

**ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES,
ECOLES NATIONALES SUPERIEURES DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE ,
DE TECHNIQUES AVANCEES, DES TELECOMMUNICATIONS,
DES MINES DE PARIS, DES MINES DE SAINT ETIENNE, DES MINES DE NANCY,
DES TELECOMMUNICATIONS DE BRETAGNE,
ECOLE POLYTECHNIQUE (FILIERE T.SI.).**

**CONCOURS D'ADMISSION 1999
EPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES
FILIERE MP
(Durée de l'épreuve : 3 heures)**

Sujet mis à la disposition du concours ENTPE.

Cet énoncé comporte 13 pages de texte numérotées de 1 à 13 et deux pages de présentation P1 et P2 . Le travail doit être reporté sur le document réponse de 12 pages distribué avec l'énoncé. Pour valider ce document réponse, chaque candidat doit obligatoirement y inscrire à l'encre, à l'intérieur du rectangle d'anonymat situé en première page, ses nom, prénoms (souligner le prénom usuel), numéro d'inscription et signature, avant même de commencer l'épreuve. Il est conseillé de lire rapidement la totalité du sujet avant de commencer l'épreuve. Un seul document réponse est fourni au candidat. Le renouvellement de ce document en cours d'épreuve est interdit.

Les questions sont organisées suivant une progression logique caractéristique de la discipline. Toutefois les parties peuvent être abordées indépendamment les unes des autres.

La rédaction des réponses sera la plus concise possible : on évitera de trop long développement de calcul en laissant subsister les articulations du raisonnement (la taille des cadres réservés aux réponses n'est pas représentative de la longueur des réponses attendues).

Si au cours de l'épreuve, le candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en notant et expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

Les hypothèses classiques utilisées par l'ingénieur en Sciences Industrielles lors de l'étude d'un système ne sont pas systématiquement énoncées dans le sujet, le candidat pourra formuler celles qu'il juge nécessaire.

L'usage d'un ordinateur ou d'une calculatrice est interdit.

ETUDE D'UNE CELLULE DE TRI AUTOMATIQUE DE CORPS CREUX

Le traitement des ordures ménagères pose de nombreux problèmes dans les pays industrialisés. Deux filières principales existent : l'incinération et le recyclage, cette deuxième voie impose un tri sélectif de qualité.

La filière de tri est basée sur une première séparation effectuée par les particuliers entre les ordures humides (végétaux, déchets de nourriture, etc.) et les ordures sèches (emballages, boîtes, bouteilles, etc.).

Le dispositif étudié : PLANECO permet de trier automatiquement tous les emballages ménagers issus des collectes d'ordures sèches.

Trois vues de la cellule PLANECO sont proposées :

— Le document P1 propose une vue générale d'une cellule de tri à quatre modules.

— Le document P2 montre sur une première figure le détail d'un module de tri, sur une seconde figure le bras en cours de prise d'un objet creux.

Principe de fonctionnement :

La cellule de tri est alimentée au moyen d'une *trémie* de stockage équipée d'un tapis élévateur. Un dispositif magnétique « *overband* » élimine les objets ferreux puis un *crible* supprime les objets de trop petite taille. Un *égrenneur* permet ensuite d'étaler les objets restant en vrac suivant une seule couche sur le tapis convoyeur d'un mètre de large.

A l'entrée de chaque module on trouve donc sur un tapis une monocouche d'objets creux à trier.

Chaque module de tri assure sa fonction selon la procédure suivante :

- une caméra vidéo couleur détermine d'abord la position, puis la forme et la couleur de l'objet visé.
- L'objet est ensuite saisi par le bras articulé au moyen d'une ventouse.
- Lors de la saisie, un capteur électromagnétique situé dans la ventouse identifie les objets métalliques (principalement ceux en aluminium).
- Si l'objet contient du métal, l'analyse d'images détermine son appartenance à un groupe connu : brique alimentaire, bouteille (conteneur de boissons) ou barquette.
- Un capteur de verre, également situé dans la ventouse, reconnaît les verres par contact.
- Tous les objets reconnus à ce stade sont déposés dans des goulottes appropriées.
- Les emballages restant : en plastique ou en carton sont maintenus sur la ventouse.
- Ils sont amenés par le bras à un spectromètre infrarouge, qui détermine le type de matière plastique de l'objet : PVC, PET, PEHD tous recyclés ou autres plastiques non recyclés.
- Un classificateur combine alors les données de vision et celles fournies par le spectromètre pour reconnaître par exemple un emballage en « Polyéthylène (PET) azuré ».
- Après identification, tous les objets pris sont déposés dans des goulottes différentes.

Le nombre de modules à installer dépend des quantités à traiter, on peut citer par exemple qu'une cellule à quatre modules permet de traiter 2000 tonnes de déchets hors verre par an pour un fonctionnement en deux fois huit heures par jour ce qui correspond à la « production » de déchets d'une population française de 130 000 habitants en fin des années 1990.

I ETUDE FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLE DE LA CELLULE

I.1 Etude fonctionnelle de la cellule de tri

La description fonctionnelle générale au moyen de l'outil S.A.D.T. est ébauchée sur le document DI.1 par les niveaux A-0 et A0.

