

Session 4 : Technologies génériques de l'intervention sous-marine (robotique)

CONTROLE COMMANDE D'UN ROBOT SOUS-MARIN DE FORTE CHARGE

Didier DURAND, Josep DOMINGO

Emile LEVALLOIS

LOGABEX
20 Avenue Didier Daurat
31400 TOULOUSE

IFP
BP 311
92506 RUEIL MALMAISON CEDEX

Ce système est composé d'un bras manipulateur hydraulique à 6 degrés de liberté de forte charge (2000 daN) et de grande précision, utilisant des informations de proximétrie ultrasonores et de mesure d'effort de contact pour effectuer une connexion sous-marine de puits de pétrole par grand fond.

Un système expert supervise les phases de connexion et génère les suites de commandes à exécuter par le robot.

Les sécurités et les modes de défaillance sont également pris en compte.

Un poste opérateur graphique permet une grande simplicité de pilotage. En effet, chaque phase de la connexion donne lieu à une représentation graphique portant sur l'état du robot et l'ensemble des capteurs proprioceptifs et extéroceptifs.

Plusieurs modes opératoires sont à la disposition de l'opérateur qui peut à chaque instant :

- * poursuivre en mode automatique,
- * réitérer une phase,
- * avorter la phase en cours,
- * passer en mode manuel.

L'opérateur a également la possibilité, à son initiative, d'interroger les sous-systèmes pour en connaître l'état actuel : bras, capteur d'effort, outil préhenseur, centrales hydrauliques, capteurs acoustiques...

Le système de contrôle/commande, bien que conçu pour réaliser une connexion sous-marine au moyen d'un bras manipulateur, peut s'adapter à tout type de process ; c'est ainsi qu'il sera utilisé prochainement pour conduire le processus de décokage dans une raffinerie de pétrole.

Session 4 : Basic underwater technology (robotics)

CONTROL OF A HIGH LOAD SUBSEA ROBOT

Didier DURAND, Josep DOMINGO

LOGABEX
20 Avenue Didier Daurat
31400 TOULOUSE

Emile LEVALLOIS

IFP
BP 311
92506 RUEIL MALMAISON CEDEX

This system is composed of a high accuracy hydraulic manipulator arm with 6 degrees of freedom, for high loads (2000 daN), using ultrasound proximity and contact force measurement data to carry out the subsea connection of bottom oil wells.

An expert system controls the connection phases and generates the sequences of commands to be executed by the robot.

The safety systems and failure modes are also taken into account.

A graphic operator station provides easy control. Each connection phase generates a graphic representation of the robot status and all the proprioceptive and exteroceptive sensors.

Several operating modes are at the operator's disposal who can, at any time, :

- * continue in automatic mode,
- * repeat a phase,
- * abort the current phase,
- * switch to manual mode.

The operator can also, at its initiative, query the subsystems to know their current status : arm, force sensor, grasping tool, hydraulic packs, acoustic sensors...

The control/command system, although it is designed to carry out a subsea connection by means of a manipulator arm, can be adapted to any type of process. For example, it will soon be used to control the decoking process in an oil refinery.

INTRODUCTION

La connexion de conduites et de câbles électriques de contrôle et de commande aux têtes de puits ou autres stations sous-marines est un élément clé de la mise en production des gisements d'hydrocarbures en mer.

Cette opération ne peut être effectuée par plongeurs au-delà de leur profondeur limite de travail, actuellement de l'ordre de 450 mètres.

C'est pourquoi COFLEXIP, premier constructeur de conduites flexibles pour l'offshore pétrolier et l'Institut Français du Pétrole se sont associés depuis 1979 pour étudier et réaliser un système de raccordement automatique de conduites flexibles et câbles de contrôle et de commande jusqu'à une profondeur de 1000 m.

