

SESSION DE 2001

**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés**

section : mécanique

épreuve d'automatique - informatique industrielle

Durée : 4 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique - à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits.

Le candidat doit obligatoirement traiter les trois parties sur des copies distinctes, en précisant bien sur chaque copie le titre, le repère et la partie de l'épreuve traitée.

PRESENTATION DU SYSTEME ETUDIE

SYSTEME DE CONTRÔLE AUTOMATIQUE DES TUBES DE GENERATEUR DE VAPEUR DE CENTRALES NUCLEAIRES A EAU CHAUDE : BRAS BETA

Le bras BETA (voir FIGURE A vue extérieure du bras) est un système de déplacement d'un outil de contrôle de l'intégrité des tubes d'un générateur de vapeur GV (voir document FIGURE B : présentation du GV).

Le générateur de vapeur est un échangeur thermique entre deux fluides :

- Une eau pressurisée venant du réacteur par un circuit dit «circuit primaire» pénètre dans le générateur de vapeur par l'entrée CP, remplit le quart de sphère inférieur puis monte par un ensemble de tubes jusqu'à la partie supérieure hémisphérique du GV. Le fluide primaire, emprunte alors une autre série de tubes, pour rejoindre le quart de sphère inférieur voisin de celui d'entrée et quitter le générateur de vapeur vers le réacteur.
Les tubes (6000 à 12000), qui sont maintenus par des grilles basses et hautes, isolent le circuit primaire CP (à l'intérieur des tubes) du circuit secondaire CS (à l'extérieur des tubes).
- L'eau du circuit secondaire voit sa température augmenter jusqu'à vaporisation (d'où le nom de générateur de vapeur pour cet échangeur), elle remplit l'espace séparant les tubes et le cylindre extérieur du générateur de vapeur. En sortie du GV elle rejoint une turbine où sa détente entraîne un alternateur.

Cette disposition permet une grande surface de contact entre les deux fluides par conséquent un bon échange thermique.

On nomme classiquement les deux quarts de sphères inférieurs des boîtes à eau.

Le générateur de vapeur est un point sensible en terme de contamination radioactive. Le fluide primaire est en effet contaminé par son séjour dans le réacteur, le fluide secondaire doit rester sain. Le contrôle des tubes du générateur de vapeur est d'une grande importance. Il se conduit par les boîtes à eau au moyen d'un système de déplacement d'un outil de contrôle dont le bras BETA est une possibilité. Le contrôle du générateur est réalisé lors d'arrêts programmés de l'installation après vidange des circuits primaire et secondaire.

Les boîtes à eau, placées sur le circuit primaire (donc polluées par le passage du fluide primaire) sont inaccessibles à un opérateur en sécurité, aussi un système mécanique de mise en place (non représenté) permet une mise en position initiale du bras depuis l'extérieur du générateur au travers du trou d'homme. Au cours de l'étude on considère le bras avec au moins quatre doigts pris dans la grille.

En position initiale, le bras est maintenu au moyen des quatre doigts de couronne, pénétrant dans quatre tubes et plaqué «en plafond» contre la grille (voir FIGURE 1 : différentes positions du bras par rapport à la grille).

L'étude suivante s'intéresse uniquement à la structure et au comportement du bras déplaçant l'outil devant chaque tube d'une boîte à eau. Elle porte sur les déplacements de l'ensemble « bras BETA » sur la grille.

Les principales fonctions mécaniques du bras qui assurent la mise en position de l'outil de contrôle au droit d'un tube pour lancer une visite sont :

- Les déplacements en translation horizontale « x » du bras par rapport à la tour (moteur MT) ;
- Les déplacements en rotation de la tour « β » par rapport à la couronne (moteur $M\beta$) ;
- Les déplacements en translation verticale des doigts de l'élévateur par rapport au bras (vérin pneumatique côté élévateur) ;
- Les déplacements en translation verticale des doigts de l'élévateur outil par rapport au bras (vérin pneumatique côté élévateur outil).

PARTIE A

MODELISATION DE LA MISE EN POSITION DANS LE PLAN DE LA GRILLE

Cette première partie porte sur le déplacement longitudinal du bras dans le plan de la grille.

Ce qui est recherché dans cette étude c'est la modélisation et non la résolution des problèmes. La démarche attendue est de partir d'une analyse mécanique du problème posé pour aboutir à des modèles sous forme de schémas blocs avec des fonctions de transfert sous forme littérale.

A - 1 Etude cinématique globale du bras β

Cette première étude permet d'analyser les chaînes cinématiques liées au déplacement longitudinal entre la tour et le bras et au déplacement rotatif entre la couronne et la tour.

Q 1 - Tracer un schéma cinématique en perspective montrant explicitement les deux possibilités de déplacements, dans la position où la couronne est encastrée dans la grille et les élévateurs sont rentrés (voir FIGURE 1 « différentes positions du bras par rapport à la grille). On retrouvera sur ce schéma la grille, la couronne, la tour, le bras et les deux moteurs MT et $M\beta$ ainsi que les éléments constituant les chaînes cinématiques ; les élévateurs ne seront pas détaillés.

Remarque : cette configuration correspond à l'ensemble de la partie A.

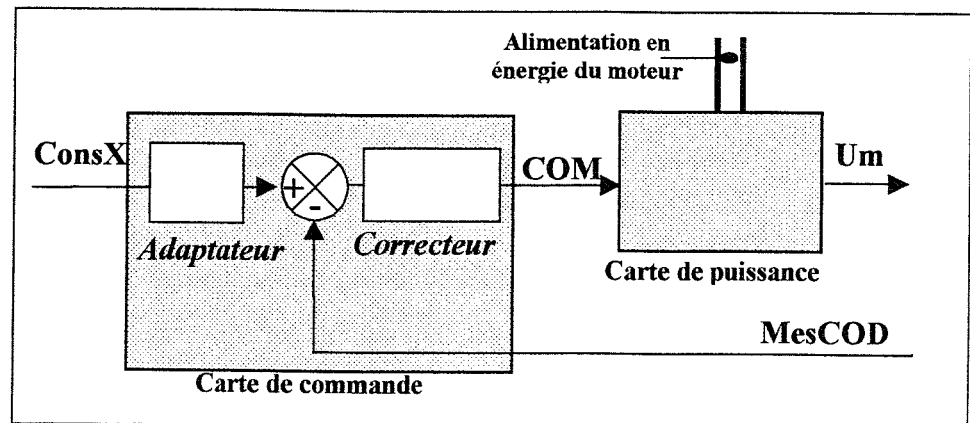
A - 2 Modélisation de la chaîne de positionnement longitudinal

Les deux mouvements principaux sont asservis en position. Le dossier de présentation de la structure mécanique montre les différents constituants de la chaîne fonctionnelle de mise en position longitudinale (FIGURE 2 et FIGURE 3).

La partie commande de l'asservissement est composée d'une carte de commande et d'une carte de puissance.

Le schéma partiel de commande simplifié est donné ci-contre.

Les variables sont :
ConsX : consigne de position en mm ;
COM : tension de commande après correction
comprise entre [-10V et +10V] ;



U_m : tension de commande comprise entre [-40V et + 40V] ;

MesCOD : information numérique de position obtenue à la sortie du codeur incrémental exprimée en point codeur (le potentiomètre 10 tours n'intervient pas dans cette mesure, il sera pris en compte uniquement dans la question B3).

Les blocs fonctionnels sont :

Adaptateur : bloc qui permet un bon fonctionnement statique de la commande ;

Correcteur : en standard, un correcteur P.I.D. paramétré non étudié ici [on le notera : $C_x(p)$] ;

Carte de puissance : assimilée à un gain pur : KP (à déterminer).

La chaîne fonctionnelle est définie dans le dossier de la structure mécanique. Les masses en mouvement du bras sont négligées dans cette partie sauf celle du moteur « MT » et celle du câble ombilical lié à l'outil « Moe », équivalente à une masse en bout de bras (coté élévateur) de 100 kg (la masse de $M\beta$ est négligée devant Moe). Toutes les liaisons sont considérées comme parfaites, tous les frottements sont négligés.

