des erreurs de géométrie et de capteurs.

D. Payannet, dans [PAY85], introduit l'utilisation de matrices homogènes pour le passage entre repères consécutifs tout au long de la chaîne cinématique du porteur. Il définit ce passage A_i^{i-1} comme étant le produit de deux matrices, la première représentant la partie déterministe du changement de repère et la seconde la partie aléatoire :

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} Ri_{11} & Ri_{12} & Ri_{13} & Ti_1 \\ Ri_{21} & Ri_{22} & Ri_{23} & Ti_2 \\ Ri_{31} & Ri_{32} & Ri_{33} & Ti_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 1 & Ei_{12} & Ei_{13} & Ei_{14} \\ Ei_{21} & 1 & Ei_{23} & Ei_{24} \\ Ei_{31} & Ei_{32} & 1 & Ei_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dans un premier temps, Payannet fait abstraction des phénomènes aléatoires ($Ei_{xy} = 0$) et recherche uniquement les erreurs systématiques contenues dans

les termes Ri_{xy} et Ti_{xy} tout d'abord dans un espace particulier, afin de reconstituer l'erreur dans tout le volume utile du robot par une interpolation de Lagrange, ou ensuite en identifiant tous les paramètres influant sur son comportement. La correction des consignes est envisagée dans l'espace de la tâche, dans celui des variables articulaires ou à l'aide d'un modèle variationnel. Dans un second temps, les erreurs aléatoires sont traitées de manière statistique, le tout débouchant sur une commande stochastique, à l'aide d'un filtre de Kalman, de manière à minimiser en permanence la somme quadratique des erreurs du reconstructeur d'état et donc les effets des erreurs aléatoires. Il s'agit d'une méthode élégante pour édulcorer le problème.

J. N. Bricout [BRI87] est le premier à aborder en France de manière fine le comportement dynamique des structures mécaniques. Abandonnant l'idée que les poutres formant le robot sont assimilables à des solides indéformables, il prend en compte le comportement élastique de leurs matériaux et soumet ces solides élastiques à tous les effets d'inertie dus au mouvement. Il utilise des méthodes énergétiques (Lagrange), mais reconnaît la validité de résultats fournis par la Résistance des Matériaux pour l'étude des segments. Ces derniers sont régis en définitive par des équations différentielles du second ordre :

$$[M_i]\,\ddot{\mathbf{q}}_i + 2\,[C_i]\,\dot{\mathbf{q}}_i + [K_i]\,\mathbf{q}_i + \mathbf{F}_i = \mathbf{0}$$

avec :
- $[M_i]$: matrices de masses,
- $[C_i]$: matrices d'amortissement,
- $[K_i]$: matrices de raideur,
- $\mathbf{q}_i$: vecteur de variables généralisées,
- $\mathbf{F}_i$: vecteur de forces de sollicitation.

Malheureusement, si Bricout s'intéresse aux phénomènes transitoires, aux problèmes de résonance et à tous les aspects vibratoires, il n'aborde pas l'influence des déformations engendrées sur la géométrie finale de la trajectoire.

A. Yazman [YAZ88] aborde le même type de problématique, mais fait reposer sa modélisation sur la technique des Bond-Graphs, bien adaptée aux systèmes multiénergétiques couplés. Cela rend son travail très spécifique sur la forme, mais les méthodes développées restent fondées sur le Principe Fondamental de la Dynamique, en utilisant le formalisme de Newton-Euler, les travaux virtuels de d'Alembert, la méthode de Lagrange...

P. Mitrouchev, dans [MIT92], traite lui aussi du comportement dynamique des structures mécaniques des robots industriels. Mais comme [BRI87], il ne considère que les aspects purement vibratoires, recherche des modes de résonances, identification des fonctions de transfert. Sur cet aspect, la bibliographie est extrêmement complète, menée sur l'essentiel des travaux publiés au niveau international, et la méthode mathématique développée donne des résultats de simulation quasiment en accord avec les résultats expérimentaux. Mitrouchev estime que les écarts constatés proviennent de certaines approximations faites par manque de connaissances technologiques. Cela dit, l'implication sur la qualité des trajectoires ou du positionnement n'est pas abordée et les conclusions sur la politique de commande (choix des fréquences d'excitation et d'échantillonnage) sont inexistantes : en effet, les actionneurs sont bloqués, et en l'absence de grands déplacements, le robot est quasi statique et son comportement se ramène donc à un comportement vibratoire !

La démarche la plus intéressante sur le plan de l'analyse métrologique du comportement des robots est l'oeuvre de J. L. Caenen [CAE93]. Cela s'explique facilement, car ce travail est très proche des préoccupations industrielles et a été appliqué sur une grande variété de robots. S'appuyant sur l'emploi des paramètres de Denavit-Hartenberg modifiés, Caenen remarque que le modèle résultant est linéaire par rapport aux paramètres dimensionnels et non linéaire par rapport aux paramètres angulaires. Aussi, dans un souci de simplicité, il fait l'hypothèse d'orientations inter-axes parfaites. Le seul paramètre angulaire traité (pour chaque axe) est l'initialisation angulaire, c'est à dire l'offset entre la position "zéro" de l'axe et le top zéro du capteur angulaire. L'identification des paramètres restants est basée sur la minimisation de la norme euclidienne de l'écart $\mathbf{X}_{\text{réel}} - \mathbf{X}_{\text{modèle}}$:

$$\text{MIN} \left(\| \mathbf{X}_{\text{réel}} - \mathbf{X}_{\text{modèle}} \|^2 \right)$$

Il annonce avec cette méthode des réductions expérimentales des trois quarts de l'erreur initiale (77 %), avec des corrections élémentaires sur chaque paramètre d'environ quelques dixièmes de millimètre ou de degré. Puis il propose une méthode pour modéliser les effets de la pesanteur. Cette méthode, qui n'a pas de réelle signification physique ou technologique, consiste à introduire sur chaque bras une petite rotation dans l'espace, cette rotation étant proportionnelle au moment du torseur d'interefforts s'y appliquant. Les paramètres sont alors des pseudo-raideurs et sont identifiés par une méthode similaire à celle des paramètres géométriques. Les corrections élémentaires

sont petites (quelques centièmes de millimètres ou de degrés), et l'amélioration globale est faible (4 %). Ce qui est le plus troublant dans cette approche, c'est qu'une partie des défauts est prise en compte par rapport à leurs causes, avec une modélisation déterministe et qu'une autre partie est prise en compte par rapport à leurs effets, avec une modélisation stochastique.

Nous allons maintenant voir pourquoi le travail de Caenen, qui ne nous semble pas complet, répond bien aux exigences d'identification des robots industriels actuels.

2.3.2.2. Etat des recherches industrielles

Le monde industriel peut être caractérisé par son pragmatisme : face à un problème, la meilleure solution est celle qui présente le meilleur rapport $\frac{\text{résultats}}{\text{coût}}$. Aussi, dans le cadre des robots industriels actuels, où les problèmes de rigidité des segments ont été réglés par un surdimensionnement de ces derniers, l'utilisation de modèles tenant compte des déformations élastiques n'est pas un passage obligé.

Les constructeurs, [CHA93], [CLU93], sont quasiment d'accord sur la distribution des origines des erreurs constatées, distribution illustrée par la figure I-35.

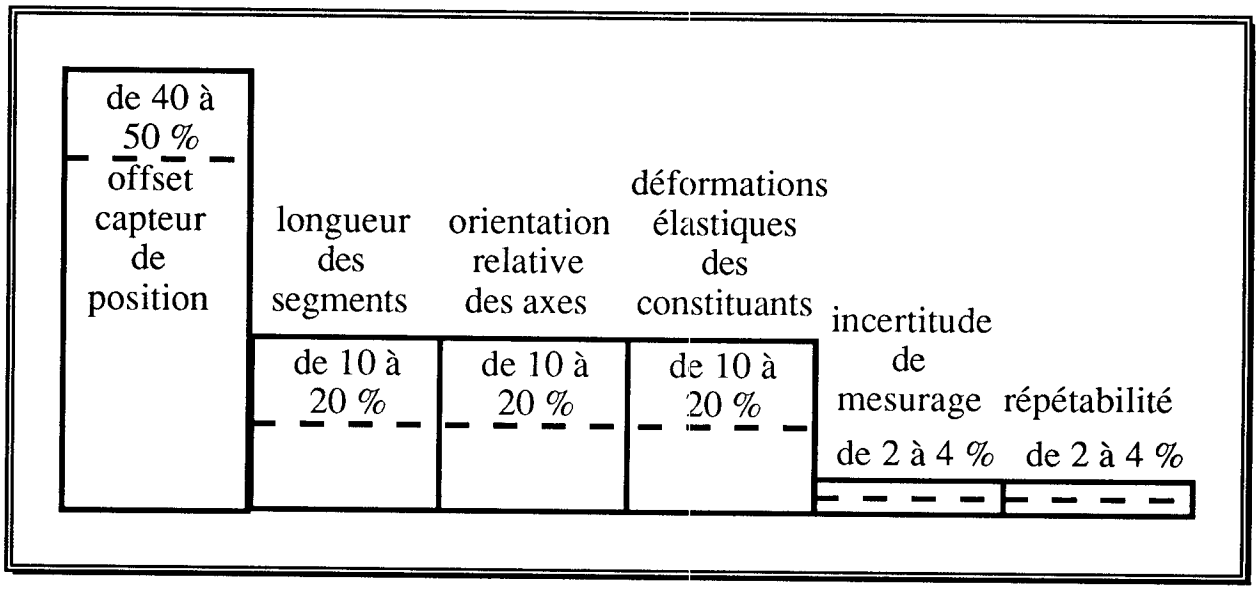


Figure I-35 : répartition actuelle des causes d'erreurs, pour des architectures mécaniques conventionnelles de porteurs

Nous y constatons bien que les trois causes principales représentent des défauts technologiques constants qui peuvent être facilement intégrés dans un

modèle théorique classique, par exemple par ajustement des paramètres de Denavit-Hartenberg.

Nous remarquerons d'ailleurs que cette distribution correspond tout à fait aux problématiques traitées par [CAE93].

Toutefois, nous observons qu'elle ne serait, bien entendu, pas la même si une conformation du modèle théorique aux paramètres réels du robot était effectuée lors de son montage, de son test, ou de sa maintenance, ou si ses segments étaient moins rigides.

Cette dernière préoccupation nous a amené à développer un modèle plus complet.

2.3.3. Identification et analyse des sources d'erreurs technologiques existant potentiellement sur un robot industriel

Nous proposons de retrouver l'influence sur les paramètres du modèle théorique des acteurs technologiques que sont tous les éléments mécaniques de la boucle proprioceptive.

2.3.3.1. Facteurs d'influence sur la posture effective du robot

Nous aborderons cette analyse à partir des synthèses générales présentées par plusieurs industriels ([CHA93], [CLU93]), et nous les compléterons à l'aide de la décomposition proposée au paragraphe 1.1.3.4. et illustrée par la figure I-8. Cela nous donne la figure I-36.

Nous avons déjà mis en évidence que l'origine des problèmes se situe dans l'absence de modélisations des imperfections de la partie mécanique, appelée "robot" sur la figure.

Il nous faut donc analyser plus finement ces comportements et passer d'une modélisation de niveau $\boxed{3}$ à une modélisation de niveau $\boxed{4}$.

Nous remarquerons que toutes les sources d'erreurs énoncées se retrouvent de manière découplée au niveau de chaque segment.

Le segment sera donc naturellement l'entité de base dans notre approche de la modélisation d'un robot.

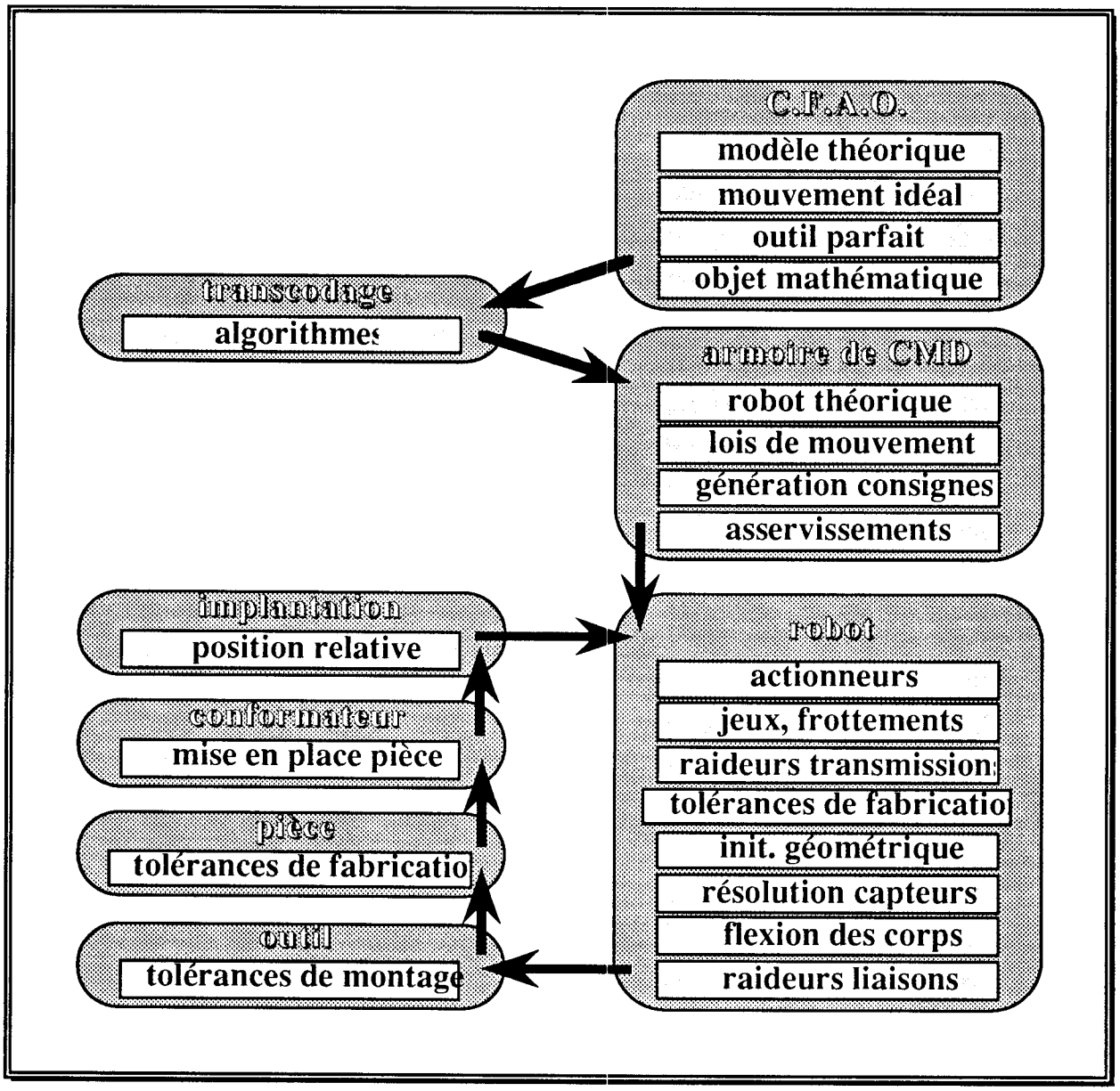


Figure I-36 : bilan général des causes d'erreurs

2.3.3.2. décomposition d'un segment

Nous trouverons dans un segment l'ensemble des éléments constituant une boucle proprioceptive élémentaire. Concernant plus particulièrement les éléments mécaniques, nous trouverons :

- une liaison cinématique avec le segment amont,
- un corps de type poutre (au sens de Bernoulli-Euler),
- une transmission entre l'actionneur et le corps.

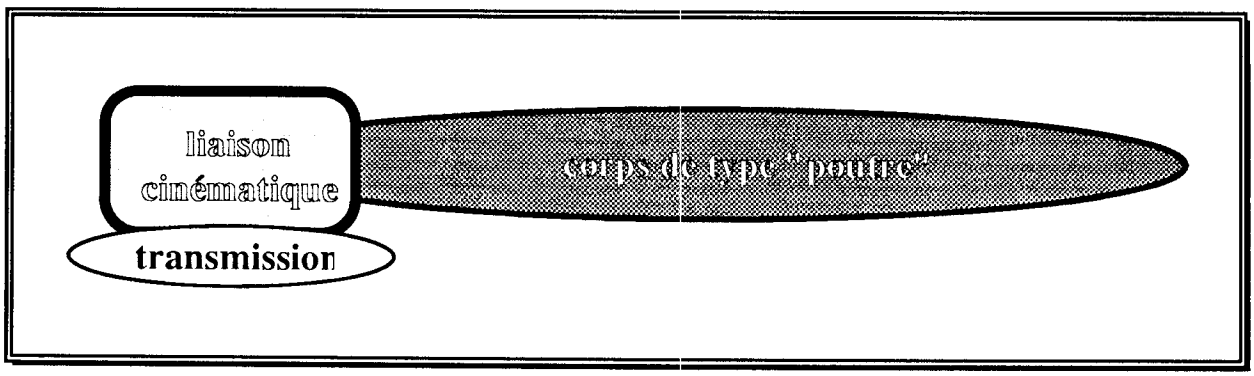


Figure I-37 : composition d'un segment

Chacun de ces constituants est à l'origine d'un certain nombre de défauts. Cette décomposition augmente donc le nombre de caractéristiques à identifier. Mais elle permet parallèlement de simplifier fortement le processus d'identification en se basant sur des phénomènes physiques et/ou technologiques ayant des lois de comportement inspirées de la pratique et devant donc rester réalistes.

3. Conclusion

Face à la problématique que nous nous proposons d'aborder, nous avons mis en évidence les insuffisances des modèles théoriques courants (MGD, MGI...) et celles des modèles trop tournés vers l'analyse spectrale. Notre objectif dans ce travail sera d'avoir une approche métrologique correspondant à des critères industriels liés à la tâche, ceci avec un maximum de pragmatisme tout en se réservant des possibilités ultérieures d'ouverture. Cela signifie donc de proposer des solutions simples de modélisation pour toutes les causes identifiables, y compris celles ayant un intérêt moindre avec les robots industriels actuels, et pouvant être mises en oeuvre à l'aide d'une culture technologique courante en construction mécanique.

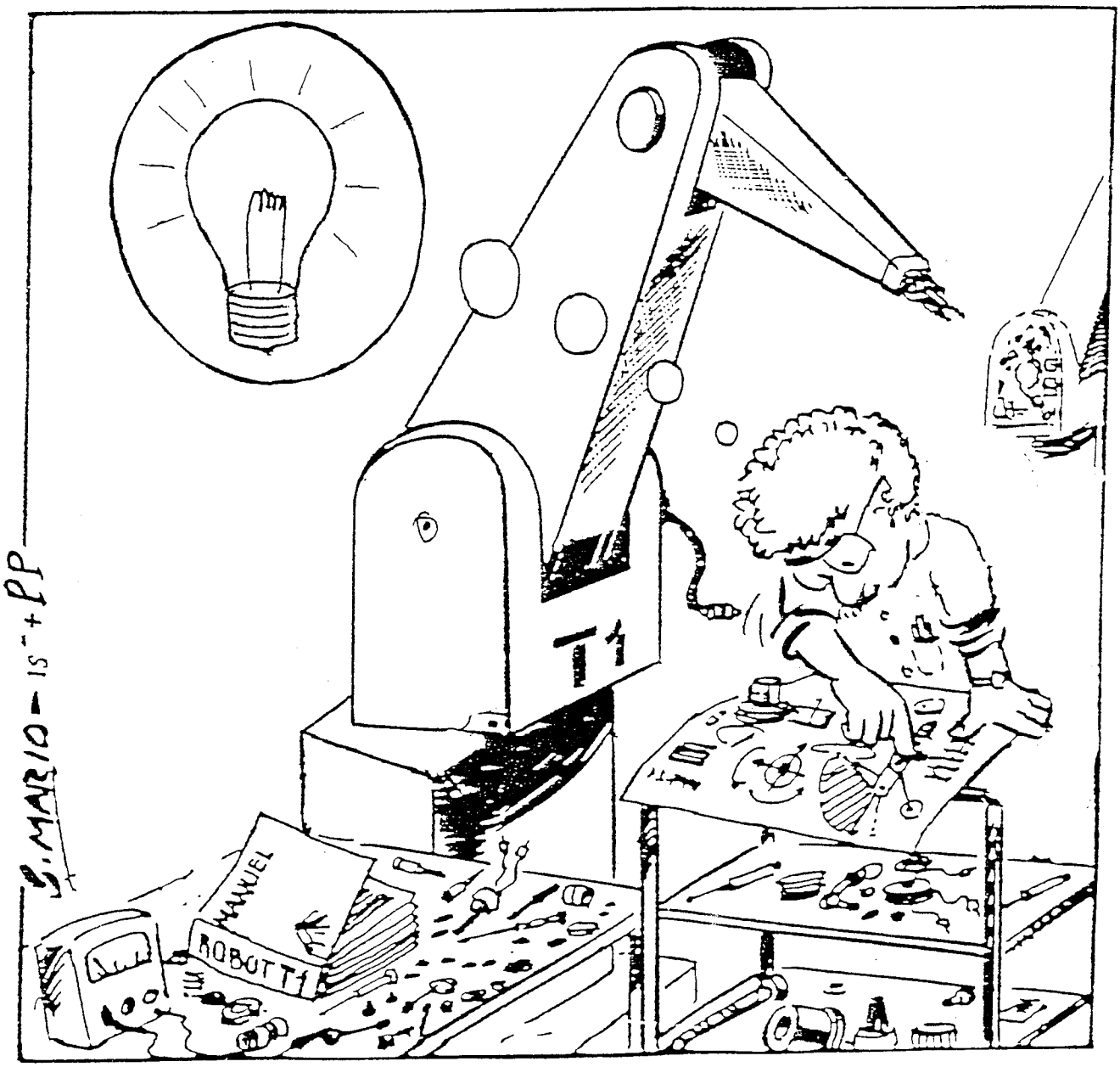
Nous avons parcouru également les techniques de métrologie des performances d'un robot industriel ainsi que l'utilisation des relevés effectués. Nous observerons que la précision des résultats obtenus est liée à l'investissement financier initialement effectué.

Nous nous sommes fixés comme objectif d'être indépendant du moyen de mesurage, d'utiliser au maximum l'existant et de privilégier la simplicité, tant du point de vue des fondements de la modélisation en robotique que de la modélisation des comportements technologiques spécifiques. L'originalité de ces travaux tient donc plus de l'articulation entre ces modélisations, rendue nécessaire par notre approche technologique du problème.

Notre deuxième chapitre commencera par un exposé des fondements du modèle que nous proposons, puis nous mettrons en place ce modèle de robot et les lois mathématiques correspondantes. Nous détaillerons le cas pseudo-statique et nous envisagerons les implications de la projection sur le cas dynamique, avec différentes hypothèses d'utilisation du robot. Enfin, nous aborderons les techniques d'identification des paramètres de ce modèle et nous proposerons une méthode spécifique à notre problématique.

Chapitre II

MODELISATION du COMPORTEMENT TECHNOLOGIQUE des ROBOTS INDUSTRIELS



1. PROPOSITION d'un MODELE incluant les CARACTERISTIQUES TECHNOLOGIQUES des ROBOTS INDUSTRIELS

1.1. Introduction à la modélisation proposée

Nous allons, dans ce sous paragraphe introductif, exposer rapidement les fondements de la modélisation que nous proposons, pour pouvoir ensuite mieux nous concentrer sur tous les points spécifiques nécessaires à son développement. Cette modélisation découle d'une décomposition fonctionnelle descendante d'un robot industriel générique, suivie d'une recomposition ascendante du modèle correspondant. Le modèle ainsi obtenu sera donc forcément un modèle paramétré, dont les paramètres seront spécifiques à chaque robot.

1.1.1. caractérisation des sources d'erreurs entre trajectoire théorique et trajectoire effective

Nous avons vu précédemment qu'un robot était assimilable à une chaîne cinématique ouverte, chaque segment de cette chaîne étant en réalité composé d'un corps, d'un actionneur et de sa transmission, d'un capteur de position et d'une liaison cinématique partielle. Pour obtenir une modélisation suffisamment fine du comportement technologique des robots, afin de pouvoir émuler leur mesurage, nous avons inventorié l'ensemble des causes d'erreurs, de dispersions ou de déformations situées dans chacun de ces composants. Nous avons constaté que, pour une posture donnée du robot, un certain nombre de facteurs provoque un défaut constant et répétitif, cela nous donnera les erreurs de paramétrisation, alors que d'autres provoquent au contraire des petites déformations variables en fonction des conditions d'utilisation, ce seront les erreurs de déformation. En effet, les résultats des calculs issus de la

modélisation classique des robots introduisent des erreurs, que nous qualifierons de défauts d'offset. Ces défauts ne proviennent pas d'une mauvaise modélisation, mais plutôt d'une mauvaise paramétrisation du modèle utilisé. Les valeurs utilisées pour ces paramètres sont le plus souvent issues des valeurs théoriques. Il est en effet courant de ne pas prendre en compte la valeur réelle du paramètre, obtenue lors de la fabrication, de l'assemblage ou du réglage. Nous distinguerons dans l'ensemble de ces décalages les écarts dimensionnels des écarts géométriques. Les erreurs de déformation sont des erreurs dues aux masses propres du robot, à celle de la charge manipulée et aux inerties, qui sollicitent les différents constituants du robot (corps, liaisons et transmissions), et qui en conséquence y créent de petites déformations élastiques. Il s'agit de phénomènes non permanents, réversibles et le plus souvent linéaires.

1.1.2. architecture globale de la modélisation

Après une description cinématique et technologique du robot, nos objectifs sont d'effectuer la simulation la plus exacte possible d'une trajectoire sous des conditions de charges données. Nous sommes alors dans une situation de véritable émulation de la partie opérative du robot et nous pouvons évaluer son comportement supposé au sens métrologique. Notre modélisation doit pouvoir traduire l'influence relative des différentes caractéristiques mécaniques de chaque composant du robot sur son comportement global. Cela sous-entend une modélisation, même simple, de chaque composant interne du porteur. Notre modèle doit donc reposer sur une décomposition fonctionnelle de ce porteur afin d'atteindre cette simplicité. Il s'agit en fait de compléter un modèle classique, théoriquement parfait, par des primitives de comportement qui ne traiteront que ces effets locaux. Cela est illustré par la figure suivante :

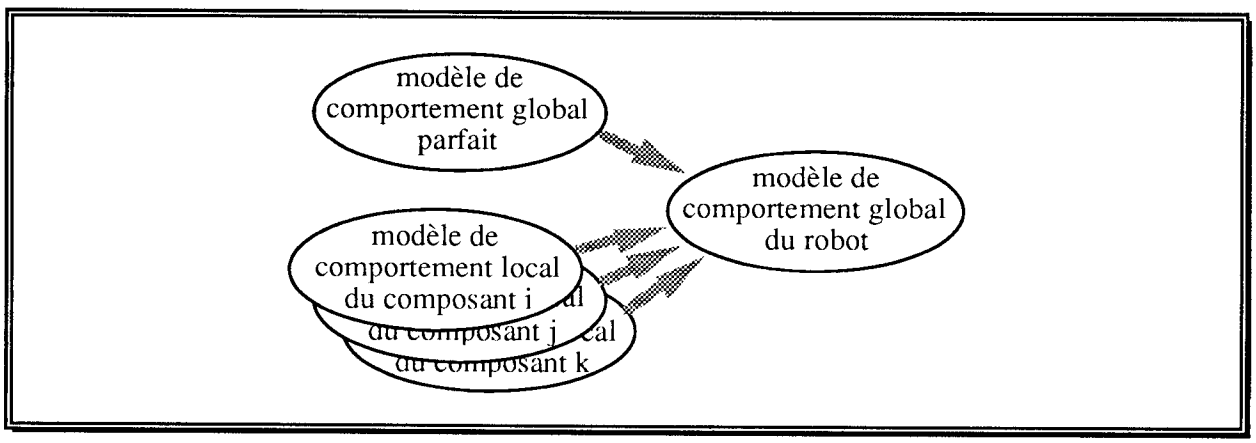


Figure II-1 : complémentarité entre les approches globale et locale

Cette figure n'est toutefois pas représentative de l'architecture de notre modèle. En effet, pour pouvoir être observé au niveau global, chaque défaut local doit subir une suite de transformations géométriques correspondant seulement à une partie du modèle de comportement global parfait.

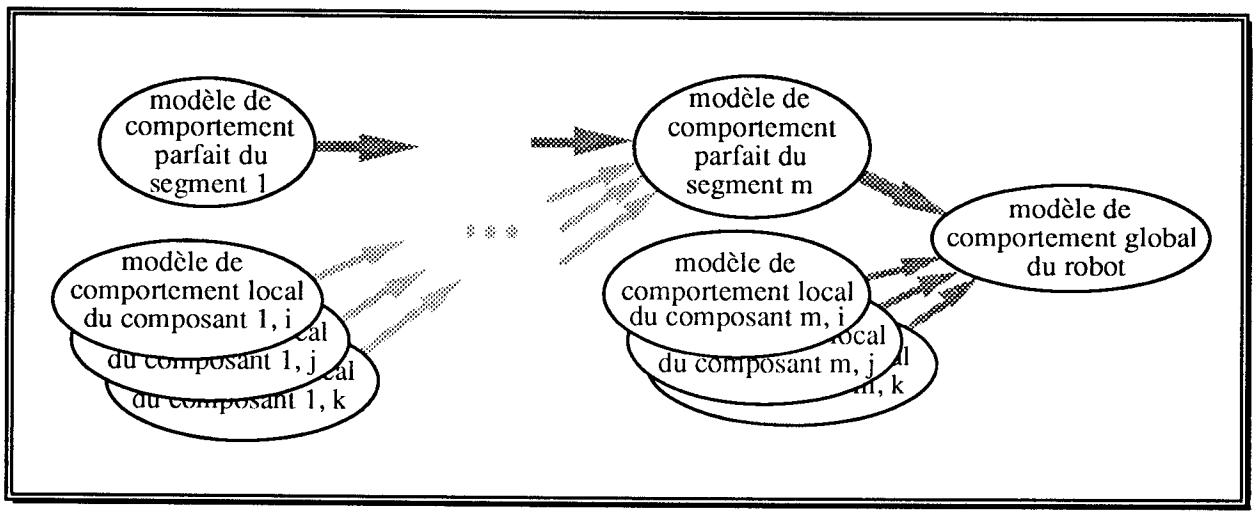


Figure II-2 : architecture du modèle d'un robot à m axes

Ces comportements locaux qui nous intéressent sont, pour une large part, fonction des efforts internes propres à chaque composant local. Aussi, pour chaque posture du robot, nous calculerons les torseurs d'interefforts liant et sollicitant tous les corps, toutes les liaisons et toutes les transmissions constituant le porteur. Les déformations élémentaires de chaque composant (corps, liaisons et transmissions) peuvent être alors calculées simplement et isolément. Chaque changement de repère du modèle géométrique parfait est alors complété par un changement de repère complémentaire correspondant aux petits déplacements résultants de tous les défauts intervenant au niveau du segment précédent.

La prise en compte cumulée de ces défauts le long de la chaîne cinématique du robot permet de reconstituer l'écart estimé au niveau de l'effecteur entre la position géométrique théorique et la position avec modélisation des comportements technologiques.

1.1.3. modélisation locale des défauts

Chaque défaut élémentaire sera modélisable par une (ou plusieurs) composante (s) d'un torseur de petits déplacements.

Dans l'espace affine à trois dimensions du site robotisé et dans l'espace vectoriel associé, nous appellerons torseur de petits déplacements $\{T_{pdp}\}$ l'ensemble défini dans ces espaces :

- d'un vecteur "résultante" noté α et représentant une petite rotation dans l'espace,

- d'un champ vectoriel noté ξ et vérifiant la relation de Varignon :

$$\xi_A = \xi_B + \mathbf{AB} \wedge \alpha$$

ξ_A représente une petite translation dans l'espace au point A.

Le torseur des petits déplacements réduit au point A dans le repère orthonormé R s'écrit par ses éléments de réduction :

$$\{T_{pdp}\} = \left\{ \begin{matrix} \alpha \\ \xi_A \end{matrix} \right\}_{/A,\, R(O,x,y,z)} = \left\{ \begin{matrix} \alpha_x & \xi_x \\ \alpha_y & \xi_y \\ \alpha_z & \xi_z \end{matrix} \right\}_{/A,\, R(O,x,y,z)}$$

avec ξ_{axe}, déplacement linéaire suivant l'axe indicé,

et α_{axe}, déplacement rotatoire autour de l'axe indicé

Nous représenterons ce petit déplacement selon la figure ci-après, mais en observant que l'écart entre les deux repères est une composition d'écarts élémentaires de très faibles amplitudes :

- trois petites translations,
- trois petites rotations :

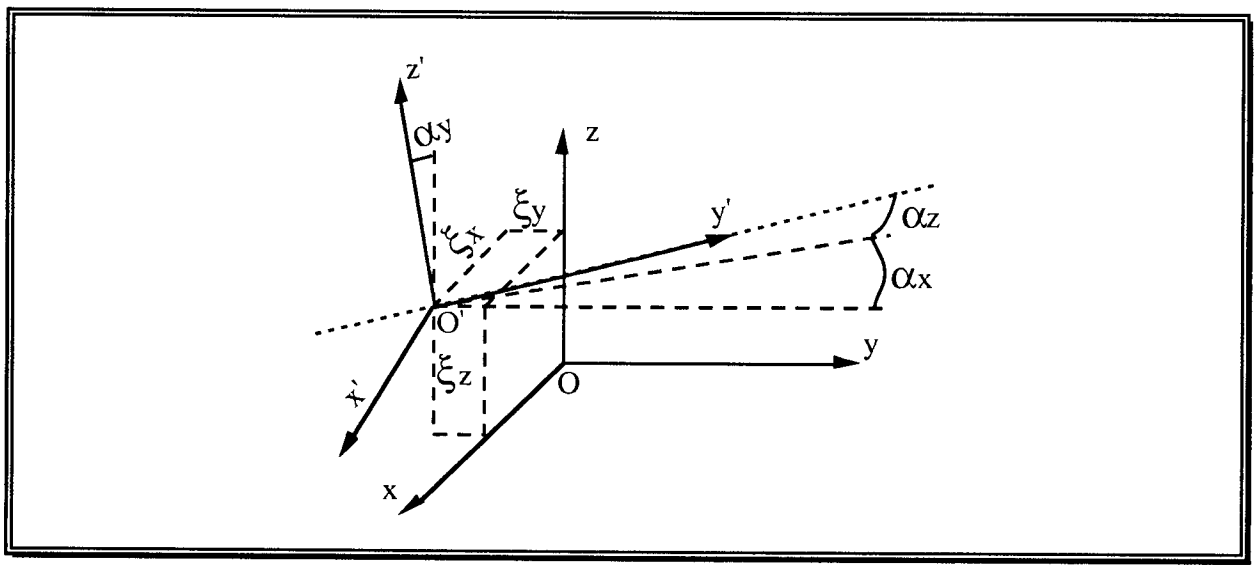


Figure II-3 : changement de repère correspondant à un torseur général de petits déplacements $\{T_{pdp}\}$

Pour chaque segment, l'ensemble des erreurs de paramétrisation est modélisé sous la forme d'un torseur paramétré de petits déplacements correspondant aux 6 degrés de liberté. Nous en verrons le détail au paragraphe

1.2.1. Les erreurs de déformation nécessitent une approche par composant élémentaire. Dans ce cas, elles sont toutes considérées comme localement proportionnelles aux sollicitations qui les provoquent. Nous verrons au paragraphe 1.2.3. que cette hypothèse est très réaliste.

Cette représentation présente l'avantage de pouvoir découpler tous les défauts élémentaires afin de les traiter un par un. Les figures suivantes illustrent les cas d'un défaut D1 engendrant un petit décalage linéaire suivant l'axe **y** et d'un défaut D2 engendrant un petit décalage angulaire autour de l'axe **z**.

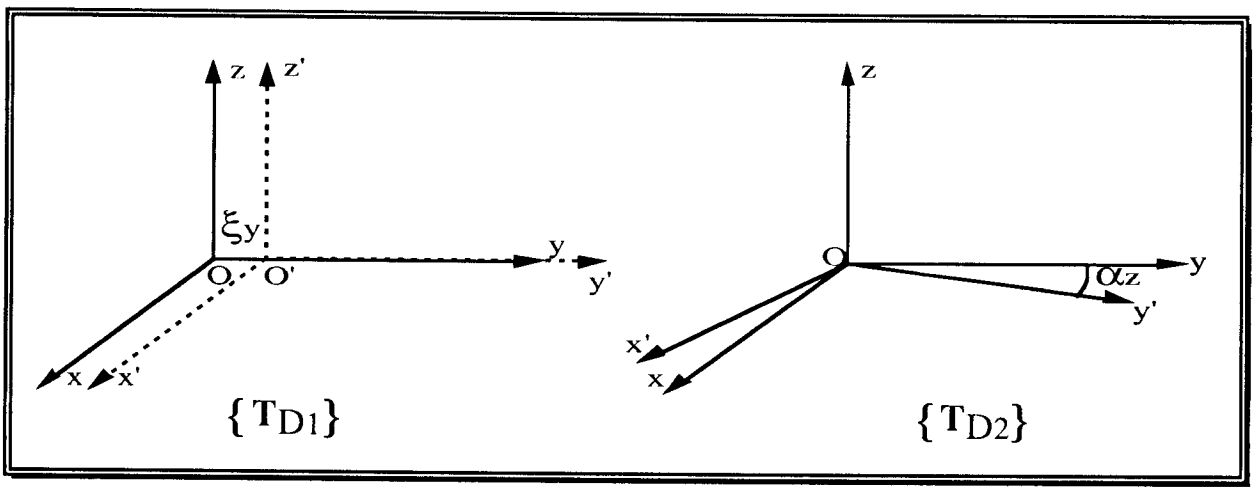


Figure II-4 : torseur de petits déplacements

1.1.4. construction du modèle

Pour chaque segment i, l'ensemble des défauts est obtenu en sommant les torseurs de petits déplacements évoqués ci avant :

$$\{T_i\} = \sum_j \{T_{Dij}\}_{/A_i,\ R(O,x,y,z)}$$

Ce torseur de petits déplacements résultant est transformé en une matrice de passage homogène qui est insérée à la bonne place dans le modèle géométrique direct du robot.

L'obtention de la position et de l'orientation finale de l'effecteur, avec prise en compte des comportements technologiques induits par les différentes sollicitations, est alors triviale.

1.2. Approche statique du comportement technologique

Nous commencerons la description de notre modélisation par l'étude du robot immobile dans une position donnée, que nous appellerons la posture **q**. Cette posture du robot polyarticulé est définie par l'ensemble des coordonnées articulaires q_i telles que :

$$\boxed{q_i = \overline{\sigma_i} \cdot \theta_i + \sigma_i \cdot d_i}$$

avec $\sigma_i = 0$ si l'articulation i est rotoïde, $\sigma_i = 1$ si elle est prismatique et $\overline{\sigma_i} = 1 - \sigma_i$.

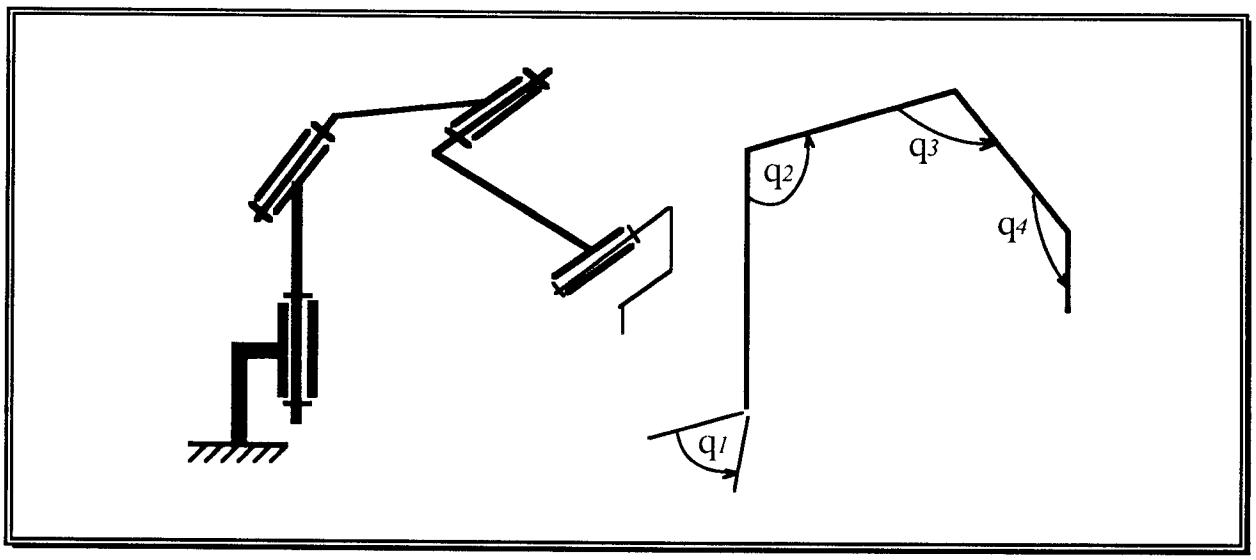


Figure II-5 : modélisation de la posture d'un bras de robot ($\sigma_i = 0, \forall$ i)

Nous allons premièrement aborder les erreurs de paramétrisation, puis nous traiterons les erreurs dues aux déformations statiques.

1.2.1. modélisation des erreurs de paramétrage

Les incertitudes de réalisation des objets techniques font que deux objets semblables ne sont jamais totalement identiques. Aussi, les différents éléments entrant dans la composition d'un segment de robot seront tous uniques en ce qui concerne leurs dimensions exactes. Pour personnaliser chaque robot, nous utiliserons pour chacun de ses segments un torseur de petits déplacements $\{T_p\}$ dont les six composantes seront des constantes correspondant aux différents décalages constants observés.

En effet, nous trouvons ces décalages sous la forme d'écarts dimensionnels linéaires, d'écarts dimensionnels angulaires et d'écarts géométriques. Ces derniers sont des erreurs de positionnement relatif du type

perpendicularité, parallélisme... L'origine de ces décalages se situe soit lors de la fabrication des différents composants, soit lors de leur montage (assemblage et réglage).

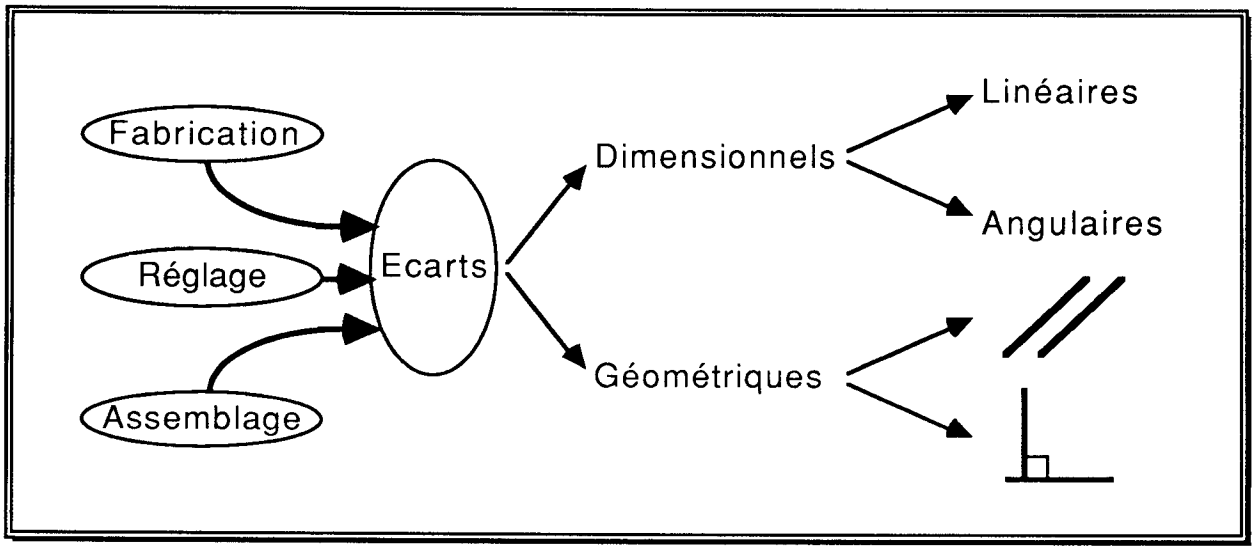


Figure II-6 : origines et classification des erreurs de paramétrage

Cette classe d'erreurs est très importante (cf. figure I-35) pour les robots actuels qui ont une architecture fondée sur la rigidité propre de chaque composant.

1.2.1.1. erreurs de paramétrage liées à la fabrication et à l'assemblage des composants mécaniques

Les incertitudes liées aux contraintes de transformation de la matière engendrent obligatoirement de multiples défauts de fabrication.

Aussi, les concepteurs d'objets mécaniques indiquent des cotes tolérancées, c'est à dire des dimensions nominales théoriques dotées d'intervalle de tolérance à l'intérieur duquel devront se situer les cotes effectivement réalisées. Ces incertitudes vont apparaître de manière prépondérante sur l'ensemble de la chaîne de pièces entrant dans la définition finale de l'entraxe entre la liaison cinématique amont et la liaison cinématique aval de chaque corps.

Prenons comme exemple le segment compris entre l'épaule et le coude d'un robot PUMA 560 [WEI91]. Cette chaîne de pièces peut être définie globalement, en accord avec la norme ISO 5459 de la manière suivante :

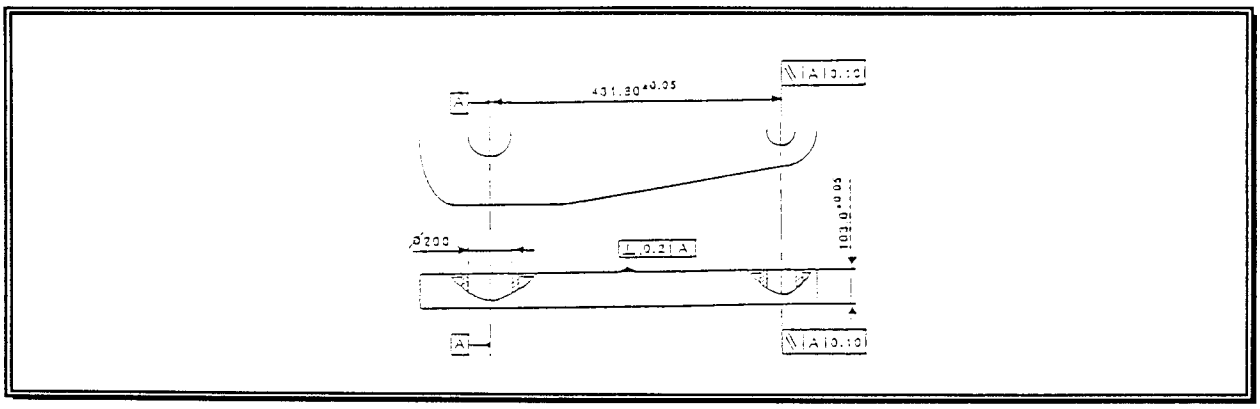


Figure II-7 : dimensionnement et tolérancement selon ISO 5459

Cette figure doit être interprétée ainsi :

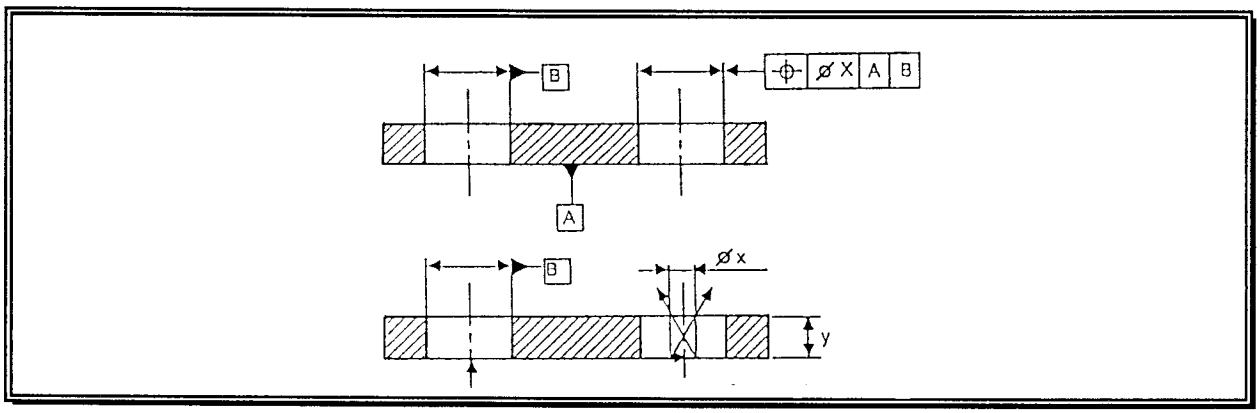


Figure II-8 : interprétation de la norme ISO 5459

Cela nous donne, au vu des tolérances annoncées et des dimensions du PUMA 560, des écarts linéaires de ± 0,05 mm et des écarts angulaires de ± 0,06 degré pour le bras en question.