Ce système est composé des éléments suivants :

- . Un bras manipulateur 6 axes, d'une charge utile de 2000 daN et d'un couple de 500 daNm.
- . Un outil préhenseur qui regroupe les fonctions nécessaires à la saisie du flexible terminé par un connecteur pétrolier, et à sa connexion sur la tête de puits : contrôle des efforts exercés sur l'environnement par capteur spécialisé, liaison mécanique avec le connecteur, détection acoustique, électronique et informatique de gestion locale, liaisons hydrauliques nécessaires pour actionner le connecteur pétrolier et la vanne d'arrêt de la conduite flexible ainsi que pour réaliser le test en pression.
- . Un système de contrôle et de commande incluant : la détection acoustique permanente des positions relatives du connecteur pétrolier à raccorder et de la bride correspondante située sur la tête de puits et la commande hybride position force facilitant l'insertion de la bride dans le connecteur, grâce aux mouvements du bras contrôlés par le capteur d'efforts annulant à tout instant les forces de frottement.
- . Un système graphique, Apollo, facilitant les échanges homme-machine et guidant pas à pas l'opérateur.
- . Un système Expert conduisant les actions et prenant en charge la surveillance de l'ensemble des capteurs. On notera que ce système, dans lequel l'enchaînement de tous les mouvements est préprogrammé, laisse quand même à l'opérateur la responsabilité des actions clés et lui permet d'intervenir à tout instant dans le déroulement des opérations.

Le système est mis en oeuvre au moyen d'un engin chenillé. Mais les techniques de pose permettent maintenant de placer l'extrémité du flexible suffisamment près de la tête de puits pour que le bras manipulateur puisse être à la fois à portée du connecteur pétrolier et de la bride correspondante. Ceci permet de mettre le système en oeuvre également au moyen d'une structure spéciale descendue depuis la surface à une proximité de la tête de puits.

Les opérations, simulées en piscine dans le cadre de ce projet, ont été les suivantes :

- . Repérage de l'emplacement de la bride sur la tête de puits.
 - . Celui-ci met en oeuvre l'ensemble des moyens acoustiques utilisés pour la connexion elle-même.
- . Saisie de l'extrémité du flexible (c'est à dire du connecteur pétrolier).
- . Connexion proprement dite
 - . Le repérage précédent permet d'optimiser le trajet du connecteur vers la bride ; les réseaux acoustiques sont alors activés et l'insertion est réalisée. Un test d'étanchéité est effectué pour confirmer la bonne fin de l'opération.
- . Repli
 - . C'est à dire désaccouplement du connecteur pétrolier et du bras et mise de celui-ci en position de garage.

STRUCTURE INFORMATIQUE

Celle-ci est composée d'un système en surface et d'un système fond.

Les deux systèmes sont connectés par une ligne série à haut débit autorisant l'envoi de commandes sous forme de messages codés en ASCII.

Le système de surface

Il est composé de trois calculateurs interconnectés :

- . Un ordinateur temps réel, multitâches "concentrateur", gérant les messages entre fond et surface, et autorisant l'accès par un spécialiste à une console système.

Cette console peut seule suffire à un opérateur de haut niveau pour piloter le système fond.

Un bras maître est connectable à ce ordinateur (non réalisé actuellement).

- . Un ordinateur de type PC/AT supporte le système expert.

Celui-ci a été écrit sous l'environnement Genesis qui permet une prise en compte temps réel des événements fond.

En phase automatique (connexion de flexible par exemple), c'est le système expert qui est maître de tout le système.

A tout moment, celui-ci peut être arrêté pour passer en mode manuel (console système ou bras maître).

- . Une station de travail Apollo seule interface nécessaire à un opérateur pour piloter le système en fonctionnement normal.

Ce ordinateur reçoit des informations du type "phase en court" du système expert.

Il est autonome dans la saisie de ces informations (pour le rafraichissement écran) au travers du réseau fond/surface.

Le système fond

Il y a ici deux équipements physiquement séparés dans deux conteneurs.

L'un se trouve embarqué à l'extrémité du bras sur l'outil préhenseur (OP) et l'autre près de la base du robot (ROB).

Le calculateur de l'OP est constitué d'un système informatique très performant puisqu'il est destiné à traiter en temps réel un ensemble important de capteurs (48 capteurs à ultra-sons, 1 capteur d'efforts 6 axes, de nombreux actionneurs et fin de course). Ce système est conçu à partir de deux processeurs.

L'un est un processeur 386 travaillant dans l'environnement RMX86 et l'autre est un processeur DSP2100 dans l'environnement SYSTREL LOGABEX.

Le calculateur ROB est bâti sur la même structure que l'OP mais les fonctions sont ici des asservissements pour le processeur ADSP2100, et des fonctions robotiques pour le processeur 386.

Les capteurs gérés sont ici 6 synchro-résolveurs 16 bits, 2 inclinomètres, divers capteurs de pression de température et fin de courses.

Les actionneurs du robot sont des servos valves, pilotant des verins et moteurs hydrauliques.