Pour la question Q2 on retient une modélisation du premier ordre pour la fonction de transfert du moteur MT.

$$HMT = \frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)}$$
 ($\omega_m(t)$: fréquence de rotation de l'arbre moteur, $u_m(t)$: tension aux bornes de l'induit).

Q 2 - Dans le cas où seul le moteur MT fonctionne, **tracer le schéma bloc de la commande de position x à partir de la carte de commande définie ci-dessus et du dossier de définition de la structure mécanique. Dans un premier temps tracer un schéma avec les fonctions de transfert exprimées littéralement à partir d'hypothèses et de modèles à définir puis faire les applications numériques qui permettraient la détermination du correcteur $C_x(p)$ qui restera la seule inconnue du schéma.**
Le candidat portera une attention particulière à la justification du modèle retenu pour le moteur MT.

Pour la question Q3 on retient une modélisation du second ordre pour le moteur MT.

Q 3 – Rappeler succinctement les hypothèses qui permettent de décrire la fonction de transfert d'un moteur à courant continu en charge par un modèle du premier et/ou du second ordre.

Le cas de fonctionnement envisagé pour la question Q4 est celui où le moteur $M\beta$ est en action alors que la consigne de position $ConsX$ de l'asservissement de position longitudinale est fixée depuis un temps suffisamment long pour que la position x ait été atteinte.

Q 4 – 1 Quelle est l'influence de la mise en mouvement de $M\beta$ sur l'asservissement de position suivant « x » ?
2 A partir du schéma cinématique de la question Q1 **montrer que les actions mécaniques entre le pignon et la crémaillère de la chaîne de mise en mouvement suivant « x » ne peuvent être nulles. En déduire la forme de la perturbation de la commande de position suivant « x ». Tracer alors le schéma bloc global (avec la perturbation) de la commande de position suivant « x ». On considère que β et $\ddot{\beta}$ sont connus puisqu'ils sont déterminés par la carte de commande de rotation, le candidat présentera les autres hypothèses qu'il jugera utiles.
3 Justifier alors l'intérêt d'un modèle du second ordre pour le moteur.**

Q 5 – Que se passe-t-il si les deux moteurs fonctionnent simultanément ? Peut-on dans le cadre de l'étude classique menée depuis la question Q2 prévoir (calculer) le comportement de l'ensemble en mouvements simultanés ?
Ce fonctionnement simultané est-il effectif dans le cadre des fonctions remplies par le bras β lors du contrôle des tubes d'un générateur de vapeur ?

Q 6 - Comment agir sur la commande MT pour limiter l'influence de $M\beta$? (seule une réponse qualitative est attendue)

Tournez la page S.V.P.

PARTIE B

ETUDE DE LA COMMANDE SEQUENTIELLE DU ROBOT

Le maintien en « plafond » du bras β est réalisé au moyen des huit doigts (quatre pour la couronne, deux pour l'élévateur simple et deux pour l'élévateur côté outil). Ces doigts sont munis de mandrins expansibles à commande pneumatique. Quatre doigts en position de prise assurent le maintien du bras, alternativement

- les quatre doigts de couronne pour permettre la rotation β ou la translation TX du bras par rapport à la couronne ;
- les quatre doigts élévateurs pour permettre la rotation β et la translation TX de la tour par rapport au bras.

La FIGURE 4 propose un schéma cinématique représentatif des mouvements du bras dans un plan parallèle à la grille.

B 1 - Analyse du schéma pneumatique

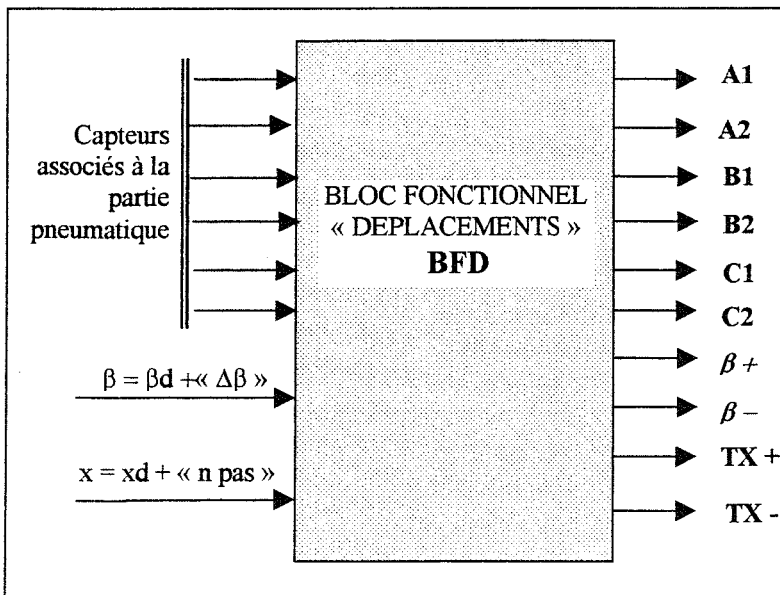
Le schéma de distribution pneumatique est fourni (voir FIGURE 5). L'étude porte sur la justification fonctionnelle de certains constituants de ce schéma.

Q 7 - Justifier la présence sur ce schéma d'un accumulateur et d'un surpresseur.

Q 8 - Après avoir affecté chaque distributeur (A [A1, A2] ; B [B1, B2] ; C [C1, C2]) au(x) vérin(s) qu'il alimente justifier la présence de trois distributeurs pour alimenter 10 vérins.

B - 2 Description de la commande séquentielle

L'étude porte sur un bloc fonctionnel BFD de commande séquentielle des déplacements (rotation β et translation TX) et des prises de position (mouvements élévateurs) du bras β .



Les axes « β » et « x » sont asservis en position.

Les commandes de déplacement sont repérées :

— $\beta+$, $\beta-$ pour la rotation (+/- selon le sens trigonométrique de la FIGURE 4) ;

— TX+, TX- pour la translation, le signe (+) si l'outil s'éloigne de la tour.

La syntaxe utilisée désignant l'information de fin des déplacements est ici :

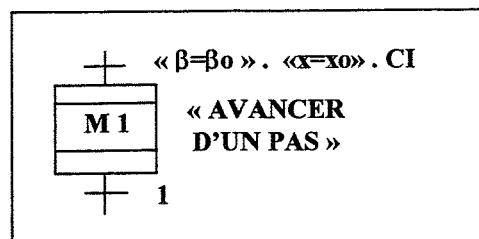
— pour l'axe « β » : $\beta = \beta_d + \Delta\beta$ avec $\Delta\beta$ paramétrable, par

exemple un déplacement relatif de $-\Pi/2$ se notera : $\beta = \beta_d + \text{« } -\Pi/2 \text{ »}$ (β_d représente évidemment la position de départ) ;

— pour l'axe « X » : $x = x_d + \text{« n pas »}$ avec « n pas » paramétrable où le pas correspond au pas de la grille et x_d la position de départ.

Les capteurs associés à la partie pneumatique sont définis sur le schéma pneumatique.

Q 9 – *Ecrire au niveau spécifié par le bloc fonctionnel BFD (en respectant les entrées et sorties définies) l'expansion de la macro étape M1 : « AVANCER D'UN PAS » (couronne encastrée ; le bras avance d'un pas). CI correspond à l'état des capteurs associés à la partie pneumatique lorsque le bras β est dans la position : couronne encastrée et élévateurs dans la grille (tous les doigts pris). Ecrire la proposition logique correspondant à CI (la macro étape M1 se termine dans une position qui correspond aussi à CI).*



On considère maintenant que les expansions des macro étapes suivantes sont déterminées sur le même principe que celui défini à la question 9, début de macro étape en conditions initiales CI puis fin de macro étape en conditions initiales CI (les expansions de ces macro étapes ne sont pas demandées) :

- M2 : RECULER D'UN PAS (couronne encastrée ; le bras recule d'un pas) ;
- M3 : EFFECTUER UNE ROTATION DE « $+\pi/2$ » (couronne encastrée) ;
- M4 : EFFECTUER UNE ROTATION DE « $-\pi/2$ » (couronne encastrée) ;
- M5 : VISITER UN TUBE ;
- M6 : AVANCER LA TOUR D'UN PAS (doigts élévateurs pris, vérins élévateurs sortis ; approcher la tour de l'outil d'un pas) ;
- M7 : RECULER LA TOUR D'UN PAS (doigts élévateurs pris, vérins élévateurs sortis ; éloigner la tour de l'outil d'un pas).