Nous allons voir maintenant comment modéliser à l'aide d'un torseur de petits déplacements les écarts de paramétrage pour l'entraxe $\Delta_i\,\Delta_{i+1}$ du corps d'un segment i. Le torseur d'écart de la position réelle de l'axe par rapport à sa position nominale se définit dans le cas d'une liaison rotoïde (ou pivot) sur Δ_{i+1} :

$$\{T_{pdp}\} = \begin{Bmatrix} \alpha_x & \xi_x \\ \alpha_y & \xi_y \\ 0 & \xi_z \end{Bmatrix}_{/O_{i+1},\, R(O_i, x_i, y_i, z_i)}$$

avec $\alpha_x \simeq \mathrm{tg}\,\alpha_x \in \left[-\frac{2\cdot X}{y}, \frac{2\cdot X}{y}\right]$, $\alpha_y \simeq \mathrm{tg}\,\alpha_y \in \left[-\frac{2\cdot X}{y}, \frac{2\cdot X}{y}\right]$,

$$\xi_x = O_{i+1}O'_{i+1} \cdot \mathbf{x}_i \in \left[-\frac{X}{2}, \frac{X}{2}\right], \xi_y = O_{i+1}O'_{i+1} \cdot \mathbf{y}_i \in \left[-\frac{X}{2}, \frac{X}{2}\right],$$

et $$\xi_z = O_{i+1}O'_{i+1} \cdot \mathbf{z}_i = O_iO'_{i+1} \cdot \mathbf{z}_i$$

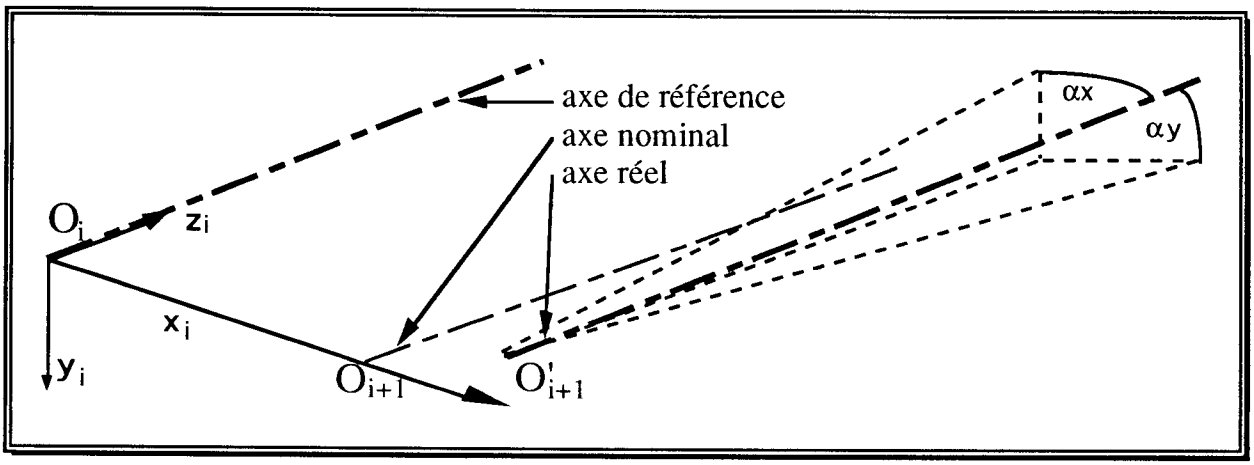


Figure II-9 : défauts de paramétrage entre deux axes

Dans tous les cas, l'axe Δ_{i+1} doit se situer à l'intérieur du cylindre de tolérance défini par la norme. Aussi, les intervalles donnés ci-avant n'indiquent réellement des limites atteignables sur les paramètres α_x, α_y, ξ_x ou ξ_y que lorsque trois d'entre eux sont nuls et que le défaut est maximal. Le cas général se situe donc entre ces extrêmes.

Dans le cas d'une liaison prismatique (ou glissière) sur Δ_{i+1}, le torseur d'écart de la position réelle de l'axe par rapport à sa position nominale se définit par :

$$\{T_{pdp}\} = \begin{Bmatrix} \alpha_x & \xi_x \\ \alpha_y & \xi_y \\ \alpha_z & 0 \end{Bmatrix}_{/O_{i+1},\, R(O_i,\mathbf{x}_i,\mathbf{y}_i,\mathbf{z}_i)}$$

1.2.1.2. erreurs de paramétrage liées au réglage des composants

Les réglages les plus courants sur un robot industriel sont de deux types : le réglage des jeux et des précontraintes dans les liaisons cinématiques et dans les transmissions, et le réglage des capteurs proprioceptifs. Ce dernier type correspond à une erreur du type erreur de paramétrage, avec la particularité d'avoir une valeur qui puisse être très facilement modifiée lors d'une opération de maintenance.

Ce réglage, ou plutôt ce manque de réglage, est une source très importante d'erreur de justesse des robots industriels, puisqu'il représente à l'heure actuelle 50 à 60 % des causes d'erreurs. En réalité, ce sont tous les composants de la chaîne cinématique entre le capteur de position et le corps du segment en question qui introduisent des défauts élémentaires. Mais tout ceci peut être compensé par le réglage du seul capteur proprioceptif : il s'agit de définir le positionnement de sa prise d'origine, ce qui s'appelle le top zéro dans le cas de capteurs incrémentaux.

Deux solutions existent actuellement : soit nous introduisons directement dans le système de commande des valeurs visant à corriger par un décalage les valeurs lues sur chaque capteur proprioceptif (cela est possible sur un grand nombre de baies de commande pour robots industriels actuellement en service), soit il faut desserrer les éléments de fixation du capteur, le déplacer pour assurer le réglage puis resserrer.

Nous proposons d'intégrer ce réglage dans notre modélisation par un torseur d'écart de la position réelle du segment :

- pour une liaison pivot, $\{T_{pdp}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \alpha_z & 0 \end{Bmatrix}_{/O_{i+1},\, R(O_i,x_i,y_i,z_i)}$

- pour une liaison glissière, $\{T_{pdp}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \xi_z \end{Bmatrix}_{/O_{i+1},\, R(O_i,x_i,y_i,z_i)}$

1.2.1.3. torseur de paramétrage du segment i

Cette sixième composante du torseur peut être intégrée dans un torseur de petits déplacements constant $\{T_p\}$ en compagnie des 5 composantes établies au paragraphe 1.2.1.1. Cela donne pour un segment i :

$$\{T_{p\,i}\} = \begin{Bmatrix} \alpha_{p\,x\,i} & \xi_{p\,x\,i} \\ \alpha_{p\,y\,i} & \xi_{p\,y\,i} \\ \alpha_{p\,z\,i} & \xi_{p\,z\,i} \end{Bmatrix}_{/O_{i+1},\, R(O_i,x_i,y_i,z_i)}$$

avec $\alpha_{p\,x\,i}$, $\xi_{p\,x\,i}$, $\alpha_{p\,y\,i}$, $\xi_{p\,y\,i}$, $\alpha_{p\,z\,i}$ et $\xi_{p\,z\,i}$ des constantes à définir expérimentalement pour chaque segment de chaque robot, $\alpha_{p\,z\,i}$ et $\xi_{p\,z\,i}$ pouvant être toutefois sujettes à des dérives ou à des variations.

1.2.2. détermination des conditions de sollicitations des différents composants d'un segment

Avant de traiter les erreurs dues aux déformations, nous allons déterminer les conditions de sollicitations des différents composants mécaniques. Nous définissons les conditions de sollicitations comme étant l'état de chargement en efforts de toutes natures sur chaque système d'objets en équilibre constituant chaque segment i.

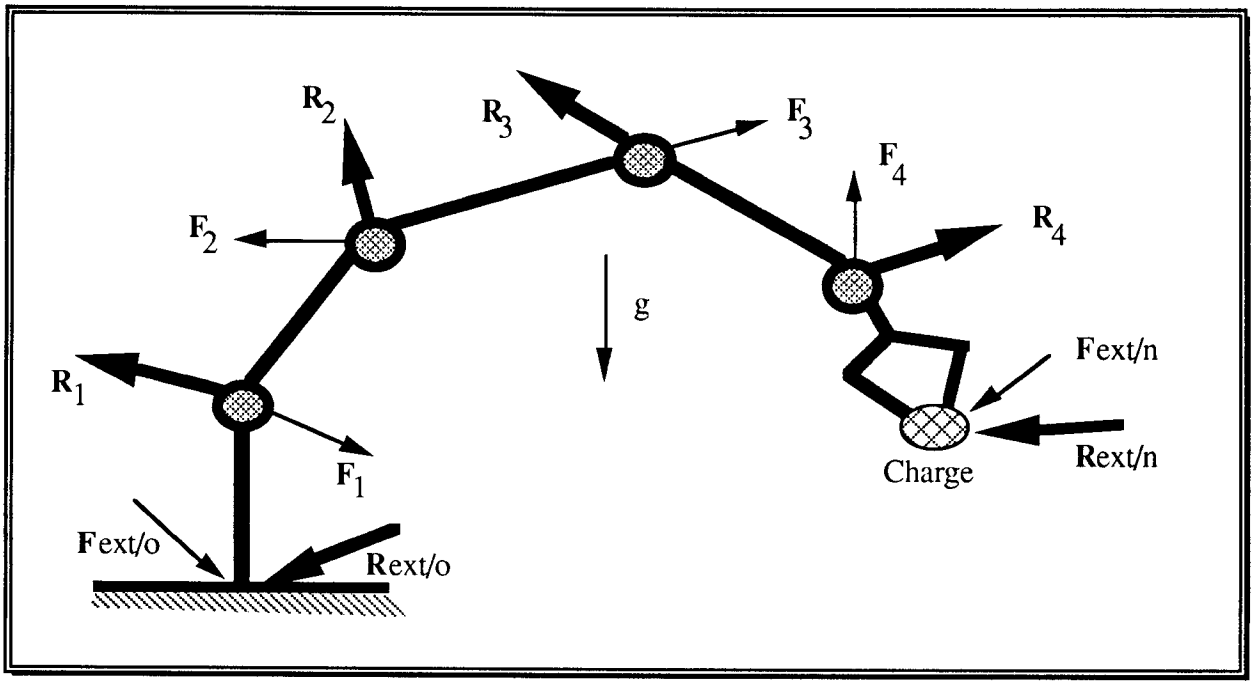


Figure II-10 : interefforts internes et externes au robot

Nous définissons le torseur d'action mécanique $\{T_{AM}\}$ comme étant l'ensemble :

- d'un vecteur "résultante" noté **F** et représentant une force dans l'espace,
- d'un champ vectoriel noté **M** et vérifiant la relation de Varignon :

$$M_A = M_B + \mathbf{AB} \wedge \mathbf{F}$$

M_A représente le moment de la force **F** par rapport au point A.

Le torseur d'action mécanique réduit au point A dans le repère orthonormé R s'écrit par ses éléments de réduction :

$$\{T_{AM}\} = \left\{ \begin{matrix} \mathbf{F} \\ M_A \end{matrix} \right\}_{/A,\, R(O,x,y,z)} = \left\{ \begin{matrix} F_x & M_{Ax} \\ F_y & M_{Ay} \\ F_z & M_{Az} \end{matrix} \right\}_{/A,\, R(O,x,y,z)}$$

avec F_{axe}, projection sur l'axe indiqué de la force **F**,

et $M_{A_{axe}}$, projection sur l'axe indiqué du moment M_A.

Le Principe Fondamental de la Statique nous indique que l'équilibre d'un objet Ci est obtenu lorsque les actions mécaniques extérieures qui lui sont appliquées se compensent : $\sum \{T_{AM\ (Ext. \to Ci)}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$

Dans le cas d'un segment i d'un robot, nous connaissons la position et l'orientation relatives des segments les uns par rapports aux autres et leur orientation vis à vis du champ gravitationnel. De plus, en faisant l'hypothèse de forces de frottement interne à chaque liaison partielle suffisamment faibles pour pouvoir être négligées, nous connaissons la forme mathématique des deux torseurs d'action mécanique provoqués par les deux segments adjacents. Ces deux torseurs sont appelés torseurs d'interefforts de liaison :

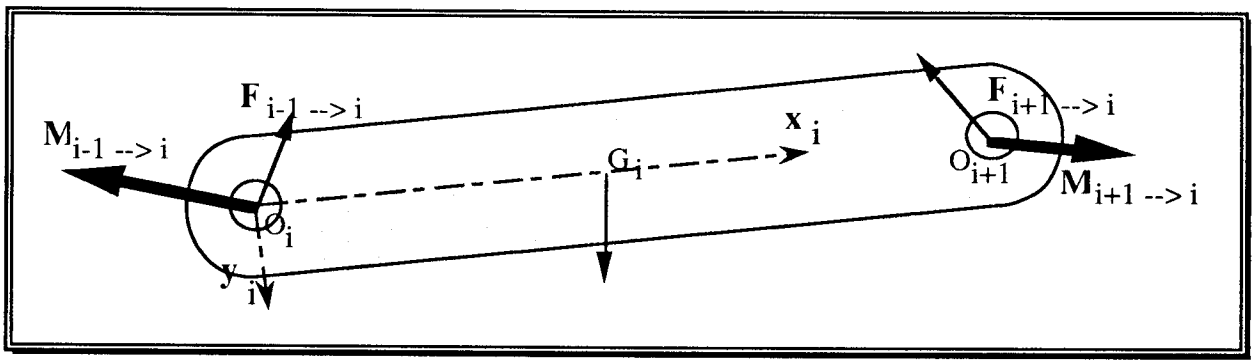


Figure II-11 : équilibre du segment i

Nous partirons donc de l'extrémité du robot, qui est sollicité par la charge, et nous remonterons progressivement vers la base. L'algorithme de recherche des différents torseurs d'interefforts d'un robot à n axes est alors :

Début
$\{T_{AM\ (Ci+1 \to Ci)}\} = \{T_{AM\ (Ext. \to Cn)}\}$
Pour chaque segment i, variant de n à 1, **faire**
Projection de $\{T_{AM\ (Ci+1 \to Ci)}\}$ dans Ri
Réduction de $\{T_{AM\ (Ci+1 \to Ci)}\}$ en Oi
Calcul des forces de gravité
Calcul de $\{T_{AM\ (Ci-1 \to Ci)}\}$ (application du PFS)
$\{T_{AM\ (Ci \to Ci-1)}\} = -\{T_{AM\ (Ci-1 \to Ci)}\}$
Fin faire
Fin

Figure II-12 : algorithme de calcul des torseurs d'interefforts

1.2.3. modélisation des défauts de déformation élastique d'un segment i

L'ensemble des éléments constituant chaque segment (liaison cinématique partielle, transmission et corps) est soumis aux sollicitations que nous venons de déterminer. Nous ferons l'hypothèse que les déformations élastiques qui en découlent sont proportionnelles aux efforts qui les engendrent. En effet, l'élasticité des matériaux est un phénomène linéaire qui est vérifié tant que nous ne dépassons pas certains seuils de contrainte interne correspondant à l'apparition de comportements plastiques : hystérésis, non linéarités. La modélisation du contact des corps élastiques, selon la théorie de Hertz, n'est quant à elle pas linéaire, mais la mise sous précharge de ces éléments permet de se placer en des points de fonctionnement où une modélisation linéaire constitue une excellente approximation.

Les déformations de chaque liaison cinématique partielle i-1/i d'un segment sont donc modélisées par cinq raideurs correspondant aux cinq degrés de liberté bloqués par la liaison en question. Le sixième degré de liberté est contrôlé par la coordonnée articulaire correspondant au mouvement asservi du robot. Nous pouvons considérer que les raideurs des asservissements, ramenées en sortie de transmission, sont suffisamment élevées pour que leurs effets puissent être négligés. Il s'agit donc pour cette sixième valeur de la raideur de la transmission de mouvement entre l'actionneur et le corps i en question. L'ensemble de ces deux types de déformation est exprimé dans deux torseurs de petit déplacement qui sont ramenés sur la liaison i/i+1 (l'autre extrémité du corps i).

Les déformations du corps de chaque segment font appel aux lois classiques de la résistance des matériaux. Chaque corps est considéré comme une poutre encastrée, de section variable ou non, sollicitée en traction compression, en flexion et en torsion par le torseur d'interefforts. Nous calculerons donc le torseur de petits déplacements correspondant à ces déformations à l'extrémité du corps coté effecteur (coté i/i+1).

1.2.3.1. erreurs de déformation de la liaison partielle du segment

Nous avons vu que la partie mécanique des robots industriels est constituée par un mécanisme articulé. Chaque articulation est réalisée par une liaison partielle dont le nombre de ddl dépasse rarement un en pratique. Ce guidage est soit un guidage en rotation (appelé également liaison rotoïde ou

liaison pivot), soit un guidage en translation (appelé également liaison prismatique ou liaison glissière).

Ces guidages seront réalisés à l'aide de composants intermédiaires visant à réduire les phénomènes de frottement et utilisant des éléments de roulement. Ces éléments se comportent en déformation selon des lois expérimentales issues de la loi de Hertz et ont des jeux internes. Pour mieux maîtriser le comportement de ces composants, ils sont préchargés, c'est à dire que nous leur appliquerons à vide un serrage. Cela supprime leurs jeux et qui commence à les déformer de manière à les placer sur un point de fonctionnement où la rigidité de la liaison sera plus grande et où le comportement sera quasiment linéaire.

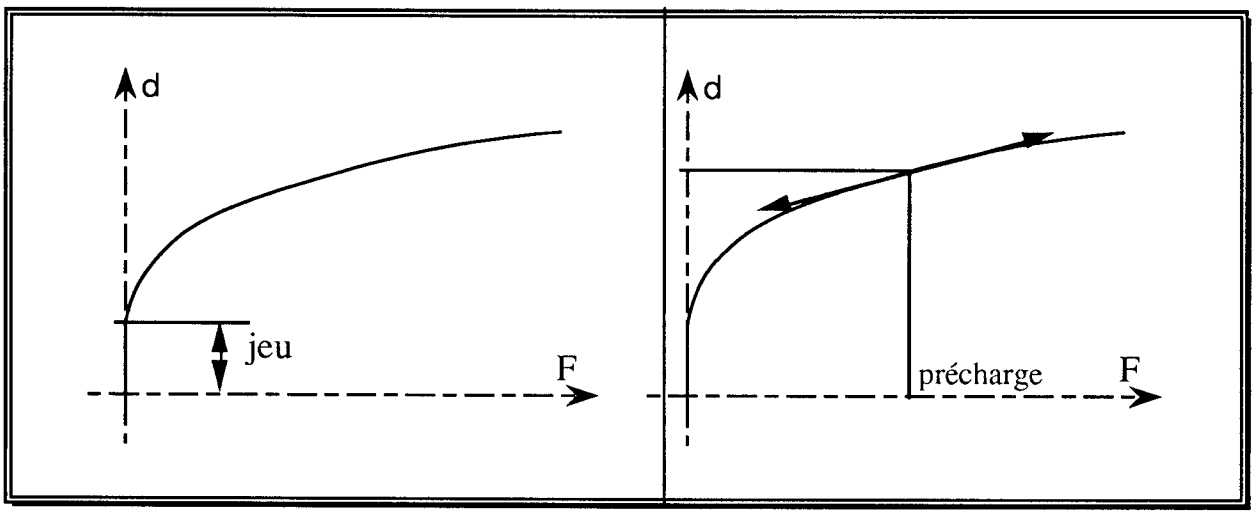


Figure II-13 : déformation d'un élément roulant non chargé, puis chargé jusqu'à un certain point de fonctionnement.

L'étude de l'architecture de ces liaisons fait apparaître deux grands types : le montage en chape, où l'axe de la liaison est maintenu par ses deux extrémités, et le montage en porte à faux. Les déformations engendrées ne seront pas du même type, aussi, notre modélisation devra prendre en compte cet aspect. La figure II-14 montre l'allure de ces déformations dans les deux cas, pour une liaison pivot. Pour une liaison glissière, cette allure serait globalement similaire.

La déformation finale de la liaison partielle est obtenue par superposition des déformations de l'arbre axial de la liaison et des déformations axiales et radiales des éléments de roulements.

Nous avons donc défini un cas générique de liaison partielle, paramétrable afin de prendre en considération toutes les possibilités de

chargement, tous les montages d'éléments de roulement et toutes les géométries d'arbre. Nous en donnons la modélisation à la figure II-15.

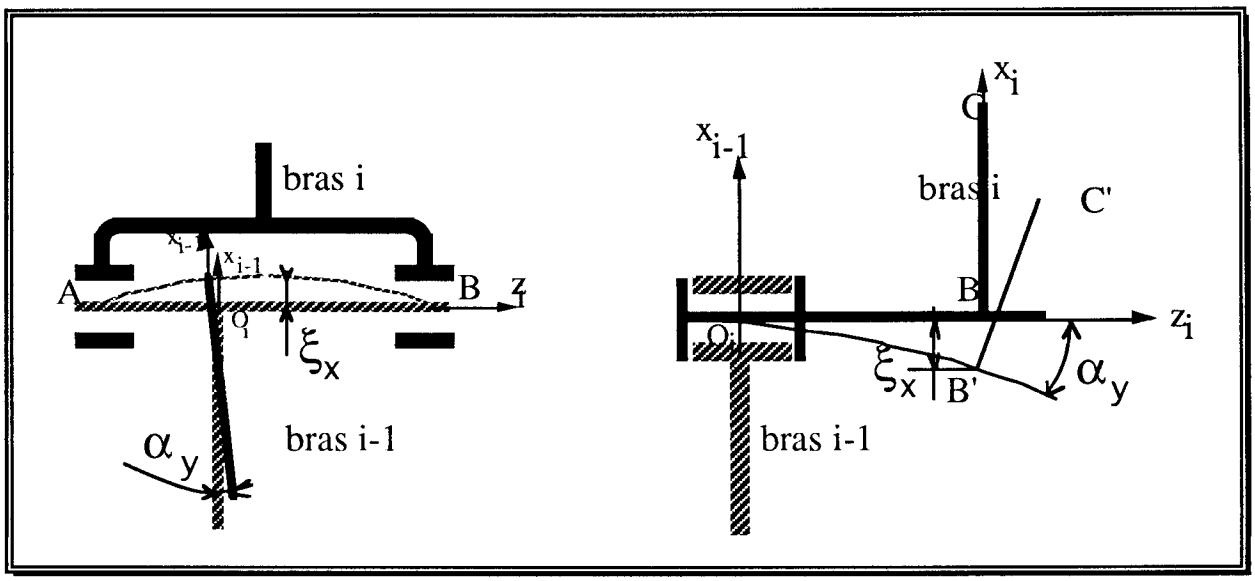


Figure II-14 : analyse des deux architectures, chape et porte à faux, sous l'action du torseur d'interefforts

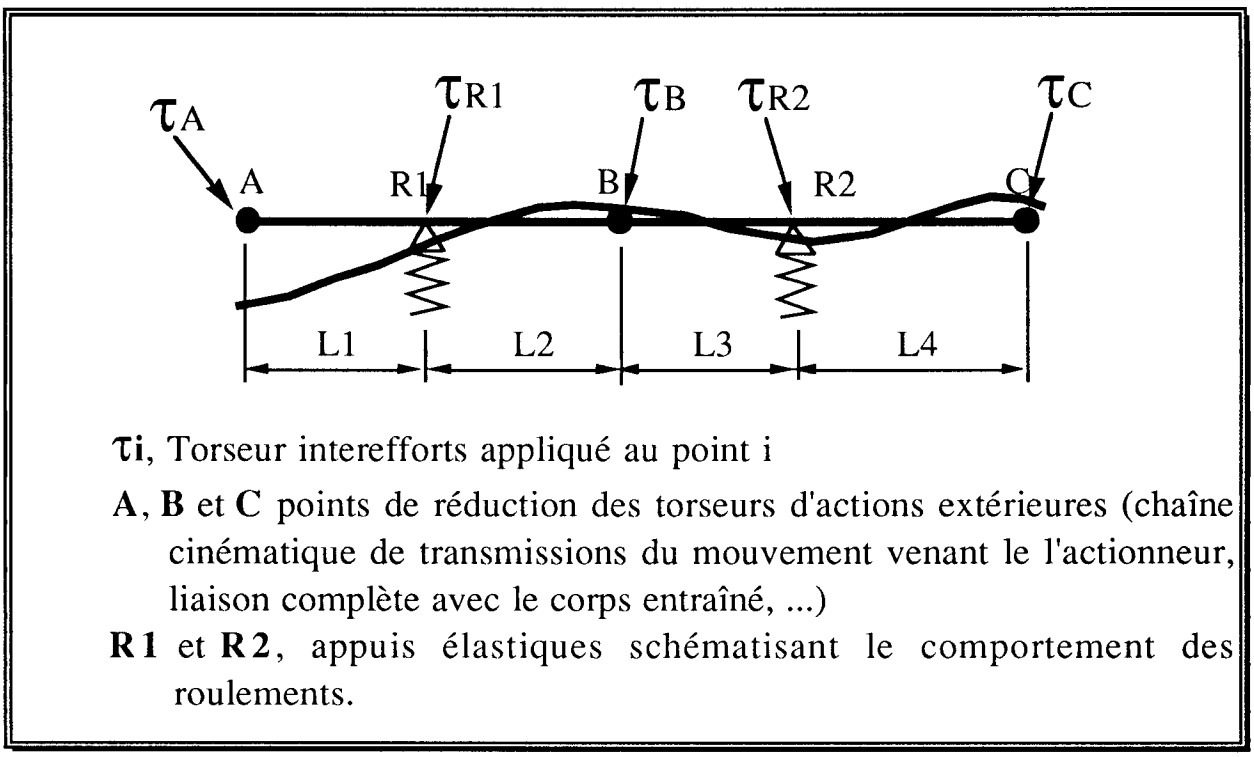


Figure II-15 : modélisation d'une architecture générique

Nous modéliserons les résultats de ces calculs par un torseur de petits déplacements de la liaison :

$$\left\{ \tau_1 \right\}_{/A} = \begin{Bmatrix} \alpha_{1x} & \xi_{1x} \\ \alpha_{1y} & \xi_{1y} \\ O & \xi_{1z} \end{Bmatrix}_{/A,\, R(O,x,y,z)} = \begin{Bmatrix} K_{11}.M_{Ax} & K_{12}.F_x \\ K_{13}.M_{Ay} & K_{14}.F_y \\ O & K_{15}.F_z \end{Bmatrix}_{/A,\, R(O,x,y,z)} ,$$

avec K_{l1}, ..., K_{l5}, les constantes d'élasticité de la liaison i/i-1 du segment i.

Sur les robots industriels, les déformations de liaisons partielles sous l'effet de la charge sont importantes. Pour donner un ordre de grandeur, nous citerons l'exemple de la liaison bras/avant-bras du robot Renault RH80 : lorsque le robot est chargé avec une masse de 15 Kg, il s'en suit une déformation verticale au niveau de l'effecteur de 0,16 millimètre.

1.2.3.2. erreurs de déformation de la transmission entre actionneur et segment

La raideur d'une chaîne cinématique de transmission est le rapport entre le couple appliqué sur sa sortie et la déviation angulaire obtenue, son entrée étant maintenant bloquée. En réalité, cette raideur n'est pas constante mais présente un phénomène d'hystérésis, du principalement au jeu nécessaire au bon fonctionnement.

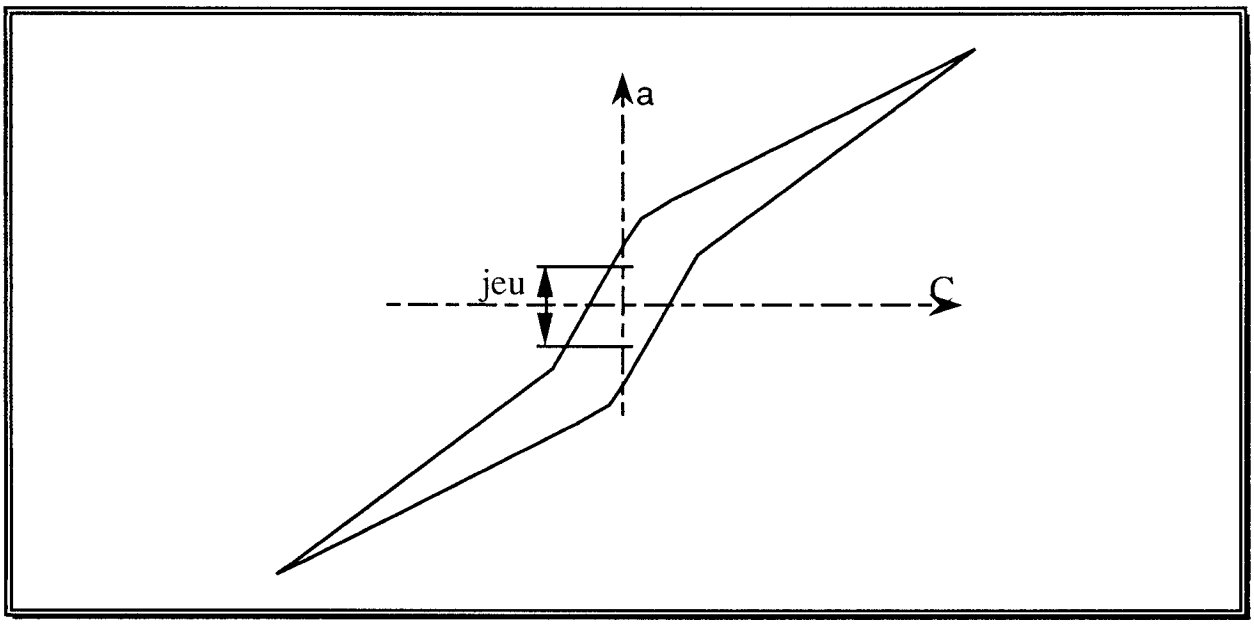


Figure II-16 : hystérésis des transmissions

Le jeu apparaît lors du changement du sens d'application du couple sur un axe. Pour un réducteur présentant un jeu de 5 minutes d'angle pour une longueur de segment de 0,5 mètre, cela représente un débattement de 0,7 millimètre...

Nous avons été amenés à utiliser comme constante de modélisation l'inverse de la raideur, appelée la constante d'élasticité de la transmission. En effet, si nous considérons la transmission comme idéale, cela sous-entend une raideur infinie, difficilement informatisable...

Nous modéliserons ces phénomènes par un torseur de petits déplacements de la transmission :

$$\left\{ \tau_t \right\}_{/A} = \left\{ \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \alpha_{tz} & 0 \end{matrix} \right\}_{/A,\, R(O,x,y,z)} = \left\{ \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ K_t \cdot M_{Az} & 0 \end{matrix} \right\}_{/A,\, R(O,x,y,z)}$$

1.2.3.3. erreurs de déformation de la poutre du segment

Le corps de chaque segment est assimilable à une poutre au sens de la Résistance des Matériaux. En effet, nous pouvons lui appliquer par hypothèse :

- l'hypothèse de Bernoulli,

une section plane, normale à l'axe longitudinal (ou à la tangente à la ligne moyenne) reste plane et normale à l'axe après déformation et conserve ses dimensions,

- la loi de Hooke,

les déformations sont proportionnelles aux efforts qui les provoquent, tant que nous restons dans le domaine élastique,

- le théorème de superposition,

si nous décomposons la mise sous charge d'un corps en plusieurs actions élémentaires et que nous étudions les déformations élémentaires correspondantes, la recomposition de ces déformations sera la déformation correspondant à la mise sous charge initiale, tant que nous restons dans le domaine élastique.

Nous ne traiterons pas du problème des contraintes engendrées par ces déformations, ce problème étant réglé lors de la conception du robot et nous considérerons ce dernier bien conçu. Nous utiliserons une modélisation de ces phénomènes de déformation suivant la technique des déplacements de noeuds, qui est une vue simplifiée de la méthode des éléments finis et qui se prête bien à une informatisation tout en 'collant' au plus près de la réalité technologique des segments (poutre de section non constante par exemple).

Chaque poutre sera considérée comme encastrée coté base et soumise coté effecteur à un torseur d'interefforts.

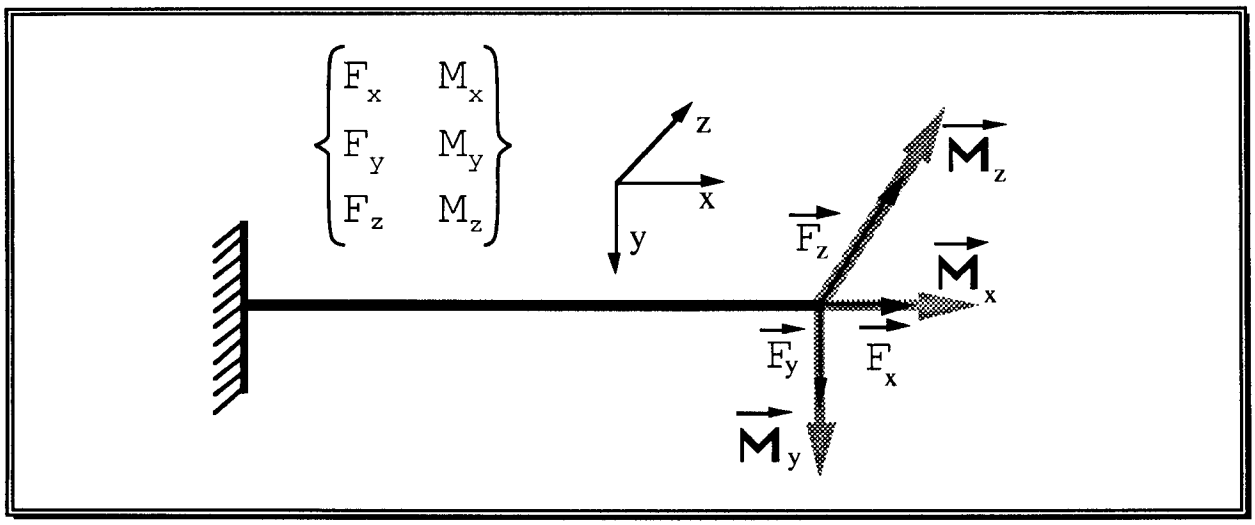


Figure II-17 : sollicitation générale d'un corps de segment

Nous pouvons décomposer ce torseur de sollicitation quelconque en une somme de quatre torseurs correspondant à quatre cas élémentaires (respectivement traction compression, flexion verticale, flexion horizontale et enfin torsion) (ces torseurs doivent être tous réduits au même point A et projeté dans le repère de la poutre) :

$$\begin{Bmatrix} F_x & M_{A_x} \\ F_y & M_{A_y} \\ F_z & M_{A_z} \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} F_x & O \\ O & O \\ O & O \end{Bmatrix}_A + \begin{Bmatrix} O & O \\ F_y & O \\ O & M_{A_z} \end{Bmatrix}_A + \begin{Bmatrix} O & O \\ O & M_{A_y} \\ F_z & O \end{Bmatrix}_A + \begin{Bmatrix} O & M_{A_x} \\ O & O \\ O & O \end{Bmatrix}_A ,$$

a : cas de sollicitation en traction compression

Le torseur d'intereffort $\begin{Bmatrix} F_x & O \\ O & O \\ O & O \end{Bmatrix}_A$ représente un chargement parfaitement normal à la section de la poutre : la déformation se produit alors uniquement dans l'axe de la poutre ξ_{dx}. Cela donne :

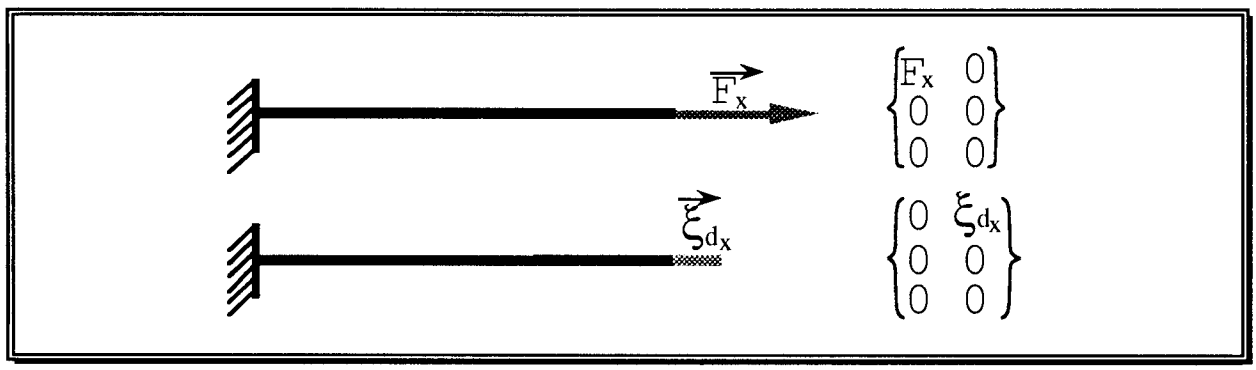


Figure II-18 : sollicitation et déformation en traction compression

b : cas de sollicitation en flexion verticale

Le torseur d'intereffort $\begin{Bmatrix} O & O \\ F_y & O \\ O & M_{A_z} \end{Bmatrix}_A$ représente un chargement parfaitement radial à l'axe de la poutre : la déformation se produit alors uniquement dans le plan vertical de l'axe de la poutre et provoque en A une flèche ξ_{dy} et une petite inclinaison α_{dz} : $\begin{Bmatrix} O & O \\ O & \xi_{dy} \\ \alpha_{dz} & O \end{Bmatrix}_A$. Cela donne :

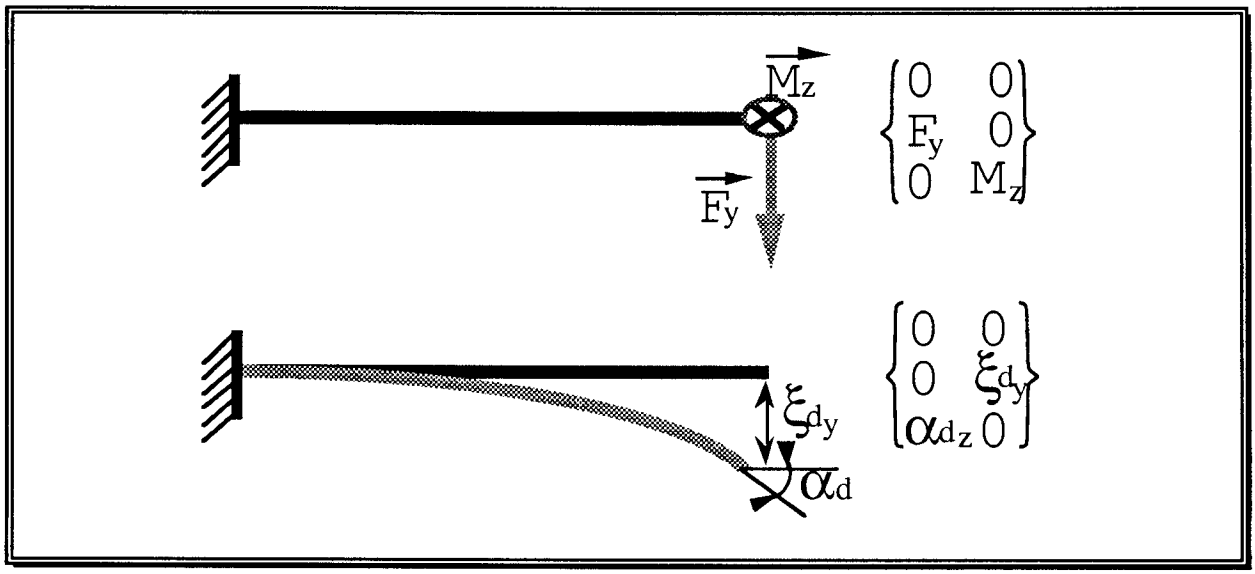


Figure II-19 : sollicitation et déformation en flexion verticale

c : cas de sollicitation en flexion horizontale

Le torseur d'intereffort $\begin{Bmatrix} O & O \\ O & M_{A_y} \\ F_z & O \end{Bmatrix}_A$ représente un chargement parfaitement radial à l'axe de la poutre, mais porté par l'autre axe : la déformation se produit alors uniquement dans le plan horizontal de l'axe de la poutre et provoque en A une flèche ξ_{dz} et une petite inclinaison α_{dy} :

$\begin{Bmatrix} O & O \\ \alpha_{dy} & O \\ O & \xi_{dz} \end{Bmatrix}_A$. C'est le même cas que précédemment, à une permutation sur les axes près.

d : cas de sollicitation en torsion

Le torseur d'intereffort $\begin{Bmatrix} O & M_{A_x} \\ O & O \\ O & O \end{Bmatrix}_A$ représente un chargement parfaitement situé dans l'axe de la poutre : la déformation se produit alors uniquement autour de lui même et provoque en A une petite rotation α_{dx} : $\begin{Bmatrix} \alpha_{dx} & O \\ O & O \\ O & O \end{Bmatrix}_A$.

Nous représenterons ce cas de chargement par la figure suivante :

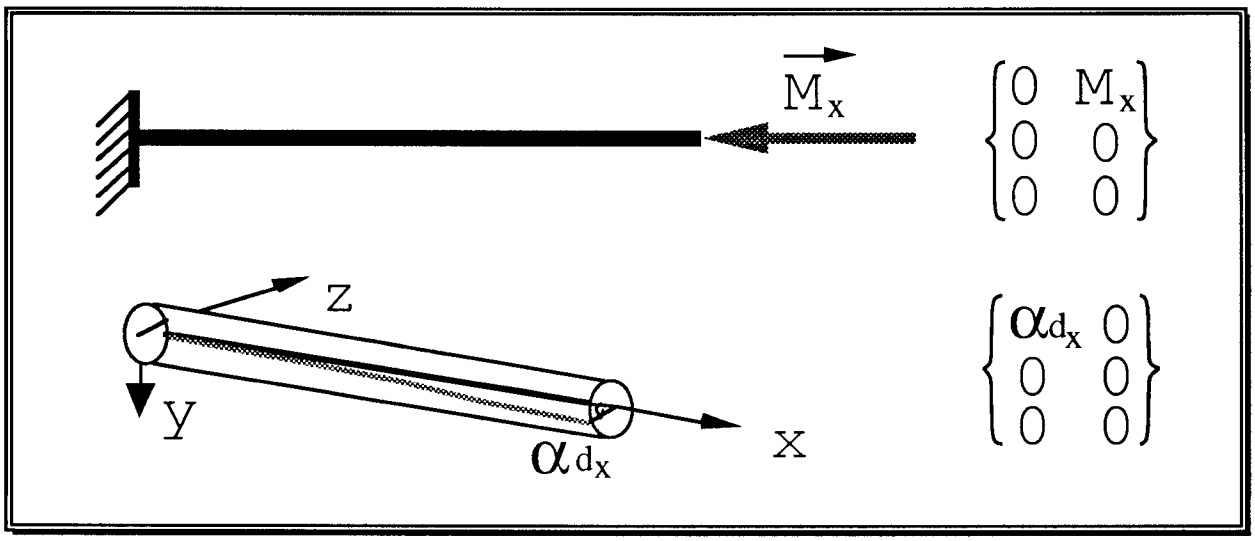


Figure II-20 : sollicitation en torsion

e : théorème de superposition

Au total, en appliquant le théorème de superposition, nous obtenons une déformée qui s'exprime à l'extrémité du segment par le torseur de petits déplacements de la poutre :

$$\left\{ \tau_d \right\}_{/A} = \begin{Bmatrix} \alpha_{dx} & \xi_{dx} \\ \alpha_{dy} & \xi_{dy} \\ \alpha_{dz} & \xi_{dz} \end{Bmatrix}_{/A,\ R(O,x,y,z)},$$

avec :

$$\begin{Bmatrix} \alpha_{dx} & \xi_{dx} \\ \alpha_{dy} & \xi_{dy} \\ \alpha_{dz} & \xi_{dz} \end{Bmatrix}_{/A} = \begin{Bmatrix} O & \xi_{dx} \\ O & O \\ O & O \end{Bmatrix}_{/A} + \begin{Bmatrix} O & O \\ O & \xi_{dy} \\ \alpha_{dz} & O \end{Bmatrix}_{/A} + \begin{Bmatrix} O & O \\ \alpha_{dy} & O \\ O & \xi_{dz} \end{Bmatrix}_{/A} + \begin{Bmatrix} \alpha_{dx} & O \\ O & O \\ O & O \end{Bmatrix}_{/A},$$

et qui se représente selon la figure II-21, page suivante.

Ces déformations sont relativement importantes dès que les charges sont non négligeables, même sur des robots réputés assez rigides.

Par exemple, l'étude statique de l'avant bras d'un robot Hitachi (longueur : 1 m, masse propre : 7,33 Kg, moment quadratique : 294 10^4 mm^4) fait apparaître une flèche de 0,16 mm pour une charge de 10 Kg.

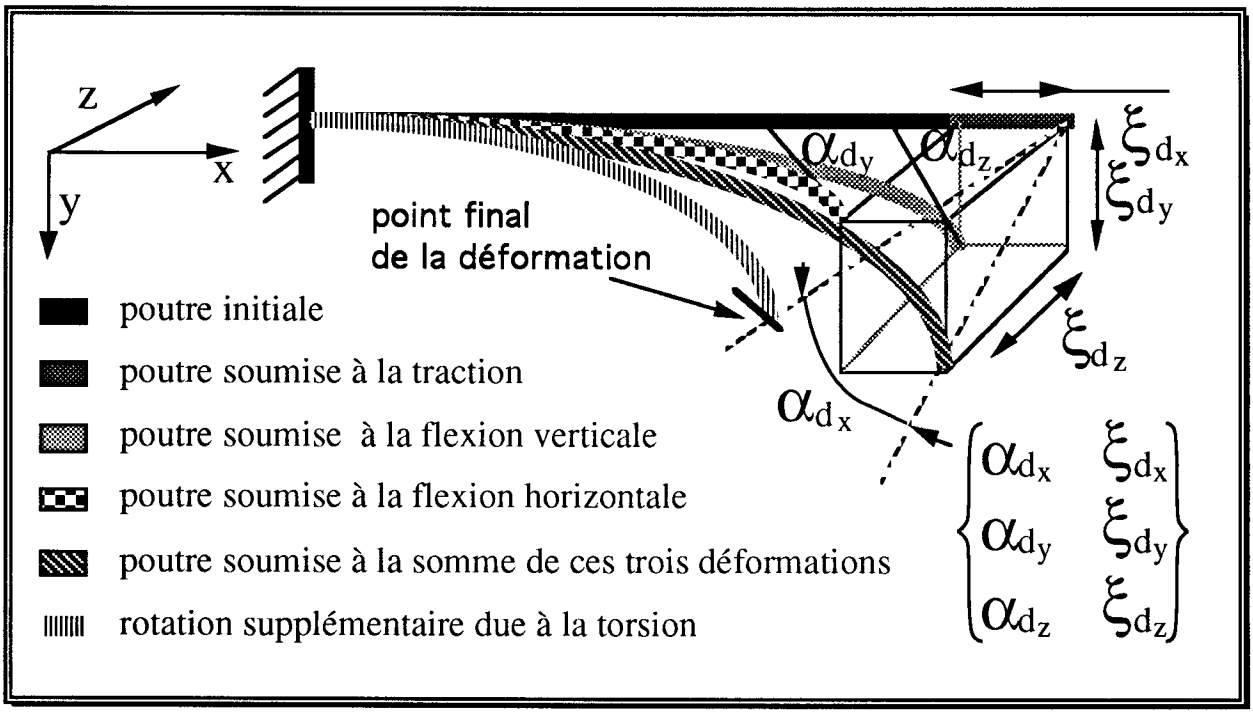


Figure II-21 : composition de la déformée totale

1.2.3.4. modélisation du corps de chaque segment

Si les corps constituant le robot étaient modélisables par des poutres C_i encastrées à leur base et libres à leur extrémité de section constante, la résistance des matériaux nous donnerait directement les expressions algébriques de ces déformations.