FONCTIONS ROBOTIQUES

Celles-ci sont implémentées dans les équipements de fond et sont appelables depuis la surface par le système expert ou par la console système.

Les principales fonctions sont les suivantes .

Fonctions de base (les principales)

- . commandes point à point,
- . commandes opérationnelles,
- . commandes fonctionnelles avec définition de terminal,
- . commandes articulaires,
- . commande hybride position/effort par mesure sur capteur d'efforts situé entre le terminal et l'outil préhenseur,
- . commandes en mode référencé par capteurs ultrasonores (alignement automatique),
- . commande gardée sur critère d'efforts ou de position.

Macro fonctions (les principales)

Ces fonctions sont les modes automatiques liés au contexte propre de la connexion du flexible.

- . L'accostage : dans ce mode, le robot vient rechercher et saisir le connecteur au moyen de l'outil préhenseur.
- . Recherche bride : mode dans lequel le robot va rechercher en spirale la position de la bride pétrolière.
- . Centrage bride : mode dans lequel le robot centre le connecteur par rapport à l'axe de la bride.

- . Avance : mode dans lequel le robot approche le connecteur vers la bride en restant centré.
- . Pénétration US : mode dans lequel le robot aligne le connecteur et la bride juste avant contact bride/connecteur.
- . Pénétration hybride : mode dans lequel le robot fait glisser au contact la bride dans le connecteur jusqu'à pénétration complète.

Les efforts radiaux de contact sont asservis à une valeur nulle et l'effort axial est affecté à une consigne (300 kgF).

Les angles restent pilotés en position constante.

La bride va, grâce à ce mode, pénétrer sans aucun effort jusqu'au fond du connecteur et sans qu'à aucun moment il ne puisse y avoir de casse ou de coincement puisque les efforts sont maîtrisés en temps réel.

- . Lacher connecteur : dans ce mode le robot verrouille les chiens du connecteur, lâche la bride en reprenant la masse lâchée, et recule pour libérer l'outil préhenseur.

LE CAPTEUR D'EFFORTS

Le capteur d'efforts utilisé dans l'application a pour fonction de mesurer le torseur des efforts s'exerçant entre l'extrémité du robot et un point de contact entre le connecteur et la bride pétrolière.

Le capteur est de la gamme EX6000 de LOGABEX en version immergeable.

Il est constitué par une architecture monobloc en inox marine faisant apparaître par usinage 6 poutres suivant une architecture triangulée (Brevet international déposé).

Chaque poutre est équipée d'un pont de jauge de contrainte.

Le calcul du torseur des efforts se fait en multipliant le vecteur mesure (6 ponts conditionnés et numérisés) par la matrice de découplage du capteur identifié au banc de mesure.

La mesure des efforts permet d'utiliser une commande particulière du robot appelée Commande hybride position/force.

Dans cette commande le robot travaille dans un espace à 12 dimensions, 6 positions et 6 efforts. Les efforts deviennent donc des dimensions commandables au même titre que les positions.

Il est possible par exemple de piloter certains axes en position et d'autres en efforts (par axes on entend axes de repère dans l'espace opérationnel ou fonctionnel) et même de les piloter simultanément en effort et en position (ou effets de rappel avec contrôle de la raideur).

Une partie de ces possibilités a été mise à profit dans cette application pour contrôler les efforts de contact en bride et connecteur, et assurer un centrage automatique par glissement des pièces l'une dans l'autre. Les efforts étant maîtrisés, aucun risque de détérioration, ni aucun coincement ne sont à craindre.

LES CAPTEURS ACOUSTIQUES

1 Les différents réseaux utilisés

4 réseaux acoustiques ont été utilisés.

2 réseaux annexes permettent :

- . la calibration du dispositif,
- . la recherche de l'ancrage.

a) 8 Capteurs d'accostage

- . à 2MHz,
- . travaillent par réflexion,
- . utilisés pour la saisie du connecteur pétrolier par l'organe préhenseur,
- . leur disposition est montrée par la figure 3.

b) 8 Capteurs de pénétration

- . à 2 MHz,
- . travaillent par réflexion,
- . utilisés dans les phases finales d'approche et permettant un centrage avec alignement des axes au niveau de 1 mm et de 0,5 degrés,
- . la figure 3 montre leur implantation sur l'OP,

Le principe de mesure des capteurs de pénétration et d'accostage est décrit par la figure 4. Pour son fonctionnement, on doit connaître la circonférence des éléments support capteurs et des cibles visées (bride ou connecteur).

c) 4 Capteurs de localisation

- . à 500 kHz,
- . travaillent par diffraction,
- . permettent une localisation de la bride à +/-300 mm et +/-5 degrés.

d) 24 Capteurs d'approche

- . à 500 kHz,
- . travaillent par diffraction,
- . permettent un centrage jusqu'à une distance de 2 m à mieux que 17 mm.
- . la figure 2 nous montre l'emplacement des réseaux de localisation et d'approche sur le connecteur.