On considère le bras en position initiale dans la configuration de la FIGURE 4, soit un repère associé à la grille ($O_G, \bar{X}_G, \bar{Y}_G$) confondu avec le repère ($O_c, \bar{X}_c, \bar{Y}_c$) de la FIGURE 4 en position initiale. Pour cette question Q 10 on considère que la surface de la grille visitée est sans limite (aucune collision possible avec les limites de la boîte à eau (voir FIGURE B)).

Q 10 – *Construire un grafct (en utilisant les macro étapes M1 à M7 et un ou plusieurs compteurs) décrivant le comportement du bras lors de la visite de tous les tubes (frontières comprises) inclus dans les deux rectangles R1 et R2 :*

R1 : $[A1, B1, C1, D1]$ avec $O_{GA1} : [56.i ; 0]$; $O_{GB1} : [6.i ; 0]$; $O_{GC1} : [6.i ; 10.i]$; $O_{GD1} : [56.i ; 10.i]$

R2 : $[A2, B2, C2, D2]$ avec $O_{GA2} : [-55.i ; 0]$; $O_{GB2} : [-6.i ; 0]$; $O_{GC2} : [-6.i ; 10.i]$; $O_{GD2} : [-55.i ; 10.i]$

Justifier les valeurs $6.i$ et $56.i$ retenues pour le rectangle R1. **Quel est l'intérêt d'associer ces deux rectangles dans la même procédure ? Quel est le nombre de tubes visités ?**

Dans la réalité du fonctionnement, le bras β est équipé d'un système de détection de collision avec les limites de la boîte à eau (voir FIGURE B) qui assure la sécurité du bras en cours de déplacement.

Q 11 – *Proposer un choix d'un ou plusieurs capteurs (type et performances), avec leur(s) implantation(s) définie(s) par un schéma, qui détectent une collision avec les limites de la boîte au cours des déplacements du bras β .*

B – 3 Etude de la fonction « calibrage » du bras β

L'étude se limite au cas de la position longitudinale (voir le dossier de définition de la structure mécanique équipée des capteurs FIGURE 2 et FIGURE 3).

Le capteur de position longitudinale est un codeur incrémental à deux pistes en quadrature de phase (signaux décalés de $\Pi/2$) avec un signal par tour du codeur. Le dispositif de mesure est complété par un potentiomètre 10 tours qui fait l'objet de la question suivante.

Q 12 - Après avoir rappelé succinctement la forme des signaux en sortie d'un codeur incrémental définir le fonctionnement du système de commande (seul le positionnement longitudinal est envisagé) après une coupure d'énergie. Préciser les constituants nécessaires à ce fonctionnement.

Q 13 - Déterminer l'amplitude de la mesure donnée par le potentiomètre. (La variation de position longitudinale est pour ce modèle de bras de $[0, 800 \text{ mm}]$. Déterminer ensuite l'amplitude de position couverte par un tour du codeur incrémental.

La fonction appelée « calibrage » permet, par l'utilisation conjointe du capteur incrémental et du potentiomètre, de reprendre « localement » le fonctionnement du bras après une coupure d'énergie. C'est-à-dire qu'à la remise sous tension du système et avec l'aide des informations données par le codeur, le potentiomètre et d'informations enregistrées à la première mise sous tension, le bras β est capable de reconstituer avec précision sa position réelle sans effectuer un mouvement de grande amplitude.

Q 14 - En utilisant un outil de description de votre choix, proposer une solution possible de procédure de reprise de fonctionnement ; justifier dans le cas du bras β de l'importance de ce dispositif ; évaluer l'amplitude du déplacement non contrôlé obtenu par la procédure proposée.

PARTIE C

REGLAGE DE LA COMMANDE DE POSITION ANGULAIRE DU BRAS

Cette troisième partie porte sur le déplacement du bras en rotation par rapport à un axe perpendiculaire au plan de la grille.

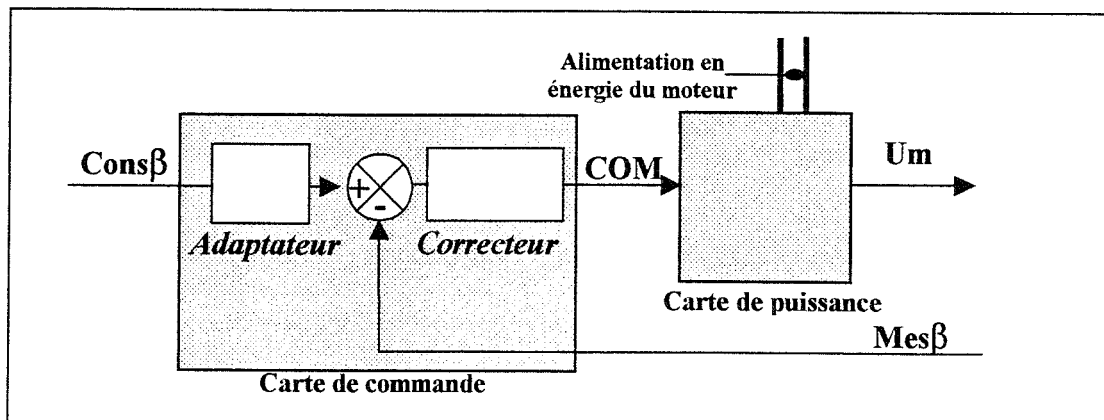
On cherche ici, à partir d'une modélisation proposée, à calculer les performances de la commande en rotation du bras.

C - 1 Modélisation de la chaîne de positionnement angulaire

La partie commande de l'asservissement est réalisée par une carte de commande. L'interface avec l'actionneur est confiée à une carte de puissance.

La chaîne fonctionnelle de positionnement angulaire est définie dans le dossier de la structure mécanique. Les masses en mouvement du bras sont négligées *dans cette partie* sauf celle du moteur $M\beta$ et celle du câble ombilical lié à l'outil, équivalente à une masse en bout de bras (coté élévateur) de 100 kg. Toutes les liaisons sont considérées comme parfaites, tous les frottements sont négligés.

Le schéma de commande simplifié est donné ci-dessous.



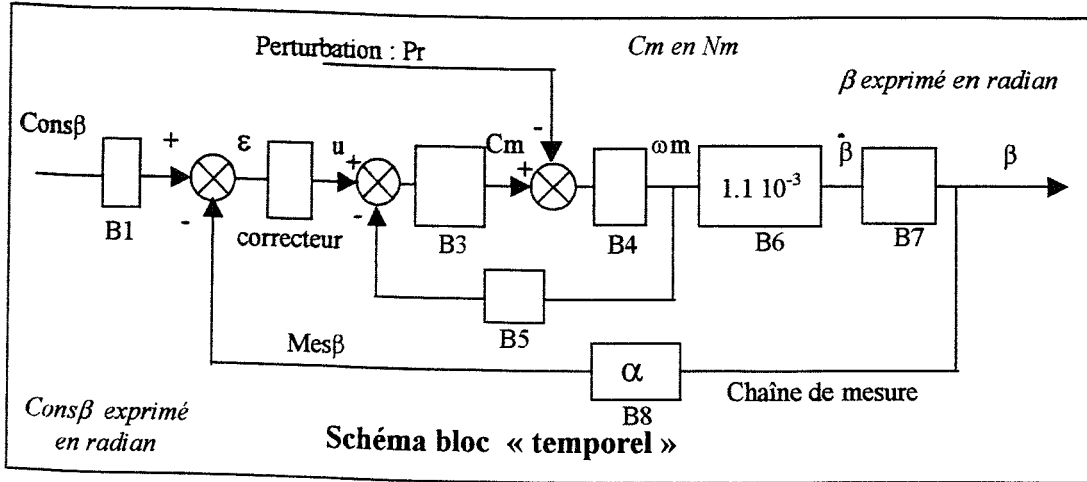
Les variables sont :

- Cons β : consigne de position angulaire en degré ;
- COM : tension de commande après correction comprise entre [-10V et +10V] ;
- Um : tension de commande comprise entre [-40V et + 40V] ;
- Mes β : information de position angulaire du bras.