Mais chaque corps du robot doit être modélisé par des poutres C_i de section constante ou variable, creuse ou pleine, rectangulaire, circulaire ou quelconque. Ces caractéristiques permettent de véritablement prendre en compte tous les aspects technologiques liés à la conception mécanique du robot.

Pour le calcul des déformations, nous utiliserons donc la technique des déplacements, qui consiste à discrétiser la structure étudiée (ici, la poutre) en noeuds, O_j, de dimensions infinitésimales et en éléments e_j de dimensions finies dl. Nous écrirons les équations d'équilibre (PFS) relatives à chaque noeud, chaque élément ayant ses propres caractéristiques (section, masse) sans pour

autant qu'il y ait de variations importantes entre deux éléments consécutifs (pouvant entraîner des concentrations de contraintes), ni qu'il y ait dépassement des limites élastiques.

L'objectif est de pouvoir établir un système d'équations linéaires qui permettra de définir les déplacements des extrémités des poutres en fonctions des charges appliquées. Pour chaque poutre, nous aurons :

$$\begin{Bmatrix} \alpha_{dx} & \xi_{dx} \\ \alpha_{dy} & \xi_{dy} \\ \alpha_{dz} & \xi_{dz} \end{Bmatrix}_{/O_{i+1},\, R(O_i,x_i,y_i,z_i)} = f\left(\begin{Bmatrix} \mathbf{F}_x & M_{A_x} \\ \mathbf{F}_y & M_{A_y} \\ \mathbf{F}_z & M_{A_z} \end{Bmatrix}_{/O_{i+1},\, R(O_i,x_i,y_i,z_i)}\right)$$

Nous retrouvons d'ailleurs une définition très proche des notations habituelles de la Résistance des Matériaux : $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \alpha, \theta) = f(\mathbf{N},\mathbf{T},\mathbf{Mf},\mathbf{Mt})$

avec **u**, déplacement linéaire dû à l'effort normal **N**,

v, déplacement linéaire dû au moment fléchissant **Mf** et à l'effort tranchant **T**,

α, rotation due au moment fléchissant **Mf** et à l'effort tranchant **T**,

θ, rotation due au moment de torsion **Mt**

En effet, en Résistance des Matériaux, nous trouvons énormément de problèmes se résolvant selon un plan de symétrie. Nous retrouvons cependant les relations vectorielles suivantes :

$$\mathbf{u} = \xi_{dx},\ \mathbf{v} = \xi_{dy} + \xi_{dz},\ \alpha = \alpha_{dy} + \alpha_{dz},\ \theta = \alpha_{dx},$$
$$\mathbf{N} = \mathbf{F}_x,\ \mathbf{T} = \mathbf{F}_y + \mathbf{F}_z,\ \mathbf{Mf} = M_{A_x} + M_{A_y},\ \mathbf{Mt} = M_{A_z}$$

Nous utiliserons donc ces notations, connaissant leur correspondance avec notre torseur (cela simplifiera notre étude des déformations en flexion, en n'ayant qu'un seul cas traité consécutivement dans les deux plans), et nous adopterons les indices suivants : l'indice "i" référence les poutres (donc les segments du robot), avec i = 1,2,3,...,n, et l'indice "j" référence les éléments de la discrétisation des poutres C_i, j variant de 1 à m.
Par exemple, pour C_i, poutre "i" du robot, nous trouverons les éléments discrétisés e_{ij}, élément "j" de la poutre "i" et O_{ij}, noeud "j" de la poutre "i". Les éléments de réduction du torseur d'intereffort seront $\mathbf{F}_i$, Force résultante appliquée à la poutre C_i par la poutre C_{i+1} ($\mathbf{F}_i = \mathbf{N}_i + \mathbf{T}_i = \mathbf{N}_i + \mathbf{T}_{i_x} + \mathbf{T}_{i_y}$) et $\mathbf{M}_i$, Moment résultant appliqué à la poutre C_i ($\mathbf{M}_i = \mathbf{Mt}_i + \mathbf{Mf}_i = \mathbf{Mt}_i + \mathbf{Mf}_{i_x} + \mathbf{Mf}_{i_y}$).

Le poids de la poutre est modélisé par une charge répartie $\mathbf{p}_i$, nous pouvons alors évaluer pour chaque élément e_{ij}, le poids élémentaire $\mathbf{p}_{ij}$ que

nous supposerons concentré à l'extrémité du petit élément et que nous projetterons sur les trois axes p_{xij}, p_{yij}, p_{zij}.

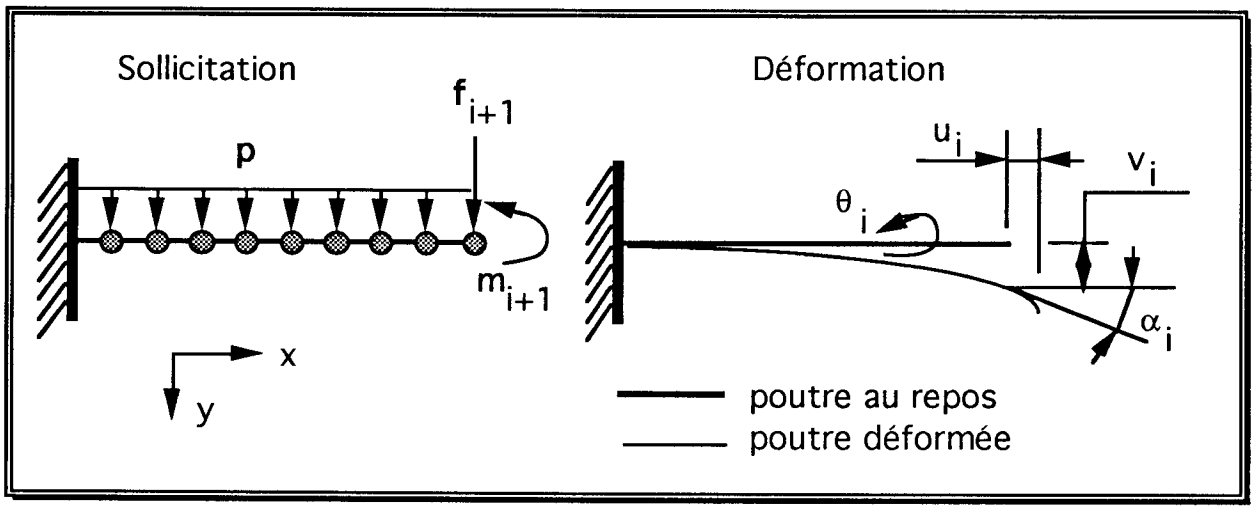


Figure II-22 : modélisation d'un corps C_i par une poutre discrétisée

a : étude d'un élément de poutre en flexion

Nous calculons la déformée de chaque élément e_{ij} soumis aux efforts exercés par les noeuds O_{ij}. Ces efforts sont des efforts de liaison interne, représentant les forces de cohésion dans la poutre :

$\mathbf{T}_{ij}$, effort tranchant exercé par le noeud O_{ij} sur e_{ij}

$\mathbf{Mf}_{ij}$, moment fléchissant exercé par le noeud O_{ij} sur e_{ij}

$\mathbf{T}_{i,j+1}$, effort tranchant exercé par le noeud $O_{i,j+1}$ sur e_{ij}

$\mathbf{Mf}_{i,j+1}$, moment fléchissant exercé par le noeud $O_{i,j+1}$ sur e_{ij}

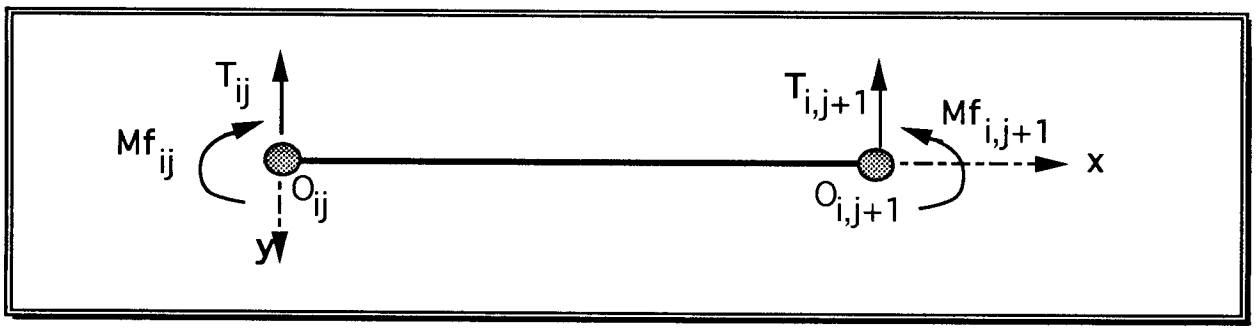


Figure II-23 : sollicitation d'un élément e_{ij} à la flexion

Dans de telles conditions de sollicitations, ce petit élément se déforme selon la figure de la page ci-après :

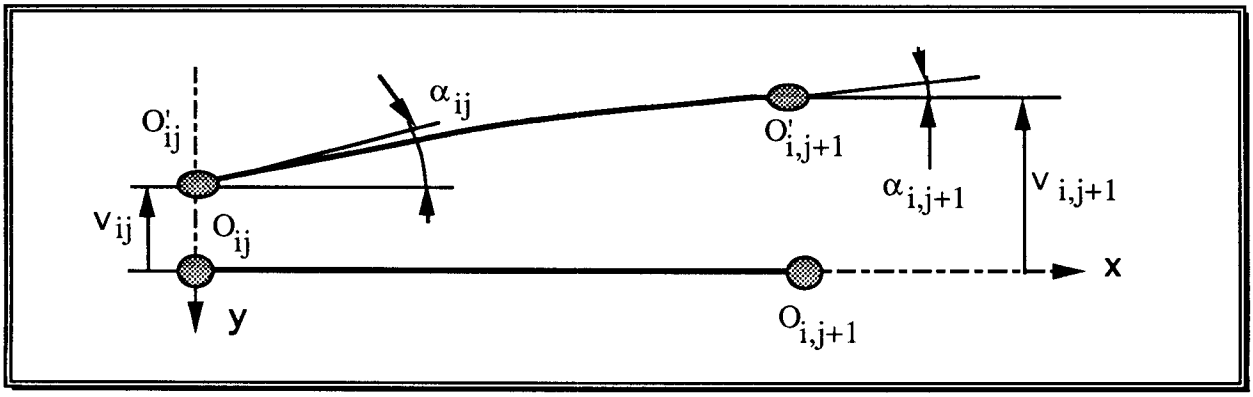


Figure II-24 : déformations dues à la flexion d'un élément e_{ij}

L'élément e_{ij} sollicité devient e'_{ij}, de la manière suivante : O_{ij} se déplace en O'_{ij}, subissant un déplacement $\mathbf{V}_{ij}$ et une rotation α_{ij} , $O_{i,j+1}$ se déplace en $O'_{i,j+1}$, subissant un déplacement $\mathbf{V}_{i,j+1}$ et une rotation $\alpha_{i,j+1}$, et il y a continuité des tangentes aux deux extrémités.

Nous isolons la portion de poutre composée des éléments de e_{ik} à e_{im}, afin d'exprimer le torseur d'intereffort, c'est à dire l'effort tranchant $\mathbf{T}_{ik}$ et le moment fléchissant $\mathbf{Mf}_{ik}$:

$$\mathbf{T}_{ik} = \mathbf{f}_{i+1/i} + \Sigma_{j=k}^{m}(\mathbf{p}_j)$$

$$\mathbf{Mf}_{ik} = (m+1-k)\cdot\mathbf{dl}_i\cdot\mathbf{f}_{i+1/i} + \Sigma_{j=k}^{m}[\mathbf{p}_j\cdot(j-k+1)\cdot\mathbf{dl}_i]$$

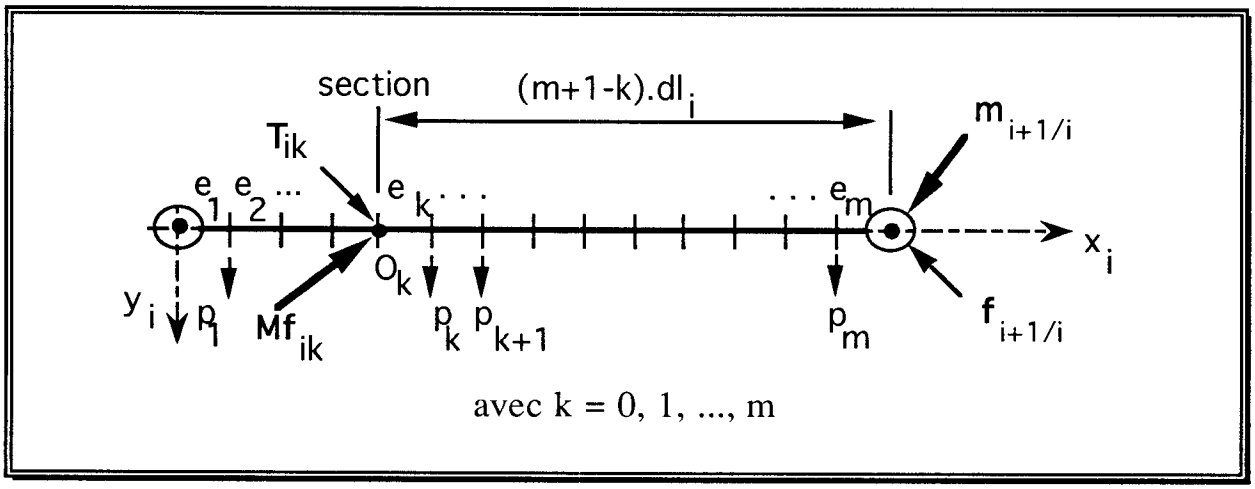


Figure II-25 : expression des efforts internes
en une section k correspondant au noeud k.

Nous pouvons maintenant entamer la détermination de la déformée due à la flexion en fonction des efforts de liaison interne.

Soit **Vo**(x), la déformée de la flexion d'un élément e_{ij} en fonction de x, **Mf**(x), le moment fléchissant appliqué à la section d'abscisse x (équivalent au moment résultant extérieur appliqué à droite de la section étudiée), **T**(x), l'effort tranchant appliqué à la section d'abscisse x (équivalent à l'effort résultant extérieur appliqué à gauche de la section étudiée), E, le module d'élasticité de Young du matériau de la poutre, et **I**, le moment quadratique de la section droite de la poutre par rapport à l'axe neutre O_i**z**.

La théorie de la Résistance des Matériaux, appliquée à la flexion simple des poutres droites, nous donne la relation de base suivante :

$$\mathbf{Mf}(x) = - E\cdot\mathbf{I}\cdot \frac{d^2}{dx^2}\cdot\mathbf{Vo}(x),$$

ce qui, pour nous, compte tenu de :

$$\mathbf{Mf}(x) = \mathbf{Mf}_{ij} + x\cdot\mathbf{T}_{ij} \quad \text{et } \mathbf{T}_{ij} = \mathbf{T}(x)$$

se traduit par :

$$- E\cdot\mathbf{I}\cdot \frac{d^2}{dx^2}\cdot\mathbf{Vo}(x) = \mathbf{Mf}_{ij} + x\cdot\mathbf{T}_{ij}$$

La littérature classique, [TIM52] par exemple, indique comment résoudre ce type d'équation (double intégration et recherche des constantes d'intégration par examen des conditions aux limites) et cela donne la solution suivante :

$$- E\cdot\mathbf{I}\cdot\mathbf{Vo}(x) = \frac{x^2}{2}\cdot\mathbf{Mf}_{ij} + \frac{x^3}{6}\cdot\mathbf{T}_{ij} + E.\mathbf{I}.\alpha_{ij}\cdot x + E\cdot\mathbf{I}\cdot\mathbf{V}_{ij},$$

Cette équation récurrente se traite élément e_{ij} par élément e_{ij}, avec comme conditions initiales :

$$\mathbf{V}_{i,j+1} = \frac{1}{E\cdot\mathbf{I}}\{\mathbf{T}_{ij}\cdot\frac{\mathbf{dl}_{ij}^3}{6} - \mathbf{Mf}_{ij}\cdot\frac{\mathbf{dl}_{ij}^2}{2} + E\cdot\mathbf{I}\cdot\alpha_{ij}\cdot\mathbf{dl}_{ij} + E\cdot\mathbf{I}\cdot\mathbf{V}_{ij}\}$$

$$\alpha_{i,j+1} = \frac{1}{E\cdot\mathbf{I}}(\mathbf{T}_{ij}\cdot\frac{\mathbf{dl}_{ij}^2}{2} - \mathbf{Mf}_{ij}\cdot\mathbf{dl}_{ij} + E\cdot\mathbf{I}\cdot\alpha_{ij})$$

Lorsque nous aurons parcouru un élément de la poutre tout au long de son abscisse, nous aurons reconstitué l'allure de sa déformée.

Cela nous donne, pour une abscisse x quelconque d'un élément e_{ij}, la figure :

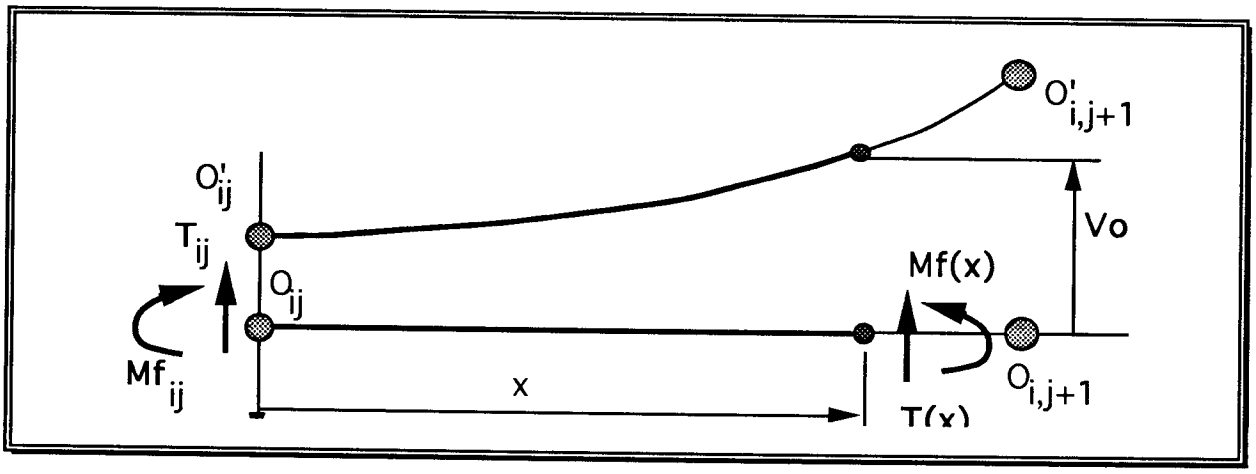


Figure II-26 : flexion totale pour un élément

Nous verrons au paragraphe suivant comment reconstituer la déformation de la poutre complète.

b : étude en traction compression d'un élément

Soit N_{ij}, l'effort normal appliqué par le noeud O_{ij} sur e_{ij}, $N_{i,j+1}$ et l'effort normal appliqué par le noeud $O_{i,j+1}$ sur e_{ij}. Ces deux forces ne sont plus égales dès que le segment n'est pas horizontal.

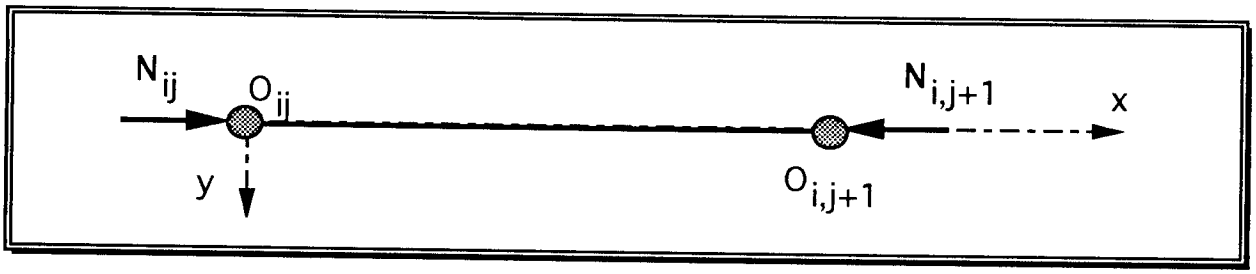


Figure II-27 : modélisation en traction compression : chargement d'un élément e_{ij}

Sous l'effet des sollicitations, l'élément e_{ij} subit une déformation qui provoque les déplacements U_{ij} et $U_{i,j+1}$ de ses extrémités j et j+1, donc des noeuds respectifs O_{ij} et $O_{i,j+1}$:

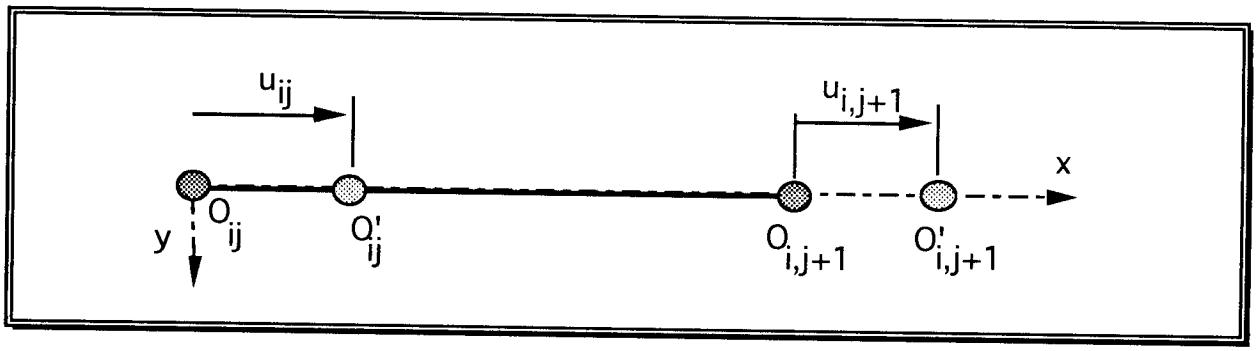


Figure II-28 : déformation d'un élément en traction compression

Nous avons donc un cumul de déformations propres tout au long de chaque élément :

U_{ij}, déplacement linéaire longitudinal de l'extrémité j
$U_{i,j+1}$, déplacement linéaire longitudinal de l'extrémité j+1

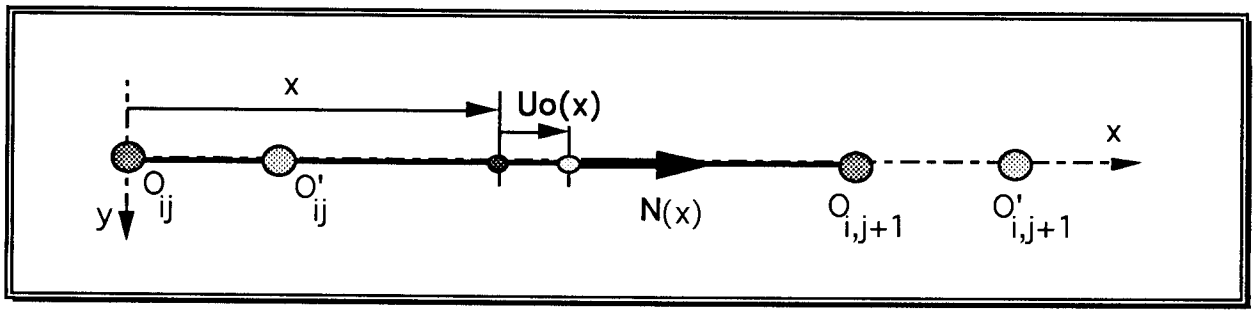


Figure II-29 : traction compression totale d'un élément

Soient **N**(x), l'effort normal appliqué sur la section d'abscisse x, et **Uo**(x), la fonction de la déformée de la traction compression de l'élément e_{ij},

La théorie de la traction compression des poutres droites donne la relation suivante :

$$\mathbf{N}(x) = - E \cdot S \cdot \frac{d}{dx} \cdot \mathbf{Uo}(x)$$

avec $\mathbf{N}(x) = \mathbf{N}_{ij}$ et S = section

Cela donne :

$$E \cdot S \cdot \mathbf{Uo}(x) = - \mathbf{N}_{ij} \cdot x + E \cdot S \cdot \mathbf{U}_{ij}$$

Nous déterminons, également par récurrence, l'expression de :

$$\mathbf{U}_{i,j+1} = \mathbf{U}_{ij} - \frac{\mathbf{N}_{ij} \cdot \mathbf{dl}_{ij}}{E \cdot S}$$

c : étude d'un élément en torsion

Soient, $\mathbf{Mt}_{ij}$, le moment de torsion appliqué à l'élément e_{ij},
θ_{ij}, la rotation relative de deux sections en rd/m,
$\theta\mathbf{t}(x)$, la fonction rotation totale de la section d'abscisse x en rd,
G, le module d'élasticité transversale du matériau constituant la poutre,
Io, le moment quadratique polaire de la section,

La théorie de la Résistance des Matériaux, appliquée à la torsion nous conduit à la relation :

$$Mt_{ij} = G \cdot \theta_{ij} \cdot Io \quad \text{et} \quad \theta t(x) = \theta_{ij} \cdot x$$

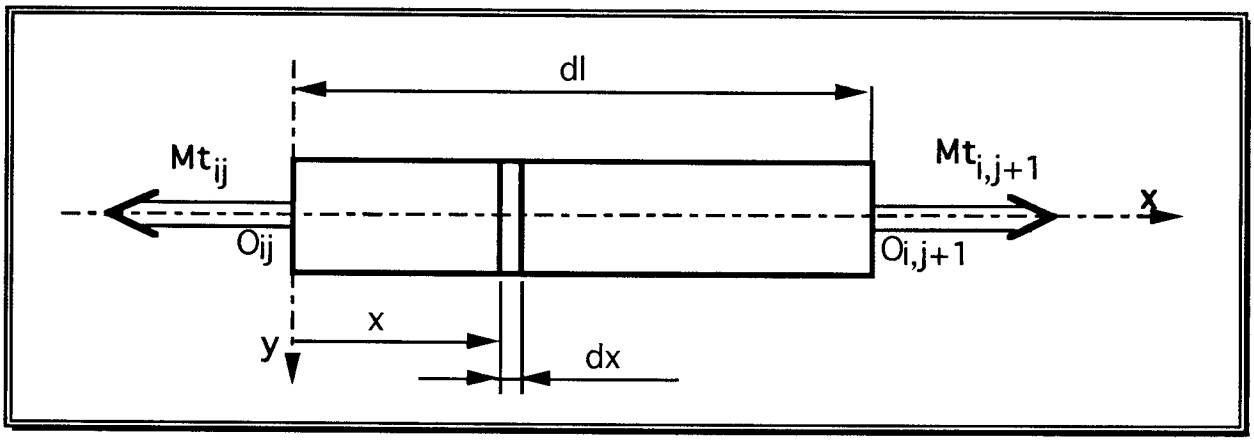


Figure II-30 : sollicitation en torsion d'un élément e_{ij}

Compte tenu des conditions aux limites de cet élément e_{ij}, nous déterminons ainsi la relation suivante :

$$\theta t_{i,j+1} = \frac{Mt_{ij}}{G \cdot Io} \cdot dl_{ij} + \theta t_{ij}$$

avec **Io** le moment quadratique polaire de la section ($Io = Io_y + Io_z$).

1.2.3.5. évaluation du Torseur global des petits déplacements pour un corps de chaque segment

a : récapitulation des déformations pour un élément e_{ij}

Nous avons identifié, pour chaque élément e_{ij}, les déformations élémentaires suivantes :

θt_{ij}, déformation angulaire due à la torsion,

Vw_{ij}, déformation linéaire due à la flexion dans le plan **xOw**, le long de **w**,

αw_{ij}, déformation angulaire due à la flexion dans le plan perpendiculaire à **w**, autour de **w**,

U_{ij}, déformation linéaire de la traction compression

Nous pouvons écrire alors le torseur des petits déplacements de déformation d'un élément e_{ij}, $T_{ij}pdf$, réduit en son extrémité $O_{i,j+1}$, et exprimant les petits déplacements qui font passer l'extrémité de cet élément de la position $O_{i,j+1}$ à la position $O'_{i,j+1}$:

$$T_{ij}pdf = \begin{Bmatrix} \theta t_{ij} & U_{ij} \\ \alpha y_{ij} & Vy_{ij} \\ \alpha z_{ij} & Vz_{ij} \end{Bmatrix}_{/O_{i,j+1},R_{ij}}$$

Deux méthodes sont envisageables pour obtenir l'influence totale de tous ces petits déplacements sur l'extrémité du segment, coté effecteur, au point O_{i+1}.

b : première méthode : calculs indépendants, réduction en un même point O_{i+1} et somme

Dans cette méthode, il s'agit de poser en condition initiale que les conditions aux limites en O_{ij} sont nulles pour chaque élément e_{ij}. Nous pourrons ainsi calculer tous les $\mathbf{T}_{ij}pdf$

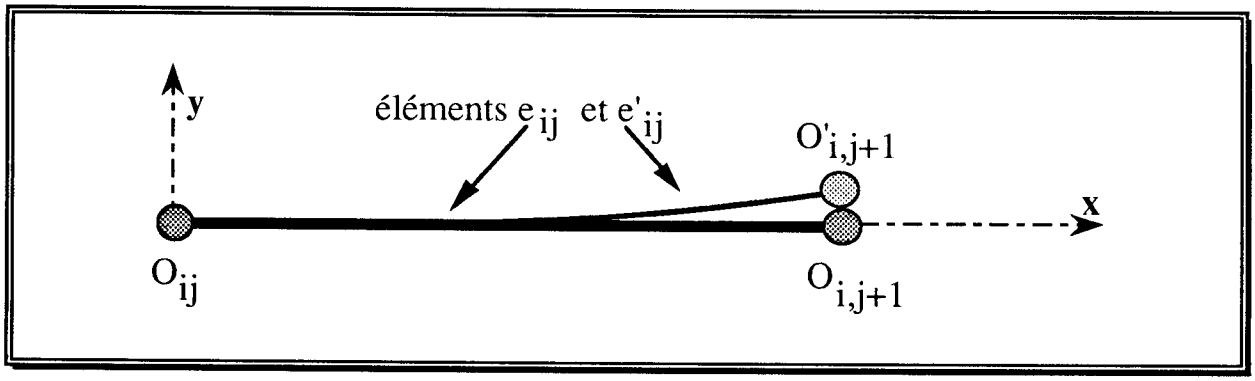


Figure II-31 : conditions d'étude aux limites des éléments e_{ij}

Les conditions initiales aux limites en O_{ij} (x=0) se traduisent donc pour chaque élément e_{ij} en ce qui concerne les translations par $\begin{pmatrix} \mathbf{U}_{ij(o)} = 0 \\ \mathbf{V}\mathbf{y}_{ij(o)} = 0 \\ \mathbf{V}\mathbf{z}_{ij(o)} = 0 \end{pmatrix}$ et en ce qui concerne les rotations par $\begin{pmatrix} \theta\mathbf{t}_{ij(o)} = 0 \\ \alpha\mathbf{y}_{ij(o)} = 0 \\ \alpha\mathbf{z}_{ij(o)} = 0 \end{pmatrix}$.

Dans un premier temps, nous réduirons l'ensemble des $\mathbf{T}_{ij}pdf$ au noeud terminal de C_i, soit j = m+1, ce qui correspond au point $\mathbf{O}_{i+1}$, (équivalent à $\mathbf{O}_{(i+1)1}$, noeud d'origine du bras C_{i+1}) :

$$\mathbf{T}_{ij}pdf = \begin{Bmatrix} \theta\mathbf{t}_{ij} & \mathbf{U'}_{ij} \\ \alpha\mathbf{y}_{ij} & \mathbf{V'y}_{ij} \\ \alpha\mathbf{z}_{ij} & \mathbf{V'z}_{ij} \end{Bmatrix}_{/\mathbf{O}_{i+1},\mathbf{R}_i} \quad \text{avec :}$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{U'}_{ij} \\ \mathbf{V'y}_{ij} \\ \mathbf{V'z}_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{ij} \\ \mathbf{V}\mathbf{y}_{ij} \\ \mathbf{V}\mathbf{z}_{ij} \end{pmatrix} + (\mathbf{O}_{i+1}\mathbf{O}_{i,j+1}) \wedge \begin{pmatrix} \theta\mathbf{t}_{ij} \\ \alpha\mathbf{y}_{ij} \\ \alpha\mathbf{z}_{ij} \end{pmatrix}$$

Puis, il nous suffit de sommer cet ensemble pour obtenir le Torseur des petits déplacements de déformation de la poutre C_i, soit $\mathbf{T}_i$pdf :

$$\mathbf{T}_i\text{pdf} = \Sigma_{j=1}^{m}(\mathbf{T}_{ij}\text{pdf}) = \begin{Bmatrix} \theta t_i & U_i \\ \alpha y_i & V y_i \\ \alpha z_i & V z_i \end{Bmatrix}_{/O_{i+1},R_i}$$

ce qui, sous une forme explicite, donne :

$$\mathbf{T}_i\text{pdf} = \begin{Bmatrix} \theta t_i = \Sigma_{j=1}^{m}(\theta t_{ij}) & U_i = \Sigma_{j=1}^{m}(U_{ij} + \mathbf{dp}_{xij}) \\ \alpha y_i = \Sigma_{j=1}^{m}(\alpha y_{ij}) & V y_i = \Sigma_{j=1}^{m}(V y_{ij} + \mathbf{dp}_{yij}) \\ \alpha z_i = \Sigma_{j=1}^{m}(\alpha z_{ij}) & V z_i = \Sigma_{j=1}^{m}(V z_{ij} + \mathbf{dp}_{zij}) \end{Bmatrix}_{/O_{i+1},R_i}$$

avec $\mathbf{dp}_{ij} = (\mathbf{O}_{i+1}\mathbf{O}_{i,j+1}) \wedge \begin{pmatrix} \theta t_{ij} \\ \alpha y_{ij} \\ \alpha z_{ij} \end{pmatrix}$, (réduction du torseur en $\mathbf{O}_{i+1}$). A noter que $\mathbf{O}_{i+1}\mathbf{O}_{i,j+1}$ le vecteur de déplacement de la réduction en $\mathbf{O}_{i+1}$ est égal à - (m - j)·$\mathbf{dl}_{ij}$.

Ces déplacements relatifs aux éléments e_{ij} d'un corps C_i seront exprimés dans le repère R_i lié à ce corps C_i.

c : deuxième méthode : prise en compte des déformations "au fur et à mesure"

Nous considérons les paramètres linéaires et angulaires de déformation de l'extrémité de l'élément $e_{i,j-1}$ comme étant les paramètres initiaux de l'élément suivant e_{ij}, c'est à dire ses conditions initiales :

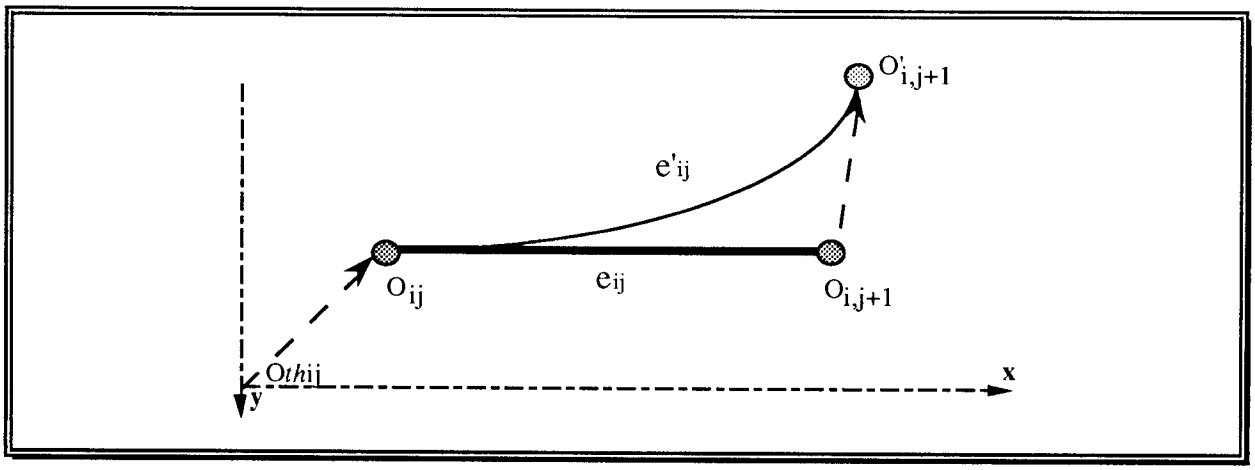


Figure II-32 : conditions initiales de l'élément e_{ij}

Le vecteur $\mathbf{O}th_{ij}\mathbf{O}_{ij}$, qui représente les conditions initiales de déformation en position, s'écrit $\begin{pmatrix} \mathbf{U}_{ij(o)} = \mathbf{U}_{i,j-1(dl)} \\ \mathbf{Vy}_{ij(o)} = \mathbf{Vy}_{i,j-1(dl)} \\ \mathbf{Vz}_{ij(o)} = \mathbf{Vz}_{i,j-1(dl)} \end{pmatrix}$, alors que les conditions initiales de déformation en rotation sont données par le vecteur

$$\begin{pmatrix} \theta\mathbf{t}_{ij(o)} = \theta\mathbf{t}_{i,j-1(dl)} \\ \alpha\mathbf{y}_{ij(o)} = \alpha\mathbf{y}_{i,j-1(dl)} \\ \alpha\mathbf{z}_{ij(o)} = \alpha\mathbf{z}_{i,j-1(dl)} \end{pmatrix}.$$

Ces conditions initiales proviennent des conditions finales de l'élément précédent $e_{i,j-1}$ (avec x=dl). Elles seront prises en compte dans les équations de déformées établies au paragraphe précédent.

De cette façon, les paramètres de déformée de l'extrémité $O_{i,m+1}$ (ou O_{i+1}) du dernier élément e_{im} composant la poutre C_i correspondront aux déformations totales de la poutre C_i.

Le Torseur des petits déplacements de déformation de C_i s'écrit donc :

$$\{\mathbf{T}_{ipdf}\} = \begin{Bmatrix} \theta\mathbf{t}_i = \theta\mathbf{t}_{im(dl)} & \mathbf{U}_i = \mathbf{U}_{im(dl)} \\ \alpha\mathbf{y}_i = \alpha\mathbf{y}_{im(dl)} & \mathbf{Vy}_i = \mathbf{Vy}_{im(dl)} \\ \alpha\mathbf{z}_i = \alpha\mathbf{z}_{im(dl)} & \mathbf{Vz}_i = \mathbf{Vz}_{im(dl)} \end{Bmatrix}_{/\mathbf{O}_{i+1},\mathbf{R}_i}$$

d : conclusion

Ce découpage en petits éléments nous permet une prise en compte par la modélisation des spécifications technologiques en étant au plus près de la réalité, puisque les poutres de robots industriels ne sont jamais de section constante.

Néanmoins, ces méthodes engendrent un calcul itératif assez pénalisant au niveau du temps de traitement algorithmique.

Pour cette raison, nous opterons pour la seconde méthode qui présente l'avantage d'avoir un nombre d'opérations calculatoires réduit par rapport à la première.

1.2.4. recomposition du défaut global

Nous allons maintenant développer dans ce paragraphe ce que nous avions sommairement décrit au paragraphe 1.1.4., c'est à dire comment mettre en place sur une posture du bras du robot le défaut global du robot, calculé à partir des modélisations élémentaires précédemment décrites.

1.2.4.1. cumul des déformations sur un segment

Pour chaque segment i, l'ensemble des défauts est obtenu en sommant les quatre torseurs de petits déplacements ainsi calculés :

$$\{T_i\} = \{T_{p_i}\}_{/O_{i+1},R_i} + \{T_{l_i}\}_{/O_{i+1},R_i} + \{T_{t_i}\}_{/O_{i+1},R_i} + \{T_{d_i}\}_{/O_{i+1},R_i}$$

Ce torseur de petits déplacements résultant contient douze paramètres de modélisation du comportement technologique, à quantifier en fonction du robot : six défauts de paramétrisation et six constantes d'élasticité pour les déformations.

Le torseur de paramétrage $\{T_{p_i}\}_{/O_{i+1},R_i}$ induit :

- trois paramètres linéaires constants ξ_{px_i}, ξ_{py_i} et ξ_{pz_i}, et
- trois paramètres angulaires constants α_{px_i}, α_{py_i} et α_{pz_i},

l'un de ces six paramètres étant toutefois réglable (celui qui correspond au degré de liberté de la liaison i et donc au capteur proprioceptif).

Le torseur de comportement de la liaison $\{T_{l_i}\}_{/O_{i+1},R_i}$ induit cinq coefficients d'élasticité K_{l_1}, K_{l_2}, K_{l_3}, K_{l_4} et K_{l_5}.

Celui de la transmission $\{T_{t_i}\}_{/O_{i+1},R_i}$ induit un coefficient d'élasticité K_t.

Ces six paramètres sont sensiblement constants, c'est à dire qu'ils sont sujets :

- à des usures et autres phénomènes déviants,
- à des réglables lors d'opérations de maintenance.

Il faudra donc identifier 12xn paramètres pour un robot à n ddl, dont 7xn avec une certaine périodicité. Nous reviendrons sur ces aspects au paragraphe 2..

1.2.4.2. notion de Modèle Géométrique Technologique

$\{T_i\}$, qui représente une petite translation et une petite rotation dans l'espace, peut s'écrire sous la forme d'une matrice de passage homogène, [MPdef], entre le repère théorique et le repère après cumul des défauts. Cette matrice représente bien une simulation locale du comportement réel, obtenue par une modélisation technologique des composants mécaniques.

$$\{T_i\} = \begin{Bmatrix} \alpha x_i & \xi x_i \\ \alpha y_i & \xi y_i \\ \alpha z_i & \xi z_i \end{Bmatrix}_{/O_{i+1}, R_i}$$

est équivalent à

$$[MPdef_i] = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha z_i & \alpha y_i & \xi x_i \\ \alpha z_i & 1 & -\alpha x_i & \xi y_i \\ -\alpha y_i & \alpha x_i & 1 & \xi z_i \\ O & O & O & 1 \end{bmatrix}$$

Figure 2.1.2.-29 : $\{T_i\}$ et $[MPdef_i]$

Nous pouvons montrer que nous obtenons alors, grâce à la simplification des termes négligeables du second ordre, une matrice différentielle de Paul [PAU81].

Cette démonstration s'articule autour des points suivants :

- la matrice homogène générale d'une translation et d'une rotation quelconque dans l'espace est :

$$\begin{bmatrix} C\alpha_{y_i}C\alpha_{z_i} & -C\alpha_{y_i}S\alpha_{z_i} & S\alpha_{y_i} & \xi_{x_i} \\ S\alpha_{x_i}S\alpha_{y_i}C\alpha_{z_i}+S\alpha_{z_i}C\alpha_{x_i} & C\alpha_{x_i}C\alpha_{z_i}-S\alpha_{x_i}S\alpha_{y_i}S\alpha_{z_i} & -S\alpha_{x_i}C\alpha_{y_i} & \xi_{y_i} \\ S\alpha_{x_i}S\alpha_{z_i}-C\alpha_{x_i}S\alpha_{y_i}C\alpha_{z_i} & S\alpha_{x_i}C\alpha_{z_i}+C\alpha_{x_i}S\alpha_{y_i}S\alpha_{z_i} & C\alpha_{x_i}C\alpha_{y_i} & \xi_{z_i} \\ O & O & O & 1 \end{bmatrix}$$

- les angles d'orientation α étant très faibles, nous pouvons approximer leurs sinus et cosinus par des développements limités à l'ordre 1 :

$$C\alpha = 1 + 0(\alpha^2) \qquad \text{et} \qquad S\alpha = \alpha + 0(\alpha^3),$$

- les α étant sensiblement de la même grandeur, les multiplications s'effectuent suivant les règles suivantes :

$$C\alpha\, S\alpha = \alpha + 0(\alpha^2), \qquad S\alpha\, S\alpha = 0(\alpha^2),$$

- cela nous donne alors la matrice de passage simplifiée suivante :

$$[MPdef_i] = \begin{bmatrix} 1 + 0(\alpha^2) & -\alpha_{z_i} + 0(\alpha^3) & \alpha_{y_i} + 0(\alpha^3) & \xi_{x_i} \\ \alpha_{z_i} + 0(\alpha^2) & 1 + 0(\alpha^2) & -\alpha_{x_i} + 0(\alpha^3) & \xi_{y_i} \\ -\alpha_{y_i} + 0(\alpha^2) & \alpha_{x_i} + 0(\alpha^2) & 1 + 0(\alpha^2) & \xi_{z_i} \\ O & O & O & 1 \end{bmatrix}$$

- nous obtenons, en simplifiant les termes en $0(\alpha)$, une matrice variationnelle (ou différentielle) de Paul.

Cette matrice doit être insérée à la bonne place dans le modèle géométrique direct du robot, afin de corriger la position théorique et prendre en compte les comportements technologiques. Cette modélisation des défauts est parfaitement adaptée à notre problème puisqu'un transformateur différentiel de coordonnées traduit parfaitement le comportement local du robot autour d'une configuration articulaire donnée.