Ces réseaux sont effacés dans la phase finale de connexion à l'aide de deux vérins.

La figure 1 montre en détail la distribution des capteurs acoustiques d'approche et de localisation.

On remarque les inclinaisons de 8° pour le plan du réseau d'approche, et de 15° pour le plan du réseau de localisation pour ainsi travailler suivant le principe de diffraction retenu pour l'application.

Ce principe permet le fonctionnement du réseau d'approche depuis 2 m jusqu'à 15 cm avec des inclinaisons maximales de 8°.

On remarque la distance "D1" de séparation de deux barettes qui est fonction du diamètre de la bride.

Le principe de diffraction entraîne un balayage des capteurs depuis le numéro 1 jusqu'au numéro 6 pour trouver celui qui talonne la bride.

Le désaxement final sera directement fonction de la séparation entre deux capteurs consécutifs (17 mm).

2 Traitement du signal (mode tracking)

Ce traitement est effectué par une carte DX2100 LOGABEX équipée d'un microprocesseur DSP2100 Analog Devices.

Le développement de l'application a été fait sous l'environnement SYSTREL (compilateur, simulateur, debugger,...)

Le signal est numérisé et mémorisé à l'aide d'un convertisseur 8 bits sur une fenêtre temporelle adaptative. La position de la fenêtre de mémorisation s'asservit la localisation temporelle du signal. Le champs de la chaîne est asservi sur l'amplitude de l'écho recherché. Pour améliorer le rapport signal/bruit, un filtre à oubli exponentiel a été implémenté. La fréquence de résonance radiale des capteurs a été supprimé à l'aide d'un filtre numérique. Enfin on prélève l'enveloppe du signal par un filtre passe-bas.

3 Traitement des données

Ce traitement est effectué par une carte INTEL 386 sous RMX 86. Cette carte dialogue avec la carte DX2100 via une base de données contenant l'ensemble des paramètres capteurs.

Pour chaque capteur on peut connaître :

- . l'état du capteur,
- . si une erreur est présente sur ce capteur,
- . l'adresse où on peut récupérer l'écho en cours,
- . le nombre de fois qui ont perdu l'écho (mode tracking),
- . la valeur maximale de l'écho en cours,
- . le gain de la chaîne d'amplification pour ce capteur,
- . l'instant d'arrivée de l'écho dans la fenêtre d'analyse,
- . la position de la fenêtre dans le domaine d'exploration,
- . le début et la fin du domaine d'exploration,
- . le type de capteur, 2MHz ou 500 kHz,
- . les paramètres d'accès sur les cartes d'émission/réception, en fonction du numéro du capteur.

Le traitement consiste à calculer les paramètres géométriques de position en fonction des données recueillies dans la base de données. Des calculs de cohérence de résultats permettent de modifier les paramètres de la base de données par exemple si un capteur donne une information trop éloignée de la moyenne, il est considéré comme asservi sur un mauvais écho et sa fenêtre de "tracking" est modifiée en conséquence.

4 Elements communs aux deux types de capteurs

- . céramique piézoélectrique,
- . travaillent en environ-réception,
- . disposent d'une faible zone aveugle d'amortissement en réception (< 5 cm),
- . sont excités avec des impulsions de 1/2 longueur d'onde et d'amplitude 200 V,
- . fabrication spécifique double étanchéité,
- . chaînes d'amplification avec CAG,
- . calibration indépendante du milieu,
- . mesures absolues des distances.

LE POSTE DE PILOTAGE

Celui-ci est très ergonomique et très convivial. Un écran de 20 " centralise à tout moment toutes les informations nécessaires à l'opérateur, correspondantes à la phase en cours. Il s'agit de l'indication de la phase en cours de l'état des capteurs et actionneurs directement impliqués dans la phase et des messages d'erreurs. A tout moment, l'opérateur peut visualiser l'état de tous les sous-systèmes non représentés dans la phase en cours sans interférer dans le déroulement des opérations. Une souris permet de valider les options proposées. Il peut aussi décider d'arrêter la phase en cours, de la réitérer, de passer en mode manuel ou d'avorter la connexion. Pour chaque fenêtre la station de travail envoie périodiquement les messages de demandes d'informations nécessaires à rafraichir les valeurs affichées.