Les blocs fonctionnels sont :

- Adaptateur : bloc qui permet un bon fonctionnement statique de la commande ;
- Correcteur : en standard, un correcteur P.I.D. paramétré [on le notera : $C\beta(p)$ lorsqu'il n'est pas encore défini explicitement] ;
- Carte de puissance : assimilée à un gain pur K_P à déterminer.

Cette modélisation aboutit à l'architecture de commande représentée par le schéma bloc suivant :



Le moteur choisi (RS 230) possède les caractéristiques suivantes :

| Caractéristiques à $\Delta\theta = 40^\circ\text{C}$ | Couple | Vitesse nominale | Tension nominale | f.e.m. par 1000 tr/min | Constante de couple | Résistance de l'induit | Inductance de l'induit | Inertie | Cst de temps mécanique |
|------------------------------------------------------|--------|------------------|------------------|------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| Symboles | C_0 | ω_n | U_n | K_e | K_t | R | L | J_m | τ_m |
| Unité | Nm | tr/min | V | V | Nm/A | Ω | mH | 10^{-5} kg m^2 | ms |
| RS 230 | 0.32 | 3000 | 24 | 6 | 0,057 | 0.66 | 0.42 | 2.6 | 5.2 |

Q 15 – En précisant vos hypothèses définir littéralement les blocs Bi « vides » du schéma précédent. Justifier votre réponse.

Q 16 – Quelles sont les perturbations auxquelles est soumise cette chaîne de commande de position angulaire au cours du fonctionnement normal (déplacement et visite des tubes) ? Traiter en particulier les effets dus au mouvement longitudinal simultané ou non.

Parmi celles-ci quelle(s) est (sont) celle(s) qui peut (peuvent) être prise(s) en compte par l'entrée perturbation Pr du schéma ?

Q 17 – A partir de la documentation du moteur et des données suivantes, donner les valeurs numériques des blocs du schéma :

- $J_t = 5 \cdot J_m$ avec J_t : inertie totale ramenée sur l'arbre moteur β (y compris celle du moteur)
- $B_6 = 1.1 \cdot 10^{-3}$
- $\alpha = 2.8 \cdot 10^{-2} \text{ V/}^\circ$

En déduire l'expression de la fonction de transfert :

$$\beta(p) = H1(p) \cdot \text{Cons}\beta(p) + H2(p) \cdot \text{Pr}(p)$$

C - 2 Amélioration des performances

Q 18 – Avec les hypothèses suivantes :

- le correcteur $C\beta(p)$ est un gain pur $K\beta$;
- la perturbation Pr est considérée nulle ;
- l'inductance L de l'induit du moteur est négligée ;

déterminer numériquement $K\beta$ tel que le système ne présente aucun dépassement et une erreur absolue nulle.

Q 19 – **Montrer alors qu'avec un tel réglage les conditions suivantes de stabilité sont réunies : marge de phase : $M\varphi \geq 45^\circ$ et marge de gain : $MG \geq 2.3$ dB.**

Q 20 - **Quel est alors l'intérêt d'un correcteur de type PID pour la commande de ce mouvement ?**

La consigne de position angulaire varie entre -180° et $+180^\circ$. Le réglage précédent est maintenu.

Q 21 – **Déterminer pour une consigne en échelon à déterminer la valeur maximale de $u(t)$ (sortie du correcteur) au cours du temps. Analyser le résultat et proposer éventuellement des modifications permettant de prendre en compte cette valeur maximale.**