QI.1.1 : Pour le niveau A0, renseigner les rubriques S1 à S5 en utilisant les données de présentation générale de la cellule.

Le niveau A0 se décompose en cinq boîtes, l'étude se poursuit par la description du niveau A5.

QI.1.2 : A partir du choix des cinq fonctions :

- A51 : Choisir et analyser l'image d'un objet
- A52 : Prendre un objet
- A53 : Analyser les informations sur l'objet
- A54 : Placer l'objet devant le spectromètre
- A55 : Placer l'objet dans une goulotte

compléter la description du bloc A5 : TRIER LES OBJETS.

I.2 Etude de la liaison entre la vision et la prise d'un objet

Chaque cellule de tri est équipée d'un bras de manipulation des objets, la structure de ce bras est particulière (voir documents DI.2.a et DI.2.b). La position de l'extrémité de la trompe de prise (6) dans le châssis (1) est obtenue en coordonnées sphériques (Théta, Phi, Rho) dans un repère $R_0 : (O_0, \vec{X}_0, \vec{Y}_0, \vec{Z}_0)$ dont le centre O_0 est physiquement dégagé afin de pouvoir y placer une caméra de vision fixe dans le châssis. En position de fonctionnement dans la cellule l'axe (O_0, \vec{Z}_0) est parallèle à la direction du tapis (dans le sens du déplacement) à une distance d de celui-ci, l'axe (O_0, \vec{X}_0) correspond à la verticale descendante.

L'objet de cette étude est de déterminer les relations entre la position de l'objet sélectionné sur le tapis (point P_c) et les coordonnées $(\theta_c, \varphi_c, \rho_c)$ à appliquer comme consigne de la commande du bras pour saisir l'objet.

QI.2.1 : Le tapis est considéré comme un plan d'altitude $x = d$ dans le repère de la figure DI.2.a soit X_c, Y_c et Z_c les coordonnées du point P_c de prise de l'objet choisi. Compléter la figure fournie en faisant apparaître $\theta_c, \varphi_c, \rho_c, X_c, Y_c$ et Z_c en déduire les expressions θ_c, φ_c et ρ_c en fonction de X_c, Y_c et Z_c .

II ETUDE DE LA PRISE DE L'OBJET DANS UNE DIRECTION DONNEE

Les informations délivrées par la caméra de vision permettent de déterminer les coordonnées Théta, Phi et Rho à effectuer pour saisir un objet. L'étude suivante (indépendante de la précédente) s'intéresse à la commande de la troisième coordonnée Rho. Pour toute cette étude les autres paramètres sont supposés constants $\text{Théta} = \text{Phi} = 0$.

II.1 Etude structurelle de la partie opérative de l'axe Rho

II.1.1 Etude de la modélisation

Le document DII.1 présente le graphe de structure et le schéma cinématique de la partie mécanique de l'axe rho.

QII.1.1.1 : On s'intéresse à la chaîne fermée de solides [7, 5, 6, 51], Déterminer le degré d'hyperstatisme de cette chaîne. (La technologie de ce mécanisme est telle qu'une modélisation plane ne peut pas être retenue pour cette question).

QII.1.1.2 : Quel type de liaison faudrait-il associer aux articulations en G et H pour rendre le modèle de cette chaîne isostatique ?

II.1.2 Etude du mouvement de la trompe

Cette étude est destinée à préciser les performances cinématiques du système et à préparer la vérification de la motorisation.

Le paramétrage est défini sur le document DII.1. L'étude cinématique est conduite à partir d'une modélisation plane.

QII.1.2.1 : A partir du schéma cinématique DII.1, compléter le schéma proposé sur la feuille réponse en y ajoutant les pièces [3, 4, 5, et la courroie 8] . Φ représente le diamètre d'une poulie et $\Phi/2$ le diamètre de l'autre.

QII.1.2.2 : On note $\vec{\Omega}_{Si/Sj} = \omega_j \cdot \vec{Y}_0$, calculer $\frac{\omega_{3/4}}{\omega_{5/4}}$ en déduire que $\omega_{4/3} = -\omega_{5/3}$.

Pour $\gamma = 0$ le réglage est tel que $\vec{Z}_0 = \vec{Z}_4 = \vec{Z}_5$ (on rappelle que $\gamma = (\vec{Z}_0, \vec{Z}_4)$).

QII.1.2.3 : Montrer alors que la trajectoire de I appartenant à 5 dans le repère 3 est l'axe $A\vec{X}'_3$.

QII.1.2.4 : Montrer enfin à partir du schéma cinématique (document DII.1) et de considérations géométriques simples que le mouvement de la trompe (6) par rapport à (3) est une translation rectiligne.

On pose $\vec{AF} = L \cdot \vec{Z}_4$; $\vec{FI} = -L \cdot \vec{Z}_5$ et on définit les points G_4 et G_5 par $\vec{FG}_4 = -\frac{L}{2} \cdot \vec{Z}_4$; $\vec{FG}_5 = -\frac{L}{2} \cdot \vec{Z}_5$.