CONCLUSION

Les essais en bassin, tels qu'ils ont été réalisés, démontrent qu'il est dorénavant possible de connecter des conduites flexibles en première et surtout en seconde extrémité, en l'absence de toute présence de plongeurs. On peut ajouter que cette méthode est sûre, indépendante des conditions météorologiques et ne nécessite pas plus de temps pour sa mise en oeuvre qu'une opération de connexion réalisée par plongeurs (quand ceux-ci peuvent être utilisés et à l'exclusion du temps nécessaire à leur compression-décompression).

Il faut noter que le système de contrôle commande, bien que développé pour cette application reste très général et peut être utilisé dans tout un système automatique ou télécommandé.

En effet, il est constitué des éléments indispensables à tout système de commande évoluée :

- . une interface opérateur ergonomique,
- . un automate de pilotage (ici un système expert),
- . un système temps réel déporté sur le site de traitement.

L'utilisation du système expert rend beaucoup plus simple la prise en compte des contraintes de pilotage, et beaucoup plus facile la modification ou le rajout de contrainte au fur et à mesure de l'évolution de la connaissance du procédé.

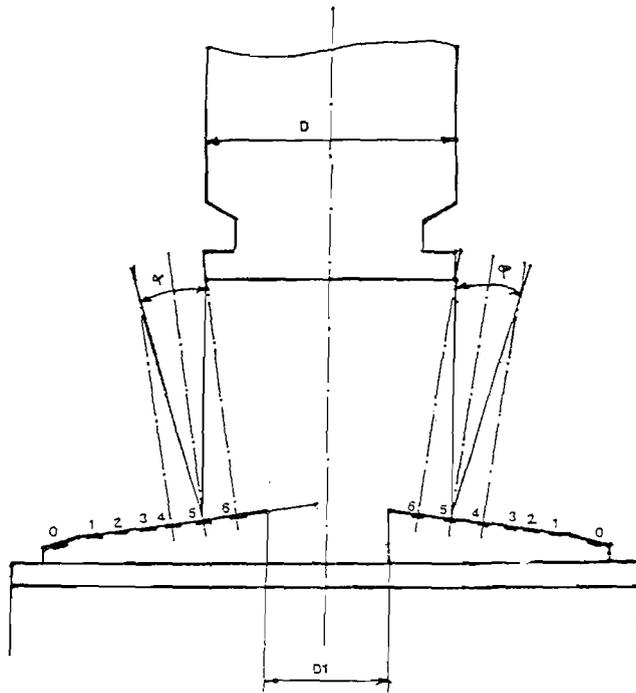
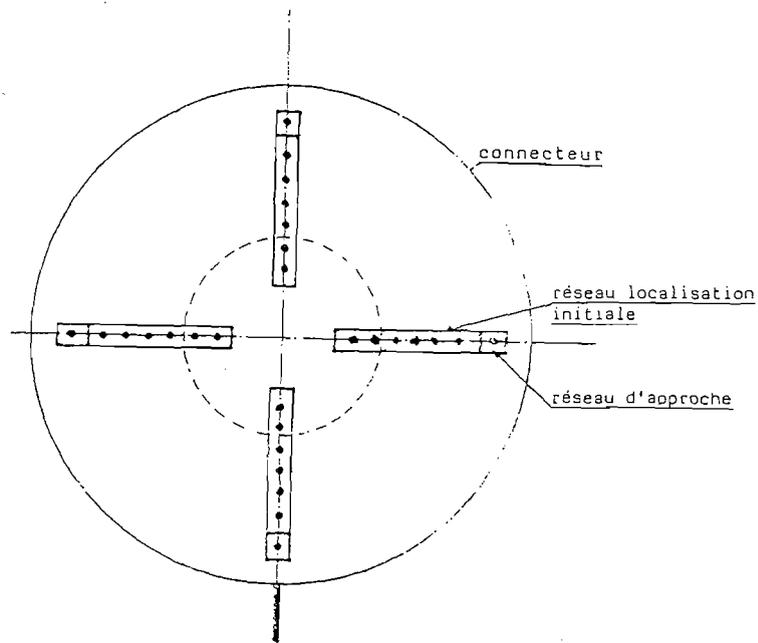
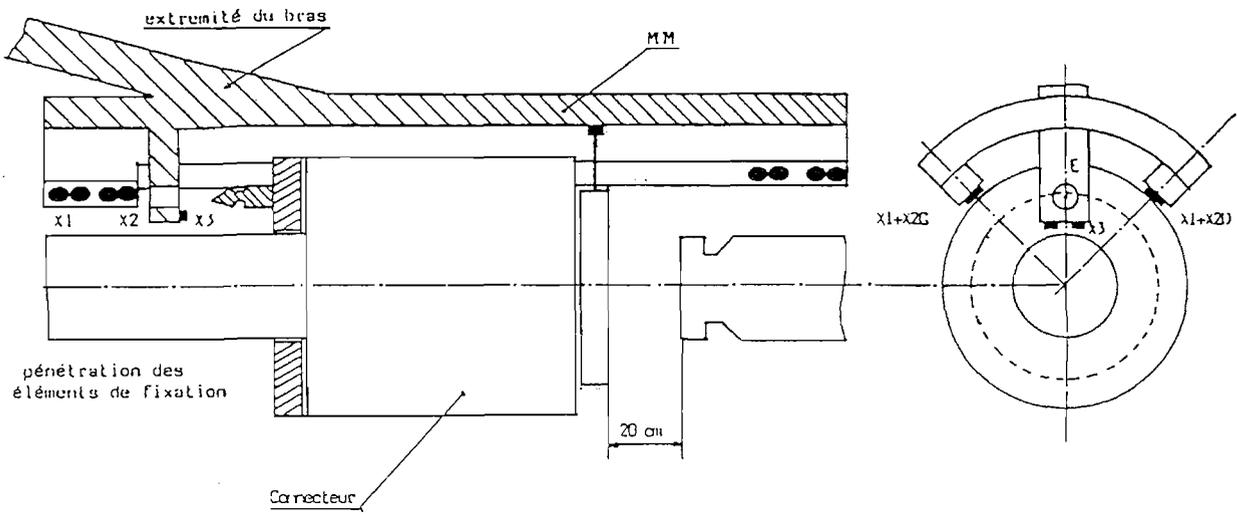