Nous définirons le modèle géométrique technologique direct (**MGTD**) comme étant le produit pour l'ensemble des segments du robot du produit d'une matrice de passage entre les axes i et i+1 et d'une matrice corrective de prise en compte des défauts technologiques du segment Ci :

$$\mathbf{MGTD} = \prod_{i=1}^{n} [MP_{i/i+1}]\,[MPdef_i]$$

Nous obtenons alors une simulation de la posture réelle du robot :

$$\mathbf{X'}(q_p) = \mathbf{MGTD}(q_p)$$

Ce modèle, une fois les différents paramètres ajustés, nous permettra de calculer un point extrémal du robot $M'(q_p)$ beaucoup plus proche de sa position réelle $Mr(q_p)$ que sa position théorique $M(q_p)$:

$$d(Mr(q_p), M'(q_p)) << d(Mr(q_p), M(q_p)).$$

1.2.4.3. quantification de l'écart de posture du robot

Nous définirons l'écart théorique de posture ΔX_p par la différence de position finale obtenue entre celle calculée à partir du MGD et celle calculée à l'aide du MGTD. Nous aurons :

$$\Delta Xp = \mathbf{X'}(q_p) - \mathbf{X}(q_p) = \mathbf{MGTD}(q_p) - \mathbf{MGD}(q_p)$$

La norme de cet écart de posture peut s'exprimer en position :

$$\| \Delta \mathbf{X} \|_{position} = d(M(q_p), M'(q_p)) = \sqrt{\Delta Xp_x^2 + \Delta Xp_y^2 + \Delta Xp_z^2}$$

et en rotation :

$$\| \Delta \mathbf{X} \|_{rotation} = \sqrt{\Delta Xp_{\alpha x}^2 + \Delta Xp_{\alpha y}^2 + \Delta Xp_{\alpha z}^2}$$

1.3. Approche dynamique

Nous allons aborder maintenant la prise en compte des phénomènes dûs aux inerties propres des constituants du robot. Nous laisserons de coté la part de ces phénomènes liée à la qualité des asservissements, cela ne concernant pas directement notre propos. Nous nous concentrerons donc sur les déformations induites sur les composants mécaniques et affectant la caractérisation métrologique de la trajectoire.

1.3.1. approche dynamique à petite vitesse

Dans un premier temps, nous allons aborder ce problème sous l'angle pseudo-statique. Cette approche correspond toutefois à de réels cas de tâches robotisées rencontrés fréquemment dans l'industrie (vitesse de déplacement réduite et meilleure précision requise), et cela en renforce l'intérêt.

1.3.1.1. notion de trajectoire robotisée

Soit une trajectoire définie par ses coordonnées de point de départ $\mathbf{X}_d$ et de point d'arrivée $\mathbf{X}_f$. Contrairement à une trajectoire au sens de la mécanique (courbe définie par une continuité de points), la robotique utilise des trajectoires discrétisées, c'est à dire une suite de points échantillonnés sur la courbe continue :

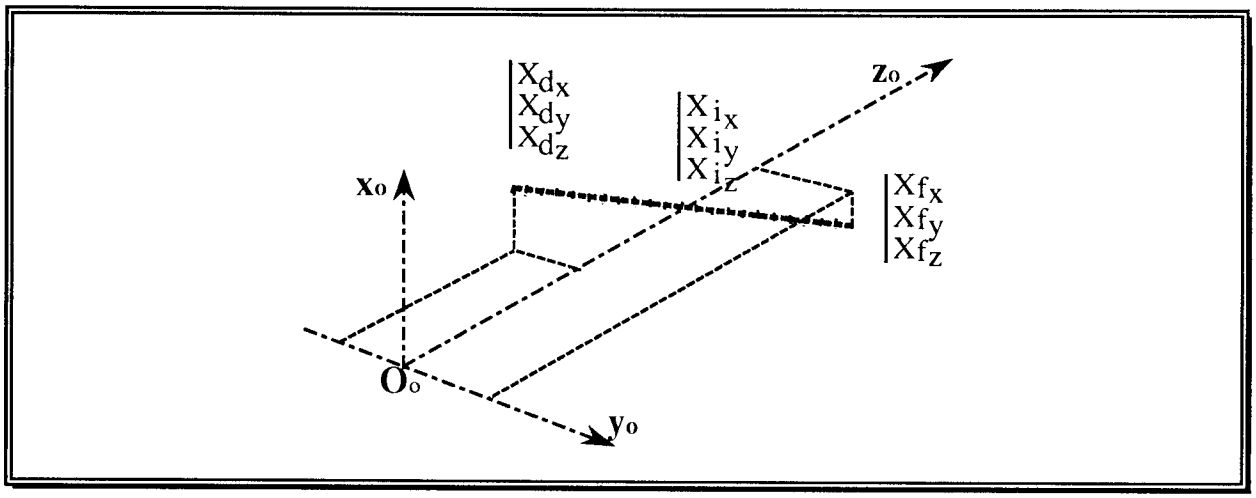


Figure II-34 : discrétisation de la trajectoire

1.3.1.2. hypothèse simplificatrice

Dans un premier temps, l'étude s'applique à un cas d'évolution du robot polyarticulé à faible vitesse, ce qui nous permet de développer notre méthode de calcul en considérant uniquement les hypothèses de la statique.

Si la vitesse de déplacement de l'effecteur n'est pas trop élevée et que la posture du robot est suffisamment éloignée d'une configuration singulière qui entraînerait malgré tout des vitesses trop élevées sur un ou plusieurs axes, alors, nous pouvons décrire une trajectoire comme étant une suite de s points correspondant à s postures statiques. En effet, pour une vitesse faible, les déformations dues aux forces d'inerties sont négligeables devant celles engendrées par les efforts statiques.

1.3.1.3. méthode de calcul

Il s'agit donc de lancer de manière itérative le calcul décrit ci-avant pour chaque point échantillonné tout au long de la trajectoire, ceci ne présentant aucune difficulté nouvelle par rapport au cas statique :

Début
Echantillonnage de la trajectoire en s points répartis entre ses deux extrémités
Pour chaque échantillon **X**k, k allant jusqu'à s, **faire**
    Calcul du **q**k : **q**k = **MGI(X**k)
    Pour chacun des segments i du robot, i allant jusqu'à n, **faire**
        Calcul du torseur d'intereffort $\{\mathbf{T}_{AM\ (Ci+1\ \text{-->}\ Ci)}\}$
        Calcul des forces de gravité et de leur projection
        Calcul de $\{\mathbf{T}_l\}$
        Calcul de $\{\mathbf{T}_t\}$
        Calcul de $\{\mathbf{T}_d\}$
        Réduction au point O_{i+1} des 4 torseurs de petits déplacements
        Sommation de ces torseurs
        Calcul de la matrice de passage variationnelle $[MPdef_i]$
    Fin faire
    Calcul de **X'**k : **X'**k = **MGTD(q**k)
    Calcul de l'écart de trajectoire Δ**X**k = **X'**$_k$ - **X**$_k$ = **X'**$_k$ - **MGD(q**$_k$)
Fin faire
Calcul d'un critère de forme de la trajectoire
Fin

Figure II-35 : algorithme de calcul à basse vitesse

1.3.1.4. quantification de l'écart de trajectoire

Nous pourrons évaluer l'écart de trajectoire à partir des s écarts Δ**X**i obtenus sur l'ensemble de la trajectoire selon plusieurs critères d'évaluation.

Par exemple, pour une trajectoire théoriquement rectiligne, nous pourrons rechercher le cylindre dont l'axe est la trajectoire théorique et qui contient la trajectoire simulée. Ce critère de rectitude est extrêmement simple, puisque le rayon de ce cylindre est égal au maximum des ΔX_i. Un autre critère de définition de la rectitude consiste à rechercher le plus petit cylindre contenant la trajectoire. Cela se fait en utilisant les techniques de régression par les moindres carrés [BOU87].

1.3.2. approche dynamique à vitesse élevée

Toutes les méthodes de calcul précédemment décrites sont fondées sur l'ignorance des phénomènes inertiels s'appliquant à la structure mécanique du robot. Cette hypothèse globale n'est plus valable dès que :

- les vitesses sont trop élevées,
- la définition de la dynamique de la trajectoire ne limite pas les accélérations angulaires,
- les masses sont élevées vis à vis d'une structure mécanique pas assez rigides.

La discrétisation des corps des segments amène naturellement à considérer l'influence des forces inertielles appliquées à chaque élément e_{ij} de longueur dl_{ij}. Nous proposons donc ici des éléments complémentaires propres aux modèles dynamiques.

1.3.2.1. force inertielle élémentaire

L'action inertielle élémentaire sur un élément e_{ij} de centre de gravité G_{ij}, représentée sur la figure ci-dessous, va s'exprimer par le torseur $\{T_{ij}\}$.

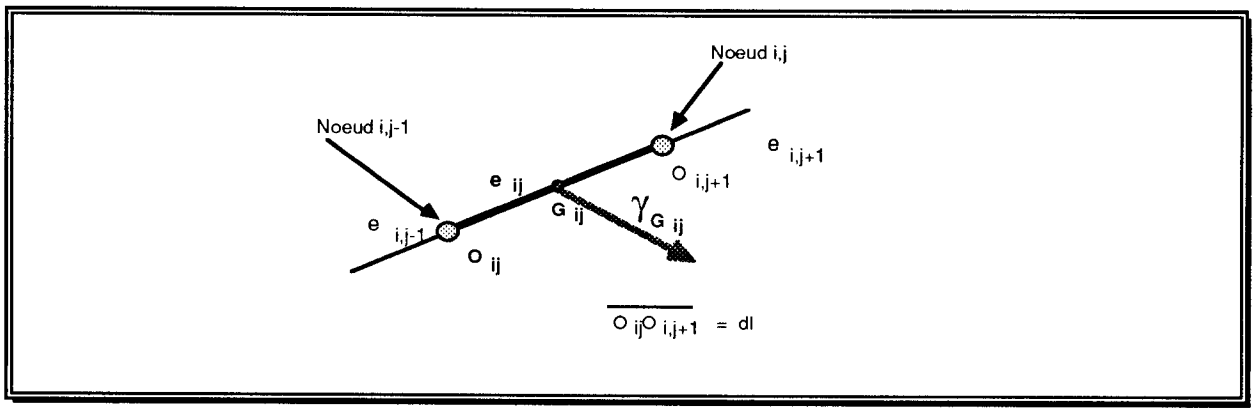


Figure II-36 : élément e_{ij} et son accélération instantanée $\gamma_{G_{ij}}$

$\{T_{ij}\}$ s'écrit : $\{T_{ij}\} = \left\{ \begin{array}{l} d\mathbf{F}_{ij} = dm_{ij}\,\gamma_{G_{ij}} \\ d\mathbf{M}_{Aij} = \mathbf{AG}_{ij} \wedge dm_{ij}\,\gamma_{G_{ij}} \end{array} \right\}_{/A}$

avec : dm_{ij} , la masse d'un élément e_{ij},

$\gamma_{G_{ij}}$, l'accélération instantanée de cet élément.

1.3.2.2. méthodologie de prise en compte de ces forces inertielles élémentaires

L'accélération à laquelle est soumise l'élément e_{ij} a deux origines, d'une part dans la dynamique propre à l'exécution de la trajectoire, et d'autre part les accélérations articulaires dues aux variations de la posture.

La dynamique de la trajectoire est définie par une loi de vitesse. L'allure la plus commune pour une telle loi est une allure trapézoïdale, et présente des échelons d'accélération. Il existe d'autres lois de vitesse, permettant de limiter vitesse et/ou accélération maximales, ou d'éviter les variations brutales d'accélération.

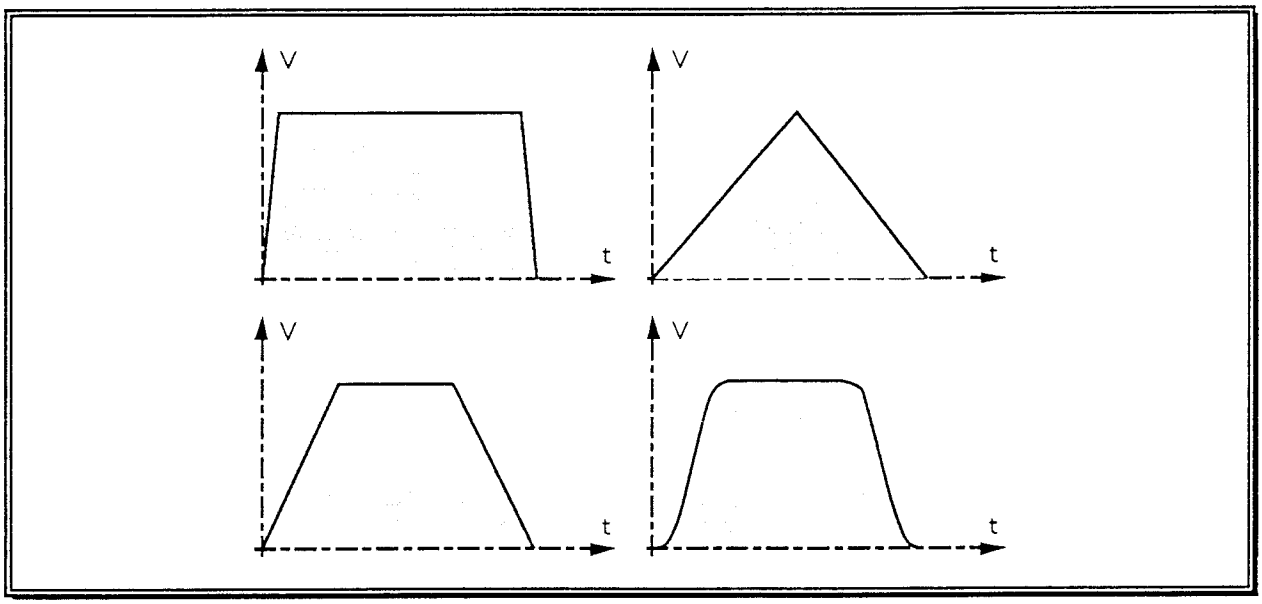
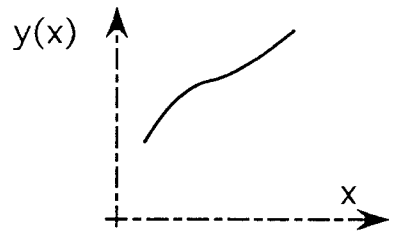


Figure II-37 : différentes lois de vitesse

Nous avons pris le parti délibéré de ne pas traiter cet aspect de la dynamique directement dans notre proposition d'évaluation des forces inertielles, afin de permettre plus facilement l'introduction de nouvelles lois de commande. Aussi, nous avons choisi la solution consistant à passer d'un échantillonnage spatial de la trajectoire à un échantillonnage spatio-temporel, c'est à dire que les points échantillonnés ne sont plus pris à équidistance sur la

trajectoire, mais à période fixe T sur cette dernière. Ceci nous permet de retrouver très facilement les valeurs suffisamment approchées des conditions cinématiques (vitesse et accélération) du mouvement sur la trajectoire :



$$\dot{y}(t+dt) = \frac{y(t+dt) - y(t)}{dt}$$

$$\ddot{y}(t+dt) = \frac{\dot{y}(t+dt) - \dot{y}(t)}{dt}$$

Figure II-38 : reconstitution des dérivées

Nous avons donc toutes les informations sur la dynamique de la charge. A partir de là, nous pouvons appliquer la même technique pour obtenir les accélérations propres dans l'espace articulaire $\ddot{q}_i$. En effet, avec un échantillonnage temporel, deux postures consécutives sont distantes d'un temps T, et nous avons les mêmes propriétés de reconstitution des dérivées. Nous pourrons donc calculer l'accélération instantanée γ_{ij} exercée sur chaque élément e_{ij}. L'algorithme général de calcul est donné à la figure II-39.

1.3.2.3. méthodologie de calcul de l'accélération γ_{ij}

Comme annoncé précédemment, nous utilisons une généralisation de l'algorithme d'Euler-Newton, ce qui nous conduit à rechercher l'accélération γ_{ij} de chaque élément e_{ij}.

a : détermination de la vitesse de rotation d'un élément e_{ij} de S_i

Soit $\mathbf{z}_i$, le vecteur unitaire suivant l'axe z_i du segment S_i, q_i, la position articulaire du segment S_i et $\dot{q}_i$, sa vitesse articulaire.

Les vitesses de rotation des éléments e_{ij} d'un même segment S_i sont équivalentes : $\omega_{i1} = ... = \omega_{i;j-1} = \omega_{ij} = \omega_{i;j+1} = ... = \omega_{im} = \omega_i$

Cette vitesse de rotation ω_i du segment S_i est la somme de sa vitesse propre de rotation $\dot{q}_i\,\mathbf{z}_i$ et de la vitesse de rotation du bras précédent ω_{i-1} :

$$\omega_i = \omega_{i-1} + (1-\sigma_i)\,\dot{q}_i\,\mathbf{z}_i$$

avec $\sigma_i=1$ si translation (liaison glissière) et $\sigma_i=0$ si rotation (liaison pivot).

Début

Échantillonnage de la trajectoire en s points répartis tous les temps T

Initialisation de $\dot{q}_0$

Pour chaque échantillon Xk, k allant jusqu'à s, **faire**

Calcul du qk : qk = **MGI**(Xk)

Calcul du $\dot{q}k$: $\dot{q}k = \dfrac{qk - qk-1}{T}$

Calcul du $\ddot{q}k$: $\ddot{q}k = \dfrac{\dot{q}k - \dot{q}k-1}{T}$

Pour chacun des segments i du robot, i allant jusqu'à n, **faire**

Calcul du torseur d'intereffort $\{T_{AM\ (Cj+1\ \text{-->}\ Cj)}\}$

Pour chacun des e_{ij} du segment i, j allant jusqu'à m_i, **faire**

Calcul de l'accélération γ_{ij} exercée sur e_{ij}

Calcul du torseur dynamique $\{T_{Dyn\ ij}\}$ exercé en G_{ij} sur e_{ij}

Réduction en O_{ij} du torseur dynamique $\{T_{Dyn\ ij}\}$

Calcul des forces de gravité et de leurs projections

Application du Principe Fondamental de la Dynamique sur e_{ij} en O_{ij} et détermination du torseur de liaison avec l'élément adjacent.

Fin faire

Calcul de $\{T_l\}$, de $\{T_t\}$ et de $\{T_d\}$ en prenant en compte les forces inertielles

Réduction au point O_{j+1} des 4 torseurs de petits déplacements

Sommation de ces torseurs

Calcul de la matrice de passage variationnelle [MPdef$_j$]

Fin faire

Calcul de X'i : X'i = **MGTD**(qi)

Calcul de l'écart de trajectoire $\Delta Xi = X'_i - X_i = X'_i - \mathbf{MGD}(q_i)$

Fin faire

Calcul d'un critère de forme de la trajectoire

Fin

Figure II-39 : algorithme de calcul avec prise en compte des inerties

b : détermination de la vitesse de translation d'un élément e_{ij} (au point O_{ij}) d'un segment S_i

Nous trouvons immédiatement :

$$V_{ij} = V_{i1} + \omega_i \wedge (j-1)\, \mathbf{dl}_{ij}$$

avec $\mathbf{V}_{i1} = \mathbf{V}_{i-1;m+1} + \sigma_i \dot{q}_i \mathbf{z}_i = \mathbf{V}_{i-1;m} + \boldsymbol{\omega}_{i-1} \wedge \mathbf{dl}_{i-1} + \sigma_i \dot{q}_i \mathbf{z}_i$, ce qui correspond à la vitesse de l'extrémité du segment S_{i-1}.

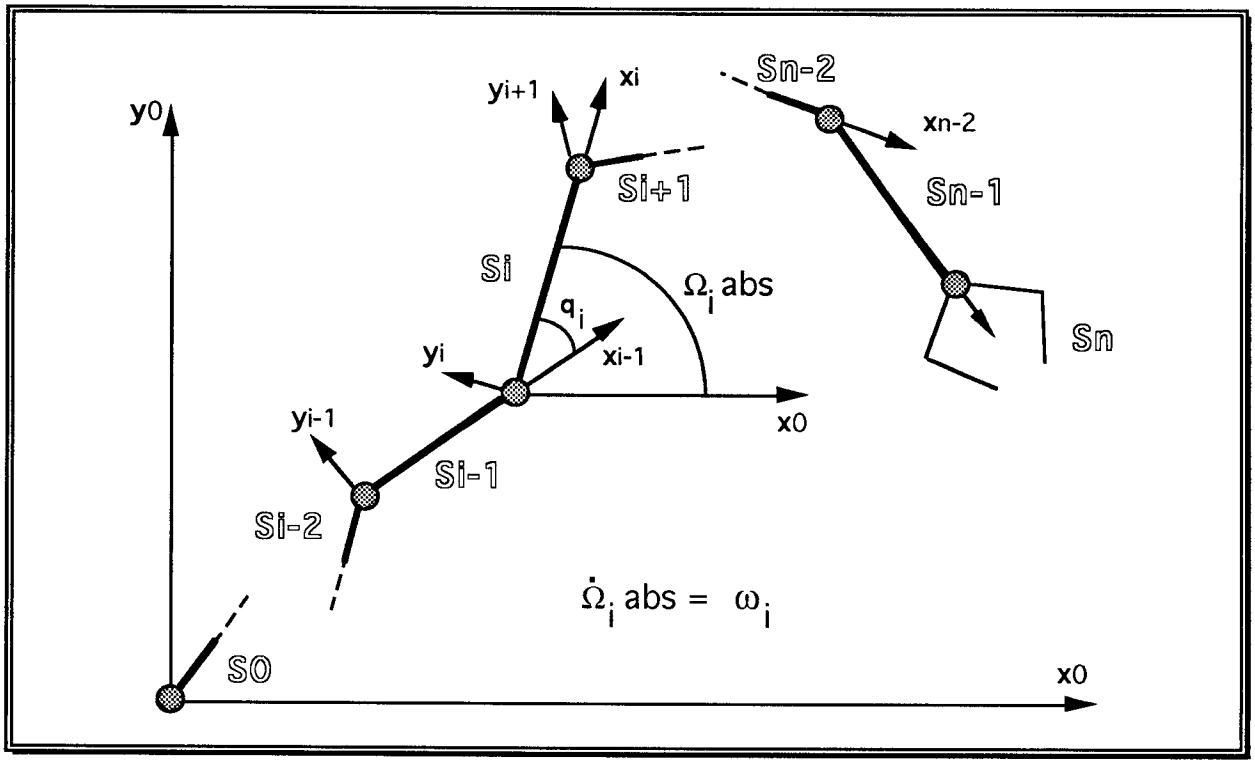


Figure II-40 : modélisation cinématique du bras

c : détermination de l'accélération angulaire d'un élément e_{ij} d'un segment S_i

Soit $\ddot{q}_i$, l'accélération articulaire du segment S_i. En dérivant l'équation obtenue en *a*, nous obtenons :

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} + (1-\sigma_i)(\ddot{q}_i \mathbf{z}_i + \boldsymbol{\omega}_{i-1} \wedge \dot{q}_i \mathbf{z}_i)$$

d : détermination de l'accélération de translation en O_{ij} d'un élément e_{ij} d'un segment S_i

Soit γ_{ij}, l'accélération instantanée d'un élément e_{ij} du segment S_i. En dérivant l'équation obtenue en *c*, nous obtenons $\gamma_{ij} = \dot{\mathbf{V}}_{ij}$:

$$\gamma_{ij} = \dot{\mathbf{V}}_{ij} = \dot{\mathbf{V}}_{i1} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \wedge (j-1)\, \mathbf{dl}_i + \boldsymbol{\omega}_i \wedge (j-1)(\boldsymbol{\omega}_i \wedge \mathbf{dl}_i + \sigma_i \dot{q}_i \mathbf{z}_i)$$

avec : $\dot{\mathbf{V}}_{i1} = \dot{\mathbf{V}}_{i-1;m+1} + \sigma_i (\ddot{q}_i \mathbf{z}_i + \boldsymbol{\omega}_{i-1} \wedge \dot{q}_i \mathbf{z}_i)$

et $\dot{\mathbf{V}}_{i-1;m+1} = \dot{\mathbf{V}}_{i-1;m} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \wedge \mathbf{dl}_{i-1} + \boldsymbol{\omega}_{i-1} \wedge ((\boldsymbol{\omega}_{i-1} \wedge \mathbf{dl}_{i-1}) + \sigma_i \dot{q}_i \mathbf{z}_i)$.

Remarque 1 : si le découpage de chaque segment ne se fait pas en un nombre constant d'éléments e_{ij}, il faut indexer leur nombre au segment correspondant et m devient m_i. L'accélération γ_{ij} devient alors :

$$\gamma_{ij} = \gamma_{i-1;m_{i-1}} + \dot{\omega}_{i-1} \wedge \mathbf{dl}_{i-1} + \omega_{i-1} \wedge ((\omega_{i-1} \wedge \mathbf{dl}_{i-1}) + \sigma_{i-1}\, \dot{q}_{i-1}\, \mathbf{z}_{i-1})$$
$$+ \sigma_i\, (\ddot{q}_i\, \mathbf{z}_i + \omega_{i-1} \wedge \dot{q}_i\, \mathbf{z}_i) + \dot{\omega}_i \wedge (j-1)\, \mathbf{dl}_i + \omega_i \wedge (j-1)(\omega_i \wedge \mathbf{dl}_i + \sigma_i\, \dot{q}_i\, \mathbf{z}_i)$$

avec j compris entre 1 et m_i-1.

Remarque 2 : Nous pouvons également imaginer une décomposition de la poutre en des éléments e_{ij} dont la longueur serait différente. Cette particularité permettrait de mieux se calquer sur la réalité technologique de la partie opérative (prise en compte de nervure, évolution des sections...) et se traduirait par le remplacement de j éléments identiques (le produit $j\,\mathbf{dl}_i$) par j éléments distincts (la somme $\sum_{k=1}^{j} \mathbf{dl}_{ik}$).

Pour la clarté de l'exposé, nous ne prendrons pas en compte ces deux remarques, leur mise en oeuvre ne posant aucune difficulté particulière.

e : détermination de l'accélération de translation en G_{ij} d'un élément e_{ij} d'un segment S_i

Pour appliquer le principe fondamental de la Dynamique à l'élément e_{ij}, il faut connaitre l'accélération totale qui s'applique en G_{ij}, le centre de gravité de cet élément. Nous avons fait comme hypothèse à ce niveau que la longueur des éléments e_{ij} est suffisamment petite et que la variation de section est suffisamment faible pour que ce centre de gravité soit situé sensiblement à mi-chemin entre O_i et O_{i+1}. Cela nous donne alors :

$$\gamma_{Gij} = \dot{\mathbf{V}}_{Gij} = \dot{\mathbf{V}}_{ij} + (\dot{\omega}_{ij} \wedge \frac{\mathbf{dl}_{ij}}{2}) + (\omega_{ij} \wedge (\omega_{ij} \wedge \frac{\mathbf{dl}_{ij}}{2})$$

1.3.2.4. équilibre dynamique d'un élément e_{ij} du segment S_i

a : Torseur dynamique au centre de gravité G_{ij} de l'élément e_{ij} du segment S_i

Soit $\mathbb{I}_{ij}$, la matrice représentant le tenseur d'inertie de l'élément e_{ij} du segment S_i par rapport au repère R_{ij}, parallèle à R_i et d'origine G_{ij}.

Les équations de la Dynamique permettent de déterminer le torseur dynamique $\{\mathbf{T}_{Dyn\ ij}\}$ créé en G_{ij} sur l'élément e_{ij} de masse dm_{ij} et d'accélération γ_{Gij}. Cela donne une résultante dynamique et un moment dynamique :

$$\{T_{Dyn\ ij}\}_{/G_{ij}} = \begin{Bmatrix} F_{ij} \\ M_{G\,ij} \end{Bmatrix}_{/G_{ij}}$$

$$= \begin{Bmatrix} dm_{ij}\ \gamma_{G\,ij} \\ \mathbb{I}_{ij}\cdot\dot{\omega}_{ij} + \omega_{ij} \wedge \mathbb{I}_{ij}\ \omega_{ij} \end{Bmatrix}_{/G_{ij}}$$

b : torseur dynamique en O_{ij} de l'élément e_{ij} du segment S_i

Nous pouvons réduire ce torseur $\{T_{Dyn\ ij}\}_{/G_{ij}}$ en Oij, afin d'obtenir $\{T_{Dyn\ ij}\}_{/O_{ij}}$, qui correspond à la composante dynamique du torseur de liaison avec l'élément adjacent.

$$\{T_{Dyn\ ij}\}_{/O_{ij}} = \begin{Bmatrix} F_{ij} \\ M_{O\,ij} \end{Bmatrix}_{/O_{ij}}$$

$$= \begin{Bmatrix} dm_{ij}\ \gamma_{G\,ij} \\ M_{G\,ij} + dm_{ij}\ \gamma_{G\,ij} \wedge \dfrac{\mathbf{dl}_{ij}}{2} \end{Bmatrix}_{/O_{ij}} =$$

$$= \begin{Bmatrix} dm_{ij}\ \gamma_{G\,ij} \\ \mathbb{I}_{ij}\cdot\dot{\omega}_{ij} + \omega_{ij} \wedge \mathbb{I}_{ij}\ \omega_{ij} + dm_{ij}\ \gamma_{G\,ij} \wedge \dfrac{\mathbf{dl}_{ij}}{2} \end{Bmatrix}_{/O_{ij}}$$

c : application du Principe Fondamental de la Dynamique en O_{ij}

Le reste de la méthodologie est totalement similaire à celle employée précédemment. En effet, le principe fondamental de la Dynamique n'est que l'expression d'un équilibre entre des interactions déjà présentes dans le principe fondamental de la Statique, auquel il faut adjoindre les actions dues à la dynamique, c'est à dire le torseur dynamique.

Nous n'en redétaillerons donc pas le principe de calcul, qui consiste à sommer les actions s'appliquant entre O_{ij} et $O_{i;m+1}$.

Le lecteur trouvera à la figure II-23, forces inertielles mises à part, les éléments de ce calcul. Il nous permet de reconstituer le torseur de liaison de l'élément e_{ij} avec l'élément $e_{i;j-1}$ $\begin{Bmatrix} T_{ij} \\ L_{O\,ij} \end{Bmatrix}_{/O_{ij}}$ et donc d'en déduire les différentes déformations en introduisant les expressions deT_{ij} et de L_{Oij} dans les équations des déformées définies au paragraphe 1.2.3.4. pour exprimer les paramètres de déformation dynamique. Le résultat final est stocké dans le torseur $\{T_{d_i}\}_{/O_{i+1},\,R_i}$ et le MGTD précédemment défini peut être calculé.

1.4. Conclusion

Nous avons donc la possibilité de simuler de manière réaliste et relativement pragmatique le comportement technologique de la partie mécanique d'un robot industriel. En effet, nous pouvons parler de réalisme puisque la modélisation de ce comportement technologique est littéralement "calquée" sur la réalisation technologique elle-même, et de pragmatisme, puisque la finesse des modélisations locales est réduite au minimum, se limitant la plupart du temps à un coefficient d'élasticité traduisant un comportement local linéaire ou quasi-linéaire.

Bien entendu, il existe d'autres phénomènes entraînant la création de défauts à l'extrémité du robot. Nous citerons les deux principaux qui sont les défauts dus aux frottements et ceux dus aux dilatations thermiques.

Les problèmes de frottement concernent à la fois $\left\{ \mathbf{T}_{l_i} \right\}_{/O_{i+1},\, R_i}$, puisque la liaison n'est plus parfaite ($f_{stat_i} \frac{\dot{q}_i}{\|\dot{q}_i\|} + f_{visq_i}\, \dot{q}_i$), $\left\{ \mathbf{T}_{t_i} \right\}_{/O_{i+1},\, R_i}$ et $\left\{ \mathbf{T}_{d_i} \right\}_{/O_{i+1},\, R_i}$, puisque la transmission et la poutre sont sollicitées différemment. En ce qui concerne les problèmes thermiques, la décomposition en constituants élémentaires constitue un terrain propice à la mise en oeuvre d'un modèle de propagation thermique à partir duquel nous pourrions évaluer les dilatations sous la forme d'un torseur de petits déplacements $\left\{ \mathbf{T}_{th_i} \right\}_{/O_{i+1},\, R_i}$.

Dans ces deux cas, notre décomposition hiérarchisée des sources de défaut nous permettrait d'intégrer ces phénomènes. Nous nous sommes contenté pour l'instant de les ignorer, grâce à des hypothèses de fonctionnement réalistes telles qu'un frottement de roulement minimal et un équilibre thermique atteint en utilisation industrielle.

2. IDENTIFICATION des PARAMETRES du MODELE TECHNOLOGIQUE d'un ROBOT INDUSTRIEL

Dans les paragraphes précédents, nous nous sommes dotés d'un modèle adapté à la prise en compte des principales sources de défauts de fonctionnement d'un robot polyarticulé et nous avons présenté les principaux moyens d'investigation pour acquérir expérimentalement une vision métrologique de ce fonctionnement.

2.1. Etude des techniques d'identification d'un modèle paramétrique de comportement d'un robot industriel

Nous allons exposer maintenant les différentes techniques d'identification envisageables pour calquer le modèle paramétrique proposé au comportement expérimental observé.

2.1.1. rappel de la problématique

Nous avons élaboré un modèle géométrique technologique direct prenant en considération tous les phénomènes liés aux incertitudes des valeurs du modèle géométrique direct et ceux liés aux défauts dus à la charge robotisée. Ce modèle (MGTD) est construit sur la base de douze paramètres par axe du robot, dont nous voulons maintenant définir la valeur. Connaissant le comportement réel d'un robot, nous voulons créer le meilleur modèle possible, capable de reproduire au mieux ce comportement réel, afin que nous puissions assimiler ce modèle à ce robot avec la plus petite marge d'erreur possible.

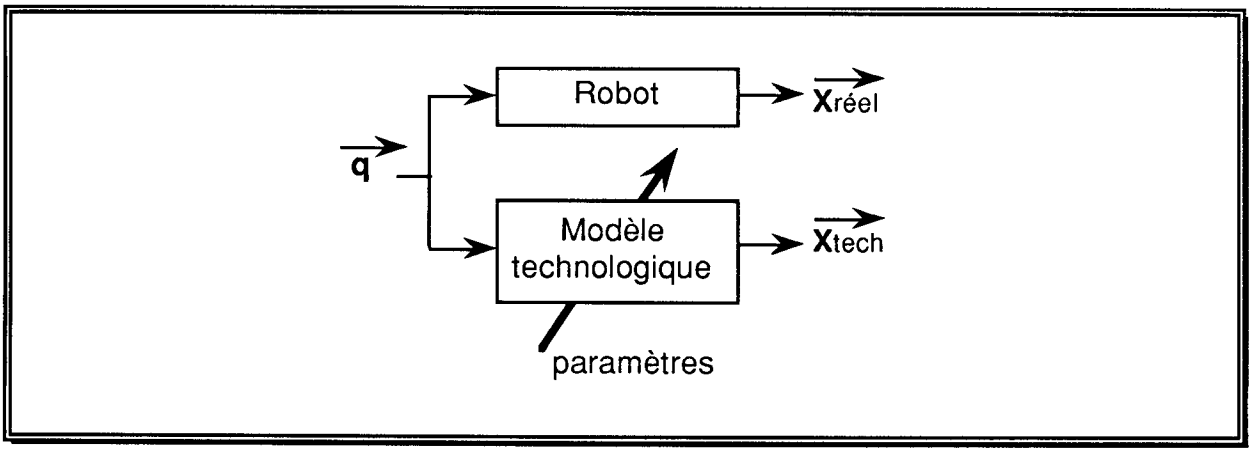


Figure II-41 : parallélisme entre modèle technologique et comportement réel

Nous nous devons donc de minimiser l'écart entre ces deux positions X_{tech} et $X_{réel}$ par le meilleur choix de paramètres possible.

En réalité, ce n'est pas aussi simple, car nous travaillerons toujours vis à vis de références théoriquement parfaites : le $X_{réel}$ sera en réalité un $X_{mesuré}$, avec le plus souvent une mesure relative à une règle matérielle, c'est à dire un $\Delta X_{mesuré}$, et le X_{tech} sera exprimé par sa partie significative, c'est à dire par l'écart généré par l'ensemble des défauts d'origine technologique vis à vis d'un comportement conventionnellement exempt de tout défaut. Cela nous donne :

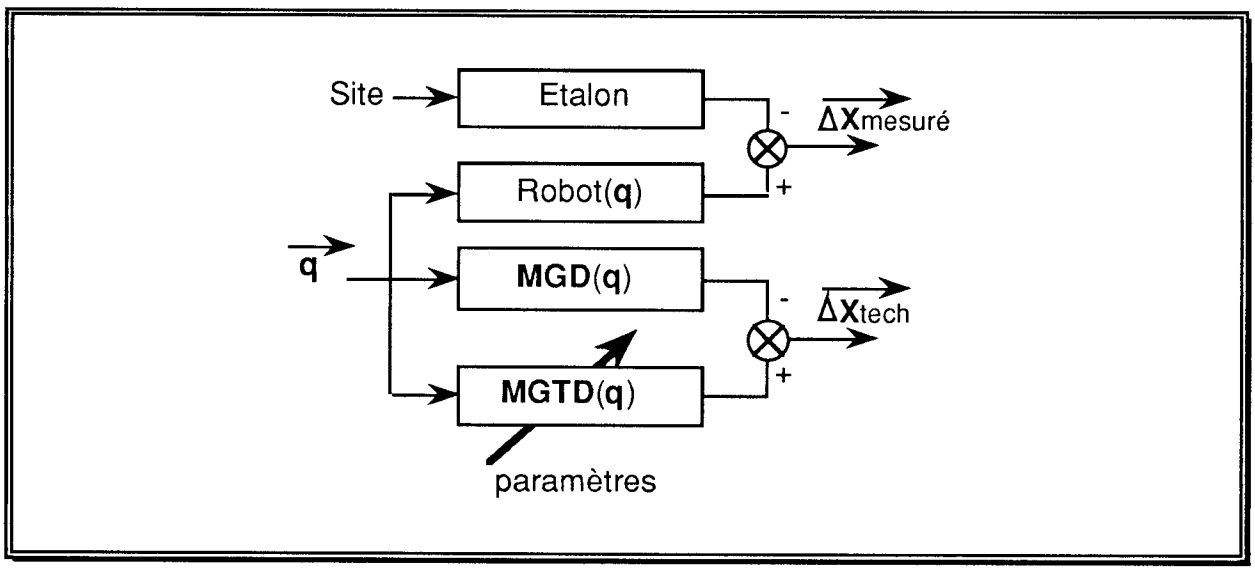


Figure II-42 : parallélisme entre l'écart mesuré et l'écart modélisé

Nous allons donc chercher à minimiser l'écart entre ces deux écarts $\Delta\Delta(\mathbf{q})$.

En complément de ce constat, et cette fois avec des incidences simplificatrices, nous pourrons envisager de dédoubler le problème en travaillant d'une part sur la position de l'effecteur et d'autre part sur son orientation, afin de rechercher deux minimales.

Le principal problème technologique se posant au niveau d'une tâche robotisée étant un problème de positionnement précis de l'effecteur dans l'espace de la scène, nous n'étudierons pas, dans un premier temps, le problème de l'orientation.

Nous allons faire un rapide panorama de différentes techniques pour quantifier et affiner les différents paramètres du MGTD, puis nous proposerons notre propre algorithme, basée sur l'amélioration du paramètre ayant le plus d'influence sur l'amélioration de la précision du MGTD.

2.1.2. analyse comparative de différentes techniques d'analyse de données et d'identification

Nous avons étudié les possibilités de transposition à notre problématique des méthodes d'analyse par composantes principales, d'analyse par plan d'expérience et d'analyse par la méthode des moindres carrés.

2.1.2.1. analyse par composantes principales

L'analyse par composantes principales consistera pour nous à rechercher au sein d'une population constituée d'un ensemble d'expériences les groupes de paramètres ayant une influence identique ou ceux ayant une influence prépondérante. Les $12 \times n$ paramètres ainsi que l'écart $\Delta\Delta(\mathbf{q})$ seront donc les propriétés observées.

Très intéressante pour comprendre le rôle et l'influence de chaque type de paramètres, cette méthode peut se révéler donc utile pour réduire l'étendue de notre problématique, en nous concentrant sur les paramètres les plus sensibles, mais elle ne nous permettrait pas, en aucun cas, d'obtenir une valeur numérique. Cette méthode ne nous convient donc pas.

2.1.2.2. analyse par la méthode des moindres carrés

Nous allons chercher à minimiser l'écart $\Delta\Delta(\mathbf{q})$. Au sens des moindres carrés, le critère à minimiser est $Q = \sum (\Delta\Delta(\mathbf{q}))^2$. La bonne configuration de paramètres correspond à l'ensemble des paramètres $\{p_k\}$ pour lequel chaque dérivée partielle de Q par rapport à chaque paramètre p_k s'annule :

$$\text{quel que soit } k\ , \qquad \frac{\partial Q}{\partial p_k} = 0.$$

Cette méthode, qui sur le principe est la meilleure de toutes, soulève deux types de difficultés. La première est que la fonction Q est extrêmement complexe et donc qu'elle est difficilement dérivable. La seconde est que le nombre de paramètres p_k rend la résolution coûteuse en temps de calcul.

Pour toutes ces raisons, cette méthode ne semble pas envisageable.

2.1.2.3. analyse par plan d'expérience

Le but d'un plan d'expérience est précisément d'optimiser la configuration d'un ensemble de facteurs d'influence (les paramètres p_k) sur une fonction ($\Delta\Delta(\mathbf{q})$).

L'idée de base est de faire varier un paramètre à la fois en multipliant les expériences et les configurations. Si nous avons m paramètres p_k pouvant être testé sur l niveaux, il faut m^l expériences pour réaliser un plan factoriel complet. Cela est impensable en ce qui nous concerne (72^3 = 373248 expériences !).

Nous pourrons aboutir plus rapidement à des résultats meilleurs, en faisant varier plusieurs paramètres à la fois selon certaines règles (critère d'orthogonalité, critère du nombre de ddl) : nous utiliserons alors un plan fractionnaire. Il s'agira d'établir un plan d'expérimentation comportant le minimum d'expériences compte tenu des résultats souhaités. Les avantages sont nombreux : diminution du nombre d'essais sans perdre en précision, possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs, détection d'éventuelles interactions entre les facteurs et gestion simplifiée de la conduite du protocole d'expérimentation.

Un plan fractionnaire doit être orthogonal. Nous définissons deux actions disjointes, c'est-à-dire ne comportant pas de facteurs en commun, comme orthogonales si, à chaque niveau de l'une, tous les niveaux de l'autre lui sont associés le même nombre de fois dans le plan d'expériences. Le plus petit plan orthogonal que l'on puisse trouver est donc un plan comportant un nombre d'expériences égal au Plus Petit Commun Multiple du produit du nombre de niveaux de toutes les actions disjointes, prises deux à deux.

Le nombre minimal d'expériences à réaliser est égal au nombre de ddl du système étudié. Nous définissons le nombre de ddl d'un facteur comme égal au nombre de niveaux moins un. Le plan doit contenir, au minimum, un

nombre d'expériences égal à la somme des degrés de liberté de chaques facteurs. Pour minimiser le nombre d'essais, il est important de choisir des nombres de niveaux non premiers entre eux. Dans notre cas, nous devons effectuer une recherche d'extremum, et il faut faire l'étude du plus grand nombre de facteurs possibles avec un minimum de niveaux. Les interactions entre facteurs seront généralement négligées.

Nous avons considéré les plans d'expériences de Taguchi, qui sont des plans fractionnaires simplifiés grâce à quelques astuces qui facilitent leur mise en pratique et donc la tâche de l'expérimentateur. Par la définition de quelques tables standards, la méthode Taguchi permet de résoudre la plupart des problèmes en matière de plan d'expériences. Ces tables standards considèrent que les interactions entre 2 facteurs sont négligeables sauf quelques unes parfaitement identifiées. Les interactions d'ordre supérieur à 2 sont négligées. Nous allons appliquer cette méthode dans le paragraphe suivant.

2.1.3. mise en oeuvre de la méthode Taguchi pour l'identification des paramètres principaux du MGTD

Le MGTD est "ajusté" par 72 paramètres, qui couvrent l'ensemble de facteurs d'influence potentiellement existant dans un robot. Mais en réalité, il a été établi par les constructeurs de robots que seul un petit nombre de ces paramètres engendre la plus grande part de l'erreur finale observée sur les robots industriels actuels.

Nous allons appliquer un plan fractionnaire réduit à ces paramètres principaux que sont le décalage angulaire $\alpha_{p\,z\,i}$ de chaque segment i et son écart de longueur $\xi_{p\,x\,i}$. Cela nous donne un plan d'expérience à 2 n facteurs, et 3 niveaux ($-d_i$, 0 et d_i).

Le modèle trouvé peut être adapté pour la configuration des facteurs testés, mais pas sur l'ensemble du domaine de validité de ces facteurs. Il est fort probable que la configuration testée ne soit pas optimale et il faudra compléter par d'autres expérimentations. Si le modèle ainsi construit s'éloigne trop du comportement réel du robot, les principales raisons seront la non prise en compte de facteurs influents, mal considérés dans le plan d'expériences, ou l'existence d'interactions fortes non retenues dans le plan d'expérimentation. Après de nouvelles expériences, nous pourrons obtenir progressivement une meilleure correspondance entre le modèle et la réalité.

Prenons comme exemple la détermination de 12 des 72 paramètres d'un robot 6 axes. Nous aurons (1 + 12.(3-1)) expériences à tester, soit 25 expériences au minimum. Le plan choisi devra être multiple du nombre de niveaux, c'est-à-dire multiple de 3. Le plan minimal retenu comporte donc 27 essais. Dans les tables de Taguchi, la table L27 (3^{13}) comporte 27 expériences, avec 13 facteurs à 3 niveaux. Elle semble donc correspondre à notre problème. Nous lancerons donc 27 fois le MGTD, avec les réglages des 12 paramètres aux niveaux indiqués par la table (les 60 paramètres restants étant constants) et nous choisirons la configuration pour laquelle $\Delta\Delta(\mathbf{q})$ est minimisé.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Figure II-43 : table de Taguchi L27

Cette méthode va nous permettre de "dégrossir" le problème. Cela suffira suivant la précision nécessaire à l'accomplissement de la tâche robotisée. Néanmoins, pour affiner la détermination des paramètres, nous pouvons lancer de nouveau le même plan d'expérimentation, en changeant simplement la valeur des niveaux des paramètres.

Nous pouvons également utiliser le même plan pour la détermination des 12 paramètres liés à un seul segment. Cela est extrêmement intéressant lors d'une opération locale de maintenance, pour ne déterminer uniquement que les paramètres ayant changé : certains paramètres dimensionnels ainsi que les six constantes d'élasticité.

Cependant, une telle méthodologie ne pourra être employée directement pour les 72 paramètres. En effet, même si la méthode des plans d'expériences semble être un bon compromis des deux méthodes précédentes, sa mise en oeuvre globale n'est pas envisageable (trop de paramètres et trop de niveaux par paramètre) et nous sommes obligés de sélectionner une partie des paramètres pour envisager sa mise en oeuvre.

2.2. proposition d'une méthode d'identification des paramètres du MGTD

Puisque les grandes méthodes d'identification ne semblent pas vraiment adaptées à notre problématique, nous avons développé une méthode spécifique, basée sur deux principes éprouvés : progression dichotomique et traitement de la cause ayant le plus d'effet.

2.2.1. principe général

Nous remarquerons tout d'abord que chacun des paramètres que nous cherchons à identifier peut être doté d'un intervalle de variation borné. Ces bornes doivent être estimées en fonction du comportement technologique local que traduit le paramètre.

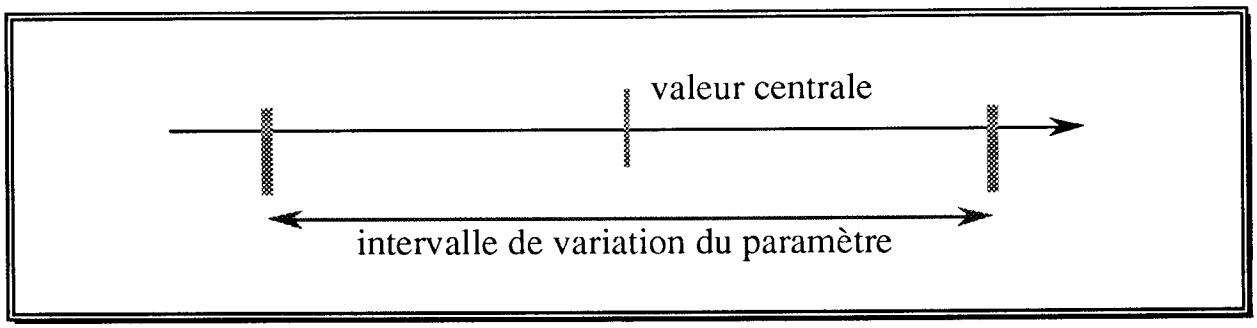


Figure II-44 : intervalle de variation d'un paramètre

Cela se fera soit par estimation des incertitudes de modélisation, soit par évaluation des incertitudes d'acquisition expérimentale, soit par exploitation de données constructeur. Par exemple, pour une longueur de segment de 500 ± 0,5 mm, l'intervalle de variation sera de 1 mm et la valeur effective du paramètre sera issue d'une côte de fabrication, alors que pour une constante d'élasticité de 100000 Nm/rad, il sera estimé à quelques %, soit 3000 Nm/rad, et dépendra des conditions de montage et de réglage. Dans tous les cas, la valeur théorique ou la valeur connue sera la valeur centrale de cet intervalle de variation.