QII.1.2.5 : Déterminer $\vec{V}_{G_4,4/3}$; $\vec{V}_{G_5,5/3}$ et $\vec{V}_{I,5/3}$ en fonction de γ , $\dot{\gamma}$ et L . (Il est inutile de formuler la réponse dans un repère orthonormé particulier).

On s'intéresse maintenant à la chaîne [3, 4, 10, 11 , 12] (document DII.1) qui contient la motorisation de l'axe rho : {rotor, vis à billes} \leftrightarrow 11 ; {stator} \leftrightarrow 10.
Le paramétrage de la chaîne est le suivant :

Solides	Type de liaison	Caractéristiques Géométriques de la liaison	Paramètres de position de la liaison
(4) - (3)	Pivot	Axe : (A, \vec{Y}_0)	$(\vec{X}_3, \vec{X}'_4) = \alpha$
(10) - (4)	Pivot	Axe : (C, \vec{Y}_0)	$(\vec{X}'_4, \vec{X}_{10}) = \beta$
(11) - (10)	Pivot	Axe : (C, \vec{X}_{10})	$(\vec{Y}_{10}, \vec{Y}_{11}) = \delta$
(12) - (11)	Hélicoïdale	Axe : (C, \vec{X}_{12})	$(\vec{Y}_{12}, \vec{Y}_{11}) = \delta$ $\vec{C}B = x \vec{X}_{10}$ avec $x = \frac{\delta \cdot h}{2 \cdot \pi}$
(12) - (3)	Pivot	Axe : (B, \vec{Y})	$(\vec{X}_3, \vec{X}_{12}) = \epsilon$

$\vec{AC} = -c \vec{X}'_4$ avec $c > 0$ $\vec{AB} = b \vec{X}_3$ avec $b > 0$ $\vec{X}_{10} = \vec{X}_{12}$; $\vec{Y}_{10} = \vec{Y}_{12}$; $\vec{Z}_{10} = \vec{Z}_{12}$
h : pas géométrique.

QII.1.2.6 : Montrer que $\gamma = \alpha - \frac{\Pi}{2}$ en remarquant que $\vec{X}'_3 = \vec{X}_0$.

QII.1.2.7 : Déterminer alors l'expression de δ en fonction de γ et des caractéristiques géométriques de la chaîne [3,4,10,11,12].

II.1.3 Etude de la motorisation : couple statique

On étudie le mécanisme de l'axe rho à vide dans la position particulière de la figure : $\gamma = -20^\circ$, seules les masses des solides (6) $M_6 = 5$ kg, (4) $M_4 = 15$ kg et (5) $M_5 = 7.5$ kg sont considérées non nulles. On retient une modélisation plane. On rappelle que l'axe \vec{X}_0 représente la verticale descendante.

QII.1.3.1 : Déterminer graphiquement les actions en H et en G : $\left\{ \mathbf{T}_{(51 \rightarrow 6)} \right\}_H$; $\left\{ \mathbf{T}_{(51 \rightarrow 7)} \right\}_G$

QII.1.3.2 : Déterminer alors les actions en E et en D : $\left\{ \mathbf{T}_{(41 \rightarrow 7)} \right\}_E$; $\left\{ \mathbf{T}_{(41 \rightarrow 3)} \right\}_D$

QII.1.3.3 : En précisant la démarche à utiliser (solide isolé, équation(s) utilisée(s)) montrer que l'on peut déterminer

- a : la tension dans le brin tendu de la courroie (on néglige la tension de l'autre brin) ;
- b : les actions en B et C qui permettent alors de calculer le couple statique du moteur.

II.1.4 Etude de la motorisation : puissance du moteur

Pour l'ensemble du mécanisme de mise en mouvement de l'axe rho les masses de tous les solides sont négligées sauf celles des solides (6), (4) et (5). Les matrices d'inertie des solides 4 et 5 sont :

$$\text{solide 4 : } \begin{bmatrix} A_4 & -F_4 & -E_4 \\ -F_4 & B_4 & -D_4 \\ -E_4 & -D_4 & C_4 \end{bmatrix}_{A(\bar{X}4, \bar{Y}4, \bar{Z}4)} \quad ; \quad \text{solide 5 : } \begin{bmatrix} A_5 & -F_5 & -E_5 \\ -F_5 & B_5 & -D_5 \\ -E_5 & -D_5 & C_5 \end{bmatrix}_{G_5(\bar{X}5, \bar{Y}5, \bar{Z}5)}$$

QII.1.4.1 : Déterminer l'énergie cinétique de l'ensemble mobile dans le mouvement par rapport à R0 en fonction de γ , $\dot{\gamma}$ et des grandeurs caractéristiques du mécanisme.

QII.1.4.2 : Déterminer la puissance des efforts extérieurs à l'ensemble mobile puis la puissance des efforts intérieurs à l'ensemble mobile en précisant vos hypothèses.

QII.1.4.3 : En déduire la puissance nécessaire au moteur en fonction de γ , $\dot{\gamma}$ et des caractéristiques d'inertie des solides de l'ensemble.

II.2 Etude de la commande du déplacement de la trompe

La commande de déplacement de la trompe est asservie en position afin de prendre un objet repéré par la caméra, de placer les objets creux (pris dans la trompe) devant le spectromètre puis d'éjecter les objets devant les bacs de tri sélectionnés.