Fig 1.



CAPTEURS D'APPROCHE ET DE LOCALISATION
EMPLACEMENT SUR LE MCM.

Fig 2.



Nombre de capteurs:
 $x1C+D = 4$
 $x2C+D = 4$
 $x3 = 2$

Nota: Le point E d'encrage doit
 pouvoir évoluer sur toute
 la circonférence (ligne pointillée)

Fig 3.

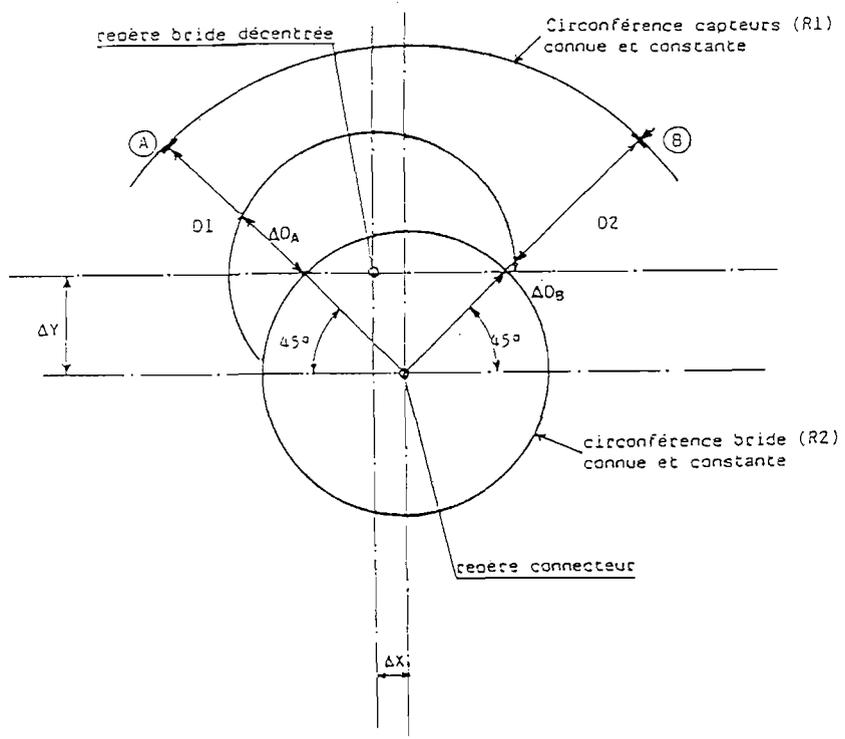
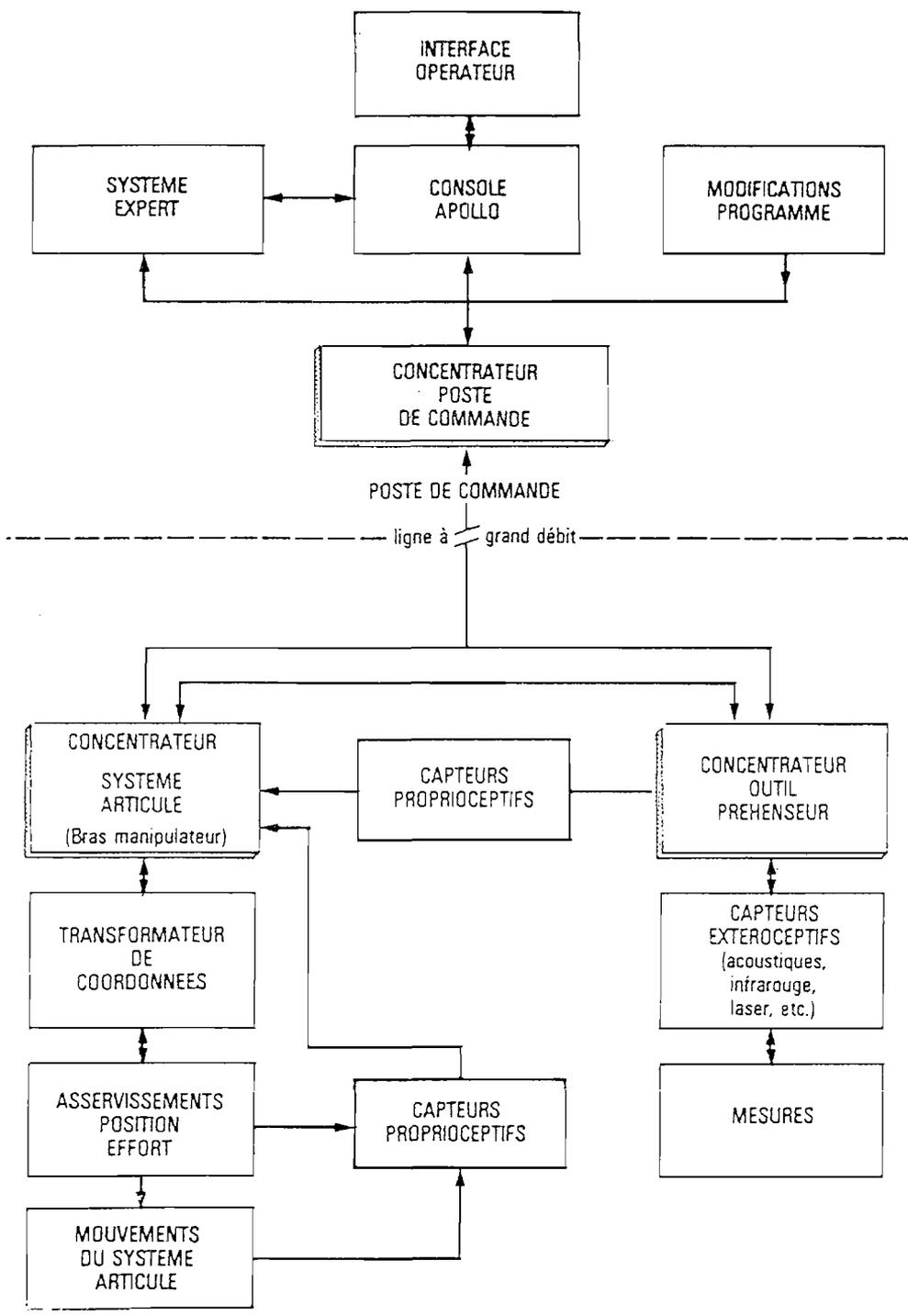


Fig 4.



ARCHITECTURE GENERALE DU SYSTEME