Nous remarquerons ensuite que, chaque comportement technologique local étant linéaire, il existe une valeur de ce paramètre p_k qui minimise l'incertitude globale $\Delta\Delta(\mathbf{q})$ de notre modèle. Nous ne pouvons toutefois pas atteindre directement cette valeur à l'aide d'une dérivée partielle, $\frac{\partial\Delta\Delta(\mathbf{q})}{\partial p_k}$, étant donné la complexité du modèle et l'influence des paramètres sur le

résultat final. Ceci nous permet en tous cas de justifier une approche par dichotomie qui se présente ainsi :

- p_k est initialisé à la valeur centrale p_{km} de l'intervalle de variation,

- Δ_k est initialisé au quart de la valeur de l'intervalle de variation,

- nous calculons $\Delta\Delta(\mathbf{q})$ pour p_{km}, $p_{km} + \Delta_k$, $p_{km} - \Delta_k$.

- nous conservons le meilleur des trois résultats comme nouvelle valeur médiane p_{km} et nous diminuons de moitié Δ_k.

Nous recommençons les deux dernières étapes jusqu'à ce que les améliorations observées sur $\Delta\Delta(\mathbf{q})$ ne soient plus significatives. Cette démarche est illustrée par la figure II-45 :

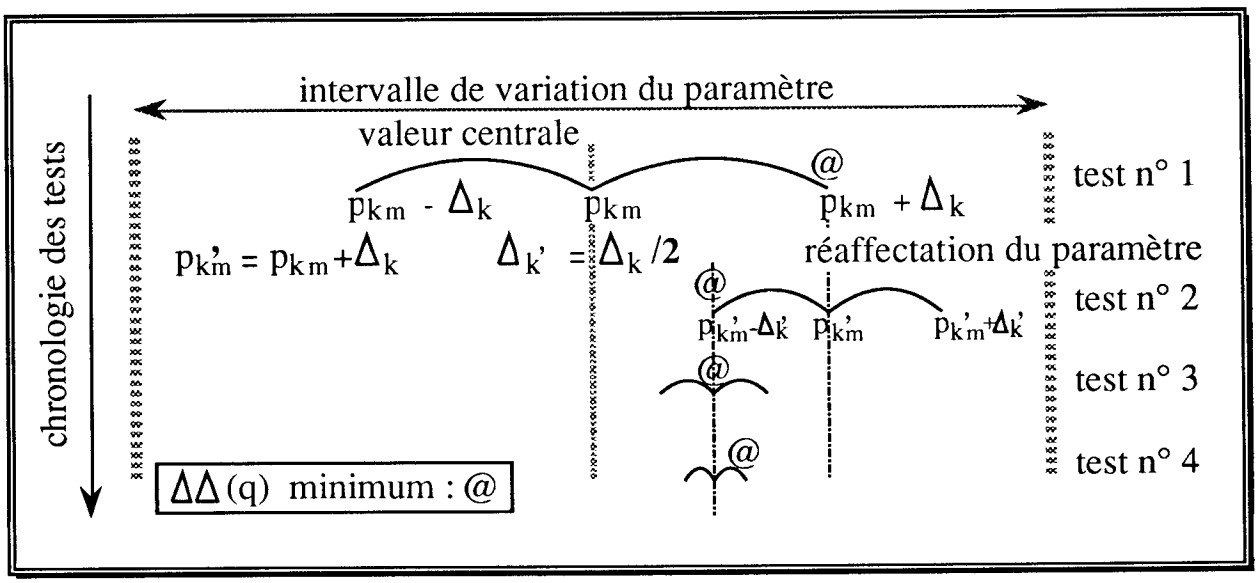


Figure II-45 : recherche de la valeur d'un paramètre par dichotomie

Malheureusement, cette étude ne peut pas être directement menée de la sorte et de manière indépendante pour chacun des paramètres.

En effet, comme nous l'avons évoqué précédemment, les paramètres sont indépendants, mais l'influence de leurs variations ne l'est pas forcément. C'est ce que nous allons détailler maintenant.

2.2.2. règles de décision de cette méthode d'identification

La remarque que nous venons de faire implique deux conséquences fondamentales.

La première est qu'il faut vérifier que la minimisation de $\Delta\Delta(\mathbf{q})$ soit vraie quelle que soit la posture $\mathbf{q}$ et les conditions de sollicitation du robot. Cela signifie qu'il faut tester $\Delta\Delta(\mathbf{q}_i)$ pour un ensemble fini de postures $\mathbf{q}_i$, $i \in \{1, ..., d\}$, les d postures en questions étant de nature fondamentalement distinctes (postures repliée concave, repliée convexe, dépliée concave ou dépliée convexe, le tout horizontalement ou verticalement...) et ceci pour plusieurs cas de chargement. Nous obtenons alors $<\Delta\Delta(\mathbf{q})>$, la "tendance" de l'écart entre l'écart mesuré et l'écart modélisé, ce terme traduisant directement l'amélioration de notre modèle.

La seconde conséquence est qu'il faut faire progresser simultanément la recherche dichotomique sur l'ensemble des paramètres p_k. En effet, si nous traitons indépendamment les paramètres, nous fausserions les résultats en privilégiant un certain ordre opérationnel. Nous avons au contraire choisi, à chaque pas de notre méthode, de ne faire évoluer que le paramètre qui réduit le plus $<\Delta\Delta(\mathbf{q})>$. Cela consiste à classer les variations des paramètres p_k par ordre d'influence sur la finesse de notre modèle pour un ensemble de Δk donné. Nous illustrerons ce classement par la figure suivante :

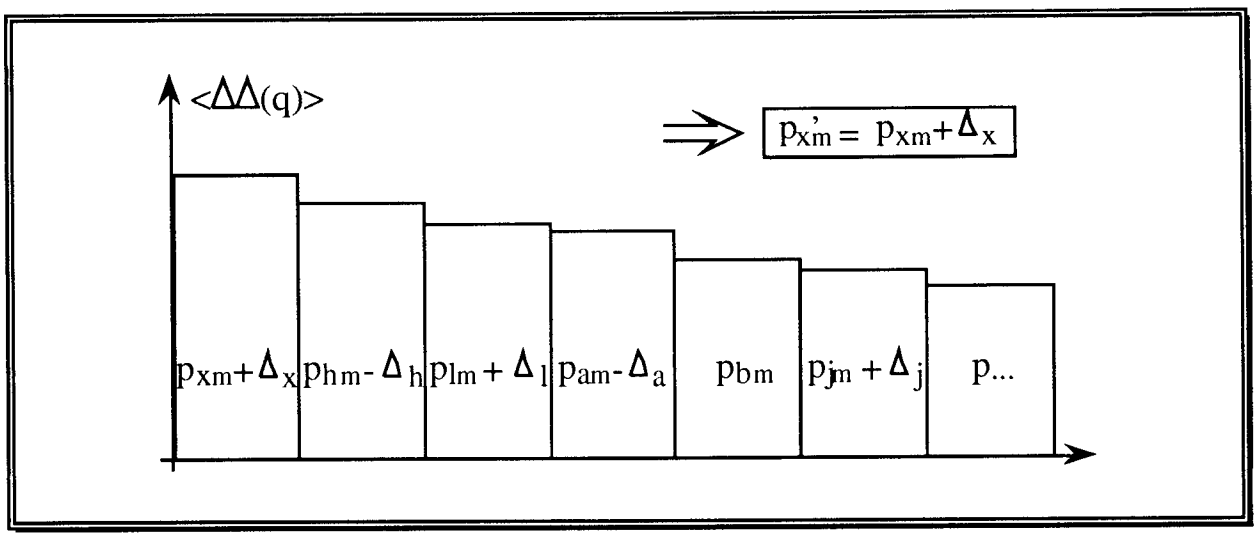


Figure II-46 : classement des variations des paramètres p_k en fonction de l'influence sur la finesse du modèle

Les règles de décision de notre méthode d'identification étant établies, nous pouvons mettre en oeuvre l'algorithme suivant :

Début

Initialisation du domaine de variation de chaque paramètre p_k et calcul de l'incrément de variation initial correspondant Δ_k

Lecture des fichiers de relevés métrologiques $\Delta X_{mesuré}$ correspondant aux différents cas de chargement et aux différentes postures

Faire

  Pour chaque paramètre p_k, k allant jusqu'à 12 fois le nb d'axes, **faire**

    Pour $p_k'_m = p_{km} + \Delta_k$, **puis** $p_k'_m = p_{km}$ **et** $p_k'_m = p_{km} - \Delta_k$, **faire**

      Pour chaque cas de chargement, **faire**

        Pour chaque posture q_i, **faire**

          Calcul de **MGD**(q_i)

          Calcul de **MGTD**(q_i)

          Calcul de ΔX_{tech} = **MGTD**(q_i) - **MGD**(q_i)

          Calcul de $\Delta\Delta(q_i) = \| \Delta X_{tech} - \Delta X_{mesuré} \|$

        Fin faire

      Fin faire

      Calcul de $<\Delta\Delta(\mathbf{q})>$

    Fin faire

    En fonction des trois $<\Delta\Delta(\mathbf{q})>$ obtenus, affectation provisoire de $p_k'_m$ et de $<\Delta\Delta(\mathbf{q})>_k$

  Fin faire

  Classement des $<\Delta\Delta(\mathbf{q})>_k$ et recherche de $<\Delta\Delta(\mathbf{q})>_r$ = Meilleur $<\Delta\Delta(\mathbf{q})>_k$

  Affectation définitive de $p_r'_m$ // modification du MGTD

  $\Delta_r' = \Delta_r/2$ // décrémentation de l'approche dichotomique correspondante

  Pour tout k, k≠r, **faire**

    $p_k'_m = p_{km}$ // pas de modification des autres paramètres en vue d'un nouveau // calcul avec le nouveau MGTD

  Fin faire

Tant que ($<\Delta\Delta(\mathbf{q})>_r$ est supérieur à l'imprécision requise du modèle)

Fin

Figure II-47 : algorithme de recherche des paramètres p_k

3. Conclusion

La méthode d'identification que nous venons de décrire ici est nécessaire pour identifier les paramètres du MGTD d'un robot donné en fonction des résultats "bruts" issus d'un mesurage.

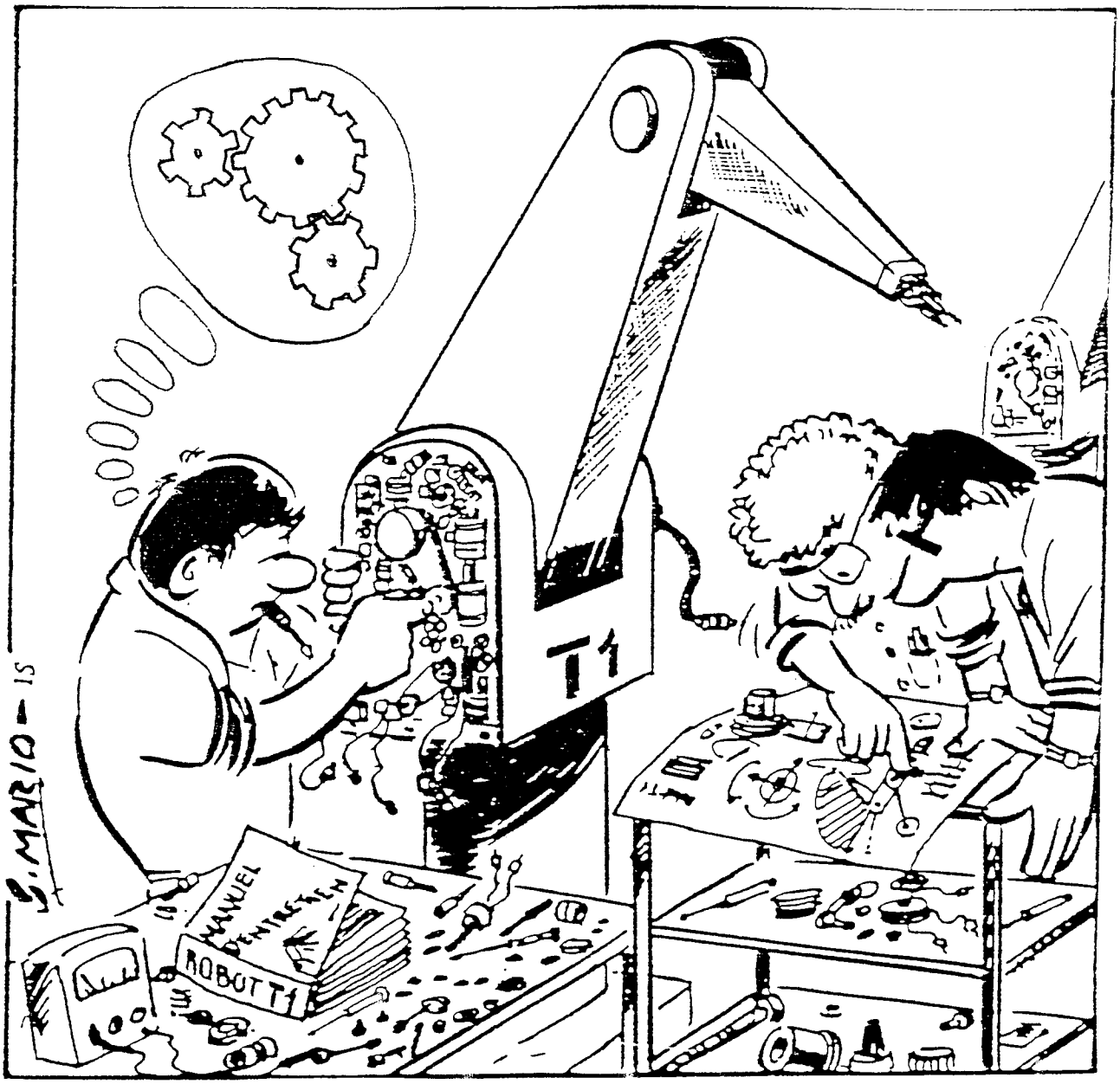
Notre méthode d'identification présente des avantages, au nombre desquels une facilité de mise en oeuvre par rapport à des méthodes purement mathématiques, la possibilité d'une prise en compte totale ou partielle de l'ensemble des paramètres, l'assurance d'une convergence vers les valeurs finales à partir d'une première estimation théorique des paramètres, et la possibilité de validation sur des exemples simples, mais aussi des inconvénients tels que des incertitudes sur les résultats obtenus ou surtout la nécessité d'un compromis entre la richesse des informations (nombre de postures, de chargement) et le temps de calcul (très nombreux calculs se superposant au volume déjà imposant des calculs du MGTD).

Nous n'émettrons que deux remarques face à cet inconvénient fondamental qu'est la longueur d'exécution de cet algorithme d'identification.

Tout d'abord, cet algorithme doit être utilisé une seule fois et hors ligne pour établir une "carte d'identité" complète contenant toute la connaissance acquise sur le robot en question.

Ensuite, il appartient à l'utilisateur d'entretenir ce potentiel de connaissances, par exemple lors d'opérations de maintenance. Nous aborderons ces aspects lors des perspectives d'application de nos travaux, dans le prochain chapitre.

Chapitre III
MISE en OEUVRE et VALIDATION du MODÉLE PROPOSÉ



1. RÉALISATION d'un SIMULATEUR du COMPORTEMENT TECHNOLOGIQUE des ROBOTS INDUSTRIELS

1.1. Cahier des Charges Fonctionnel du logiciel

1.1.1. Polyvalence du logiciel

L'application logicielle que nous avons élaborée a été dénommée "Robsilon". Ce nom est la contraction d'une part de robot, qui est le centre de nos préoccupations, et d'autre part d'epsilon, qui est une lettre grecque fréquemment employée pour désigner de petites quantités.

L'objectif général de ce logiciel est de simuler un comportement technologique du robot proche du réel sous l'effet des sollicitations de la charge, et de visualiser l'écart vis à vis de la position théorique, en vue de l'évaluation de performances. Ceci passe donc par l'utilisation d'un MGTD.

Face à la problématique générale que nous avons décrite au chapitre 2, deux attitudes étaient possibles :

- la première consiste à réaliser des MGTD spécifiques à chaque cas traité, et cela implique chaque fois de nouveaux développements informatiques,

- la seconde consiste à traiter le cas le plus général, pour le spécifier ensuite à l'aide d'une description appropriée.

1.1.1.1. Polyvalence de Robsilon

Dès le départ, nous nous sommes imposé cette seconde solution, plus polyvalente, et nous avons réalisé une maquette logicielle calquée sur la méthodologie générale. Cette polyvalence ainsi privilégiée a toutefois un coût, qui se traduit en terme de temps de calcul.

En effet, pour l'obtention du modèle géométrique direct et surtout pour celle du modèle géométrique inverse, nous avons privilégié l'utilisation d'un progiciel spécialisé dans ce type de résolution, SYMORO [KHA92]. Ceci nous permet de ne pas avoir à résoudre des problèmes hors du contexte de notre travail. Toutefois, les résultats ainsi obtenus, qui ne sont pas destinés à cet usage, doivent être préalablement filtrés de tout commentaire, puis, à chaque utilisation, doivent être interprétés. Pour les calculs suivants, tous les changements de repères, toutes les projections de vecteurs et toutes les réductions de torseur en un point doivent elles aussi être envisagées dans le cas le plus général.

Tout ceci étant réalisé sur calculateur personnel de type compatible PC, les performances obtenues ne permettent pas d'envisager directement une utilisation industrielle.

1.1.1.2. Cas de PC'ERICC

Nous avons toutefois réalisé un MGTD spécifique au robot pédagogique ERICC. Cette projection particulière a consisté à analyser tous les phénomènes pour ne retenir que les plus importants, à calculer une fois pour toutes les MGD, MGI et MGTD simplifié de ce robot et à intégrer le tout, associé à un module d'acquisition permettant la mesure avec un capteur laser, dans le logiciel de supervision PC'ERICC.

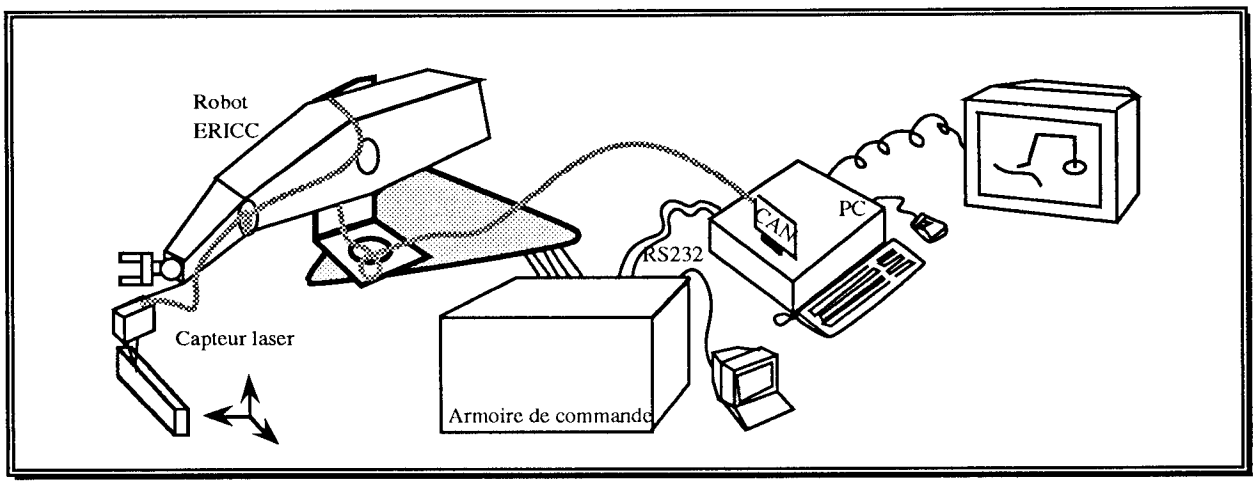


Figure III-1 : configuration de l'intégration au sein de la maquette pédagogique PC'ERICC

Dans ce cas, les performances sont meilleures.

1.1.1.3. Conclusion

Compte tenu de cette expérience acquise, nous pensons que toute solution industrielle doit être envisagée sur station de travail, en terme d'extension de logiciels de CFAO Robotique existants. Nous détaillerons cela au paragraphe 2.1..

1.1.2. Fonctionnalités du logiciel

1.1.2.1. Inventaire des phénomènes à prendre en compte

Dans le cadre de Robsilon, tous les défauts modélisables sont donc potentiellement pris en compte. Cela signifie que l'utilisateur, lorsqu'il va décrire un robot, va pouvoir choisir de prendre en compte ou non chaque paramètre. Vis à vis du modèle technologique, tout défaut non pris en compte correspondra à un paramètre nul, sauf en ce qui concerne les déformations des poutres.

Dans ce dernier cas, le choix effectué par l'utilisateur oriente ou non vers le calcul des déformations des poutres. L'utilisateur devra décrire la section, le matériau de la poutre et choisir le nombre de noeuds utilisés par la méthode des éléments finis.

1.1.2.2. Visualisation des résultats

Nous avons souhaité réaliser une maquette permettant d'une part la visualisation du résultat global, mais capable d'autre part d'apporter des explications partielles sur les phénomènes simulés.

En effet, le calcul de l'écart simulé au niveau de l'effecteur, obtenu par comparaison différentielle entre l'utilisation du Modèle Géométrique Technologique Direct et celle du Modèle Géométrique Direct, constitue la réponse la plus pertinente fournie par le logiciel. Dans le cas de l'étude d'une trajectoire complète, la visualisation graphique de l'évolution des différentes composantes du torseur d'écart apporte une plus grande facilité d'appréhension immédiate des zones où peuvent se situer des problèmes.

Enfin, tous les calculs intermédiaires sont accessibles. Ceci concerne les torseurs d'interefforts intersegments, les torseurs de déformations de chaque segment ainsi que les torseurs de comportement de chaque composant. Cette visualisation des résultats locaux intermédiaires nous permet d'analyser et d'identifier l'origine de certains défauts observés au niveau global.

1.2. Architecture de la réalisation logicielle

La réalisation logicielle a été conçue dans l'esprit d'une éventuelle réutilisation de ses composantes dans un contexte différent, et avec des règles de production précises visant à assurer un certain niveau de qualité. Nous allons expliquer et justifier dans ce paragraphe le choix d'une telle politique dans le cadre d'une éventuelle portabilité de cette maquette vers un produit à vocation industrielle.

1.2.1. Architecture modulaire du logiciel

Nous avons choisi d'écrire ce logiciel en langage C++, en utilisant une décomposition orientée objet du robot qui soit véritablement calquée sur la modélisation développée dans la deuxième partie de ce mémoire.

Nous en retirons un très grand nombre d'avantages, en tête desquels figure une correspondance directe entre ces objets, pris indépendamment de leur niveau hiérarchique, et les méthodes de simulation de leur comportement technologique. Ces méthodes ont été systématiquement implémentées dans des modules logiciels séparés, de manière à accroître la lisibilité des sources et à favoriser l'enrichissement des méthodes correspondantes. De plus, chacun de ces modules est caractérisé par un certain type "d'intrants" (les données nécessaires à la mise en oeuvre du traitement correspondant) et par un certain type "d'extrants" (les données issues du traitement et représentant le résultat obtenu). Toute méthode alternative, concurrentielle ou complémentaire peut être alors facilement mise en oeuvre et le potentiel d'évolution du logiciel est alors maximal.

Nous constatons que, dans ces conditions de développement, la portabilité de notre application est une caractéristique fondamentale du travail effectué.

Pour accroître cette portabilité, nous avons pensé l'organisation de ces modules en trois groupes totalement distincts et en deux niveaux hiérarchiques.

Les trois groupes traitent respectivement tout ce qui concerne l'interface homme-machine, tout ce qui concerne la prise en compte des traitements "conventionnels" en robotique et afin tous les calculs spécifiques à l'obtention du Modèle Géométrique Technologique Direct.

Chaque groupe est scindé en deux niveaux : un premier niveau, dit de gestion, assure le lien avec les autres groupes et déclenche les appels des méthodes spécialisées contenues dans les modules du second niveau.

Cette organisation est illustrée par la figure suivante :

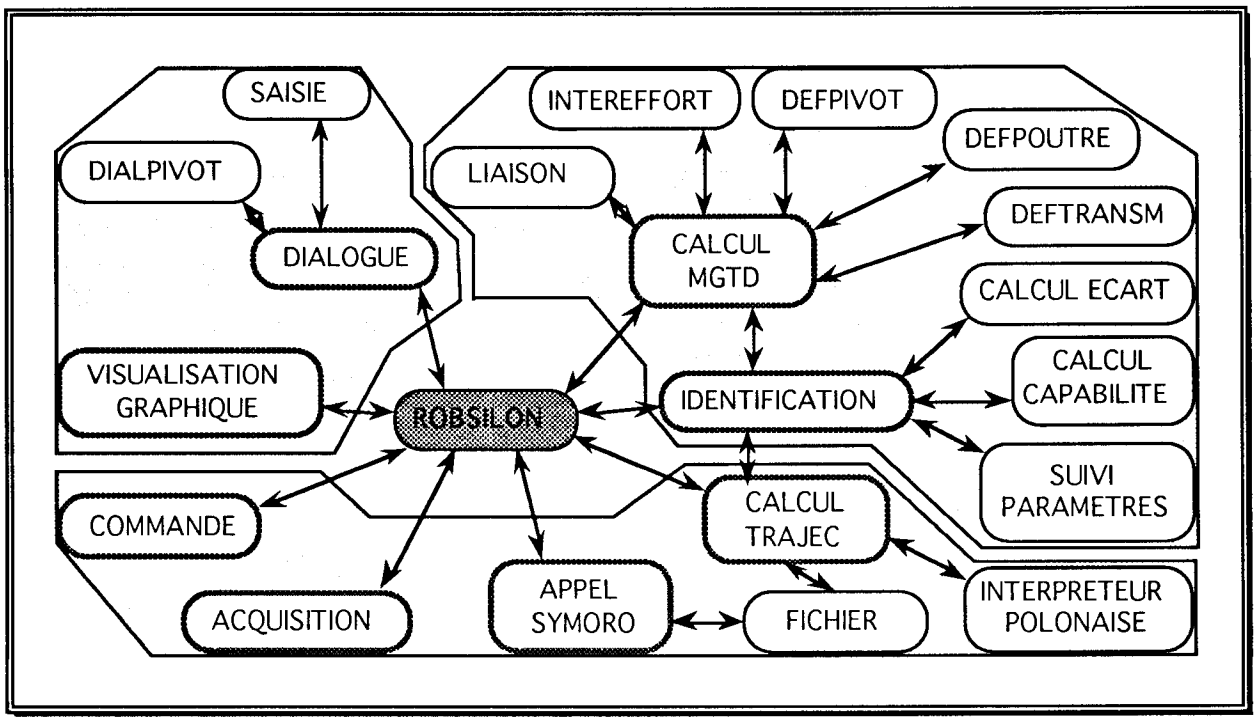


Figure III-2 : architecture modulaire du logiciel

Le groupe de modules logiciels liés à la relation homme machine a été spécifiquement développé pour l'environnement graphique de la machine supportant notre application (un compatible PC-AT). Toutefois, le souci d'une possible transcription de la présentation adoptée vers un autre environnement nous a conduit à mener une étude ergonomique du fonctionnement (chronologie, hiérarchie, complétude des écrans). Les résultats de cette étude ont été intégralement mis en oeuvre dans la maquette développée et doivent favoriser la portabilité vers des machines plus puissantes.

Le groupe de modules concernant la modélisation "conventionnelle" en robotique est articulé autour de SYMORO [KHA92]. SYMORO est un logiciel de calcul formel spécialement conçu au LAN pour l'étude des structures articulaires rigides en robotique. Il permet d'obtenir automatiquement à partir d'une description de type Denavit Hartenberg les modèles géométriques et différentiels, directs et inverses. Les résultats, obtenus sous forme de fichiers alphanumériques, doivent être filtrés de tous leurs commentaires, puis les équations restantes, en notation polonaise, doivent être interprétées. Cette solution, qui est la plus efficace dans le cadre de la solution matérielle choisie (compatible PC-AT), peut, bien entendu, être remplacée par un autre module de simulation robotique qui serait issu d'un logiciel de CFAO Robotique.

Seul, le module de traitement du MGTD est quasiment portable dans sa totalité. Ceci s'explique par l'absence de référence à des contraintes informatiques matérielles ou d'environnement.

Ainsi, grâce à cette politique de développement informatique, seule la reconstitution des deux autres groupes de modules ou la mise en oeuvre de fonctionnalités équivalentes sont nécessaires pour faire évoluer notre maquette et la transformer en un véritable produit industriel.

Nous allons maintenant présenter le détail de ces différents modules.

1.2.2. Rôle des différents modules de relation

Robsilon est un logiciel fonctionnant sous l'environnement graphique Windows. Il bénéficie en conséquence de l'ensemble de drivers et de ressources standards de cet environnement, tant sur le plan interfaçage avec le matériel que sur l'aspect présentation graphique.

Deux modules principaux regroupent la majorité des primitives de relation : le module de dialogue et celui de visualisation.

1.2.2.1. Le module de dialogue

Le noyau de l'interface homme machine est constitué de la gestion des menus déroulants et de l'appel des fonctions correspondant aux items choisis par l'opérateur.

Deux cas se présentent : soit une boite de dialogue complémentaire permet à l'opérateur de renseigner le logiciel, soit une fonction de traitement automatique est lancée.

L'utilisation des bibliothèques de fonctions orientées objet propres à Windows simplifie grandement la réalisation d'un tel module.

1.2.2.2. Le module de visualisation

C'est le module permettant une représentation graphique des informations résultant de la simulation du comportement technologique du robot, à l'aide du MGTD.

Ces deux modules seront illustrés de manière plus détaillée au paragraphe 1.3.

1.2.3. Rôle des différents modules de calcul

Nous présenterons ici l'ensemble des modules liés à des traitements de type robotique.

1.2.3.1. Le module de calcul de trajectoires

Il s'agit là des calculs cinématiques conventionnels, de type MGD, MGI ou MV. Ils sont donc articulés autour des résultats fournis par SYMORO.

a : Le module d'interprétation des modèles géométriques

Ce module est un interpréteur de modèle produit par SYMORO [KHA92]. Connaissant le vecteur intrant (par exemple le vecteur position **X**), il interprétera le modèle nécessaire (par exemple, le **MGI**) pour fournir comme le vecteur extrant (par exemple, le vecteur articulaire **q**).

b: Le module d'entrée-sortie sur disque

Il contient l'ensemble des méthodes permettant la lecture des fichiers de données des différents robots, la lecture des fichiers alphanumériques de leurs différents modèles et l'écriture de fichiers de résultats.

3.1.2.3.2. Le module de calcul du MGTD

Il s'agit des modules directement liés à notre travail.

a : Le module de calcul des projections aux liaisons

Il est nécessaire, pour standardiser les calculs effectués dans les modules suivants, de toujours travailler suivant un même repère, choisi avec les mêmes règles quel que soit le segment i considéré. Ce repère a été défini de la manière suivante : l'axe $\mathbf{x}_i$ le long du segment i, l'axe $\mathbf{z}_i$ perpendiculaire à $\mathbf{x}_i$ et porté par la liaison pivot avec le segment i-1, et l'axe $\mathbf{y}_i$ étant complémentaire pour obtenir un repère orthonormé direct R_i.

Ce module a pour objet de traiter les changements de repères entre un segment et un de ses deux segments adjacents. Cela se fait d'une part à l'aide de la configuration de Denavit Hartenberg entre les deux segments et d'autre part avec la valeur de la coordonnée articulaire q_i.

b : Le module de calcul des torseurs d'interefforts

Il s'agit du module appliquant le principe fondamental de la statique (ou celui de la dynamique) à chacun des segments i. Il permet donc le calcul du torseur d'interefforts avec le segment i-1 en fonction de la posture effective du segment i et de la charge appliquée à l'extrémité du robot.

c : Le module de calcul de déformation des poutres

Il contient l'ensemble des primitives de Résistance des Matériaux décrites aux paragraphes 1.2.3.3. et 1.2.3.4. du chapitre II, et concernant les déformations de traction-compression, de flexion et de torsion.

d : Le module de calcul de déformation des transmissions

Ce module gère les déformations des transmissions (paragraphe 1.2.3.2., chapitre II). Ce problème, qui peut paraître élémentaire, doit normalement être enrichi de la prise en compte des phénomènes d'hystérésis, couramment rencontrés dans les réducteurs mécaniques. A l'heure actuelle, nous nous sommes contentés de tenir compte d'un jeu total j que nous appliquons en fonction du sens de la sollicitation. Cela nous donne le torseur de petites déformations suivant :

$$\left\{ \tau_t \right\}_{/A} = \left\{ \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \alpha_{tz} & 0 \end{matrix} \right\}_{/A,\,Ri} = \left\{ \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ K_t \cdot M_{Az} + \dfrac{\mathrm{sgn}(M_{Az}) \cdot j}{2} & 0 \end{matrix} \right\}_{/A,\,Ri}$$

e : Le module de calcul des déformations des liaisons

Ce module gère le problème extrêmement complexe de la déformation des liaisons partielles. En effet, la détermination des coefficients de raideur évoqués au paragraphe 1.2.3.1. du chapitre II entraîne soit une démarche expérimentale, soit un deuxième niveau de modélisation.

La démarche expérimentale est extrêmement délicate à mettre en oeuvre, et sa validité reste éphémère. En effet, lors de chaque opération de maintenance de la liaison, la raideur est susceptible d'évoluer...

La modélisation reste donc la voie la plus raisonnable, même si elle engendre des calculs supplémentaires qui vont allonger le temps d'exécution du MGTD.

1.3. Fonction relation Homme Machine de notre maquette logicielle

Devant la complexité du problème à maîtriser, la mise en oeuvre d'une interface Homme Machine performante sous l'environnement Windows constitue un atout pour l'assistance de l'opérateur.

1.3.1. Présentation des menus déroulants

Les différentes fonctionnalités de Robsilon sont atteignables au travers d'un menu déroulant réalisé de manière structurée et chronologique.

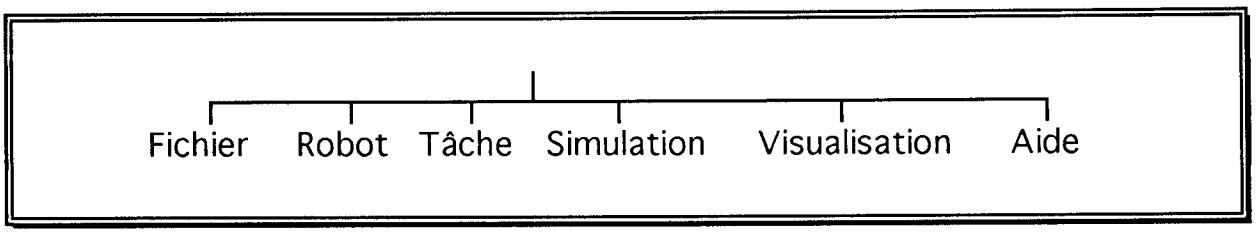


Figure III-3 : items de la barre de menus

L'item "Fichier", commun à toutes les applications sous environnement graphique, concerne la gestion des sessions d'utilisation. L'utilisation de Robsilon nécessitant la définition d'un très grand nombre de données, l'opérateur peut sauvegarder l'état de son travail à chaque instant pour pouvoir le retrouver ultérieurement. Une session se compose donc de la définition totale ou partielle de l'ensemble des données affairant au triptyque {robot, trajectoire, charge}.

Les caractéristiques cinématiques et technologiques du robot étudié seront introduites à partir de l'item "Robot", qui permet soit d'utiliser un robot déjà défini, soit d'en définir complètement un nouveau. Ceci se fait au travers d'un jeu de sous-menus et de boites de dialogue spécialisées.

Il en est quasiment de même pour l'item "Tâche", qui permet de définir les conditions de simulation de la tâche : définition de la trajectoire, de la vitesse de déplacement, de la charge, du nombre d'échantillons...

Lorsque toutes les données sont définies, la simulation peut être lancée par l'item "Simulation".

Une fois les calculs terminés, l'item "Visualisation" est accessible. Outre la visualisation globale du robot en trois projections planes et une perpective, Robsilon permet d'afficher l'évolution tout au long de la trajectoire des composantes du torseur d'écart entre la trajectoire simulée de l'extrémité

du robot et la trajectoire théorique initialement programmée, de tous les torseurs locaux de petites déformations, ou de tous les torseurs d'interefforts.

L'item "Aide" permet une assistance contextuelle, surtout pendant la phase de description du triptyque {robot, trajectoire, charge}.

1.3.2. Présentation de quelques fenêtres de description d'un robot industriel

1.3.2.1. Fenêtres de description du robot

Nous ne détaillerons qu'un seul écran, suffisamment représentatif :

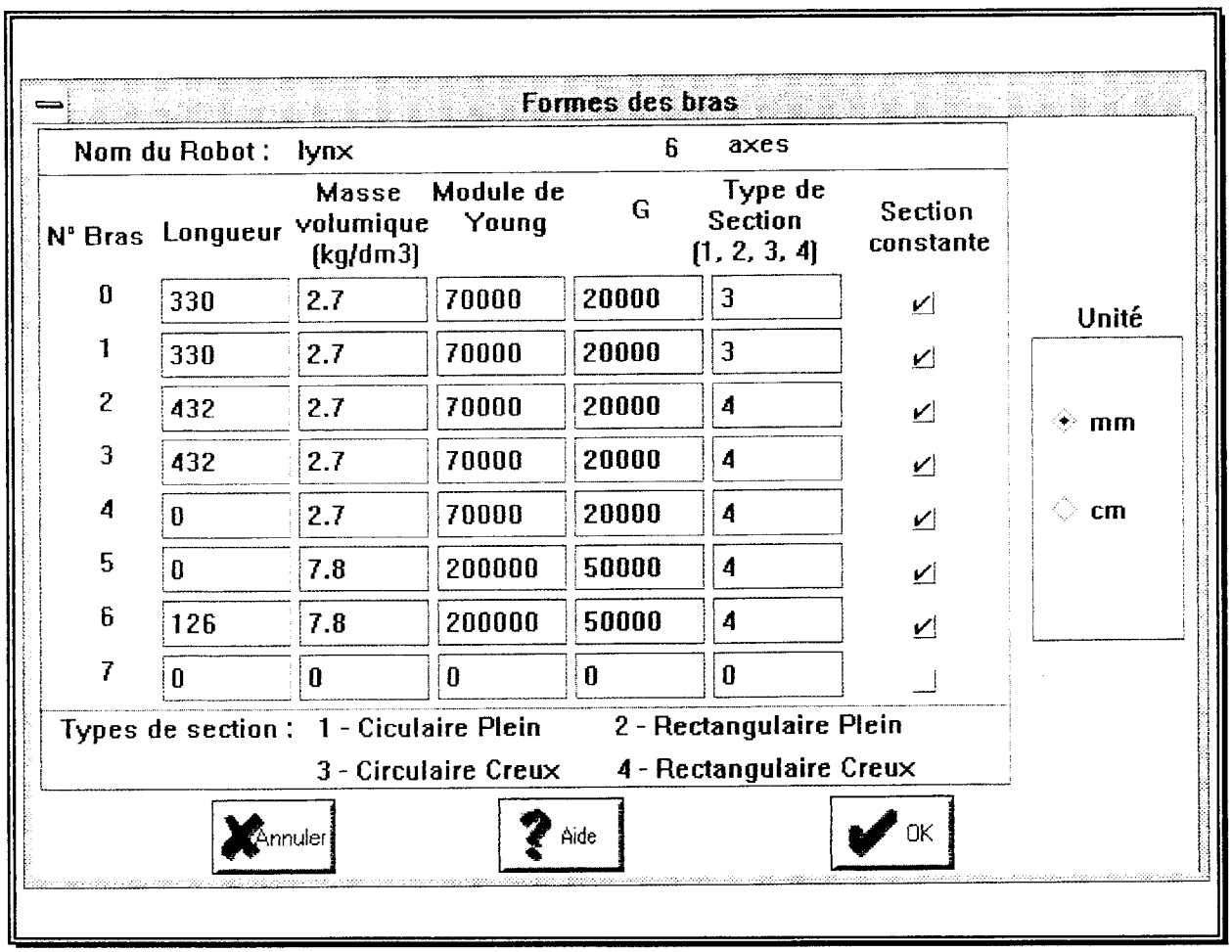


Figure III-4 : définition technologique des segments

Cet écran vient à la suite d'un écran similaire permettant la saisie des paramètres de Denavit Hartenberg. Il précède une série de boites de saisie des données concernant les sections de segments (constantes ou variables), de coefficients de raideurs, d'intervalles de variation...

1.3.2.2. Fenêtre de description d'une liaison pivot

La boite de dialogue suivante illustre la problématique de modélisations complémentaires : il s'agit là de caractériser les cinq raideurs d'une liaison pivot réalisée à l'aide de deux roulements à contact oblique (figure II-15).Il s'agit là de définir si la liaison est de type 'chape' ou 'porte à faux'. Cette boite de dialogue est un bon exemple des préoccupations pédagogiques de notre logiciel : des boutons radio pour définir les choix, des champs de saisie explicites et un schéma explicatif.

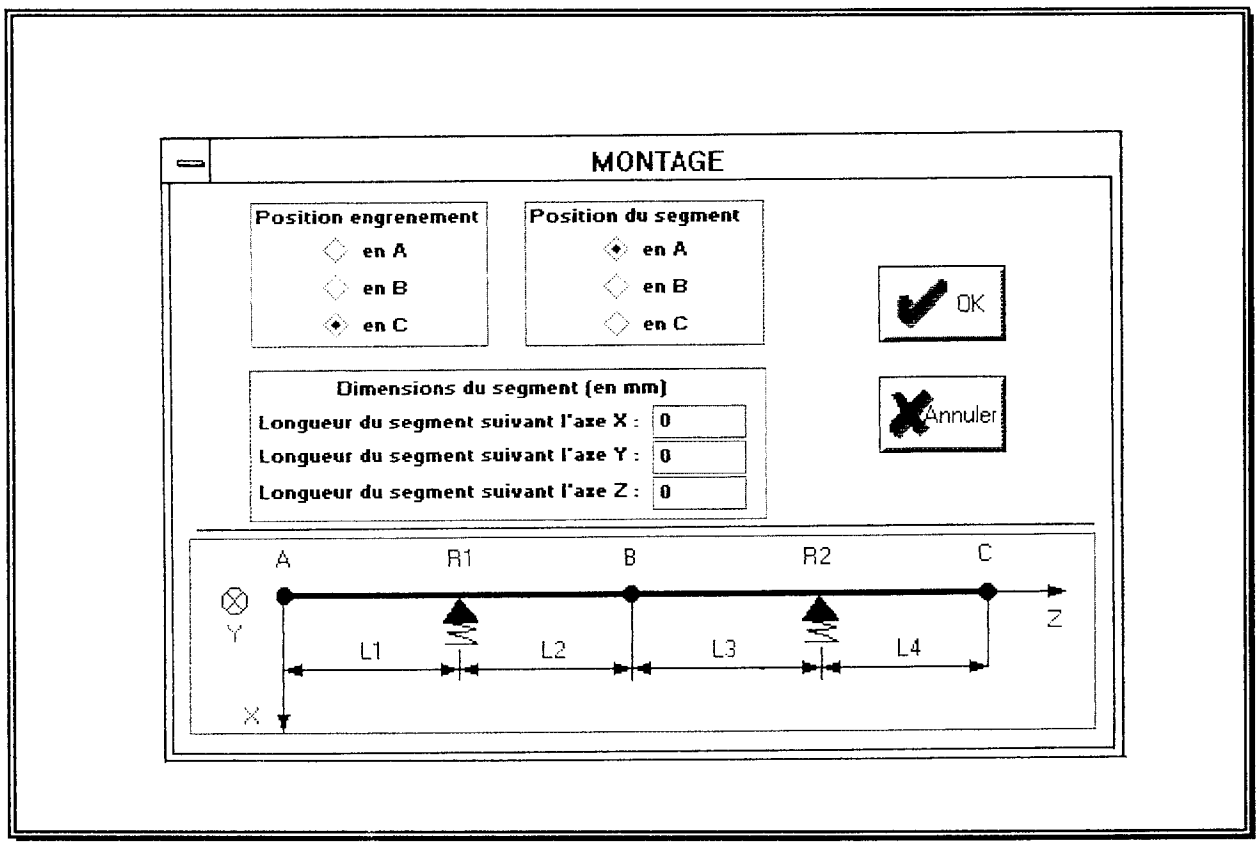


Figure III-5 : écran de configuration d'une liaison

1.3.2.3. Fenêtre de description d'une tâche robotisée

a : définition de la trajectoire

La définition de la trajectoire a été simplifiée au maximum : saisie des points de départ et d'arrivée, du nombre d'échantillons et de la vitesse de déplacement (cette dernière uniquement dans le cas d'une prise en compte de phénomènes dynamiques). Il appartient à l'utilisateur de vérifier que cette trajectoire est bien exécutable (appartenance au volume de travail du robot, pas de mise d'axe en fin de course, pas de changement intempestif de postures...).

b : description de la charge

La définition de la charge est plus simple, elle se fait par la description du torseur d'action mécanique correspondant au chargement, selon la figure suivante :

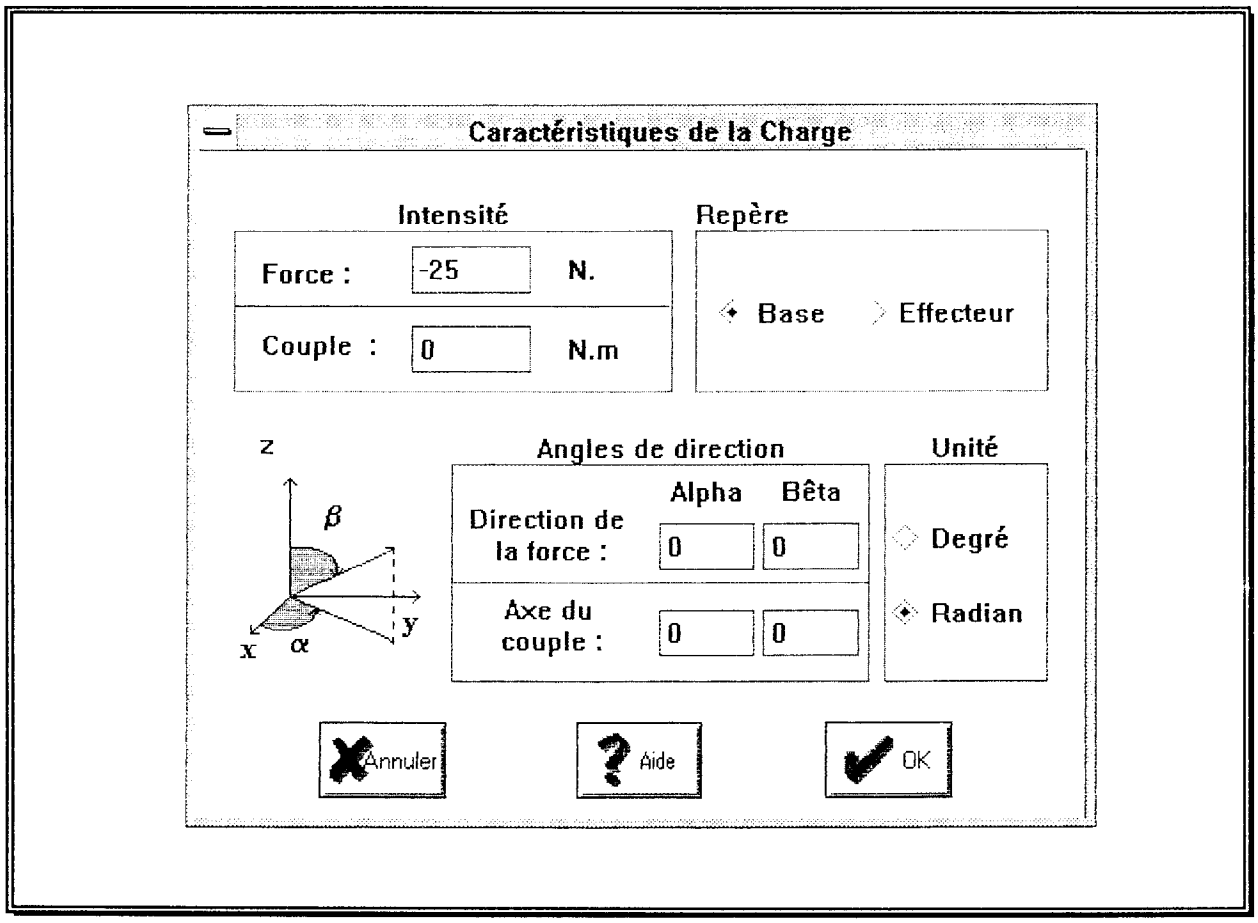


Figure III-6 : définition des conditions de chargement

1.3.3. Fenêtre de visualisation graphique des résultats

La présentation graphique des résultats est organisée selon le schéma de la figure de la page suivante.