Cette commande permet à partir d'une consigne ρ_{CONS} de piloter la position réelle ρ_{RE} . Le capteur de mise en position est installé en A et mesure le paramètre α de la liaison entre (4) et (3) (voir document DII.1).

II.2.1 Modélisation de la commande

QII.2.1.1 : Compléter le schéma bloc de la commande de déplacement (DOC II.2.a) en justifiant de manière qualitative les fonctions de transfert introduites par les résultats des questions de la partie II.1. Faire apparaître les grandeurs physiques et informationnelles sur les liens entre blocs.

II.2.2 Etude des performances de la commande

Pour poursuivre l'étude une modélisation simplifiée est proposée sur le document DOC II.2.b dans lequel : $C_0(p) = Kx$ (Kx : gain réel variable) ; $G_2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ V/mm}$; $K_m = 5 \text{ rd/s/V}$; $\tau_m = 1 \cdot 10^{-2} \text{ s}$ et $R = 10^{-2} \text{ mm/rd}$.

QII.2.2.1 : Tracer le schéma équivalent à retour unitaire. En déduire G_1 tel que la partie du schéma extérieure à la boucle ait une fonction de transfert équivalente à l'unité, justifier ce choix. Donner l'expression numérique de la fonction de transfert en boucle ouverte.

QII.2.2.2 : Montrer alors que la précision de réponse à un échelon de déplacement est indépendante de la valeur de Kx .

On souhaite conserver pour cette commande une stabilité définie par les marges suivantes :

— marge de gain $MG = 10$ dB ;

— marge de phase $M\phi = 45^\circ$.

QII.2.2.3 : En prenant $K_x = 10^{+4}$ tracer sur le diagramme fourni l'allure du lieu de transfert permettant de définir les marges de stabilité de la commande de position. En déduire la valeur de K_x exprimée en dB conduisant aux marges définies ci-dessus.

Afin d'améliorer les performances de cette commande on modifie le schéma bloc en introduisant une génératrice tachymétrique qui contrôle la fréquence de rotation du moteur. Voir DOC II.2.c. dans lequel : $C1o(p) = K\theta$ (avec $K\theta$: gain réel variable) et $G3 = 2 \cdot 10^{-2}$ V/rd/s .

QII.2.2.4 : On s'intéresse dans un premier temps à la partie insérée dans le schéma précédent : depuis $i\theta$ jusqu'à $\dot{\theta}$. Tracer le schéma équivalent à retour unitaire. En déduire $G4$ tel que la partie du schéma extérieure à la boucle de la partie insérée ait une fonction de transfert équivalente à l'unité. En déduire la valeur informationnelle (nature de l'information portée) de $i\theta$

QII.2.2.5 : En prenant maintenant $K_x = 10^{+6}$ et $K\theta = 10$ tracer sur le diagramme fourni l'allure du lieu de transfert permettant de définir les marges de stabilité de la commande de position. En déduire la nouvelle valeur de K_x (toujours en dB) conduisant aux marges définies ci-dessus.

QII.2.2.6 : Quel est alors l'intérêt de la boucle de vitesse introduite dans le schéma sur les performances de la commande en position ? Quel type de correcteur placé en $Co(p)$ aurait une influence comparable à la présence de cette boucle de vitesse ?

III ETUDE DE LA COMMANDE SEQUENTIELLE D'UN MODULE DE TRI

La structure des flux d'informations binaires entrant et sortant de la partie commande P.C. d'un module de tri peut se représenter par le schéma du document DOC III.a. Le grafcet donné par le document DOC III.b définit le comportement séquentiel de la P.C. du module retenu.

III.1 Analyse du flux informationnel

Le DOC III.a fait apparaître huit liens i_1 à i_8 entre les différentes parties du système. Chaque lien correspond en fait à un vecteur (ensemble ordonnée de variables logiques) d'entrée ou de sortie dont la taille n est pas définie.

Q III.1.1 : En utilisant le grafcet du document DOC III.b et la description générale du fonctionnement d'un module de tri (page 1) donner pour chaque lien un exemple d'information binaire échangée.

III.2 Vérification des performances de la commande séquentielle

Q III.1.2 : A partir du grafcet du document DOC III.b et de la description générale du fonctionnement page 1. Proposer une description logique correspondant aux trois réceptivités r_1 , r_2 et r_3 .

La macroétape M3 correspond à la commande de mise en position du bras manipulateur, les coordonnées θ_0 et ϕ_0 à atteindre sont connues la coordonnée ρ_0 n'est pas connue de manière précise, la stratégie de commande consiste à aller en vitesse rapide à une distance $\rho_0 - \Delta\rho$ fixe

quelle que soit la position de l'objet puis à continuer le déplacement à vitesse lente jusqu'au déclenchement d'un capteur de contact tc situé dans la trompe.