BRAS BETA SEUL

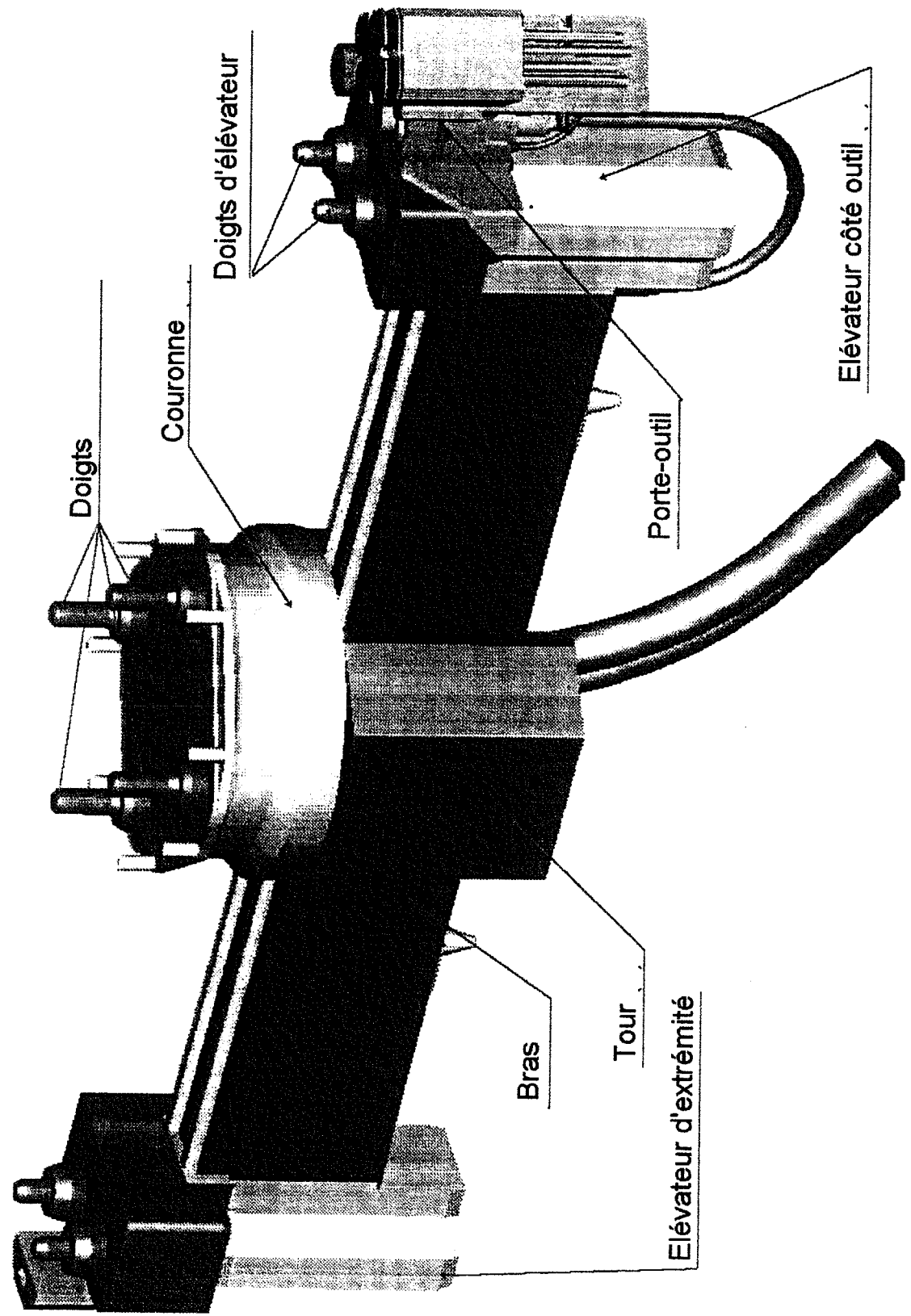


FIGURE A : BRAS BETA

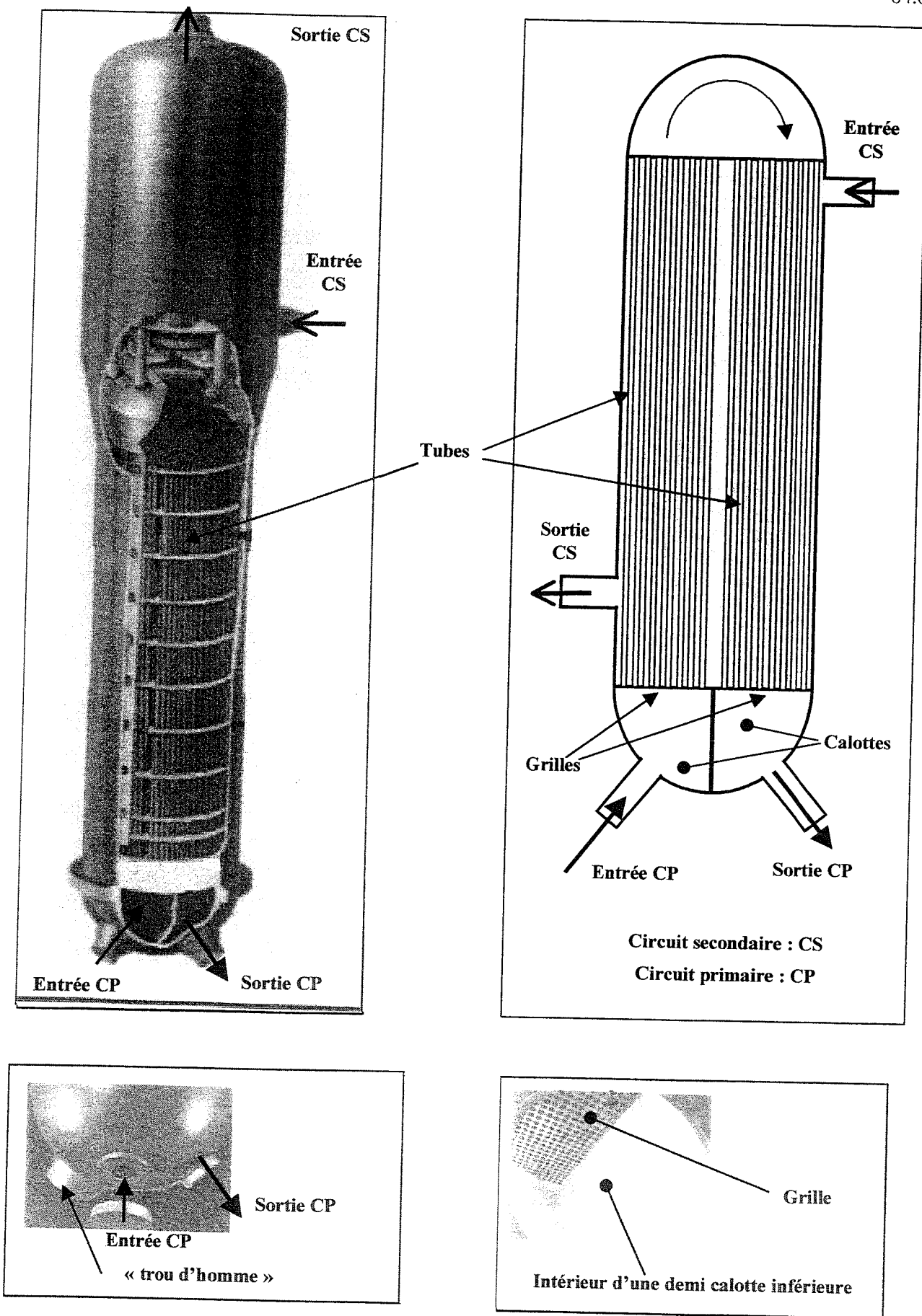
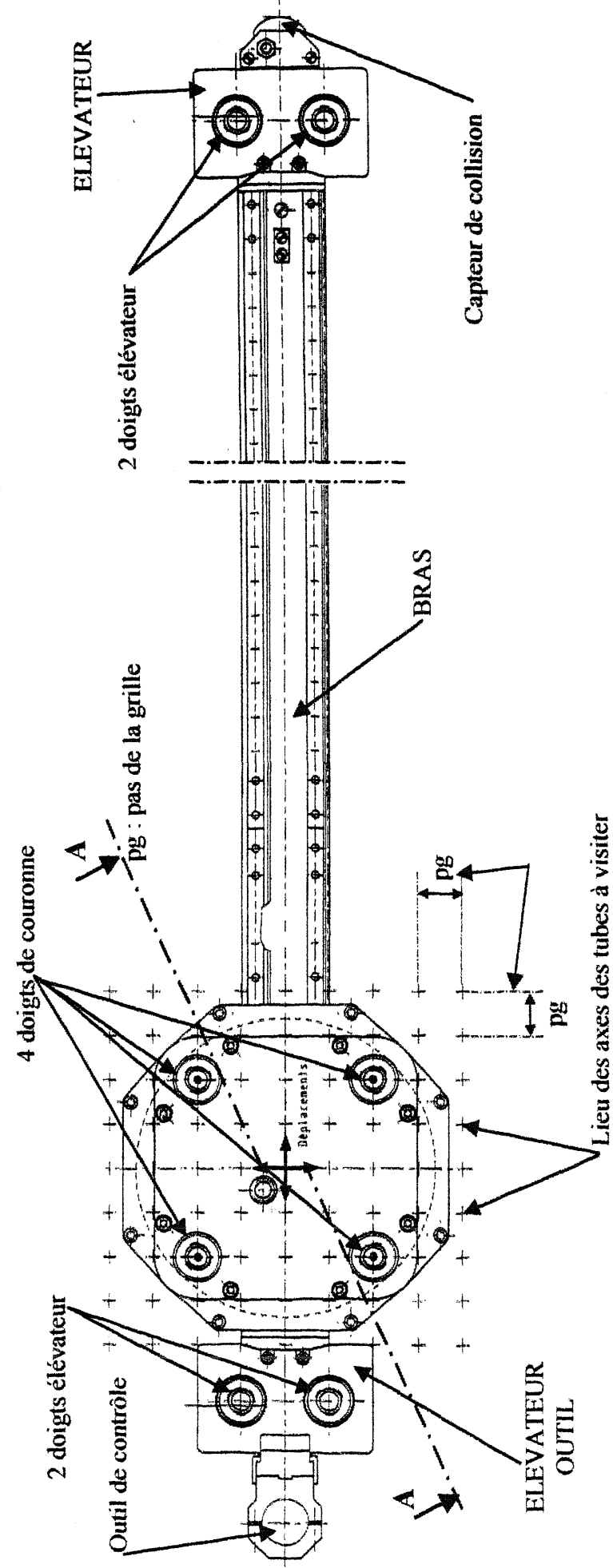
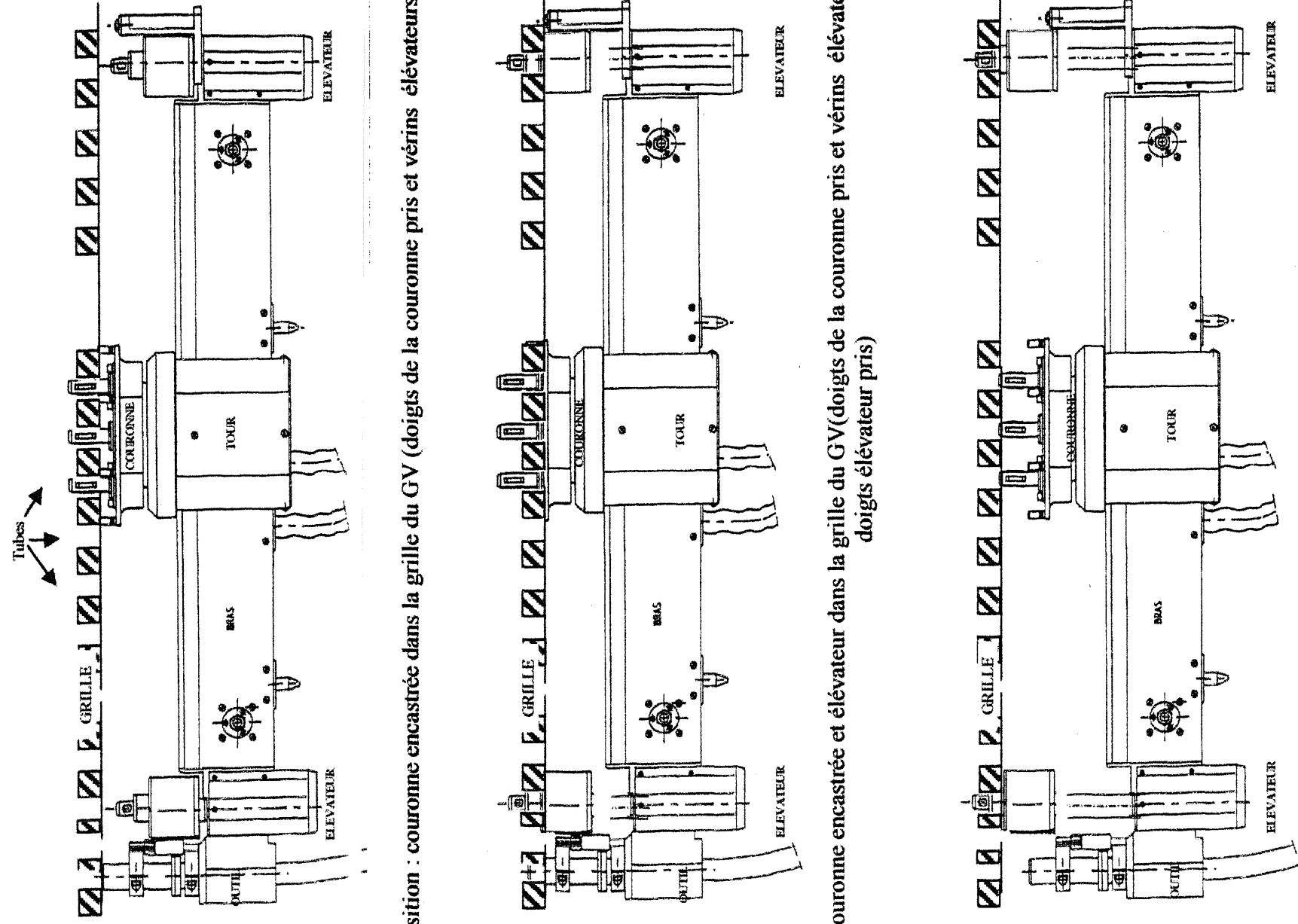