Quel que soit le type de torseur visualisé, le vecteur résultante et le vecteur moment résultant seront affichés, en fonction de leur variation suivant x. Un curseur peut être positionné à l'aide des deux flèches, les valeurs numériques des composantes du torseur sont alors actualisées.

Les courbes sont affichées à l'échelle maximale, les unités et les facteurs d'échelle sont automatiquement ajustés.

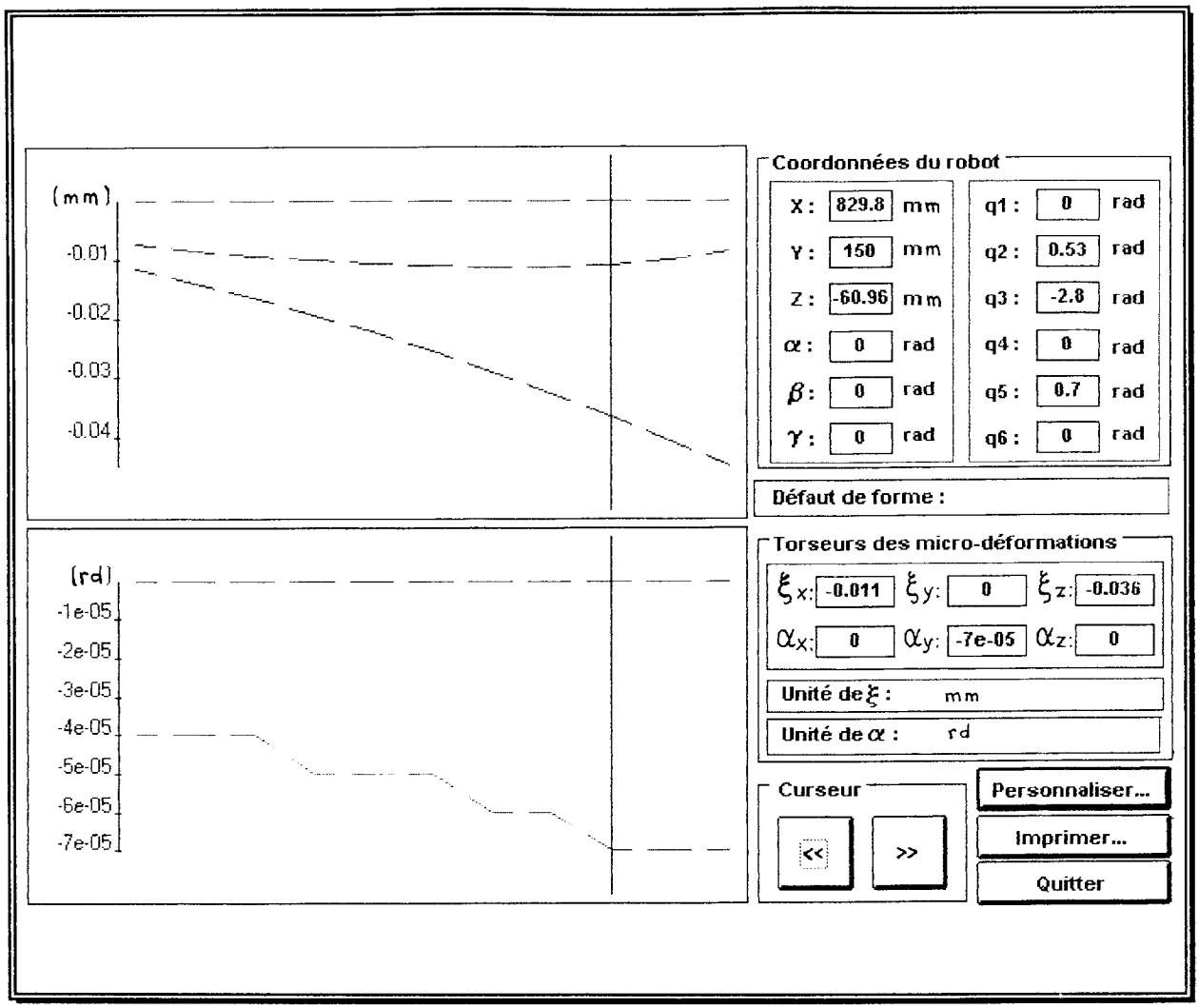


Figure III-7 : visualisation du torseur d'écart global

Tous les résultats détaillés sont également disponibles sous la forme d'un fichier au format texte, consultable à partir de Robsilon ou de n'importe quel éditeur ou tableur.

1.4. Validation expérimentale de la modélisation technologique des robots industriels

Compte tenu du volume de données et d'observations nécessaires à l'évaluation de notre logiciel, il nous a été impossible pour l'instant d'obtenir un jeu de données métrologiques complet correspondant à un site industriel. En effet, il nous faut pour un même robot et pour un jeu de quelques trajectoires ou de quelques positions, les relevés précis des situations géométriques de l'effecteur sous différents cas de chargement. De plus, il nous faut avoir accès aux plans mécaniques du robot et aux fiches de réglage pour pouvoir évaluer les caractéristiques technologiques de ses constituants. Les relevés industriels que nous aurions pu obtenir étaient tous incomplets. Ce qui nous a le plus souvent manqué est la variation de la charge transportée et l'accès aux plans mécaniques du robot.

1.4.1. Description de l'expérimentation

Nous nous sommes donc limités à des essais dans notre laboratoire, avec nos matériels. Nous avons choisi un robot 6 axes PUMA 560, dont les performances annoncées sont 0,2 mm de résolution, ± 0,1 mm de répétabilité pour une charge utile nominale de 2,5 kg. Le site expérimental a été équipé d'un dispositif de mesurage du type mesure de rectitude à la règle. Il se présente selon la vue suivante :

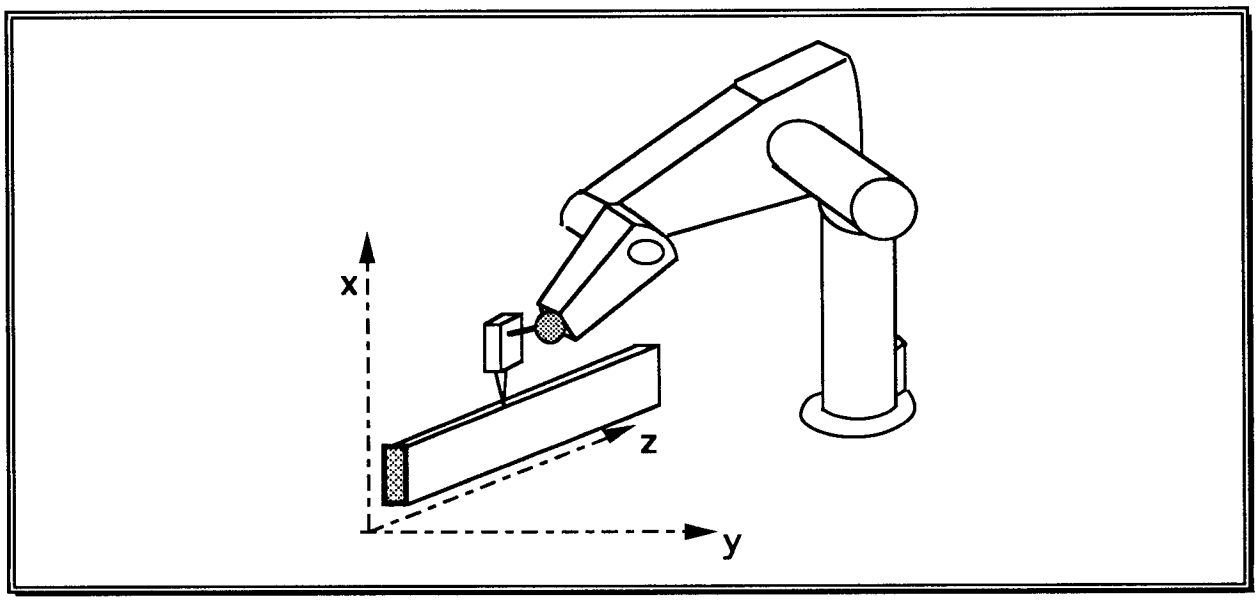
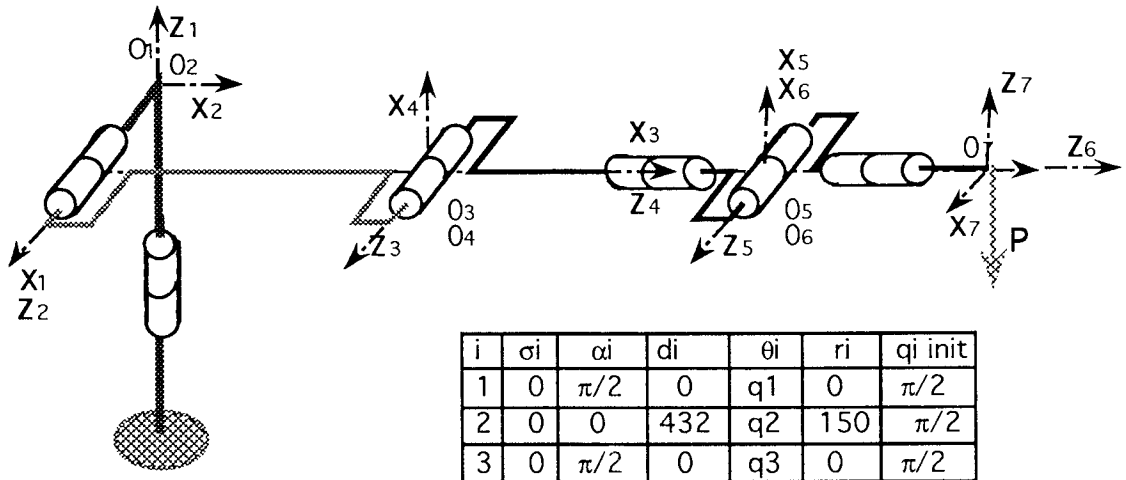


Figure III-8 : vue du site expérimental

1.4.1.1. Modélisation du robot PUMA 560

Le robot PUMA 560 est un robot polyarticulé d'architecture RRRRRR. Sa représentation sous la forme Denavit Hartenberg est la suivante :



i	σi	αi	di	θi	ri	qi init
1	0	π/2	0	q1	0	π/2
2	0	0	432	q2	150	π/2
3	0	π/2	0	q3	0	π/2
4	0	- π/2	0	q4	432	π/2
5	0	π/2	0	q5	0	π/2
6	0	π/2	0	q6	126	π/2

Figure III-9 : modélisation du robot PUMA 560

Vu la conception extrêmement rigide de la mécanique de ce robot, nous avons négligé les déformations internes des liaisons pivot et des transmissions. De plus, la section de chaque bras a été simplifiée et ramenée à une section rectangulaire équivalente.

1.4.1.2. Le capteur et sa chaîne d'acquisition

Le capteur de mesure de distance sans contact repose sur la triangulation d'un rayon laser de très faible puissance (3 mW) :

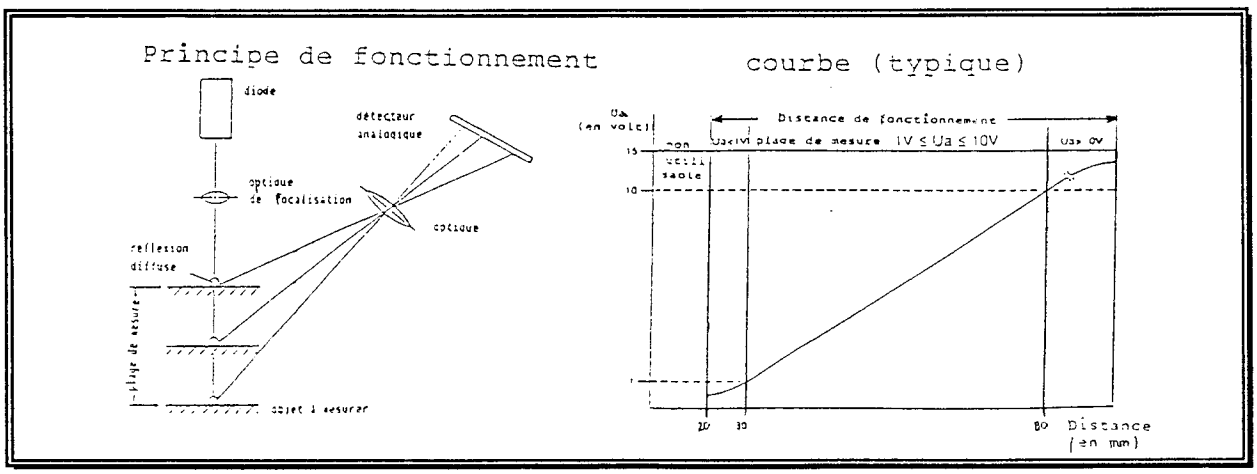


Figure III-10 : fonctionnement du capteur laser

La chaîne d'acquisition est constituée d'un contrôleur de gain et d'une carte d'entrée analogique/numérique 12 bits insérée dans un calculateur de type PC/AT.

Pour des raisons de sécurité, la mise en route du faisceau laser pendant chaque mesure se fait sous la supervision active de l'opérateur.

1.4.2. Résultats obtenus

1.4.2.1. Conditions d'expérimentation

Les résultats présentés à la page suivante correspondent à une trajectoire linéaire de 10 positions où le robot part avec une posture plutôt repliée, et se déplie jusqu'à son élongation maximale. Les différents cas de chargement testés vont de 0,5 kg (poids minimal dû au support capteur) à 3 kg (charge utile nominale légèrement dépassée, par tranches de 500 grammes.

Aucune communication n'ayant été établie entre le calculateur de mesurage et la baie de pilotage du robot, la coordination entre l'exécution en pas à pas de la trajectoire et l'exécution de la mesure est à la charge de l'opérateur, la trajectoire s'effectuant alors dans le cas pseudo-statique.

L'évaluation de performances a visé tout d'abord à définir la capabilité robot vis à vis des caractéristiques annoncées par le constructeur, puis à valider notre modèle sur une trajectoire donnée.

1.4.2.2. Essais de précision

La quantification de la fidélité du robot, au travers de l'observation de la répétabilité verticale, a été obtenue grâce à la valeur moyenne et à l'écart type d'une campagne de 40 essais par couple {posture, charge}. Celle de la capabilité tâche dépend de l'étude de toutes les campagnes concernant soit une seule posture, soit une seule charge. Enfin, la capabilité du robot est donnée par la prise en compte de toutes les valeurs enregistrées.

1.4.2.3. Courbes expérimentales

Les résultats expérimentaux sont donnés à la figure III-11. Ils sont tout à fait conformes à ce que nous pouvions attendre, l'écart de posture mesuré $\Delta \mathbf{X}_m$ s'accroissant avec la charge.

Les résultats obtenus par simulation sont donnés aux figures III-12 et III-13. Seuls les résultats liés à ξ_{z_s} peuvent être comparés à ξ_{z_m}, les autres composantes de l'écart théorique de posture $\Delta \mathbf{X}_p$ n'ayant pas été mesurées.

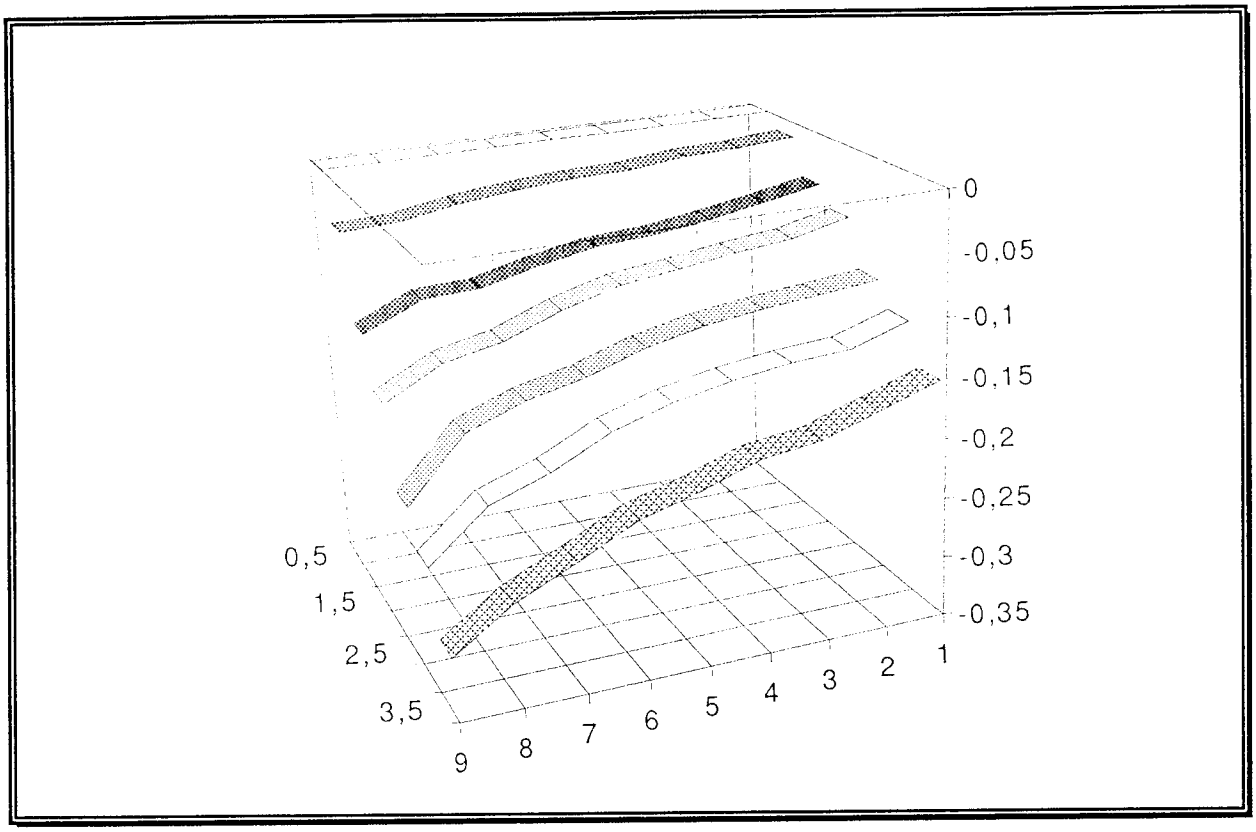


Figure III-11 : mesures expérimentales de ξ_{z_m} en fonction de diverses charges

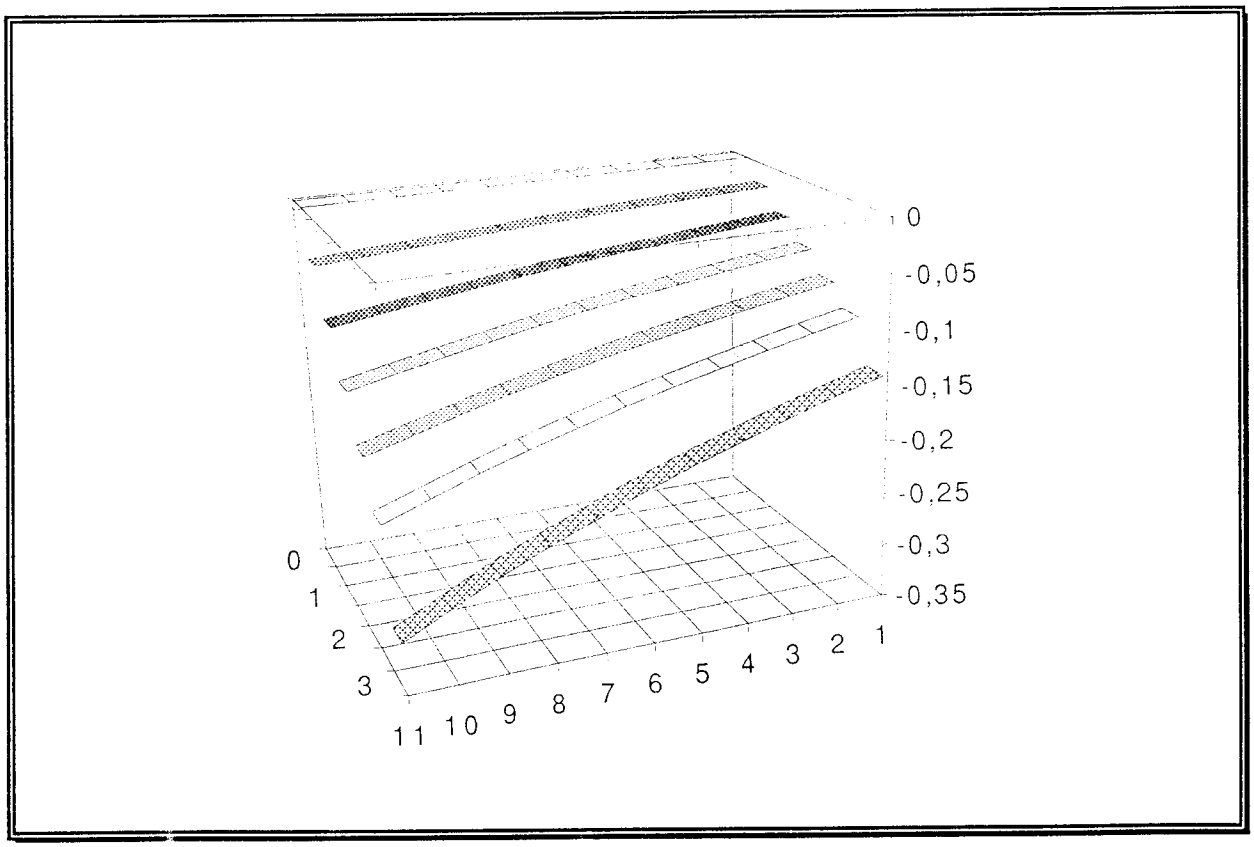


Figure III-12 : simulation du déplacement vertical ξ_s

1.5. Conclusion

Nous avons successivement abordé tout d'abord les différents modules logiciels développés dans le cadre de Robsilon, puis différents aspects de l'interface de relation homme machine, illustrant quelques phases de son fonctionnement.

Le logiciel Robsilon et le modèle comportemental associé n'ont donc pu faire l'objet que de validations partielles, sur des robots de laboratoire ou à l'aide d'exemples traités manuellement. Malgré la faiblesse de nos outils de mesurage et la faible capacité de charge des robots en question, nous avons constaté une corrélation entre le comportement mesuré du robot et notre modélisation par approche technologique.

Toutefois, si une validation sur site industriel est absente de nos travaux, la logique des mécanismes comportementaux d'un robot et celle de leurs enchaînements restent similaires, et les résultats obtenus devraient être confirmés.

2. APPLICATIONS de la MODELISATION TECHNOLOGIQUE des ROBOTS INDUSTRIELS

Nous venons de présenter la mise en pratique de la modélisation technologique d'un robot industriel. Nous aborderons maintenant les applications de l'ensemble de notre travail. Ces applications peuvent être scindées en deux classes : d'une part, des réponses à des problématiques industrielles actuelles et d'autre part des possibilités de développement de nouveaux type de produits robotiques. Notre propos va donc s'articuler autour de cette classification et se présentera sous la forme de trois thèmes distincts.

Le premier thème concerne l'incidence de notre modélisation sur les possibilités de la CFAO Robotique, en terme de gains de productivité. Ces gains s'exprimeront sous forme de fiabilisation du travail de programmation fait hors ligne, d'amélioration de l'appréciation des performances réelles et de diminution des coûts de mise en oeuvre sur la chaîne de production.

En second point, nous traiterons de manière plus spécifique les différentes facettes de l'assistance que notre modélisation peut fournir à un opérateur aux différents stades du cycle de vie d'un système robotique, afin de traiter les besoins d'évaluation de performances.

Enfin, pour conclure ce chapitre, nous envisagerons comment le développement d'une telle modélisation peut permettre l'émergence d'une nouvelle génération d'architecture de robots industriels, utilisant les techniques de la mécatronique. Les problématiques soulevées dans ce dernier paragraphe seront telles que nous nous contenterons d'exposer les fondements des principes qui constitueront une large part de nos futurs travaux de recherche.

2.1. Implications industrielles en CFAO Robotique

2.1.1. Enjeux industriels de la simulation réaliste de tâches robotisées

Nous avons déjà maintes fois évoqué dans la première partie de ce mémoire l'ensemble des difficultés de mise en oeuvre concrète d'une tâche robotisée, et nous ne reviendrons pas dessus.

Toutefois, devant ces difficultés et face à des impératifs de productivité, certains industriels en arrivent à remettre en cause la CFAO Robotique, et même plus globalement l'utilisation de robots sur des chaînes flexibles polyvalentes.

D'autres attribuent à ces mêmes difficultés l'échec de la pénétration de la CFAO Robotique dans les PMI. Il est vrai que, si les techniques de programmation graphique de tâches robotisées ont considérablement amélioré l'interaction entre le programmeur et la tâche, la mise en oeuvre globale de la chaîne de définition de la tâche opérationnelle réellement exécutée en production (CFAO Robotique + mise au point, voir figure I-34) reste trop longue face aux techniques éprouvées d'apprentissage par syntaxeur, par exemple.

Face à ces inquiétudes, les industriels intervenant directement dans ce domaine se devaient de réagir.

C'est ce qu'ils ont fait en engageant un vaste programme international de recherche visant à améliorer les performances de l'ensemble des constituants de cette chaîne de définition et de simulation de la tâche robotisée.

Nous allons très rapidement présenter ces travaux, puis nous nous situerons face à l'état de ce programme.

2.1.2. Le projet Realistic Robot Simulation (RRS)

Le projet Realistic Robot Simulation a été initié en 1991 par la quasi-totalité des constructeurs automobiles européens, avec comme objectif l'amélioration de l'efficience de l'utilisation hors ligne des moyens de CFAO Robotique dans l'industrie automobile.

Ce projet a réuni autour d'un même objectif ces différents utilisateurs, mais aussi et surtout les fournisseurs de systèmes de CFAO Robotiques et les constructeurs de robots industriels et (/ou) de baies de commande. Le

consortium ainsi formé s'est autofinancé et reste propriétaire des résultats obtenus. Toutefois, ces résultats, afin de devenir de fait standard, sont offerts au domaine public.

Une rapide analyse basée sur l'expérience des acteurs du consortium a fait très clairement ressortir que, vu du système de CFAO, les plus grandes incertitudes se situaient au niveau de la simulation de la baie de commande. Une telle constatation se retrouve d'ailleurs dans [ARM92], qui recense comme points de difficulté la prise en compte de la dynamique du robot, la reproduction du générateur de mouvement, le comportement des asservissements et celui des actionneurs. Si tout ceci est sans grande importance lorsque le robot se déplace lentement, ce n'est pas le cas lorsqu'il déplace des charges à grande vitesse.

Le but concrètement fixé au départ du projet RRS a été de résoudre le problème précis du générateur de consignes. Avec une véritable perspective industrielle, c'est à dire pour assurer la réussite du projet et éviter de s'engager tout azimut dans diverses directions, l'essentiel du travail effectué a consisté à tracer le cadre logique des spécifications d'un module de simulation de baie de commande estampillé RRS et dénommé RCS Module (Robot Controller Simulating Module). A ce propos, [DES94] écrit que l'on doit "pouvoir utiliser dans les logiciels de CAO Robotique les mêmes modules de génération de mouvements que ceux utilisés dans le contrôleur de robots, sans se préoccuper de l'origine du module de simulation, ni du logiciel dans lequel il sera implanté". Il s'agit donc d'un inventaire des fonctions utilisables et de leur mode d'appel, de manière à définir le même interface à tous les membres du consortium.

L'utilisation des modules ainsi définis est à la charge des offreurs de CFAO Robotique, les utilisateurs finaux du secteur de l'automobile s'engageant à exiger cette fonctionnalité.

Par contre, la réalisation des modules de simulation spécifique à chaque commande de robot est du ressort de chaque constructeur de robots et (/ou) de baies de commande. Aucune directive ou méthodologie n'est imposée : cela peut donc être obtenu par une simple duplication des algorithmes existant dans la baie du robot. Seul est spécifié un niveau de qualité, dont le seuil acceptable a été fixé à ± 0,001 radiant d'écart sur chacune des consignes articulaires et à ± 3 % d'erreur sur le calcul du temps de cycle. Les maquettes de module déjà réalisées ont d'ailleurs de meilleures performances...

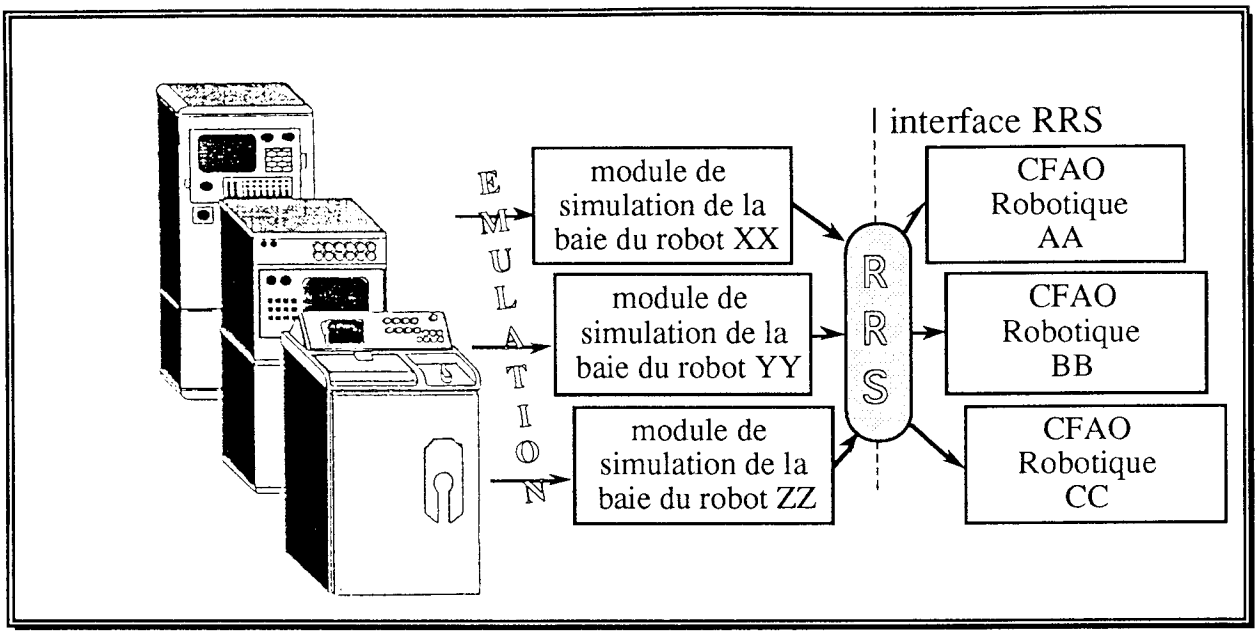


Figure III-13 : modularité des simulateurs RRS : standardisation de l'interface au système de CFAO Robotique

2.1.3. Les limitations actuelles du programme RRS

Comme nous l'avons vu précédemment, le projet RRS a été borné pour l'instant aux seuls modules RCS. Les erreurs flagrantes, pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres selon le couple {système CFAO, baie de commande} sont ainsi maintenant considérablement réduites.

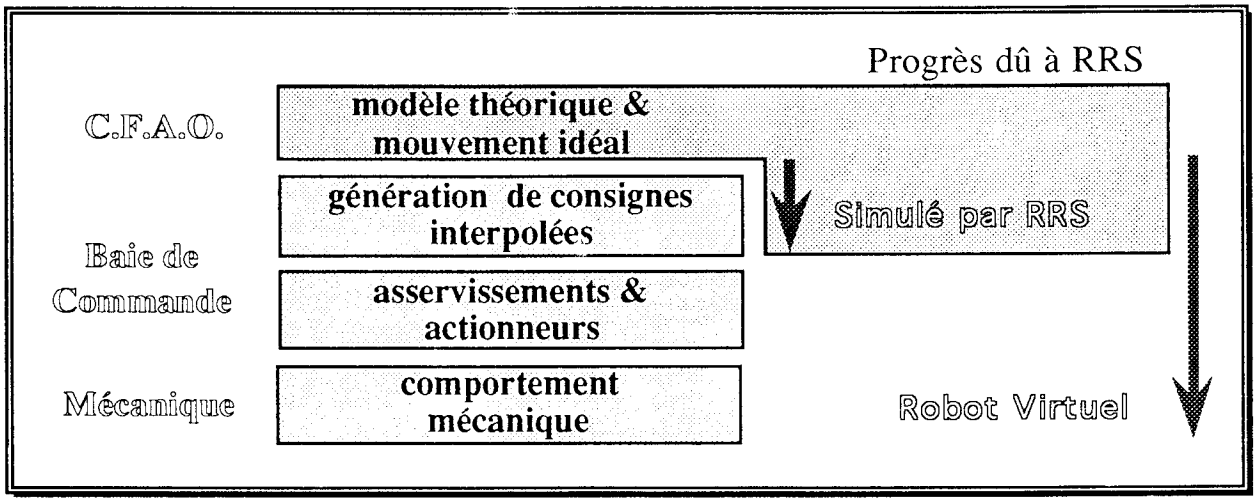


Figure III-14 : évolution de la CFAO Robotique, grâce à RRS

Nous constatons bien que la modélisation réaliste du robot virtuel n'est pas complète. Il existe en conséquence un ensemble d'effets non simulés et donc non contrôlables. Tant que la qualité de la tâche robotisée ne l'impose pas, le non-traitement de ces effets n'est pas gênant et la CFAO Robotique

jouera parfaitement son rôle. Dès que des conditions plus sévères de précision ou de chargement apparaissent, la CFAO Robotique se comporte comme un système où la partie terminale de la chaîne d'obtention des résultats fonctionne en boucle ouverte.

Nous allons voir que notre travail contribue à supprimer cette défaillance.

2.1.4. Prolongement de RRS grâce à la modélisation du comportement technologique de la partie mécanique

Les deux problèmes non abordés par RRS sont le comportement du couple {préactionneur, actionneur} et celui de la partie purement mécanique.

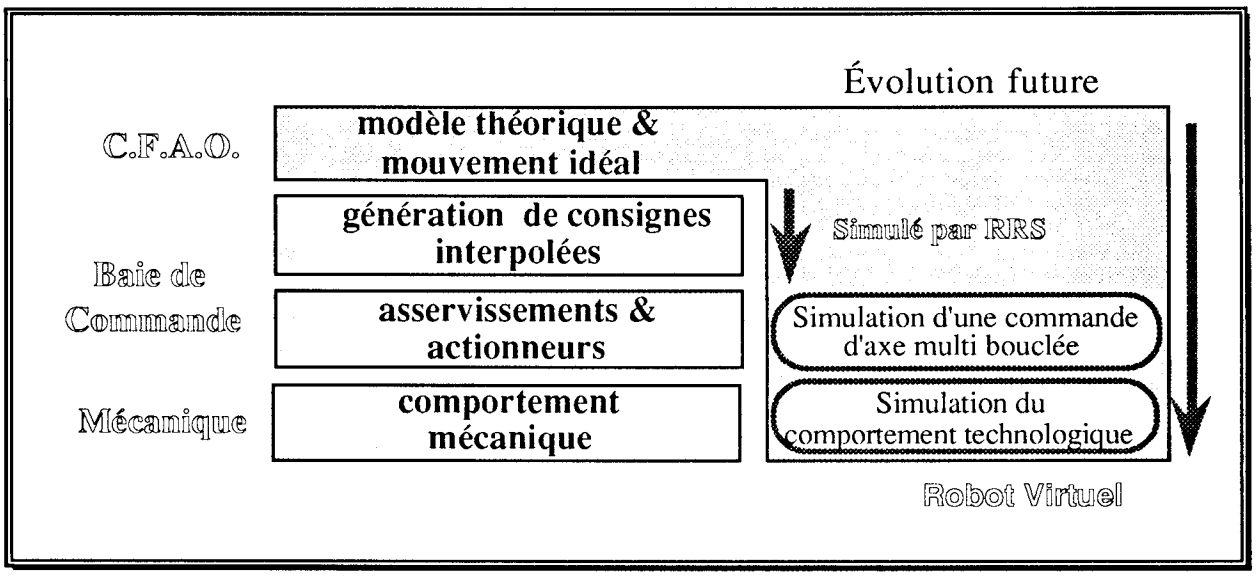


Figure III-15 : vue prospective de la CFAO Robotique

Le premier aspect est un classique de l'automatique appliquée aux servomécanismes. Les méthodes de résolution sont connues, la plupart des configurations ont déjà été traitées et ont fait l'objet de très nombreux travaux de recherche.

Le second point est quant à lui totalement couvert par notre modélisation du comportement technologique d'un robot industriel. Nous pouvons donc envisager l'intégration sans trop de difficultés de nos travaux dans la démarche RRS.

2.2. Aide à l'évaluation de performances des systèmes robotiques

Nous avons maintenant, d'une part grâce aux travaux découlant du projet RRS, et d'autre part grâce aux travaux présentés dans ce mémoire, l'ensemble des éléments permettant de simuler de manière très réaliste la quasi-totalité du comportement d'un robot industriel. Nous pouvons dire que nous avons tous les éléments pour construire un véritable robot virtuel. Les applications de ce robot virtuel sont nombreuses et variées, elles se situent tout au long du cycle de vie d'un robot industriel, et nous proposons d'en faire ici un rapide aperçu.

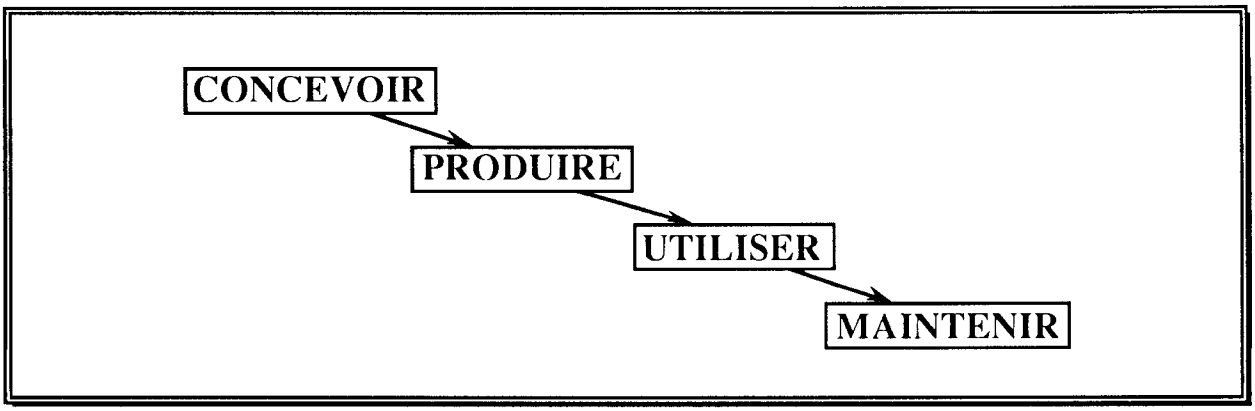


Figure III-16 : cycle de vie simplifié d'un équipement de production

2.2.1. Aide à l'évaluation lors de la conception d'un robot industriel

L'étude de l'ensemble des déformations d'un robot industriel sous l'effet des sollicitations qui lui seront appliquées doit être conduite lors de sa conception. Généralement, cette étude se réduit à des calculs de vérification locale qui sont effectués manuellement, puisqu'il n'existe pratiquement aucun logiciel capable d'intégrer l'ensemble des différentes fonctionnalités nécessaires.

Pourtant, en terme d'analyse de la valeur, il est fondamental d'assurer l'homogénéité du robot. C'est à dire que le niveau d'influence de chaque composant sur la déformation globale du robot doit :

- soit être sensiblement constant, en vertu du principe qui dit que le niveau de qualité d'une chaîne d'éléments est à l'image du niveau de qualité du plus mauvais de ses éléments,
- soit au contraire privilégier l'influence de certains d'entre eux, de

manière à simplifier le comportement technologique et à permettre d'envisager sa prise en compte en temps réel lors de la commande.

Nous verrons au prochain paragraphe une application de ce dernier principe.

Notre méthode donne la possibilité de définir de manière totalement arbitraire les différentes raideurs locales afin de simuler le comportement technologique global. Cette caractéristique permet d'établir, en terme de cahier des charges fonctionnel, les différentes raideurs des composants à utiliser tout au long de la chaîne cinématique.

Il s'agit d'une aide à l'analyse descendante à mener lors de la phase de conception détaillée du robot.

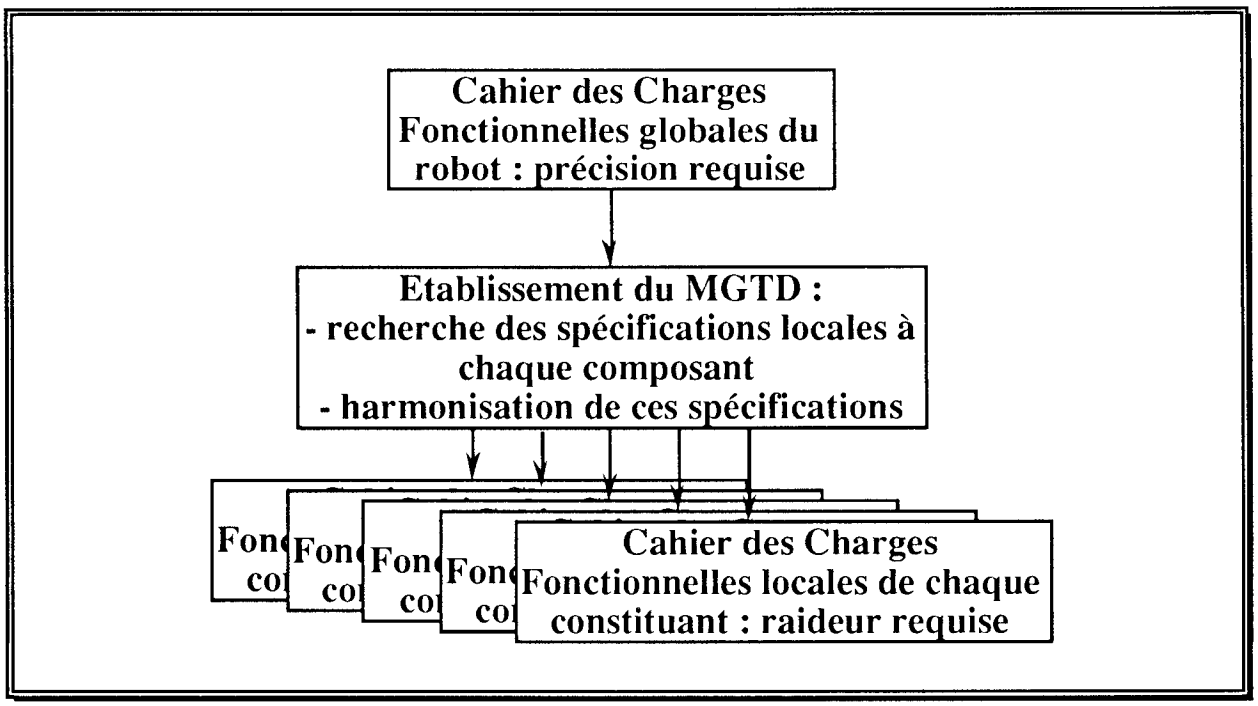


Figure III-17 : analyse descendante d'un robot lors de la phase de conception détaillée

Notre méthodologie s'inscrit donc comme un maillon central dans la phase de conception d'un robot industriel et son intégration logicielle fournira un outil de CAO directement utilisable par un bureau d'étude.

2.2.2. Aide à l'évaluation lors de la mise en service d'un robot industriel

Nous avons vu dans ce mémoire toute la difficulté pour appréhender l'ensemble de la connaissance utile à l'emploi d'une modélisation technologique

du comportement réel d'un robot industriel. Les techniques à mettre en oeuvre ayant déjà été décrites, nous ne nous attarderons pas sur cette phase de la vie d'un robot.

Nous remarquerons cependant que cette identification doit intervenir juste après l'assemblage final, pendant la phase de mise au point et de qualification de la machine.

A l'heure actuelle, cette identification se limite généralement à la détermination des offsets codeur, à l'aide le plus souvent de la méthode de "mise en correspondance de pointes" décrite au paragraphe 2.2.3. du premier chapitre.

Notre méthode, qui est la plus générale possible à l'heure actuelle, peut également être dérivée de manière partielle, afin de ne pas prendre en compte certains phénomènes dont l'influence serait faible.

2.2.3. Aide à l'évaluation lors de la programmation des tâches d'un robot industriel

Dans ce paragraphe, nous distinguerons les deux types d'assistance à la programmation de tâches robotisées offertes par notre méthode : l'assistance passive et l'assistance active.

2.2.3.1. Évaluation des performances métrologiques pour une tâche robotisée quelconque

Il s'agit là de vérifier l'aptitude du robot à accomplir une tâche robotisée donnée.

Avec le cahier des charges de la tâche, le programmeur peut tout d'abord mettre en oeuvre le MGTD. Ensuite, il lui faut vérifier si l'écart de trajectoire obtenu par simulation n'est pas supérieur aux tolérances de géométrie de la trajectoire acceptables par le procédé mis en oeuvre.

A l'heure actuelle, ce type de problème est éludé, soit par l'emploi d'une programmation par apprentissage, soit par l'utilisation d'un capteur extéroceptif et d'un effecteur intelligent à mobilité réduite compensant de manière automatique les défauts technologiques du porteur.

Toutefois, l'observation systématique des déformations et la mémorisation des résultats obtenus permet de caractériser directement la capabilité du robot dans une situation donnée.

2.2.3.2. Correction de consignes pour une tâche robotisée donnée

Une approche beaucoup plus intéressante de la programmation de tâches robotisées se trouve dans la recherche d'une compensation des défauts.