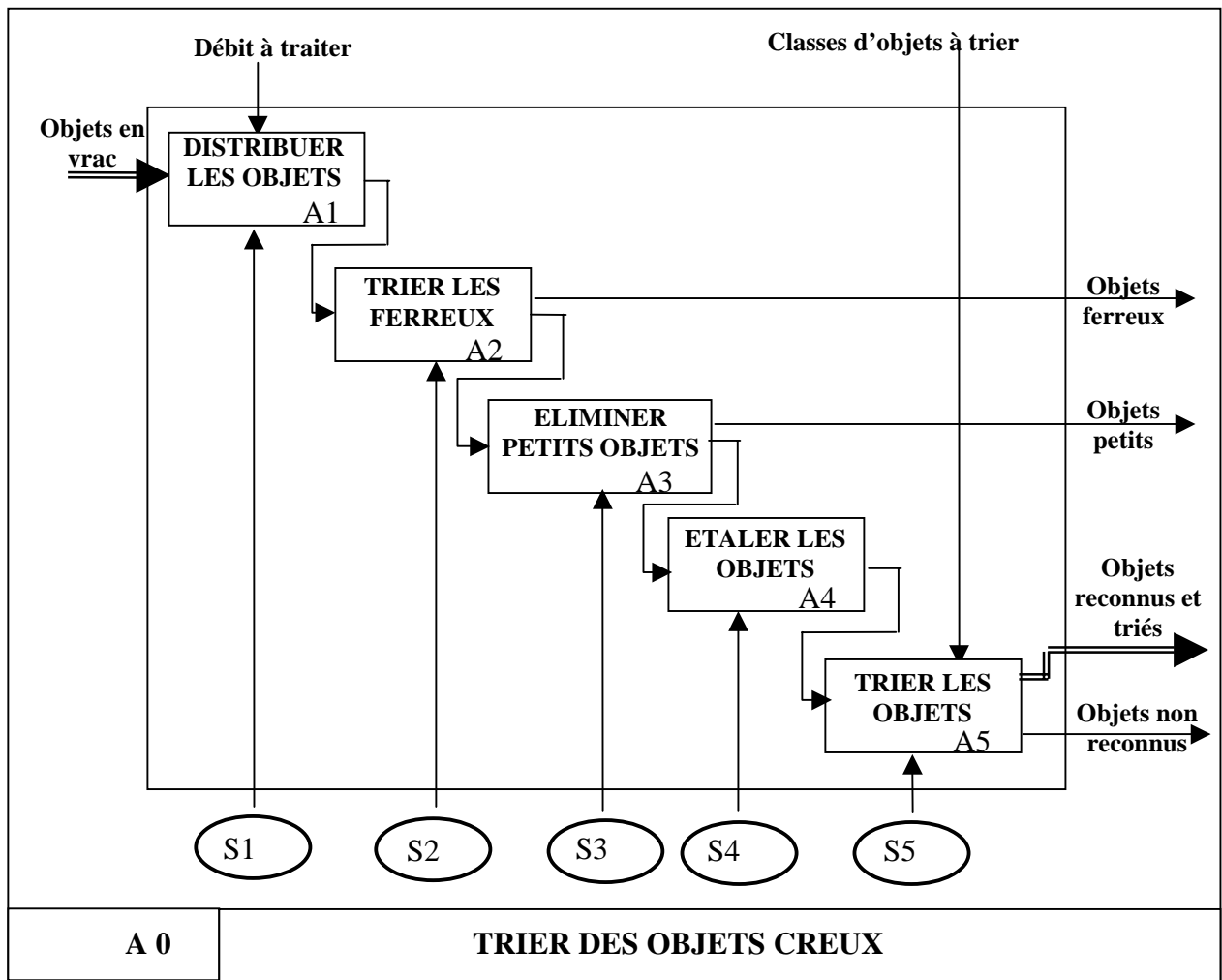
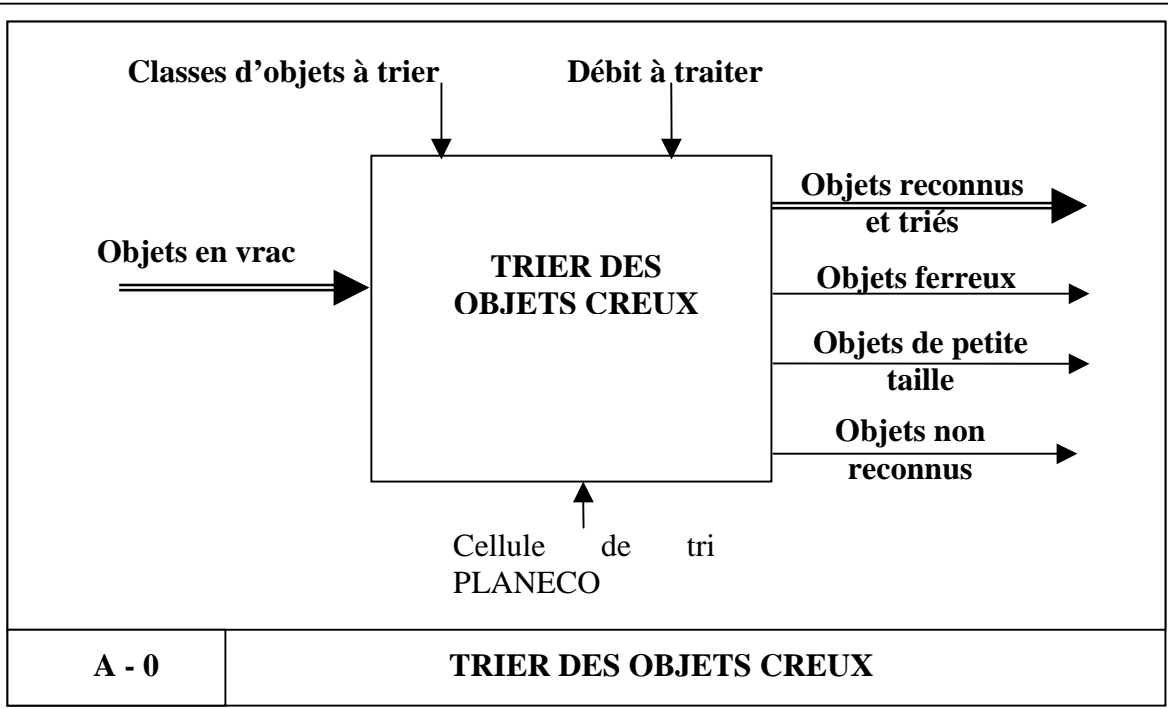
Q III.1.3 : Tracer l'expansion de la macroétape M3.