FIGURE B : Présentation du générateur de vapeur GV

VUE DE DESSUS DU BRAS



**DIFFERENTES POSITIONS DU BRAS PAR RAPPORT A LA GRILLE
 (ALTITUDE SUIVANT Z)**



Bras Béta en position : couronne encastrée dans la grille du GV (doigts de la couronne pris et vérins élévateurs en position rentrée)

Bras Béta en position : couronne encastrée et élévateur dans la grille du GV (doigts de la couronne pris et vérins élévateurs en position intermédiaire doigts élévateur pris)

Bras Béta en position : élévateur encastré dans la grille du GV (couronne libre) (vérins élévateurs en position sortie et doigts élévateur pris)

FIGURE 1 : BRAS ET MOUVEMENTS VERTICAUX DU BRAS

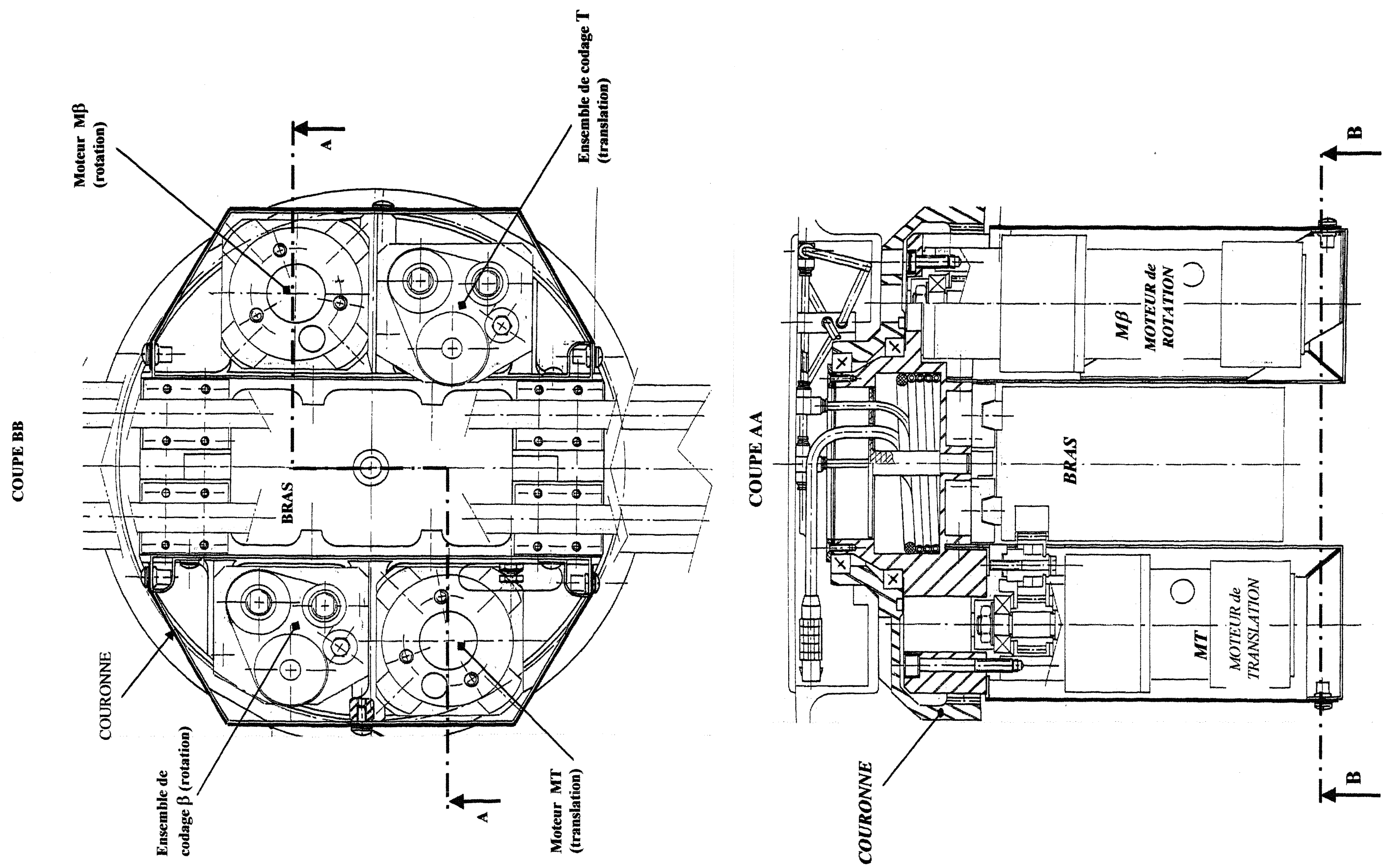
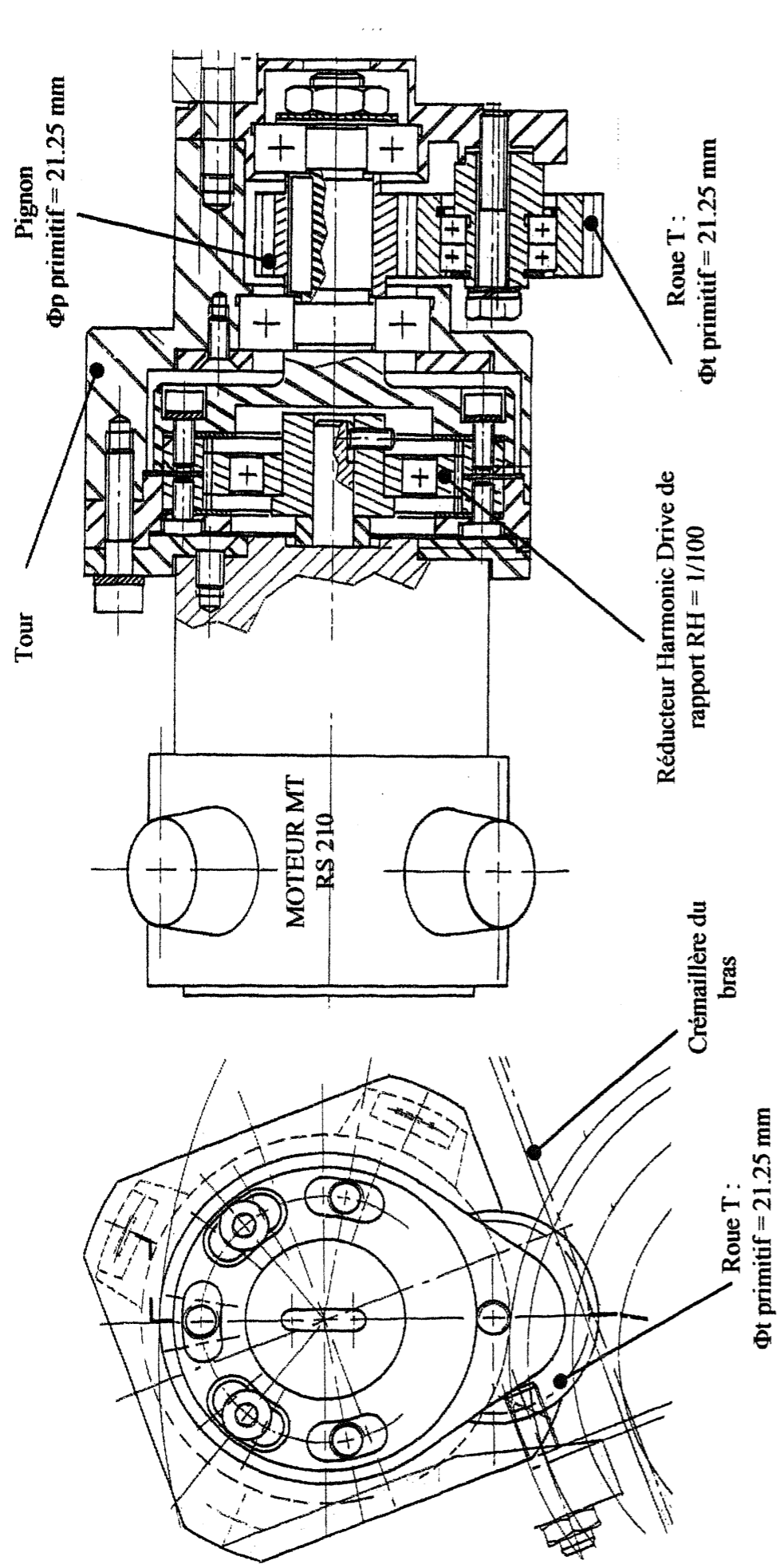