L'idée est de programmer une trajectoire déportée d'une valeur égale à l'inverse de l'erreur simulée, de manière à ce que le robot se retrouve quasiment sur la trajectoire désirée lors du fonctionnement réel.

La méthode employée est la suivante : pour chaque position, il faut

- obtenir les coordonnées articulaires du robot {étape 1},

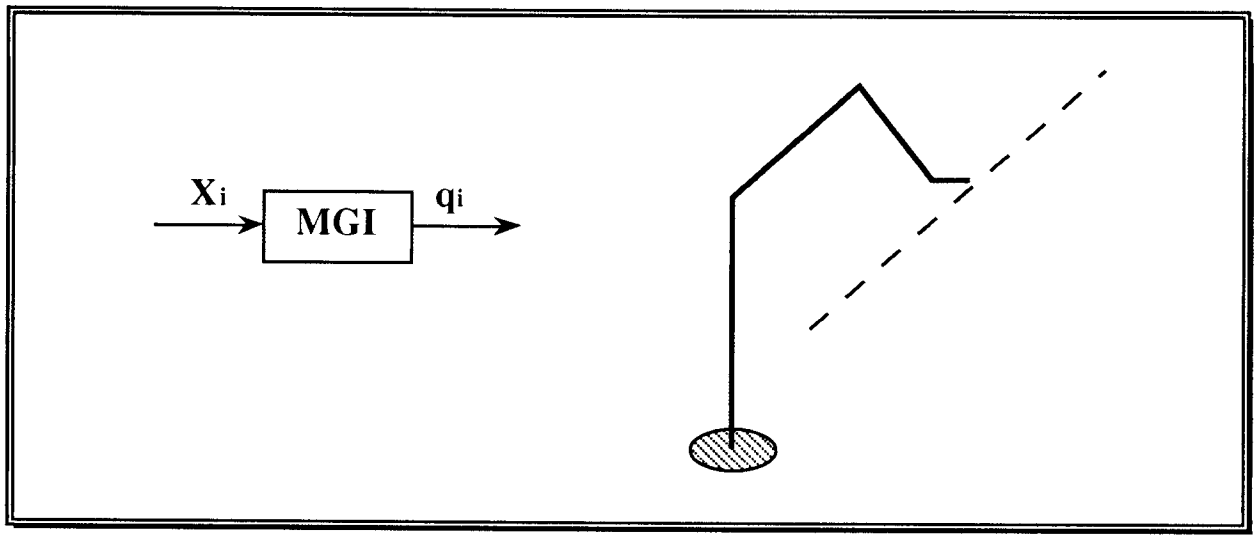


Figure III-18 : étape 1 : détermination des vecteurs articulaires théoriques

- lancer la simulation au travers du modèle technologique {étape 2},

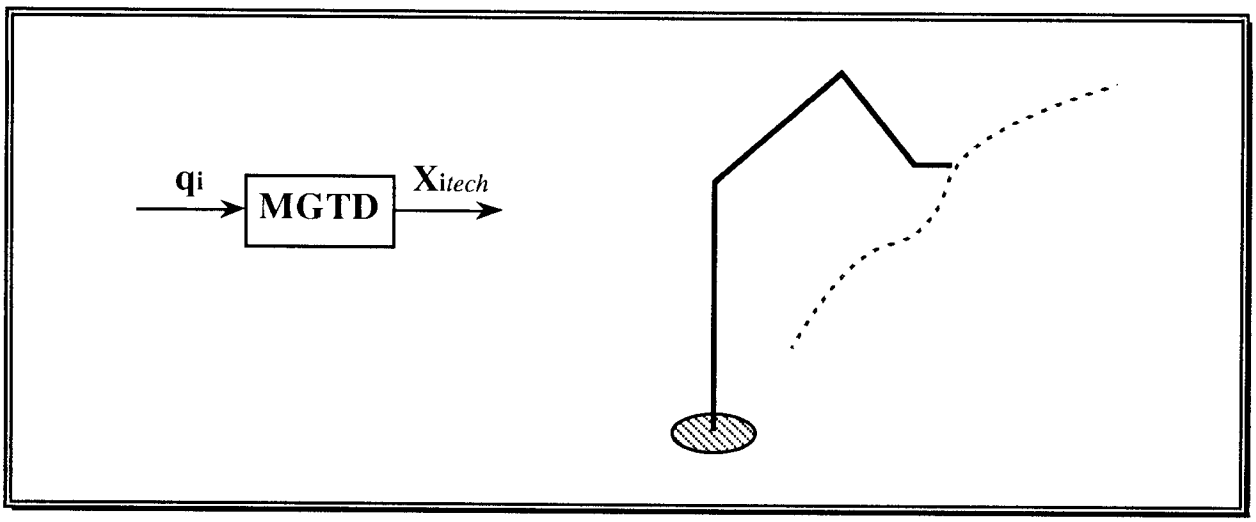


Figure III-19 : étape 2 : simulation du comportement technologique

- faire la différence vectorielle $\Delta X_{itech} - \Delta X_i = \delta X_i$,

- calculer l'erreur articulaire équivalente $\Delta q_i = MV(\delta X_i)$ {étape 3},

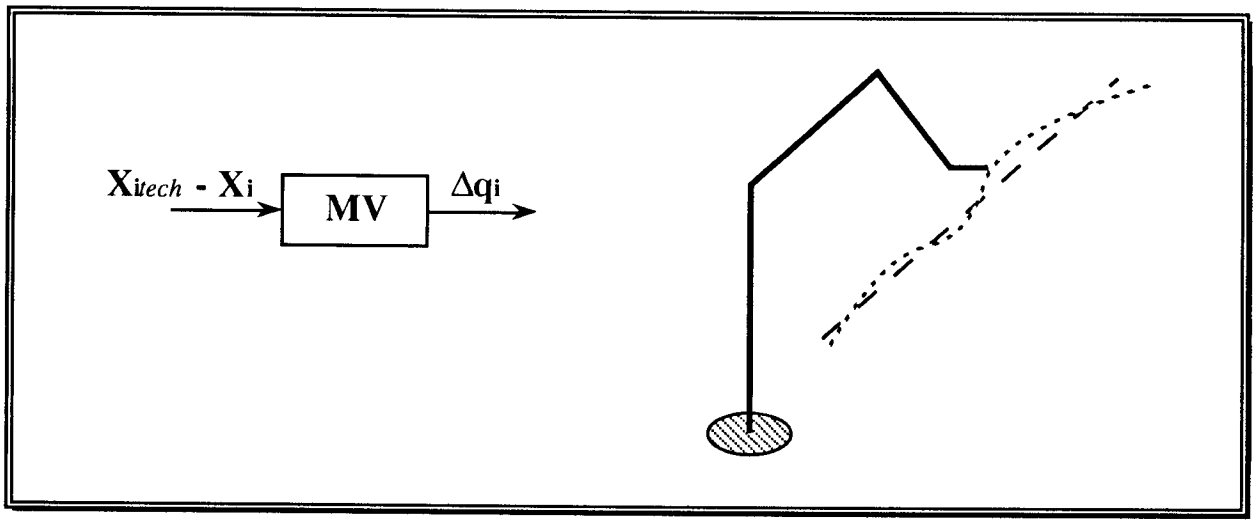


Figure III-20 : étape 3 : détermination de l'erreur Δq_i

- transformer l'erreur articulaire Δq_i en correction articulaire δq_i :

$$\delta q_i = - \Delta q_i,$$

- calculer la nouvelle consigne articulaire corrigée $q_i - \Delta q_i$,

- l'appliquer au MGD pour connaître les coordonnées à programmer dans l'espace de la scène de travail {étape 4}.

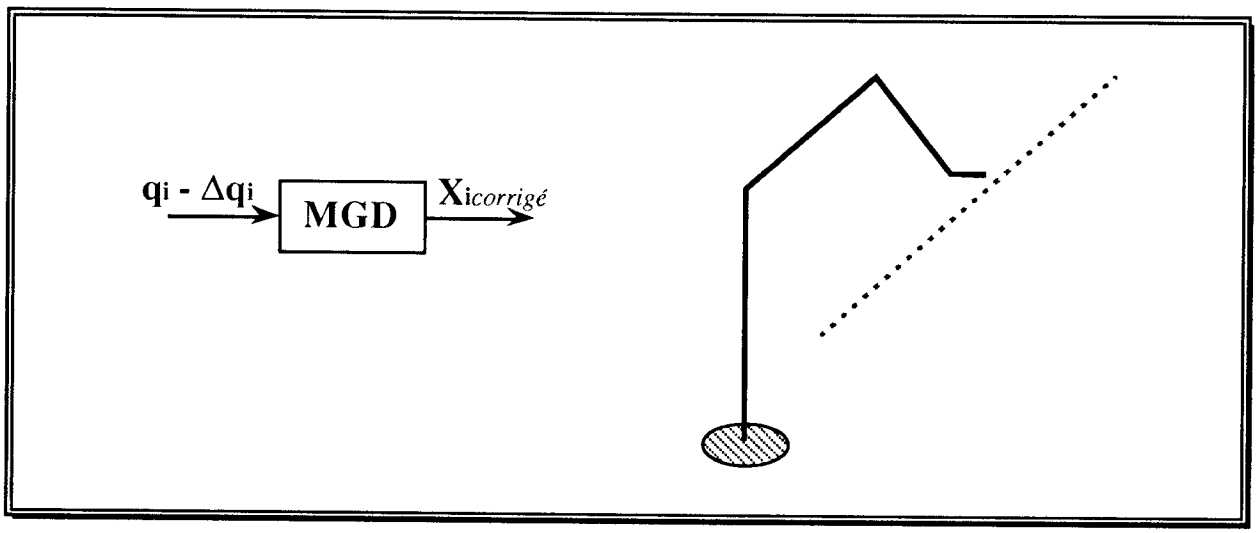


Figure III-21 : étape 4 : mise en oeuvre de la trajectoire corrigée

Cette méthode ne permet bien entendu pas d'obtenir une trajectoire parfaite, mais elle permet de réduire fortement l'erreur de forme de la trajectoire finale.

2.2.4. Aide à l'évaluation lors de la maintenance d'un robot industriel

Nous avons vu que l'intérêt indiscutable de l'emploi d'un MGTD pour certaines tâches robotisées "délicates" du fait de la précision requise nécessite en contrepartie un gros investissement initial dans la connaissance technologique du robot. Or, la plupart des paramètres décrivant les imperfections locales des différents composants sont amenés à évoluer dans le temps. En effet, si nous observons leurs variations à moyen ou long terme, nous observons des phénomènes de dérive, dus aux usures, aux déréglages et aux fluctuations des conditions d'utilisation. Ce dernier point interdit toute modélisation prédictive de ces phénomènes de dérive. De plus, certaines interventions entraînent des modifications brutales des paramètres correspondant au composant concerné.

Pour conserver la pérennité de cette connaissance, il nous faut assurer le suivi des paramètres, c'est à dire régulièrement valider leurs différentes valeurs et au besoin les ajuster. Cette tâche est naturellement dévolue à la fonction maintenance.

Nous allons détailler dans ce paragraphe comment s'articulent les différents mécanismes qui réalisent cette fonction principale de "veille" ou de réactualisation. Puis, nous aborderons les fonctions secondaires qui en découlent et qui vont permettre à la maintenance de s'enrichir elle même considérablement.

2.2.4.1. Aide à l'évaluation de nouveaux paramètres lors de la maintenance curative d'un robot industriel

Toute intervention de maintenance curative sur un robot se traduit par le remplacement d'un composant défectueux ou par le réglage d'une caractéristique fonctionnelle locale. Qu'il s'agisse de l'un ou de l'autre, le comportement local du composant correspondant va être changé et le MGTD doit être modifié en conséquence.

Le grand intérêt de réactualiser le MGTD au fur et à mesure des interventions est que nous savons parfaitement quels sont les paramètres concernés par chaque intervention. La recherche sur les nouvelles valeurs des paramètres concernés est donc en fait parfaitement ciblée. Nous pouvons donc utiliser la méthode de recherche définie au paragraphe 2.2. du chapitre II, mais avec un nombre réduit de paramètres à identifier, ceci réduisant considérablement la durée de cette identification.

2.2.4.2. Aide au suivi lors de la maintenance préventive d'un robot industriel

Nous venons d'évoquer la nécessité de prendre en compte au niveau du MGTD les modifications brutales intervenues lors de certaines interventions de maintenance curative.

Une autre approche consiste à observer régulièrement les dérives du comportement du robot pour d'une part corriger le MGTD au fur et à mesure et d'autre part prévoir les opérations de maintenance préventive.

Ce suivi, pour être efficace, c'est à dire systématique et fiable, doit être automatisé.

Ceci se traduit par l'exécution périodique d'un cycle de contrôle, où le robot va se placer successivement devant une série de plots de palpage placés dans le site de travail et correspondant à des postures différentes. Un capteur permet de mesurer l'écart de position entre la position atteinte par le robot, toutes corrections par le MGTD effectuées, et une position de référence.

L'algorithme de mise en oeuvre d'une telle procédure est le suivant :

Début
Cycle de mesurage automatique
Si (écarts mesurés > limite admissible), **alors**
  Faire
    Identification des paramètres du MGTD
    Modification du MGTD
    Cycle de mesurage automatique
  Jusqu'à ce que (écarts mesurés < limite admissible)
Affectation des historiques de suivi des paramètres
Fin

Figure III-22 : algorithme de suivi en maintenance préventive

La lecture des historiques permet de visualiser les tendances et donc, à l'image d'une carte de contrôle utilisée en MSP, d'établir des dates prévisionnelles de réglage ou plus généralement d'intervention en maintenance préventive.

2.3. Projection sur le concept de robot mécatronique

Les premières études menées sur le concept de robot mécatronique remontent à une huitaine d'années [GRO88] et ont permis d'en cerner les principes de base, tant du point de vue de la commande que de celui de la mécanique.

Nous allons dans ce paragraphe justifier la démarche qui nous a conduit vers ce concept, nous présenterons très succinctement les solutions technologiques retenues et nous détaillerons les apports de notre approche technologique dans la validation de la démarche précédente et dans la solution de pilotage à mettre en oeuvre.

2.3.1. Présentation des objectifs recherchés en mécatronique

La robotique est une discipline qui a dû, dès son origine, savoir trouver les intersections entre des disciplines aussi différentes que sont la mécanique et l'électronique, et ceci tout en les localisant distinctement entre partie opérative et baie de commande. Aujourd'hui, la mécatronique, abordée dans le prolongement des recherches menées autour de la robotique, permet d'envisager de nouvelles dispositions architecturales, qui déboucheront, peut être, sur de futures générations de robots industriels.

Nous pouvons définir un objet mécatronique comme étant le résultat de l'intégration et de l'intrication de composants mécaniques et électroniques élémentaires. L'intégration signifie l'association localisée de ces composants, et l'intrication sous entend que le produit résultant est complexe et emmêlé. Si ceci semble vrai localement, nous allons voir que cela permet en revanche de décomplexifier le niveau global.

Nous proposons donc une architecture de robots imbriquant mécanique et électronique, bâtie sur une localisation simultanée et profonde de ces deux technologies. Nous obtenons alors des composants locaux actifs, c'est à dire autonomes, intelligents et surtout acteurs dans la réalisation de la tâche robotisée. Ces composants interagissent les uns avec les autres au travers d'une architecture de pilotage totalement décentralisée.

Pour arriver à cette proposition, nous avons observé qu'un robot est un système mécanique articulé (SMA) dont le pilotage indépendant de la position de chaque articulation permet l'obtention d'une trajectoire finale. En effet, la

cohérence de sa tâche globale n'est fonction que de la coordination entre ces pilotages locaux (ex. : coordination des interpolations, coordination des vitesses, synchronisation...).

Ensuite, nous retrouvons au niveau de chaque articulation les problématiques de type mécanisme et commande, c'est à dire de l'ensemble des éléments entrant dans la constitution de chaque boucle proprioceptive. Nous les avions décrits à la figure I-8 : transmetteur (réducteur), liaison cinématique, actionneur, préactionneur (variateur), carte de commande, capteurs, éléments de sûreté de fonctionnement... Sur des architectures traditionnelles, nous observons que cette boucle est totalement et systématiquement étirée tout au long des parties opérative et informative.

Coté mécanique, nous trouvons le plus souvent des transmissions qui traversent de part en part le SMA et des actionneurs réducteurs regroupés le plus près possible de sa base. Ceci est souvent justifié par la nécessité d'équilibrer et (/ou) de répartir les masses, par les puissances massiques assez moyennes des actionneurs électriques et par l'obligation d'insérer dans la chaîne cinématique de la transmission des adaptateurs de couple (abaisser la vitesse pour augmenter le couple utilisable)

Coté électronique, l'architecture du système de pilotage est toujours centralisée dans une baie de commande intégrant des fonctions de modélisation du comportement global, localisée dans une armoire séparée de la partie opérative. Ceci nécessite du câblage sur des distances conséquentes associé à la connectique correspondante et implique beaucoup de soins dans l'instrumentation et le conditionnement des signaux électriques échangés (par axe, nous avons à l'heure actuelle les câbles de puissance de l'actionneur, ceux du capteur de position, ceux des capteurs de fin de course et ceux de dispositifs annexes {freins, embrayages...}).

Ces différents constats entraînent une course à la rigidité des différents segments. Quand la transmission de mouvement du dernier segment traverse le robot pour remonter vers son embase, elle s'accompagne d'une complexité croissante des mécanismes nécessaires : pièces supplémentaires de guidage, de transmission... Tout ceci se traduit sur les autres segments par des masses embarquées supplétives, en augmentation lorsque nous nous rapprochons de l'embase du robot. Les différents chemins de câbles contribuent également largement à cet accroissement de poids. Pour actionner tous ces excédents, il nous faut alors des actionneurs plus puissants, donc plus lourds, ce qui nous

conduit dans une véritable spirale du "costaud", de la rigidité ou tout simplement du surdimensionnement.

Pour illustrer notre propos, nous avons défini la notion de rendement massique d'un robot : $\frac{\text{masse transportée par le robot}}{\text{masse totale du robot}}$ et nous engageons le lecteur à calculer ce ratio pour quelques robots industriels actuellement commercialisés. Les résultats qu'il obtiendra lui confirmeront que sur cet aspect également, la robotique actuelle n'est qu'un pâle reflet des capacités humaines.

Aussi, fort de ce constat, nous prônons que c'est au niveau de chaque articulation du robot que l'on doit concevoir un véritable composant mécatronique intégrant la projection locale des fonctions ci-dessus énumérées. Nous appelons ce composant une Unité Intelligente d'Axe Mécatronique (UIAM).

L'architecture du robot est alors radicalement transformée et le robot mécatronique se présente alors selon le schéma de la figure suivante :

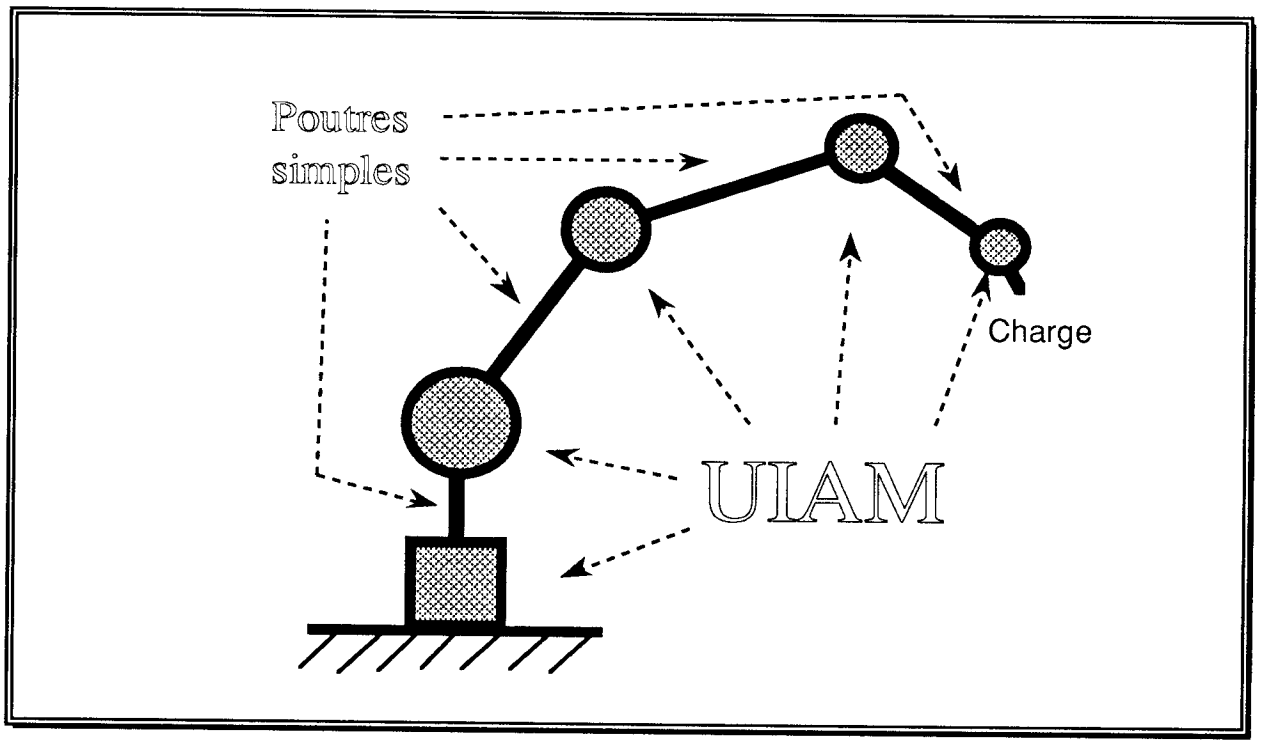


Figure III-23 : architecture mécatronique d'un robot polyarticulé

- des axes dotés d'un composant multitechnologique intégré hautement sophistiqué (UIAM),
- des liens entre UIAM consécutives de type poutre profilées, sans autre fonctionnalité,

- un bus de communication inter-UIAM et un bus d'énergie, et
- un poste de supervision sous la forme d'un calculateur banalisé.

Cette approche mécatronique se distingue des solutions classiquement utilisées à l'heure actuelle par l'abandon de la spirale inutile du "costaud". Ceci ne signifie pas tout de même pas que le robot sera fragile, mais que la tenue aux sollicitations ne sera plus envisagée en terme de rigidité, mais en terme de respect du domaine élastique. En particulier, les liens entre UIAM pourront fléchir, avec une marge de sécurité vis à vis des zones où des phénomènes plastiques pourraient apparaître.

Ce dernier point est fondamental, car il implique l'augmentation du rendement massique du robot. En effet, si nous concentrons motorisation et transmission à l'intérieur de chaque axe, il n'y a plus la même obligation de rigidité des corps de type poutre les reliant deux à deux. Les déformations élastiques qui résulteront d'une diminution de la rigidité des segments devront, bien entendu, être pris en compte dans la modélisation du robot. Il en résulte une diminution conséquente du poids de ces éléments de liaison, et donc du poids du robot. Une part plus grande de la puissance mise en oeuvre dans les axes sert donc au déplacement de la charge, au lieu de servir au déplacement des éléments du robot.

L'architecture de la commande doit elle aussi être repensée autour de cette disposition physique des UIAM. L'idée fondamentale est de rassembler localement le plus d'intelligence et de pouvoir de décision possible. L'architecture centralisée et hiérarchisée est alors totalement inadaptée à ces nouvelles contraintes. Au sein de notre laboratoire, une grande proportion des travaux effectués a consisté à élaborer de nouvelles solutions d'architecture de commande basées sur le concept de décentralisation. Nous les étendons progressivement à tous les niveaux du pilotage : architecture semi-décentralisée de la commande ([MIC88], [CAR90]), puis décentralisation totale de la commande ([BRU88], [BRU89], [BRU90], [MAR89], [CAU91], [BRU93b]), application de principes similaires à la supervision ([OLI90], [ARN90]), à l'ordonnancement [PUJ93b] et à des fonctions de pilotage de niveaux supérieurs [BER90], [DAI93]...

Les avantages d'une telle structure architecturale décentralisée sont nombreux et variés :

- l'Autonomie de chaque composant local vis à vis de ses voisins (par exemple, pour une UIAM, la mécanique est découplée du reste du SMA et sa commande est totalement indépendante),

- l'Homogénéité structurale de l'architecture informative, chaque composant étant au même niveau hiérarchique que ses voisins,
- l'Accessibilité immédiate aux données de toute nature.

Tout ceci nous permet d'envisager :
- une plus grande modularité dans la conception du système de pilotage (similarité des problèmes et formalisme d'élaboration de solution),
- une amélioration de la flexibilité opérationnelle (la transparence du système d'information permet de prendre en compte dans les décisions des faits auparavant éludés), et
- une simplicité accrue de mise en oeuvre et de maintenance (conséquence directe des deux points précédents qui débouchent sur une standardisation du matériel et des algorithmes et à une spécification de certains paramètres liés aux caractéristiques fonctionnelles propres du composant décentralisé).

D'autres conséquences plus technologiques sont à apprécier :
- la diminution du câblage (l'ensemble de tous les câbles sont remplacés par deux câbles communs à tous les axes, un de puissance et un de communication),
- la suppression de l'armoire de commande et du pupitre associé (baie de commande) et remplacement de ce dernier par un calculateur banalisé,
- la standardisation de l'UIAM, ce qui permet de diminuer son coût de production,
- la possibilité de rationaliser cette production, chaque composant (UIAM) pouvant être entièrement assemblé, testé et validé avant l'assemblage final du robot,
- la restructuration de l'architecture mécanique du robot.

Avant de revenir sur ce dernier point, qui est fondamental pour notre problématique, nous allons présenter plus en détail une UIAM.

2.3.2. Description de l'UIAM élémentaire

Une UIAM est un opérateur de mouvement angulaire, totalement autonome et pouvant s'intégrer à un système mécanique modulaire.

Nous avons choisi une liaison cinématique de type "porte à faux", qui offre des amplitudes de mouvement beaucoup plus grandes que celles offertes par des articulations architecturées en "chape". Chacune des deux parties en mouvement relatif se termine par une bride de fixation pour les éléments tubulaires inter-UIAM.

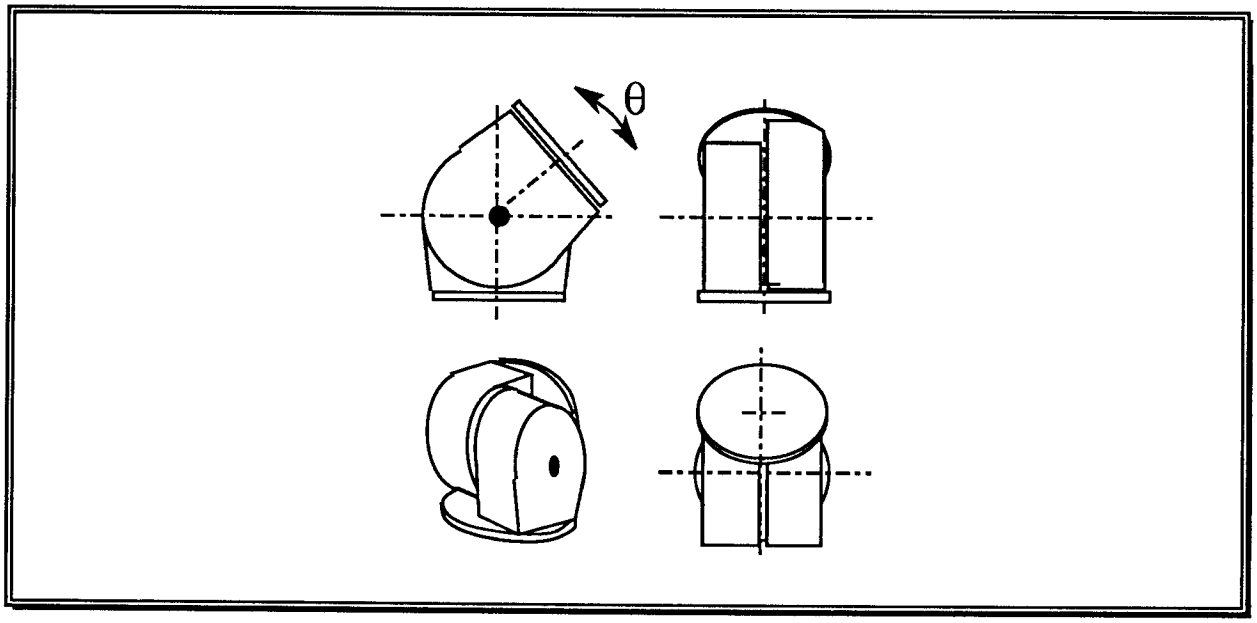


Figure III-24 : vue extérieure d'une UIAM

La figure suivante nous donne une idée des différents éléments mécaniques, électroniques et micro-informatiques, et des différents liens mécaniques et électriques.

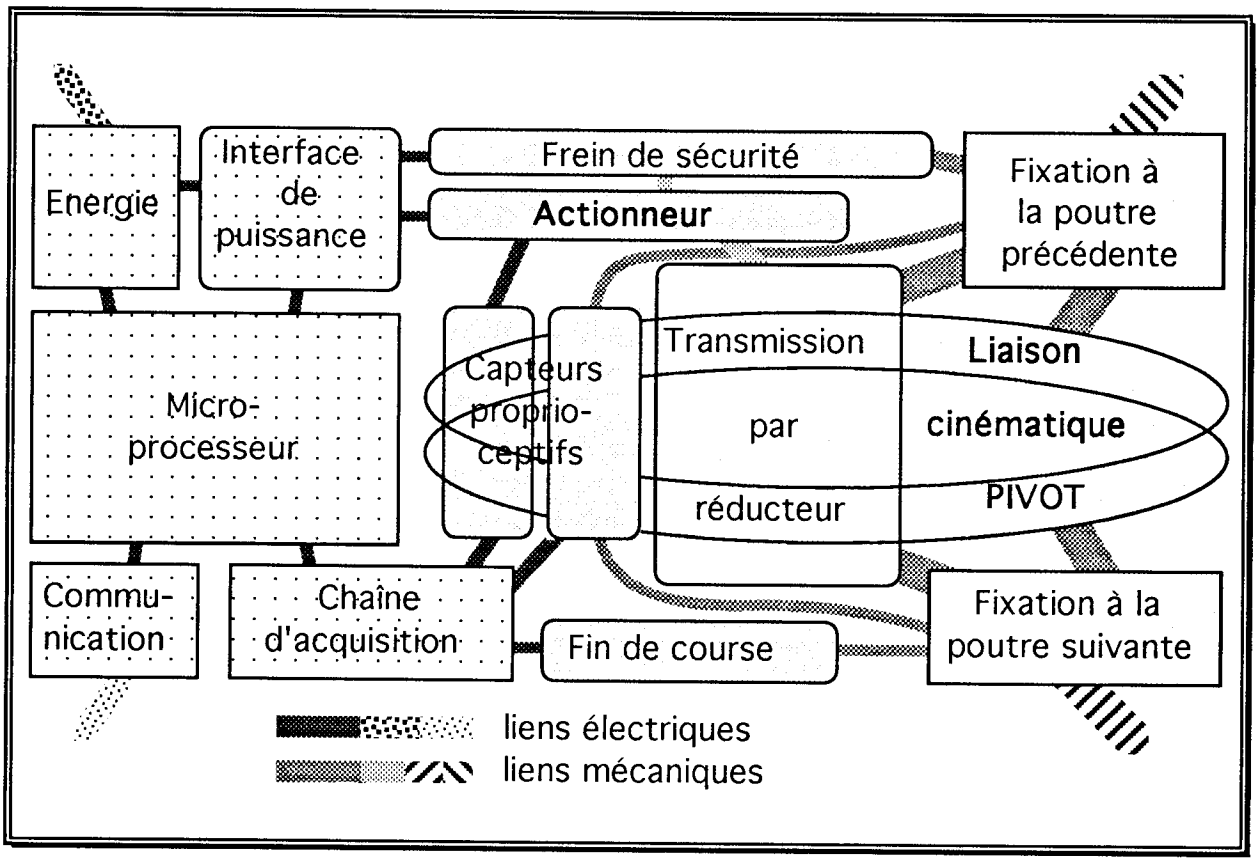


Figure III-25 : schéma fonctionnel d'une UIAM

En ce qui concerne la partie mécanique, l'intégralité de la chaîne cinématique doit être réduite au minimum, tout en permettant des caractéristiques mécaniques extrêmement performantes (couple maximum supérieur à 600 mN, vitesse supérieure à 0,3 rd/s, précision de mise en position inférieure à 0,002 degré). La liaison pivot doit être la plus rigide possible, ce qui conduit à utiliser des éléments roulants de type rouleau. L'électronique intégrée assurant toutes les fonctions de pilotage, placée physiquement au coeur de la mécanique, doit être parfaitement protégée contre les phénomènes électromagnétiques. Le calculateur embarqué permet l'ensemble des traitements possibles, tant du point de vue de la commande que de celui de la surveillance et est doté d'une grande capacité de communication. Compte tenu de ces contraintes, les solutions actuellement envisagées permettent de loger tous ces composants dans un volume cylindrique de 180 millimètres de diamètre et de 200 millimètres de longueur.

2.3.3. Conséquences sur l'architecture globale du robot mécatronique

Comme annoncé précédemment, les segments du robot mécatronique sont effectivement extrêmement simplifiés par rapport à toute autre solution plus conventionnelle.

En effet, chaque segment est maintenant constitué d'une UIAM et d'un corps de liaison de type poutre. Il peut être maintenant représenté par la figure suivante :

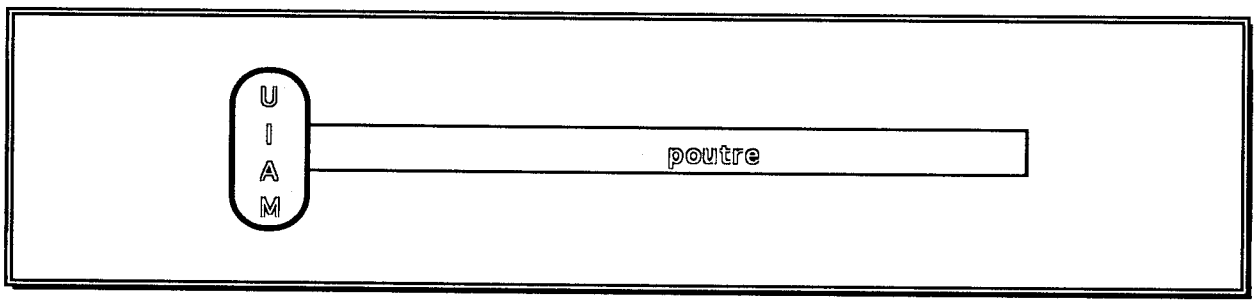


Figure III-26 : constitution d'un segment de robot mécatronique

L'UIAM étant par définition compacte et homogène, son comportement aux sollicitations sera assez uniforme et, d'une manière générale, sera nettement plus rigide que celui de la poutre associée.

Les dimensions de cette dernière vont être déterminées en fonction des critères complémentaires suivants :

- les contraintes internes doivent être strictement inférieures aux conditions de résistance du matériau constituant la poutre, quelles que soient les conditions d'utilisation du robot (ex : démarrage à charge et accélération maximales),

- la forme de la section doit maximaliser le moment quadratique IGyy,

- le poids linéique de la poutre doit être minimal,

- la forme de la section ne doit pas engendrer de concentrations de contraintes, cette section peut d'ailleurs rester constante tout au long du lien inter-UIAM.

Cela donne des formes tubulaires suivantes :

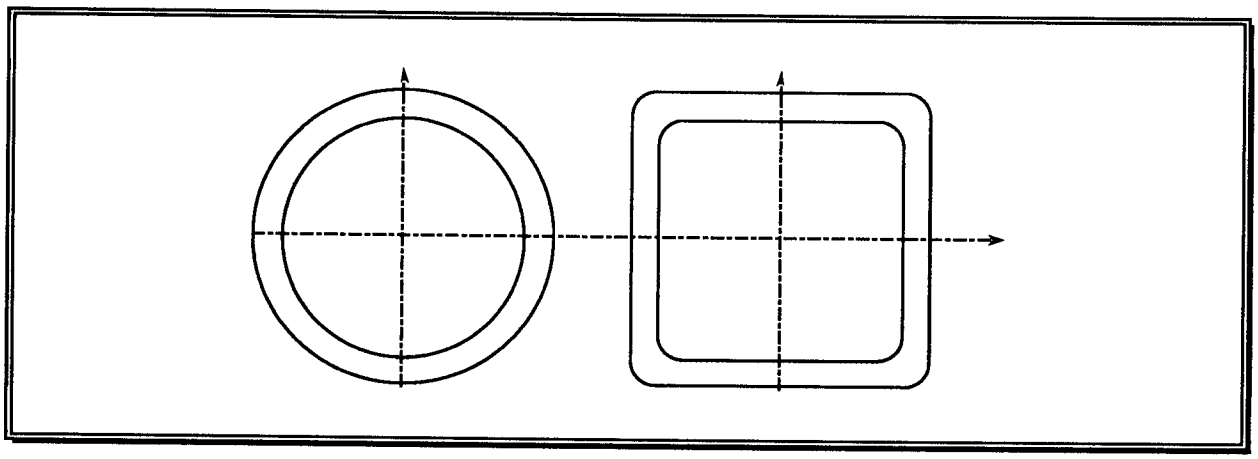


Figure III-27 : formes acceptables de section de poutres inter-UIAM

De tout ceci découle une certaine localisation des défauts engendrés par les déformations des composants. Si l'UIAM est modélisable essentiellement par ses trois raideurs torsionnelles (ξ_d # 0), il n'en sera pas de même pour la poutre, qui engendrera un torseur de petites déformations le plus général possible $\begin{Bmatrix} \alpha_{dx} & \xi_{dx} \\ \alpha_{dy} & \xi_{dy} \\ \alpha_{dz} & \xi_{dz} \end{Bmatrix}_{/A}$. Toutefois, la forme constante de la section nous permet de ne pas utiliser la méthode des éléments finis, mais directement certains résultats simples de la Résistance des Matériaux (flèches, déformées) existant sous forme de formulaire.

Le calcul étant alors nettement plus rapide (!), nous pouvons envisager une politique de commande permettant de compenser partiellement les défauts statiques. La puissance de calcul des UIAMs étant très élevée, le traitement local de certains défauts dynamiques peut également s'envisager, puisqu'il est possible d'isoler les contributions de chaque segment du robot afin d'évaluer les effets de couplage dynamique [NAG87].

Les grandes lignes en sont aisément compréhensibles au travers de la figure suivante :

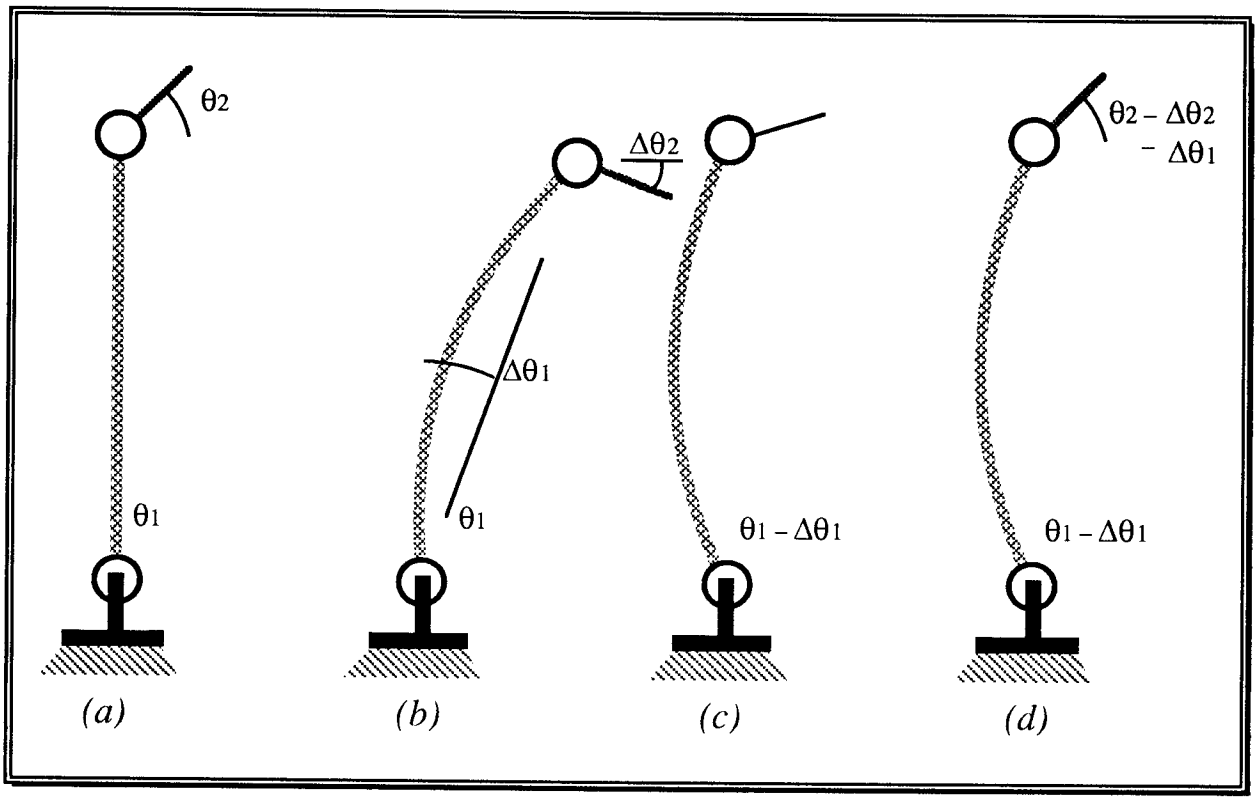


Figure III-28 : corrections des défauts : cas simple

(a) : robot sans sollicitation

(b): robot sollicité sans correction

(c): correction sur le premier axe, $\Delta\theta_1$ obtenu par mesure du couple moteur sur l'axe 1 puis application au segment 1 des formules de RdM donnant la flèche f : $\Delta\theta_1 = -\frac{f}{2\,L} = -\frac{1}{2}\left(\frac{F_y\,L^2}{3\,E\,I_z}\right)$,

(d): correction sur les deux premiers axes, $\Delta\theta_1$ et $\Delta\theta_2$ obtenus par mesure du couple moteur sur l'axe 2 et application de formules équivalentes.

La mise en oeuvre généralisée à un robot polyarticulé de n axes de ce type de corrections nécessite l'utilisation d'un modèle variationnel pour maîtriser parfaitement l'effet global. La connaissance du couple transmis dans chaque articulation permettant la détermination des déformations amonts et aval qui entrent dans le calcul de chaque correction.

De même, la connaissance de la raideur des poutres de liaison permet de mettre en oeuvre une politique de commande permettant de prévenir l'apparition de défauts dynamiques du type oscillations ou vibrations...

3. Conclusion

Nous venons d'énumérer les nombreuses applications susceptibles d'être concernées par une modélisation technologique des robots industriels.

En réalité, ce résultat était prévisible, puisque les modèles actuellement employés en robotique n'ont qu'une vue globale du comportement réel d'un robot, et que ceci peut induire des incertitudes dans toutes les activités concernées.

Il n'était pas question pour nous de dégager pour chacune de ces applications une solution particulière permettant une validation expérimentale. Aussi avons nous choisi de développer un logiciel dont les caractéristiques sont articulées autour de la recherche d'un maximum de polyvalence et d'interactivité.

Toutefois, il est clair pour nous que les travaux présentés ci-avant doivent pouvoir servir de préliminaire à des travaux de développement du nouveau type d'architecture de robots développé au paragraphe 2.3. ; une telle architecture devrait offrir une meilleure puissance massique du robot grâce aux possibilités ouvertes par une approche mécatronique.

Notre logiciel peut donc constituer l'outil d'évaluation de performances pour la mise au point du robot "virtuel" correspondant au robot mécatronique que nous voulons développer.

CONCLUSION GENERALE

Les robots industriels (polyarticulés) sont des machines de production dont le comportement reste hautement complexe. Les nombreuses recherches menées afin de mieux appréhender ce comportement vont dans des directions diverses telles que l'approche vibratoire ou l'approche métrologique. Sur ce dernier point, les robots ayant une structure de chaîne simple sont extrêmement sensibles en terme de performance aux défauts technologiques apparaissant lors de leur fabrication.

L'approche que nous proposons vise justement à traiter de cette problématique, à laquelle correspondent de véritables verrous sur le plan de l'exploitation industrielle des robots. Dans la plupart des cas, force est d'ignorer ces verrous, ce qui peut conduire jusqu'à une impossibilité de robotiser la tâche correspondante. Ces difficultés apparaissent dans des situations précises, notamment lorsque la tâche nécessite une grande précision, lorsque la charge transportée est modifiée en cours de tâche ou encore lorsqu'il n'est pas possible de recourir à une programmation de tâche par apprentissage.

Dans ces divers cas, notre approche technologique du comportement en fonctionnement des robots industriels apporte une solution qui peut justifier l'investissement expérimental nécessaire à la détermination du MGTD correspondant.

La méthode et les outils que nous proposons constituent en effet des moyens d'investigations supplémentaires permettant un accroissement du champ de robotisation ; ces moyens doivent cependant être utilisés dans le cadre d'une stratégie du "juste robotisé" prenant en compte les impératifs économiques.

Dans cette perspective, si notre travail ouvre de nouvelles opportunités, notamment pour la robotique, il n'en demeure pas moins vrai que ce type de

méthode peut paraitre lourde à mettre en oeuvre ; elle constitue cependant un passage obligé pour pouvoir assurer à la fois une tâche et sa qualité d'exécution. En effet, toute machine de production est différente de ses semblables, qu'ils soient ou non issus de la même série, particulièrement lorsqu'il s'agit de machines aussi complexes que les robots. Il devient donc nécessaire, face à des exigences de qualité de la tâche, de caractériser technologiquement chaque machine.

Une telle obligation impliquera nécessairement une collaboration entre fabricants et utilisateurs pour mettre en oeuvre les techniques opératoires proposées. On peut imaginer, par exemple, l'établissement d'une fiche d'identité technologique propre à chaque robot et contenant la valeur des 12 paramètres de chacun de ses n axes.

A l'évidence, le développement d'un logiciel professionnel d'assistance à cette caractérisation incitera les industriels à généraliser cette pratique. Pour l'instant, cela passe forcément par une étude expérimentale basée sur des données d'origine industrielle afin de mieux valider nos travaux.

Perspectives de développement

Outre ce qui concerne ces perspectives d'application industrielle de ces recherches, nous projetons trois orientations de recherche : la première s'inscrit sur l'élargissement du champ et du contexte de la méthode, la seconde concerne l'approfondissement de la validation, et enfin, la troisième porte sur l'élargissement conceptuel en prenant mieux en compte l'aspect de la dynamique du système.

L'architecture particulière des robots étudiés se prête bien à l'étude que nous avons menée. En effet, la disposition en série des articulations entraîne d'une part le fait que chaque défaut élémentaire local à chaque articulation se trouve amplifié au niveau de l'effecteur, d'autre part le fait que toute sollicitation au niveau de l'effecteur se traduit au niveau de chaque articulation par des efforts encore plus grands, lesquels induisent proportionnellement les défauts locaux. Cette problématique serait nettement moins intéressante dans le cadre de machines à architecture cartésienne [CLE82]. Toutefois, quelques légers compléments aux composantes de notre approche technologique nous permettraient d'aborder simplement des problèmes complexes comme celui du comportement des Machines à Mesurer Tridimensionnelles pendulaires ([DAV93], par exemple, la flexion d'un bras exposé au rayonnement

thermique d'un éclairage standard). Ceci constitue un élargissement du champ d'action de notre travail.

Pour l'instant, il est urgent pour nous de trouver un cas industriel répondant aux critères énoncés précédemment ou un jeu complet de données métrologiques. A cette seule condition, notre modélisation sera validable.