Les durées moyennes d'étapes où de macro-étapes sont données sur le document DOC III.b. Les statistiques de fonctionnement de la cellule sont les suivantes :

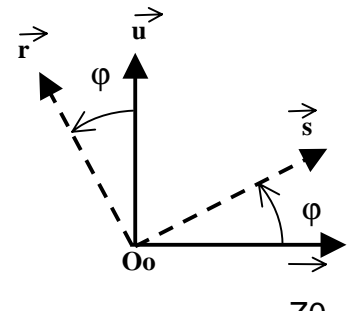
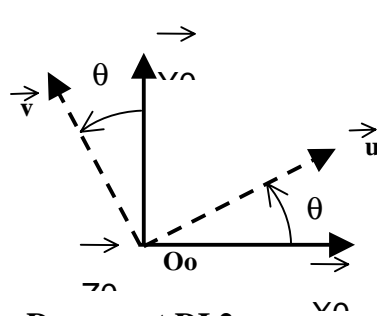
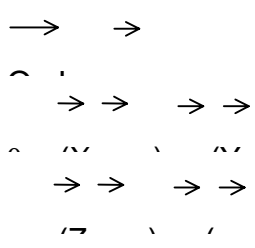
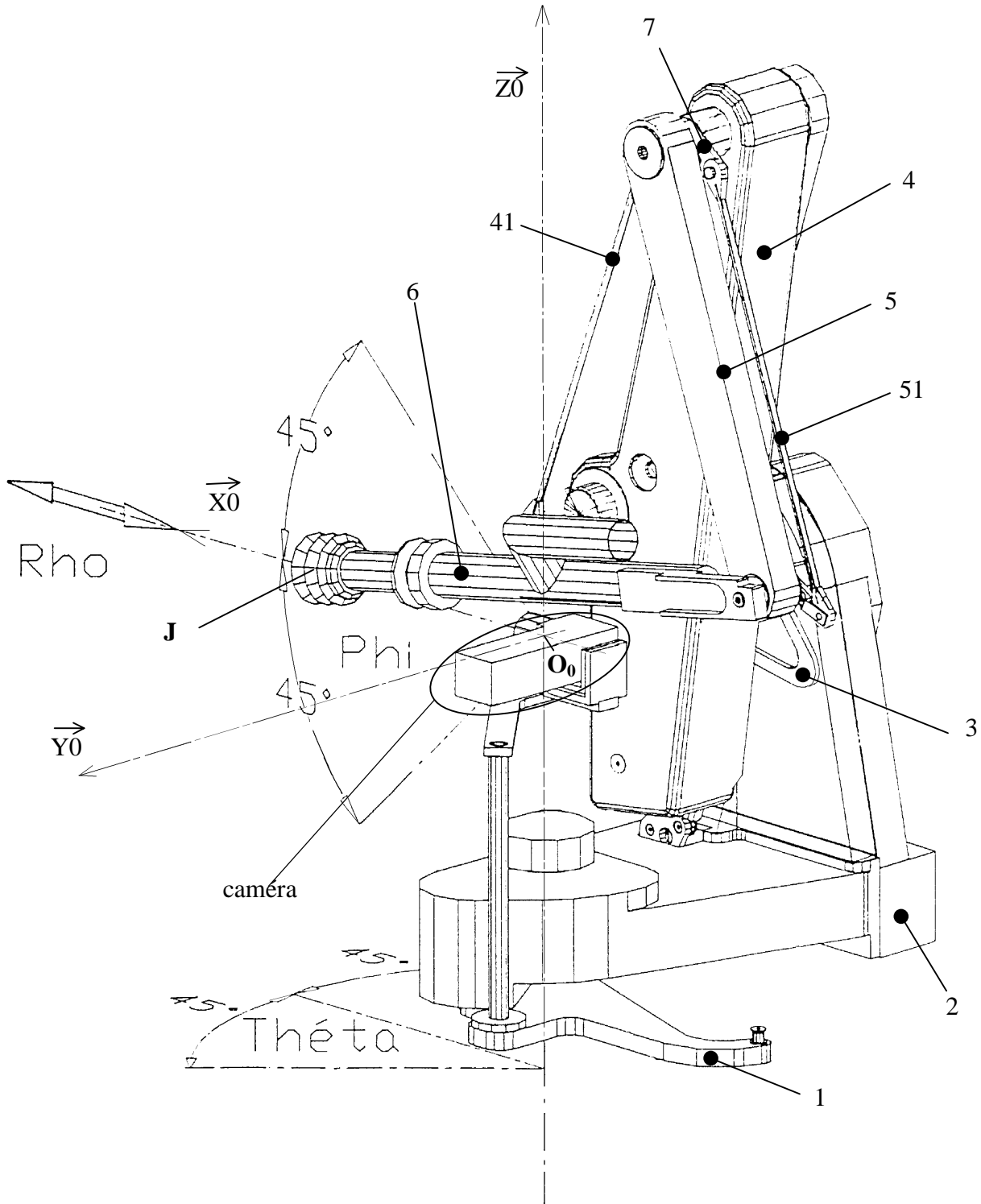
- 26 % d'objets métalliques ;
- 30 % d'objets en verre ;
- 33,33 % de bouteilles plastiques en PVC ou PET ;
- 10,66 % d'objets non reconnus.