FIGURE 2 : DETAILS TOUR ET COURONNE

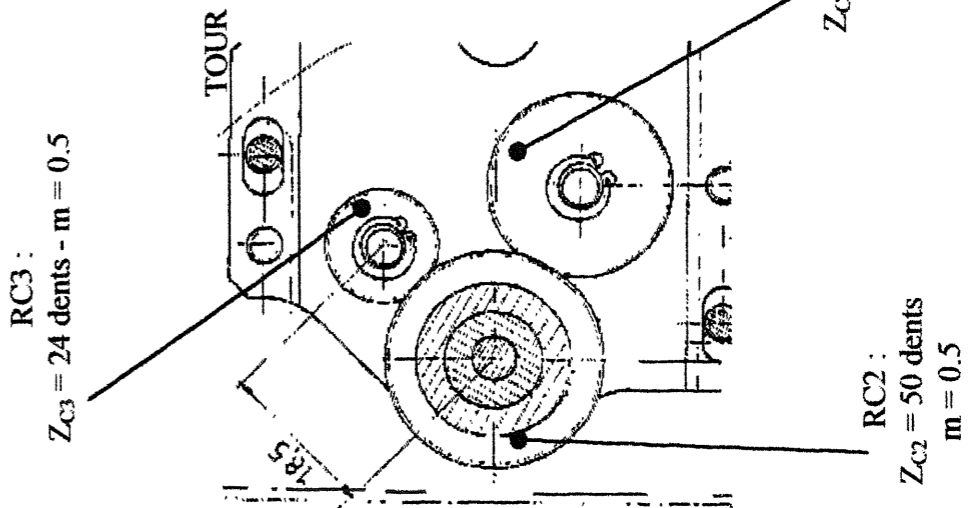
DETAIL MOTORISATION DE TRANSLATION



| Caractéristiques à Δθ = 40°C | Couple | Vitesse nominale | Tension nominale | f.c.m. par 1000 tr/min | Constante de couple | Résistance de l'induit | Inductance de l'induit | Inertie | Cst de temps mécanique |
|------------------------------|--------|------------------|------------------|------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Symboles | Co | ωn | Un | Ke | Kt | R | L | Jm | τm |
| Unité | Nm | tr/min | V | V | Nm/A | Ω | mH | 10 ⁻⁵ kg m ² | ms |
| RS 210 | 0.12 | 3000 | 23 | 5 | 0,048 | 2,3 | 1,1 | 1,3 | 13 |

ENSEMBLE DE CODAGE DE LA TRANSLATION

COUPE EE



COUPE DD

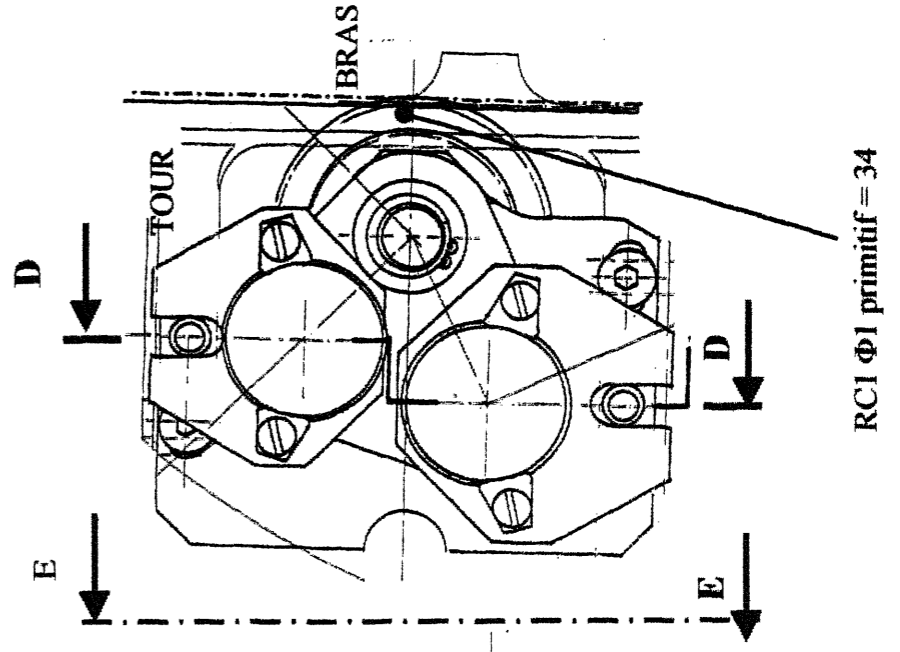
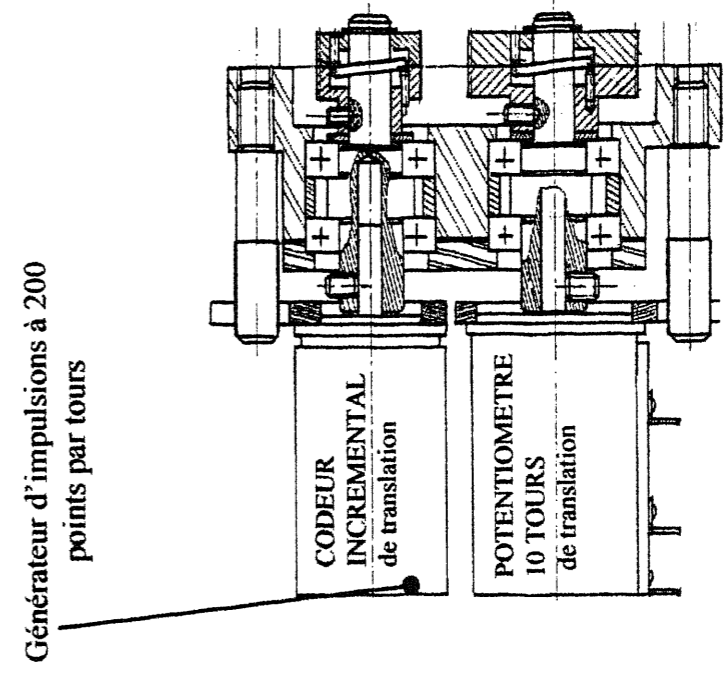