Enfin, il nous faut continuer à développer les idées énoncées concernant l'approche dynamique du problème, afin de rendre notre approche technologique exploitable quelles que soient les conditions cinématiques d'exécution de la trajectoire. Toutefois, nous sommes conscients que leur intégration directe et en temps réel dans les algorithmes de commande nécessiterait actuellement des calculateurs extrêmement puissants.

Enfin, accessoirement, nos travaux ont montré que les modélisations conventionnelles utilisées en robotique ne s'appliquaient qu'à un comportement macro géométrique incompatible avec des requêtes de précision importantes. Notre objectif d'évaluation prévisionnelle de performances au sens métrologique a été globalement atteint, même si l'expérimentation sur de véritables sites industriels reste à poursuivre. De toute façon, la tendance des besoins exprimés par les utilisateurs de cellules robotisées va vers des objectifs de précision accrue de la trajectoire obtenue par simulation. L'objectif pragmatique s'exprime alors en terme de productivité immédiate et consiste à diminuer le taux de retouche du programme de définition de tâche sur le site robotisé de production. Nos travaux vont tout à fait dans ce sens et constituent donc une base de réflexion pour tout développement ultérieur répondant à cette demande industrielle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[AND83] P. ANDRE, J.M. KAUFFMAN, F. LHOTE, J.P. TAILLARD ; "Les robots, tome 4, constituants technologiques"
Hermès 1983

[ARM92] J. F. ARMAND ; "Contribution à l'évaluation et à l'amélioration des performances de la programmation des robots-manipulateurs à partir d'un système de CAO",
Thèse de Doctorat en Sciences, Montpellier II, Avril 1992
référence : page 149

[ARN90] Christian ARNAUD ; "Contribution à l'étude et à la réalisation d'un système de supervision d'une chaîne de contrôle-commande",
Thèse de Doctorat en Sciences, LAIM Juillet 90
référence : page 162

[ART77] I. ARTOBOLEVSKI ; "Théorie des mécanismes et des machines",
Editions MIR, Moscou 1977

[AUB91] A. AUBIN PRACHT ; "Modélisation, identification et commande du bras manipulateur TAM",
Thèse de doctorat Automatique, INP Grenoble 1991

[BEN88] Abdelali BENNIS ; "Etude du rattrapage des pannes déviantes dans les asservissements de robots",
Thèse de Doctorat 3ème cycle Automatique, LAIM Marseille Décembre 88
référence : page 34

[BEN92] D.J. BENNETT, J.M. HOLLERBACH ; "Kinematic calibration by direct estimation of the Jacobian Matrix",
Proc. IEEE Robotics and Automation, Nice Mai 1992

[BER87] Jean-Claude BERTRAND ; "Cours de Robotique",
Cours de DEA Automatique et Informatique XIAO, LAIM Université d'Aix Marseille 3 Mars 1987
référence : page 7

[BER88] Jean Claude BERTRAND, Daniel BRUN-PICARD, Jean Paul KIEFFER ; "Gestion et Pilotage des Systèmes Industriels de Production dans un Contexte d'Architecture Décentralisée",
2ème congrès international de Génie Industriel Nancy 88

[BER90] Jean Claude BERTRAND, Daniel BRUN-PICARD, Patrick PUJO ; "CIM : vers une mise en oeuvre décentralisée du système de production pour une meilleure intégration des fonctions de conception, production et gestion",
CIM 90 : Productique et Intégration , Bordeaux Juin 90
référence : page 162

[BOR91] J.H. BORM, CH MENQ ; "Determination of optimal measurement configurations for robot calibration",
The International Journal of Robotics Research, vol 10, n°1, février 1991
référence : page 62

[BOU87] Pierre BOURDET ; "Contribution à la mesure tridimensionnelle : modèle d'identification géométrique des surfaces, métrologie fonctionnelle des pièces mécaniques, correction géométrique des machines à mesurer tridimensionnelles",
Thèse de Doctorat es Sciences, LURPA Cachan 1987
référence : page 108

[BRI87] J.N. BRICOUT ; "Contribution à la modélisation du comportement dynamique de manipulateurs déformables"
Thèse de Doctorat en Mécanique Lille Juin 1987
référence : pages 62,63 & 65

[BRU86] P. BRULARD ; "Mesure bidimensionnelle fine par suivi de contour par caméra : adaptation à la définition de trajectoires d'un robot et au contrôle métrologique",
Thèse de Doctorat Automatique INP Grenoble 1986

[BRU88] Daniel BRUN-PICARD ; "Contribution à l'élaboration d'un modèle de commande décentralisée",
Thèse de Doctorat es Sciences Automatique, LAIM Octobre 88
référence : pages 7 & 162

[BRU89] Daniel BRUN-PICARD, Jean Claude BERTRAND ; "Commande décentralisée des systèmes automatisés de production",
JIIA89 USINICA89, Journées de l'informatisation et de l'automatisation des usines, Paris Juin 89
référence : page 162

[BRU90] Daniel BRUN PICARD, Jean Michel OLIVE, Jean Claude CARMONA, Agnès FARJON, Philippe THEVENET ; "Distributed control and power conversion units for robots and machine tools",
IMACS-TCI' 90, Nancy septembre 1990
référence : page 162

[BRU93] Daniel BRUN-PICARD, Aline CAUVIN, Patrick PUJO ; "Calibration des robots par auto-apprentissage" ;
Groupe "Robotique" du GRECO SARTA, 8-9 avril 1993, Nantes

[BRU93b] Daniel BRUN-PICARD, Laurent COUVREUR, Alain FERRARINI, Marie Line NERVI ; "Proposition d'une architecture décentralisée autonome et ouverte sur le pilotage d'atelier flexible de fabrication",
4ème Congrès International de Génie des Systèmes Industriels, Marseille Décembre 1993
référence : page 162

[CAE88] J.L. CAENEN, J.C. ANGUE ; "Robot calibration : identification of the geometrical parameters",
Proc. I.S.M.M. International Conference Mini and Microcomputers, Miami Beach, December 14-16, 1988

[CAE89] J.L. CAENEN ; "L'évaluation des performances des robots, un préalable nécessaire",
Conférences "Outils d'aide à la mise en oeuvre des robots industriels", Exporobot89, Le Bourget Mars 1989

[CAE89b] J.L. CAENEN, J.C. ANGUE ; "Robot calibration",
20ème International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, october 1989

[CAE90] J.L. CAENEN ; "L'étalonnage des robots : une étape indispensable à la programmation hors-ligne",
Conférences "Optimisation de l'exploitation des robots", Exporobot90, Le Bourget, 6-9 Mars 1990

[CAE90b] J.L. CAENEN, J.C. ANGUE ; "Identification of geometric and non geometric parameters of robots",
CH 2876-1/90/0000/1032 § 01.00 (c) 1990 IEEE

[CAE93] J. L. CAENEN ; "Contribution à l'identification de paramètres géométriques et non géométriques d'un modèle de robot ; application à l'amélioration de la précision de positionnement statique",
Thèse de Doctorat en Sciences Automatique Valenciennes Janvier 1993

référence : pages 9, 62, 65 & 67

[CAE93b] J. L. CAENEN ; "Mesure et amélioration de la précision absolue des robots : systèmes industrialisés et résultats obtenus",
Groupe "Robotique" du GRECO SARTA, 8-9 avril 1993, Nantes

[CAR90] Jean Claude CARMONA ; "Contribution à l'étude et à la réalisation d'un système de commande décentralisée d'un tour industriel"
Thèse de Doctorat en Sciences, LAIM Février 90

référence : page 162

[CAU91] Aline CAUVIN ; "Etude de la répartition de l'intelligence dans un système de commande décentralisé : application à la commande décentralisée de robots",
Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille 3, LAIM Décembre 91"

référence : page 162

[CAZ89] Michel CAZIN, J. METGE ; "Mécanique de la robotique",
Gauthiers Villars Dunod 1989

[CHA93] Ph. CHARLES, A. GENAY ; "Utilisation de la CAO Robotique dans une application de process continu"
Réunion de la commission "CFAO Robotique" de l'AFRI, Paris, Novembre 93
référence : page 59, 62, 66 & 67

[CHE87] J. CHEN, L.M. CHAO ; "Positioning error analysis for robot manipulators with all rotary joints",
I.E.E.E. Journal of Robotics and Automation, vol. RA-3, n°6, décembre 1987
référence : page 62

[CHR85] J.P. CHRETIEN, M. DELPECH, A. LOUHMADI ; "Modeling and simulation of distributed flexibility in a space born manipulator", 10th IFAC Symposium on Automatic Control in Space, Toulouse 1985, pp 268-277

[CLE81] A. CLEMENT ; Pierre BOURDET, R. WEILL ; "Commande adaptative dimensionnelle d'une machine à mesurer tridimensionnelle",
Annals of the CIRP, Vol. 30/1/1981

[CLE82] A. CLEMENT ; "Identification et génération de courbes discrétisées dans un univers mécanique imprécis : application à la réalisation d'un robot de soudage",
Thèse de Doctorat es Sciences Physiques, Nancy 1, Janvier 1982
référence : page 170

[CLU93] J. C. CLUZAN ; "Intérêt industriel de la calibration des robots", Groupe "Robotique" du GRECO SARTA, 8-9 avril 1993, Nantes
référence : pages 58, 59, 62, 66 & 67

[CLU94] J. C. CLUZAN ; "Principe technique d'utilisation et de programmation des modules RRS",
Réunion de la commission "CFAO Robotique" de l'AFRI, Paris, 17 février 1994

[COC87] F. COCHET ; "Etude préalable à la robotisation des processus de production : l'analyse de la robotisabilité" ;
AFCET, ADEFI Atelier Productique ; ECONOMICA 87
référence : page 11

[COI86] Ph. COIFFET ; "La Robotique, principes et applications", Hermès, collection Traité des Nouvelles Technologies, série Robotique, 1986, ISBN 2-86601-076-0
référence : page 21

[COI93] Ph. COIFFET ; "Quels robots souhaitons-nous ? Les obstacles à franchir pour y parvenir",.
Colloque "Robotique et maintenance industrielle complexe" World Med 93 Marseille 8 octobre 1993 pp 18-27
référence : pages 8 & 13

[CRA91] J.J. CRAIG ; "Calibration of Industrial Robots"
24th ISIR, Japon Novembre 93, pp 889-893
référence : page 45

[DAI93] Dadan Umar DAIHANI, Jean Paul KIEFFER, Patrick PUJO ; "A conceptual approach of a new architecture of the computer aided quality management systems, toward their better integretion with the other production management functions",
Newcastle International Conference on Quality & its Applications, Newcastle, Septembre 1993
référence : page 162

[DAV91] Jean-Marie DAVID, Thierry COOREVITS ; "Le contrôle tridimensionnel sur machine à mesurer et machine-outil",
Nathan ISBN 2 09 288 460-4, Renishaw/Techno Nathan 1991

[DAV93] Jean-Marie DAVID, Thierry COOREVITS ; "Les limites de la correction par logiciel des erreurs de géométrie des MMT, définition d'une nouvelle architecture de machines",
Congrès Métrologie 93 Lille octobre 1993
référence : page 170

[DEL87] S. DELIGNIERES ; "Choix de morphologies de robot"
Thèse de Doctorat Ingénieur ENSM Nantes, Novembre 1987
référence : pages 7 & 17

[DEN55] J. DENAVIT, R.S. HARTENBERG ; " A kinematic notation for lower - pair mechanisms based on matrices",
ASME J. Applied Mechanical, pp 215-221, Juin 1955
référence : page 22

[DES94] Patrick DESMASURES ; "Présentation générale et objectifs du projet RRS",
Réunion de la commission "CFAO Robotique" de l'AFRI, Paris, 17 février 1994
référence : page 149

[DOM88] E. DOMBRE, W. KHALIL ; "Modélisation et commande des robots",
Hermès, collection Traité des Nouvelles Technologies, série Robotique, 1988, ISBN 2-86601-142-2
référence : page 22 & 25

[FIR92] Fédération Internationale de Robotique, Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies ; "World Industrial Robot Statistics 1992"

[FOR89] Christian FORESTIER ; "Contribution à l'étude et à la réalisation d'un système de programmation graphique de robots industriels", Thèse de Doctorat en Sciences, LAIM Juin 89
référence : pages 9, 11 & 60

[GAR93] M. A. GARNERO, R. PIGEYRE (EDF Chatou) ; "Etalonnage géométrique et non géométrique des robots industriels. Application aux besoins EDF" ; Groupe "Robotique" du GRECO SARTA, 8-9 avril 1993, Nantes
référence : page 59 & 62

[GAT88] M. GATENHOLM, "Robot calibration and performance specification",
19th International Symposium on Industrial Robot, Sydney, 1988

[GRO88] Gilles GROUSSET, Daniel MENNIER ; "Rapport d'étude du Robot Servant",
Rapport interne LAIM 1988.
référence : page 159

[GRU92] M.A. GRUET POURSAT ; "Analyse statistique de la calibration par 2 modes non linéaires et non paramétriques de la courbe de réponse, étude asymptotique de régions de confiance",
Thèse de Doctorat Mathématiques, Paris11, 1992

[HAR64] R.S. HARTENBERG, J. DENAVIT ; "Kinématic Synthesis of linkages"
Mc Graw Hill Book Company 1964

[HAS92] T. HASEGAWA ; "An interactive system for modeling and monitoring a manipulation environment",
IEEE Trans Syst. Man Cybern. , vol. SMC-12 n°3, 1982, pp 250-258
référence : page 41

[HAY83] S. HAYATI ; "Robot arm geometric link parameter estimation",
Proc. I.E.E.E. International Conference on Decision and Control, San Antonio, Décembre 1983

[HAY85] S. HAYATI, M. MIRMIRANI ; "Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators",
Journal of Robotic Systems, 2 (4), pp 397-413, 1985
référence : page 62

[HEN88] H. HENRICHFREISE ; "The control of the elastic manipulation device using DSP",
American Control Conference, vol 2 Atlanta, Georgie, Juin 1988
référence : page 62

[HOL88] J.M. HOLLERBACH, D.J. BENNETT ; "Automatic kinematic calibration using a motion tracking system",
Robotics Research : the fourth international symposium, MIT press, 1988

[IDR90] Saïd IDRISSI ; "Etude et réalisation d'un système décentralisé de détection et localisation en ligne des pannes sur robot industriel"
Thèse de Doctorat Automatique, LAIM Marseille Décembre 88
référence : page 34

[JUT88] Alain JUTARD, M. BETEMPS ; "Les Robots",
Hermès, Collection Technologies de Pointe, 1988, ISBN 2-86601-158-9

[KHA87] O. KHATIB ; "A unified approach for motion and force control of robot manipulates : the operational space formulation",
IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3 (1), fév. 1987, pp 43-53
référence : page 7

[KHA89] W. KHALIL, J.L. CAENEN, C. ENGUEHARD ; "Identification and calibration of the geometric parameters of robots", Proc. First International Symposium Experimental robotics, Montréal, 19-21 Juin 1989

[KHA91] W. KHALIL, M. GAUTIER, C.H. ENGUEHARD, ; "Identifiable parameters and optimum configurations for robots calibration", ROBOTICA 1991, vol. 9 part 1, pp 63-70

[KHA92] W. KHALIL ; "SYMORO+ : système pour la modélisation des robots" ; Nantes 92

référence : pages 130, 133 & 135

[KOS91] V.D. KOSTADINOV ; " Geometric parameters estimation of robotic systems", Proc. IEEE Robotics and Automation, Sacramento Avril 1991

référence : page 62

[LIU91] N. LIU; "Vision stéréoscopique : calibration et mise en correspondance de primitives dans un univers polyédrique", Thèse de Doctorat Électronique Paris11 1991

référence : page 41

[LOP86] P. LOPEZ ; "Commande des systèmes robotiques, Applications" Editests 1986

référence : page 7

[LOS90] L. LOSCO, P. ANDRE, P. MITROUCHEV, J.P. TAILLARD ; "Kinematic modeling of robots having supple bodies", Congrés IASTED Robotics and Manufacturing Santa Barbara U.S.A. Novembre 90 pp 30-33

[LOS92] L. LOSCO, P. MITROUCHEV, P. ANDRE, J.P. TAILLARD ; "Modélisation des robots sujets à déformations élastiques", Congrés Automatisation Industrielle Montréal Juin 1992

[MAR89] Pascal MARIN ; "Contribution au développement d'une chaîne de 'contrôle-commande' à architecture totalement décentralisée", Thèse de Doctorat en Sciences, LAIM Juillet 89

référence : page 162

[MAR92] Marie Laurence MARQUAND ; "Contribution à l'étude et à la réalisation d'un logiciel de programmation graphique de l'environnement de travail d'un robot industriel",
Doctorat en Sciences Automatique, LAIM 1992
référence : pages 39 & 40

[MAR94] Gérard MASSE ; "Contribution à la prise en compte des phénomènes dynamiques dans le comportement technologique des robots industriels polyarticulés",
DEA Automatique et Informatique XIAO, LAIM Septembre 1994

[MEN89] Daniel MENNIER ; "Architecture Mécanique des robots",
cours DESS Robotique et Maintenance
Faculté des Sciences et Techniques de St Jérôme, Université d'Aix Marseille 3 1989

[MIC88] Pierre MICHEL ; "Contribution à la réalisation d'une commande décentralisée d'un axe de robot manipulateur",
Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille 3, LAIM Avril 88
référence : page 162

[MIL83] V. MILENKOVIC, B. HUANG ; "Kinematics of mayjor robot linkage",
Processing 13 th International Symposium of Industrial robots, Chicago Avril 1983, pp (16-31)-(16-47).
référence : page 16

[MIL87] P. MILLOT ; "Coopération Homme Machine dans les postes de supervision des procédés automatisés",
Thèse d'Etat (Automatique et Informatique Industrielle) 1987
référence : page 9

[MIL88] P. MILLOT ; "Supervision des procédés automatisés et ergonomie",
Hermès 1988

[MIT91] P. MITROUCHEV, S. ZWILLER, J.P. TAILLARD, L. LOSCO, P. ANDRE ; "Intégration à un système de CAO d'outils de modélisation de robots non rigides",
Congrés Micad 91 pp 71-82

[MIT92] P. MITROUCHEV ; "Méthodologie pour l'élaboration de modèles de comportement de robots-manipulateurs sujets à des déformations élastiques",
Thèse de Doctorat Automatique et Informatique, Besançon juin 92
référence : pages 9, 62 & 65

[NAG87] G. NAGANATHAN, A.H. SONY ; "Coupling effects of kinematics and flexibility in manipulators",
Int. Journ. rob. res., 1987, USA, 6, n°1, pp.75-84
référence : page 166

[OLI89] P. OLIVIER ; "La périrobotique d'assemblage",
Hermès, Collection Technologie de pointe, 1991, ISBN 2-86601-184-8

[OLI90] Jean Michel OLIVE ; "Contribution à l'étude et à la réalisation d'un système de supervision d'un tour industriel",
Thèse de Doctorat en Sciences, LAIM Février 90
référence : page 162

[OWE86] T. OWEN, E. DOMBRE ; "Les robots d'assemblage",
Hermès 1986
référence : page 11

[PAU81] R. P. PAUL ; "Robot manipulators : mathematics, programming, and control",
MIT Press, Cambridge 1981
référence : page 24

[PAY85] D. PAYANNET ; "Modélisation et correction des erreurs statiques des robots manipulateurs"
Thèse de Doctorat Automatique Montpellier 2 1985
référence : pages 9, 62 & 63

[PEH60] L. PEHUET ; "L'organisation technique de l'entreprise industrielle",
Eyrolles 1960
référence : page 12

[PON91] P. PONTIER ; "La C.A.O. Robotique. Etude d'avants-projets et programmation hors-ligne des robots",
CETIM 1991, ISBN 2-85 400-198-2

[PRI89] Marc PRIEL ; "Evaluating the performances of industrial robot", ASME Winter Meeting, San Francisco, Décembre 1989

[PRI90] Marc PRIEL ; "Les robots industriels : caractéristiques, performances et choix",
AFNOR Technique, ISBN 2-12-306211-3, 1990

[PUJ93] Patrick PUJO ; "ROBSILON : un outil de simulation pour appréhender et identifier des caractéristiques métrologiques sur les robots industriels polyarticulés",
6ème Congrés International de Métrologie, Métrologie 93, Lille Octobre 1993

[PUJ93b] Patrick PUJO, Jean Claude BERTRAND ; "La décentralisation de l'ordonnancement : une solution pour augmenter la flexibilité et la réactivité des Systèmes Avancés de Production",
4ème Congrès International de Génie des Systèmes Industriels, Marseille Décembre 1993
référence : page 10

[RAN93] C. RANSON ; "Présentation du guide pour l'expression de l'incertitude de mesure"
6ème Congrés International de Métrologie, Métrologie 93, Lille Octobre 1993. pp 258-264

[RAU91] B. RAUCENT, G. CAMPION, G. BASTIN, J.C. SAMIN, P.Y. WILLEMS ; "On the identification of the barycentric parameter of robot manipulator from external measurements",
Proc. I.E.E.E. International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, Avril 1991

[REL74] J.P. RELETTE, F.LELEUX ; "Calcul dynamique des structures par la méthode des éléments finis",
Note technique n°7, CETIM Août 1974

[RIS81] G. RIS ; "Contribution à l'identification des robots des défauts d'un robot : application à l'interchangeabilité",
Thèse de Doctorat Physique, Nancy 1981
référence : pages 9 & 62

[ROT87] S. ROTH, B.W. MOORING, B. RAVANI ; "An overview of robot calibration",
I.E.E.E. Journal of Robotics and Automation, vol RA-3, n°5, 1987
référence : page 62

[SHA87] J.S. SHAMMA, D.E. WHITNEY : "A method for inverse robot calibration",
Transactions of the ASME, Journal of Dynamic systems, Measurement, and Control, vol 109, Mars 1987
référence : page 62

[SIE73] R. SIESTRUNCK ; "Applications récentes de la théorie des graphes à l'analyse et à la conception des mécanismes",
Revue Française de Mécanique n°45 1973

[STO86] H.W. STONE, A.C SANDERSON, C.P. NEUMAN ; "Arm signature identification",
Proc. I.E.E.E. International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, vol 1, pp 41-48, avril 1986

[STO87] H.W. STONE, A.C. SANDERSON ; " A prototype arm signature identification system",
Proc. I.E.E.E. International Conference on Robotics and Automation, Raleigh, vol 1, pp 175-182, mars 1987

[TAI89] J.P. TAILLARD, L. LOSCO, P. MITROUCHEV ; "Génération automatique de modèles des systèmes mécaniques de solides rigides et déformables",
Congrés Stru Co Me 89 Paris novembre 1989 pp 329-337

[TAI91] J.P. TAILLARD, P. MITROUCHEV, L. LOSCO, P. ANDRE ; "modélisation dynamique des robots à segments élastiques"
Congrés IASTED Manufacturing and Robotics Lugano Suisse Juin 1991 pp 99-102

[TAK93] K. TAKASE ; "Development of intelligent robotics, progress in robot manipulation",
Colloque "Robotique et Maintenance Industrielle Complexe, World Med 93, Marseille 8 octobre 1993 pp 77-84
référence : page 41

[TIM52] S. TIMOSHENKO ; "Theory of Elasticity",
McGraw Hill Book Inc., New York 1952
référence : page 62

[TRE87] J.P. TREVELYAN, M. NELSON ; "Adaptative robot control incorporating automatic error recovery",
pp 385-398
référence : page 50

[WAL94] E. WALTER, L. PRONZATO ; "Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales",
Masson, Février 1994,

[WEI91] R. WEILL, B.SHANI ; "Assessment of Accuracy of Robots in Relation with Geometrical Tolerances in Robot Links",
Anuals of the CIRP, Vol 40/1/1991
référence : pages 62 & 78

[WHI86] D.E. WHITNEY, C.A. LOZINSKI, J.M. ROURKE ; "Industrial robot forward calibration method and results",
Transactions of the ASME Journal of dynamic systems, Measurement, and Control, vol 108, Mars 1986
référence : page 62

[YAZ88] A. YAZMAN ; "Modélisation des robots flexibles par les Bond-graphs ; application à l'analyse de leurs performances dynamiques",
Thèse de Doctorat en Sciences, Paris Orsay, 1988
référence : pages 62 & 64

TABLE des MATIERES

INTRODUCTION 1

Chapitre I **MODELISATION et PERFORMANCES des ROBOTS INDUSTRIELS**..... 5

1. Modélisation des robots industriels.....6

1.1. Analyse fonctionnelle d'un robot industriel 6

1.1.1. Définition d'un robot industriel 6

1.1.2. Définition d'une tâche robotisée.....10

1.1.3. Architecture d'un robot industriel.....12

1.2. Grandes classes de modélisation de la commande en robotique 20

1.2.1. Espace de coordonnées.....20

1.2.2. Modélisations géométriques.....21

1.2.3. Modélisations cinématiques et variationnelles 25

1.2.4. Modélisations dynamiques 27

2. Caractérisation technologique des robots industriels.30

2.1. Mesurage d'un robot industriel 30

2.1.1. Examen de la problématique et surface d'erreur de position.....30

2.1.2. Analyse critique des modélisations théoriques.....36

2.1.3. Classification des sources d'erreurs et d'incertitudes dans la définition de la tâche robotisée.....37

2.2. Etude des techniques d'expérimentation et de métrologie 43

2.2.1. Métrologie à l'aide de théodolites.....43

2.2.2. Métrologie à l'aide d'un robot à mesurer par interféromètre dynamique 3D 44

2.2.3. Méthode empirique d'approximation par "mise en correspondance de pointes".....45

2.2.4. Métrologie par caméras 47

2.2.5. Définition d'une méthode de mesurage réduit.....48

2.2.6. Métrologie à l'aide d'un Ball-Bar.....50

2.2.7. Métrologie à la règle 55

2.3. Approche technologique de la modélisation des robots industriels 56

2.3.1. Performances actuelles des robots industriels 56

2.3.2. Etat des recherches.....62

2.3.3. Identification et analyse des sources d'erreurs technologiques existant potentiellement sur un robot.....67

3. Conclusion.....70

Chapitre II MODELISATION du COMPORTEMENT TECHNOLOGIQUE des ROBOTS INDUSTRIELS.....71

1. Proposition d'un modèle incluant les caractéristiques technologiques des robots industriels 72

1.1. Introduction à la modélisation proposée 72

1.1.1. Caractérisation des sources d'erreurs entre trajectoire théorique et trajectoire effective.....72

1.1.2. Architecture globale du modèle 73

1.1.3. Modélisation locale des défauts 74

1.1.4. Construction du modèle 76

1.2. .Approche statique du comportement technologique 77

1.2.1. Modélisation des erreurs de paramétrage 77

1.2.2. Détermination des conditions de sollicitations des différents composants d'un segment 82

1.2.3. Modélisation des défauts de déformation élastique d'un segment i 84

1.2.4. Recomposition du défaut global 102

1.3. Approche dynamique 106

1.3.1. Approche dynamique à petite vitesse 106

1.3.2. Approche dynamique à vitesse élevée 108

1.4. Conclusion 115

2. Identification des paramètres du modèle technologique d'un robot industriel 116

2.1. Etude des techniques d'identification d'un modèle paramétrique de comportement technologique d'un robot industriel 116

2.1.1. Rappel de la problématique 116

2.1.2. Analyse comparative de différentes techniques d'analyse de données et d'identification 118

2.1.3. Mise en oeuvre de la méthode Taguchi pour l'identification des paramètres principaux du MGTD.... 120

2.2. Proposition d'une méthode d'identification des paramètres du MGTD 123

2.2.1. Principe général 123

2.2.2. Règles de décision de cette méthode d'identification 124

3. Conclusion 127

2.1.4. Prolongement de RRS grâce à la modélisation du comportement technologique de la partie mécanique..... 151

2.2. Aide à l'évaluation de performances des systèmes robotiques 152

2.2.1. Aide à l'évaluation lors de la conception d'un robot industriel 152

2.2.2. Aide à l'évaluation lors de la mise en service d'un robot industriel 153

2.2.3. Aide à l'évaluation lors de la programmation des tâches d'un robot industriel 154

2.2.4. Aide à l'évaluation lors de la maintenance d'un robot industriel 156

2.3. Projection sur le concept de robot mécatronique 159

2.3.1. Présentation des objectifs recherchés en mécatronique... 159

2.3.2. Description de l'UIAM élémentaire..... 163

2.3.3. Conséquences sur l'architecture globale du robot mécatronique..... 165

3. Conclusion..... 168

CONCLUSION GÉNÉRALE..... 169

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 172

TABLE des MATIERES..... 186

TABLE des ACRONYMES..... 191

TABLE des ILLUSTRATIONS 192

ANNEXE : vues des sites expérimentaux

TABLE des ACRONYMES

3D	tridimensionnel
A/N	Analogique/Numérique
CFAO	Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur
ddl	degré de liberté
ISO	International Standard Organization
IT	Intervalle de Tolérance
KF	1000 francs
LAN	Laboratoire d'Automatique de Nantes
MDD	Modèle Dynamique Direct
MDI	Modèle Dynamique Inverse
MF	1000000 francs
MGD	Modèle Géométrique Direct
MGI	Modèle Géométrique Inverse
MGTD	Modèle Géométrique Technologique Direct
MOCN	Machine Outil à Commande Numérique
MSP	Maîtrise Statistique des Procédés
PFS	Principe Fondamental de la Statique
PHL	Programmation Hors Ligne
PI	Partie Informative
PMI	Petites et Moyennes Industries
PO	Partie Opérative
PSD	cellule photoélectrique bi-axiale
RCS	Robot Controller Simulating
RdM	Résistance des Matériaux
RRS	Realistic Robot Simulation
SMA	Système Mécanique Articulé
TAM	Torseur d'Action Mécanique
UIAM	Unité Intelligente d'Axe Mécatronique

TABLE des ILLUSTRATIONS

Chapitre I

Figure I-1 :	interactions du robot avec le reste de l'univers	9
Figure I-2 :	analyse de la robotisabilité	11
Figure I-3 :	architecture générale d'un système robotique (inspiré de [COI93])	13
Figure I-4 :	modélisation d'un robot polyarticulé par une chaîne simple de segments	15
Figure I-5 :	types principaux de porteur (d'après [MIL83])	16
Figure I-6 :	types principaux de poignets (d'après [DEL87])	17
Figure I-7 :	interactions PI-PO	18
Figure I-8 :	nomenclature d'un robot et niveaux d'éclatement de cette nomenclature	19
Figure I-9 :	systèmes de coordonnées de l'espace opérationnel Ro	20
Figure I-10 :	paramètres de Denavit-Hartenberg	22
Figure I-11 :	transformation géométrique directe d'un robot dans son site et avec son effecteur	23
Figure I-12 :	calcul du prochain vecteur articulaire en fonction de la position opérationnelle à atteindre, de la position opérationnelle actuelle, du vecteur articulaire actuel et du jacobien, et en utilisant un modèle variationnel inverse	26

Figure I-13 : calcul du prochain vecteur articulaire, en tenant compte de la position effectivement atteinte à l'itération précédente 27

Figure I-14 : détermination des champs de vitesse et d'accélération 29

Figure I-15 : détermination des interefforts et équilibre d'un segment 29

Figure I-16 : posture théorique et posture réelle sous l'effet de sa tâche 31

Figure I-17 : surface d'erreur en position pour une posture et une tâche données 34

Figure I-18 : adéquation entre la tâche robotisée et la capacité du robot 35

Figure I-19 : programmation graphique de l'environnement de travail (d'après [MAR92]) 40

Figure I-20 : scannérisation d'une scène par balayage laser et acquisition vidéo 41

Figure I-21 : mesure 3D par théodolites : description et méthode de calcul (document LEICA) 43

Figure I-22 : illustration et schéma de principe d'un robot interférométrique 3D (document LEICA) 45

Figure I-23 : principe de l'acquisition "par correspondance de pointes" 46

Figure I-24 : acquisition de situation géométrique par caméras 47

Figure I-25 : trajectoire théorique, trajectoire réelle et droite des moindres carrés 49

Figure I-26 : principe et mise en oeuvre d'un capteur "Ball-Bar" 51

Figure I-27 : problématique de calcul de (x_i, y_i, z_i) 52

Figure I-28 : calcul de la longueur maximale de la trajectoire rectiligne 52

Figure I-29 : exemple de mesure dans le plan horizontal (**xOz**) 53

Figure I-30 : correction de la mesure dans le plan horizontal (**xOz**) 54

Figure I-31 : mesure à la règle étalon et au capteur laser 55

Figure I-32 : résolution robot et résolution capteur 57

Figure I-33 : bilan des sources d'erreurs (d'après [CLU93]) 58

Figure I-34 : préparation des tâches robotisées 60

Figure I-35 : répartition actuelle des causes d'erreurs, pour des architectures mécaniques conventionnelles de porteurs 66

Figure I-36 : bilan général des causes d'erreurs 68

Figure I-37 : composition d'un segment 69

Chapitre II

Figure II-1 : complémentarité entre approches globale et locale 73

Figure II-2 : architecture du modèle d'un robot à m axes 74

Figure II-3 : changement de repère correspondant à un torseur général de petits déplacements $\{T_{pdp}\}$ 75

Figure II-4 : torseur de petits déplacements 76

Figure II-5 : modélisation de la posture d'un bras de robot 77

Figure II-6 : origines et classification des erreurs de paramétrage 78

Figure II-7 : dimensionnement et tolérancement selon ISO 5459 79

Figure II-8 : interprétation de la norme ISO 5459 79

Figure II-9 : défauts de paramétrage entre deux axes 80

Figure II-10 : interefforts internes et externes au robot 82

Figure II-11 : équilibre du segment i 83

Figure II-12 : algorithme de calcul des torseurs d'interefforts 83

Figure II-13 : déformation d'un élément roulant non chargé, puis chargé jusqu'à un certain point de fonctionnement 85

Figure II-14 : analyse des deux architectures, chape et porte à faux, sous l'action du torseur d'interefforts 86

Figure II-15 : modélisation d'une architecture générique 86

Figure II-16 :	hystérésis des transmissions	87
Figure II-17 :	sollicitation générale d'un corps de segment	89
Figure II-18 :	sollicitation et déformation en traction compression	89
Figure II-19 :	sollicitation et déformation en flexion verticale	90
Figure II-20 :	sollicitation en torsion	91
Figure II-21 :	composition de la déformée totale	92
Figure II-22 :	modélisation d'un corps C_i par une poutre discrétisée	94
Figure II-23 :	sollicitation d'un élément e_{ij} à la flexion	94
Figure II-24 :	déformations dues à la flexion d'un élément e_{ij}	95
Figure II-25 :	expression des efforts internes en une section k correspondant au noeud k.	95
Figure II-26 :	flexion totale pour un élément	97
Figure II-27 :	modélisation en traction compression : chargement d'un élément e_{ij}	97
Figure II-28 :	déformation d'un élément en traction compression	97
Figure II-29 :	traction compression totale d'un élément	98
Figure II-30 :	sollicitation en torsion d'un élément e_{ij}	99
Figure II-31 :	conditions d'étude aux limites des éléments e_{ij}	100
Figure II-32 :	conditions initiales de l'élément e_{ij}	101
Figure II-33 :	$\{T_i\}$ et $[MPdef_i]$	104
Figure II-34 :	discrétisation de la trajectoire	106
Figure II-35 :	algorithme de calcul à basse vitesse	107
Figure II-36 :	élément e_{ij} et son accélération instantanée $\gamma_{G_{ij}}$	108
Figure II-37 :	différentes lois de vitesse	109
Figure II-38 :	reconstitution des dérivées	110
Figure II-39 :	algorithme de calcul avec prise en compte des inerties	111
Figure II-40 :	modélisation cinématique du bras	112

Figure II-41 : parallélisme entre modèle technologique et comportement réel 117

Figure II-42 : parallélisme entre l'écart mesuré et l'écart modélisé 117

Figure II-43 : table de Taguchi L27 121

Figure II-44 : intervalle de variation d'un paramètre 123

Figure II-45 : recherche de la valeur d'un paramètre par dichotomie 124

Figure II-46 : classement des variations des paramètres p_k en fonction de l'influence sur la finesse du modèle 125

Figure II-47 : algorithme de recherche des paramètres p_k 126

Chapitre III

Figure III-1 : configuration de l'intégration au sein de la maquette pédagogique PC'ERICC 130

Figure III-2 : architecture modulaire du logiciel 133

Figure III-3 : items de la barre de menus 137

Figure III-4 : définition technologique des segments 138

Figure III-5 : écran de configuration d'une liaison 139

Figure III-6 : définition des conditions de chargement 140

Figure III-7 : visualisation du torseur d'écart global 141

Figure III-8 : vue du site expérimental 142

Figure III-9 : modélisation du robot PUMA 560 143

Figure III-10 : fonctionnement du capteur laser 143

Figure III-11 : mesures expérimentales de ξ_{z_m} en fonction de diverses charges 145

Figure III-12 : simulation du vecteur déplacement ξ_{z_s} 145

Figure III-13 : modularité des simulateurs RRS : standardisation de l'interface au système de CFAO Robotique 150

Figure III-14 : évolution de la CFAO Robotique, grâce à RRS 150

Figure III-15 : vue prospective de la CFAO Robotique 151

Figure III-16 : cycle de vie simplifié d'un équipement de production 152

Figure III-17 : analyse descendante d'un robot lors de la phase de conception détaillée 153

Figure III-18 : étape 1 : détermination des vecteurs articulaires théoriques 155

Figure III-19 : étape 2 : simulation du comportement technologique 155

Figure III-20 : étape 3 : détermination de la correction Δqi 156

Figure III-21 : étape 4 : mise en oeuvre de la trajectoire corrigée 156

Figure III-22 : algorithme de suivi en maintenance préventive 158

Figure III-23 : architecture mécatronique d'un robot polyarticulé 161

Figure III-24 : vue extérieure d'une UIAM 163

Figure III-25 : schéma fonctionnel d'une UIAM 164

Figure III-26 : constitution d'un segment de robot mécatronique 165

Figure III-27 : formes acceptables de section de poutres inter-UIAM 166

Figure III-28 : corrections des défauts : cas simple 167

ANNEXE

vues des sites expérimentaux

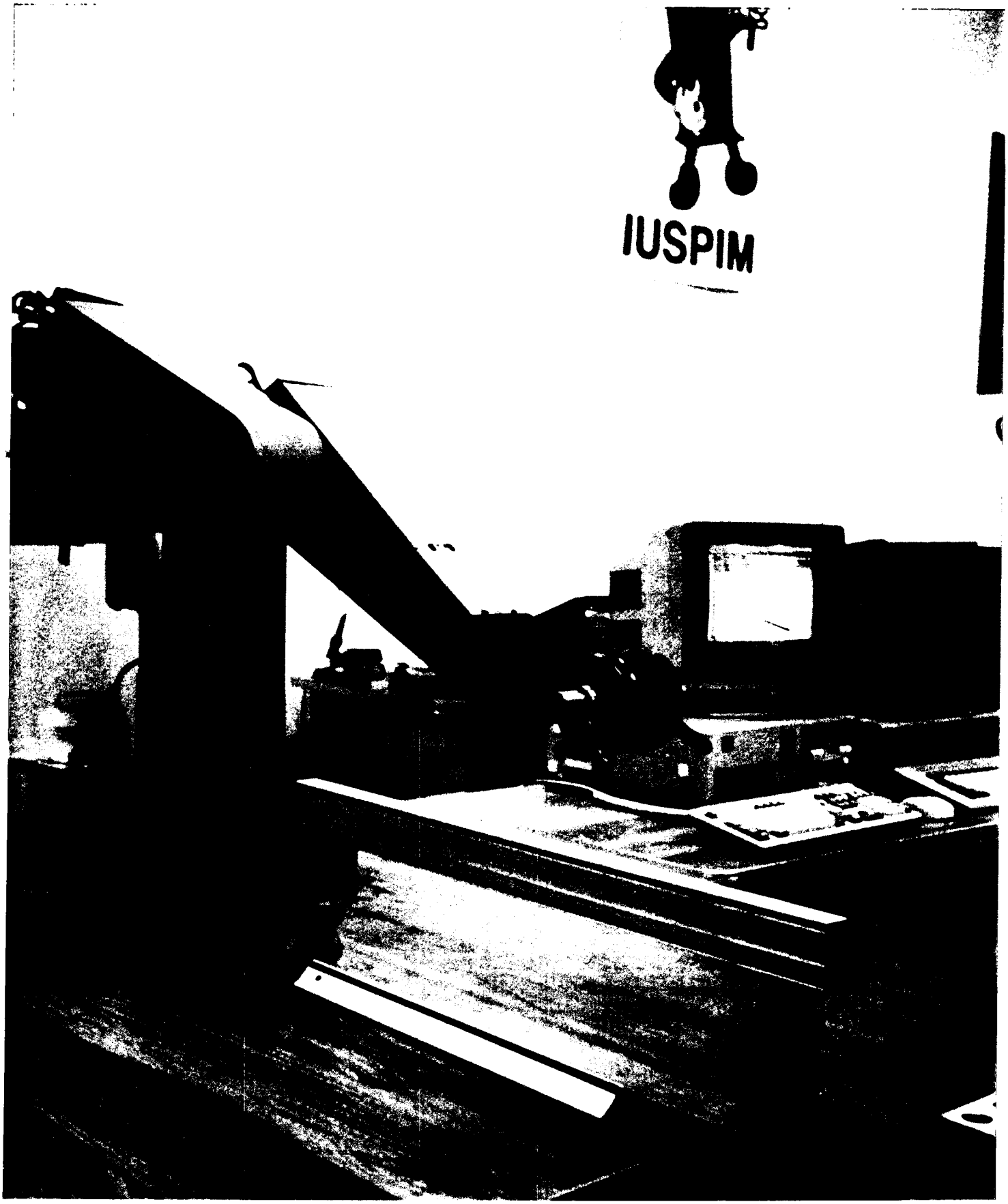
vue 1 : vue d'ensemble du site en laboratoire A1

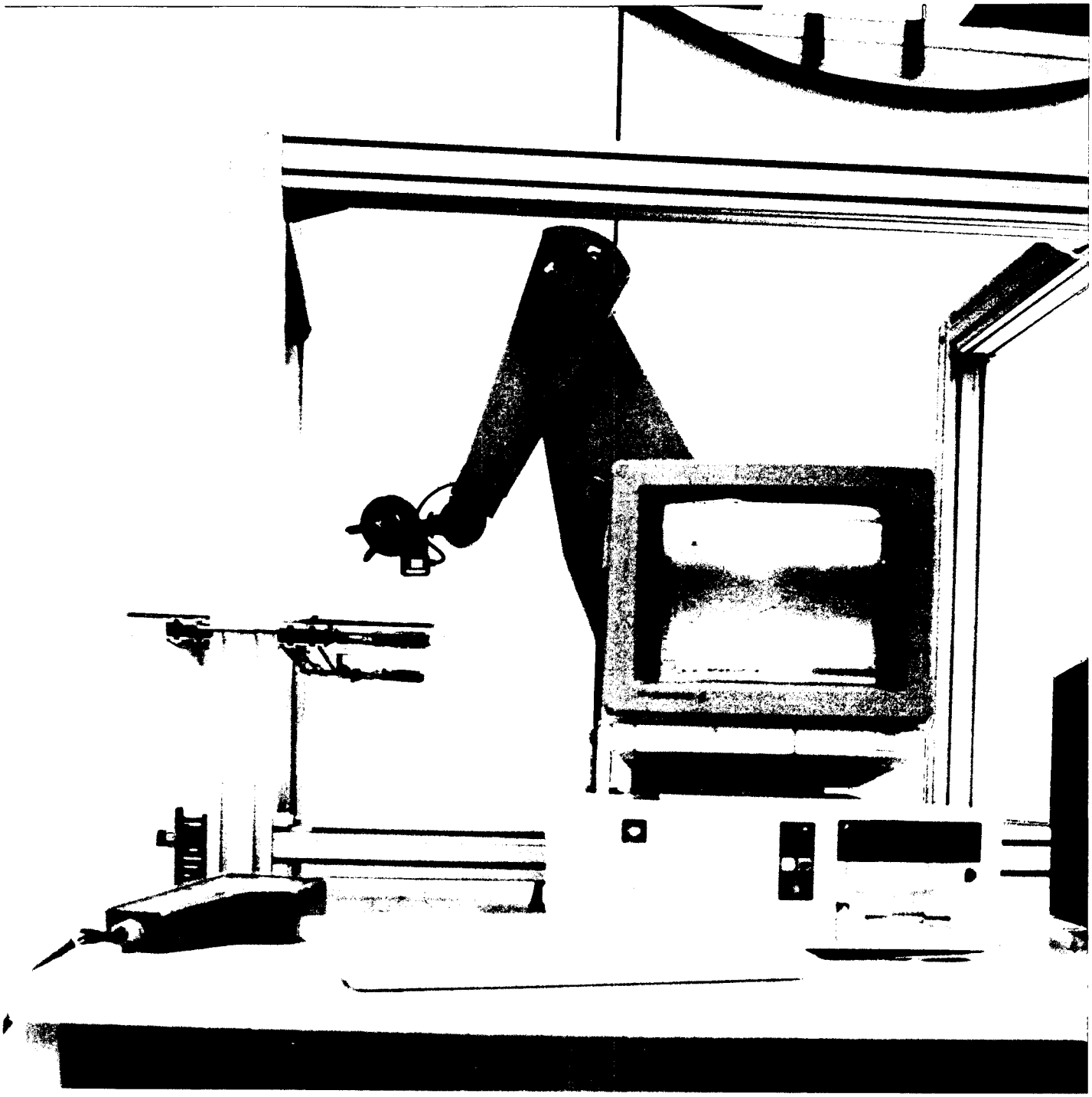
vue 2 : vue rapprochée du site en laboratoire A2

vue 3 : vue d'ensemble n°1 du site industriel A3

vue 4 : vue d'ensemble n°1 du site industriel A4

vue 5 : vue rapprochée du site industriel A5


IUSPIM



IMA

RESUME / ABSTRACT

La réalisation technologique de la structure de chaîne mécanique ouverte d'un porteur de robot industriel entraîne l'apparition de défauts dans la géométrie de la trajectoire réellement effectuée. Ces phénomènes dégradent le niveau des performances métrologiques de la tâche robotisée. Aussi, après avoir effectué un inventaire des différentes causes à l'origine de ces phénomènes, il est proposé une modélisation de leur influence au niveau global. Il est présenté ensuite une application logicielle permettant de reconstituer par simulation la trajectoire réelle, à partir des caractéristiques de la tâche et du robot. Cette application sera validée par une expérimentation sur une cellule robotisée industrielle. Enfin, en conclusion de ce mémoire, l'examen des différents axes d'application de cette approche technologique débouche sur de nouvelles perspectives de recherche, tant sur le plan de la CFAO Robotique que sur celui de la conception ou de la gestion d'exploitation des robots industriels.

Mots clés:

robotique industrielle	métrologie	modélisation paramétrique
mécanique industrielle	performance	modélisation technologique
programmation de tâche	capabilité	robot mécatronique

The technological realization of the structure of open mechanical chain of an industrial robot porter entails the appearance of defects in the geometry of the really followed trajectory. These phenomena degrade the level of metrological performances of the robotics task. Also, after an inventory of the different causes of these phenomena, a modelization of their global influence is proposed. Then, an software application allowing to reconstruct by simulation the real trajectory from characteristics of the task and the robot is presented. This application will be validated by an experimentation on a industrial robotics cell. To conclude, the examination of the main thrusts of application of this technological approach opens on new prospects of research, on the level of the Robotics CAD/CAM and on the level of the design or the exploitation of industrial robots.

Key words:

industrial robotics	metrology	parametric modelization
industrial mechanics	performance	technological modelization
programming of task	capability	mechatronic robot