(remarque : les valeurs numériques fournies ne reflètent pas la réalité, elles permettent un calcul simple sans machine)

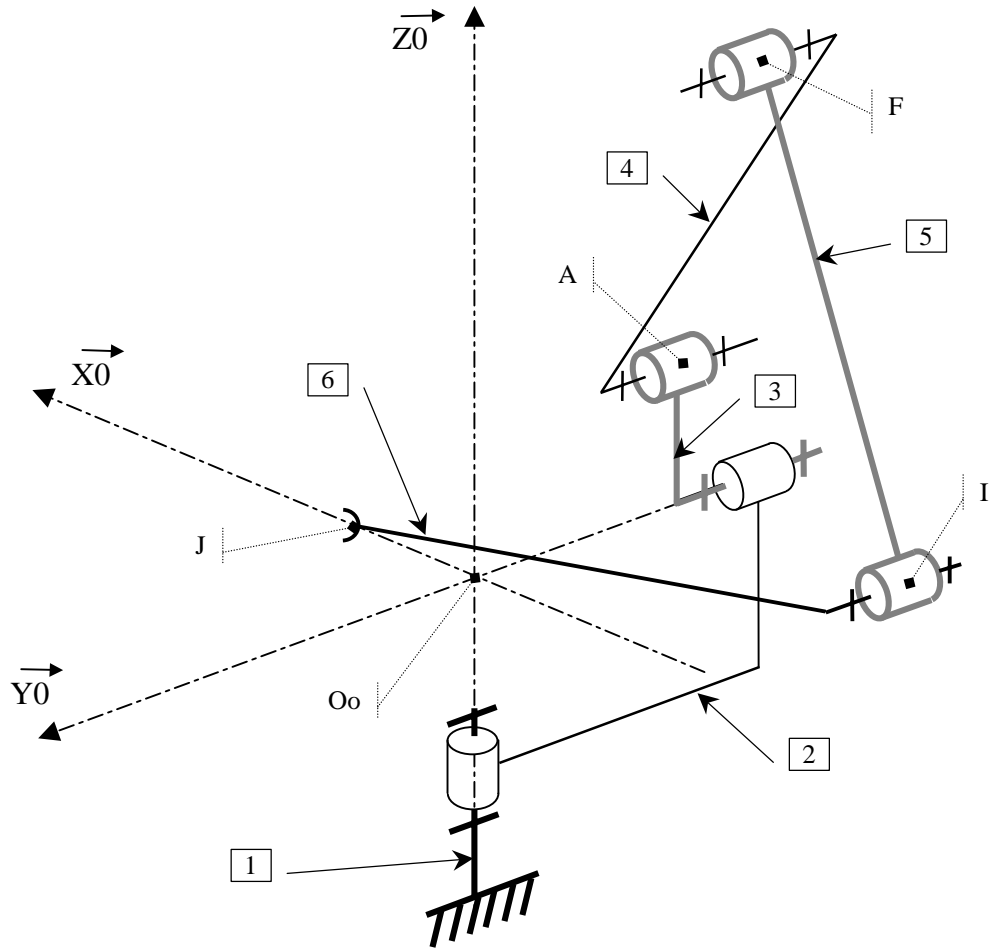
Q III.1.4 : Déterminer la capacité de tri exprimée en objets triés par heure.