FIGURE 3 : MOTORISATION ET CAPTEURS DU MOUVEMENT DE TRANSLATION

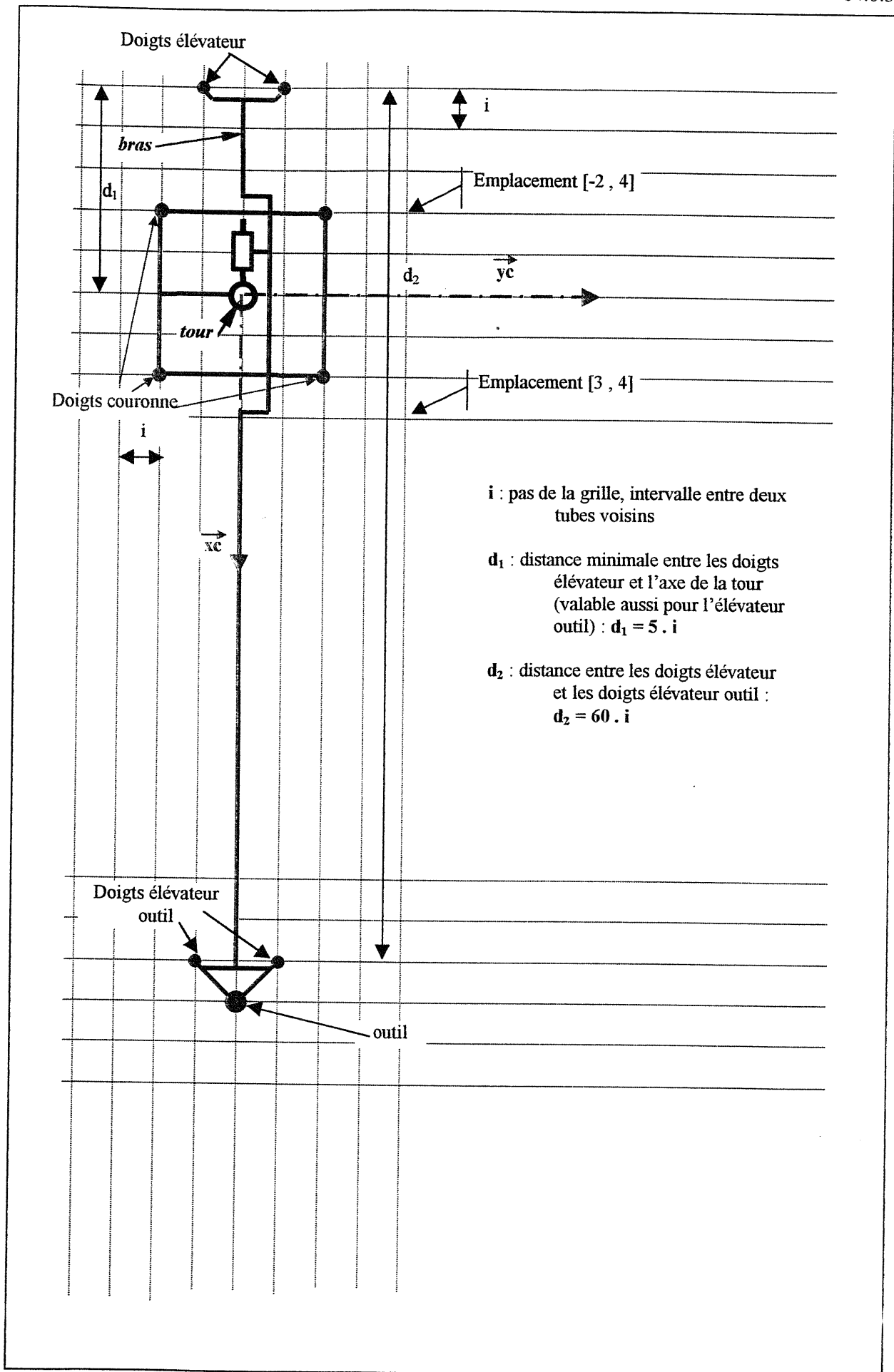
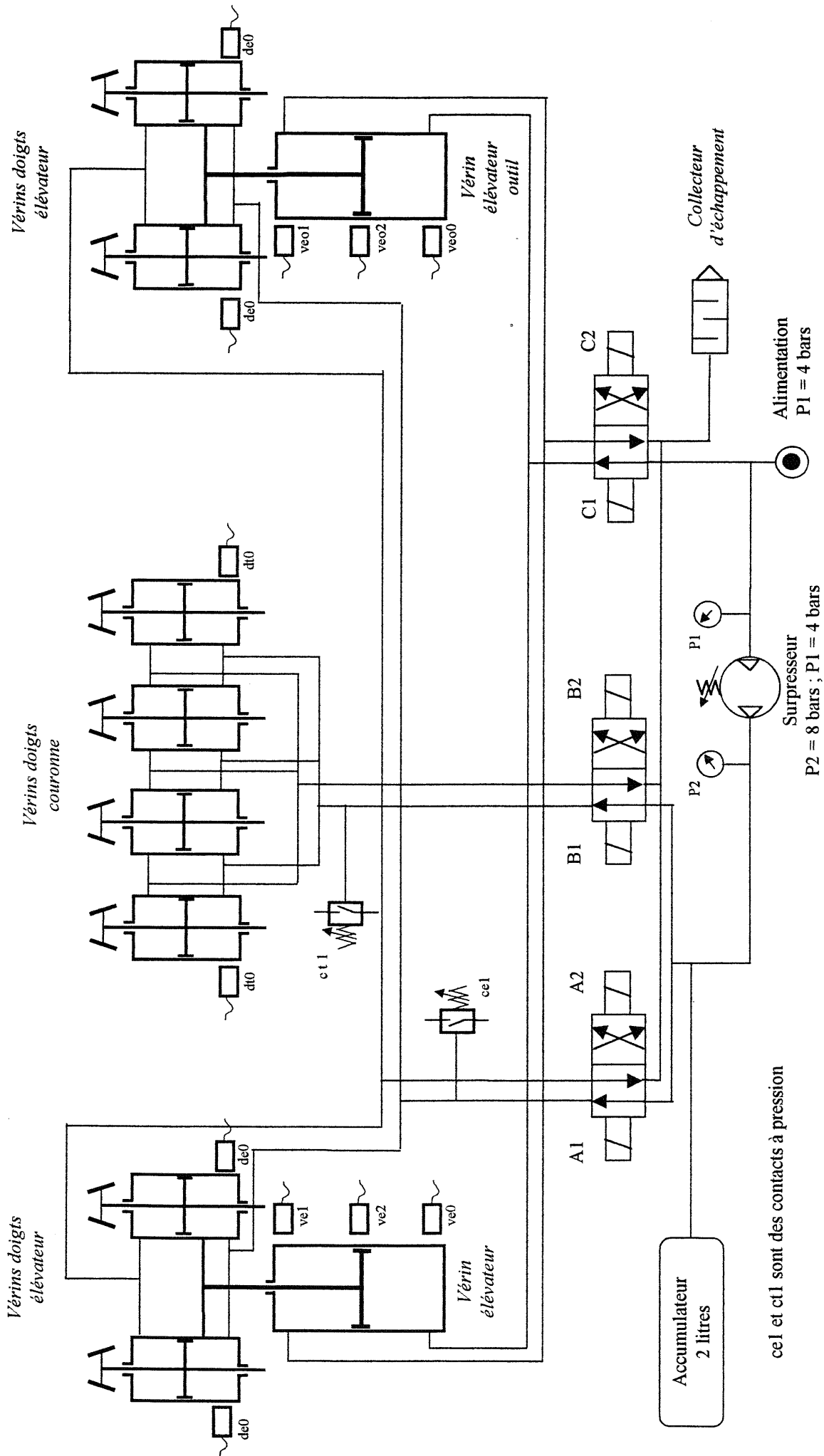


FIGURE 4 : Schéma des mouvements plans du bras



ce1 et ct1 sont des contacts à pression

FIGURE 5 : Schéma de distribution