Document DI.1



Document DI.2.a

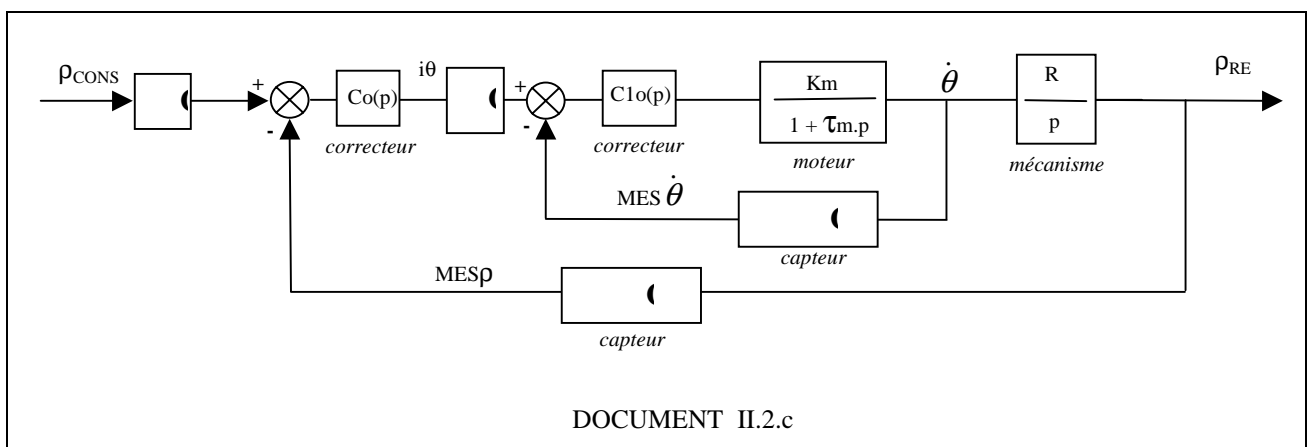
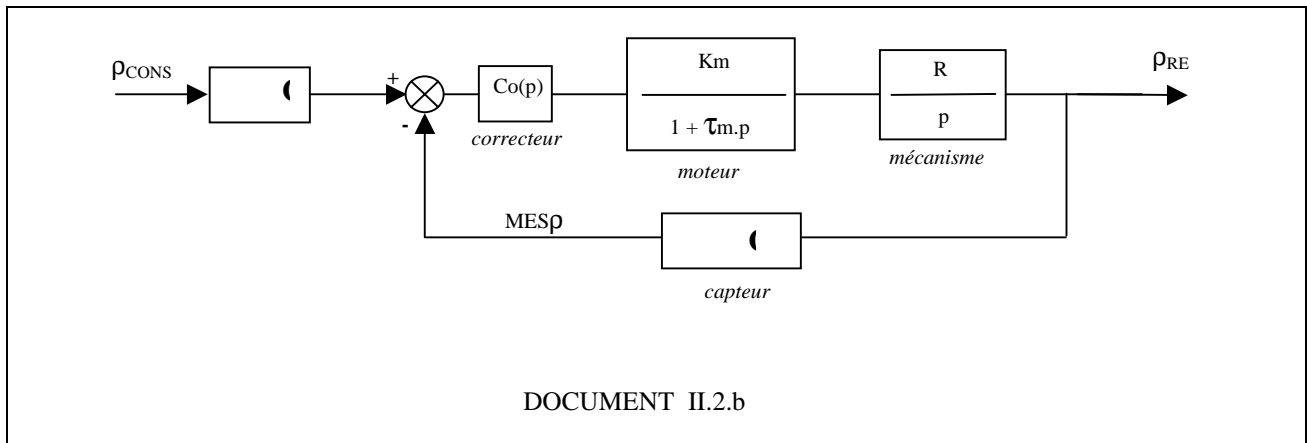
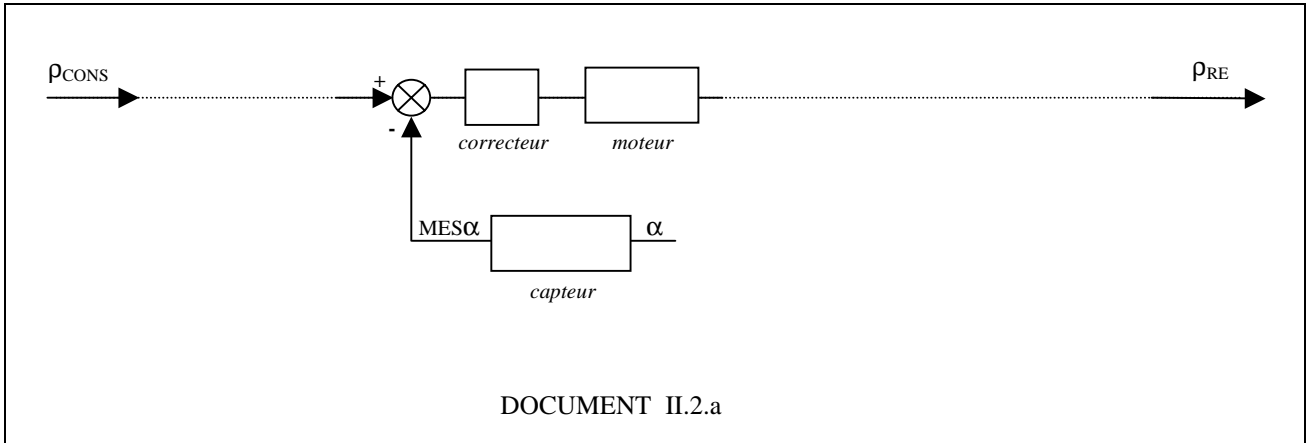


La liaison (2)-(1) pilote Théta

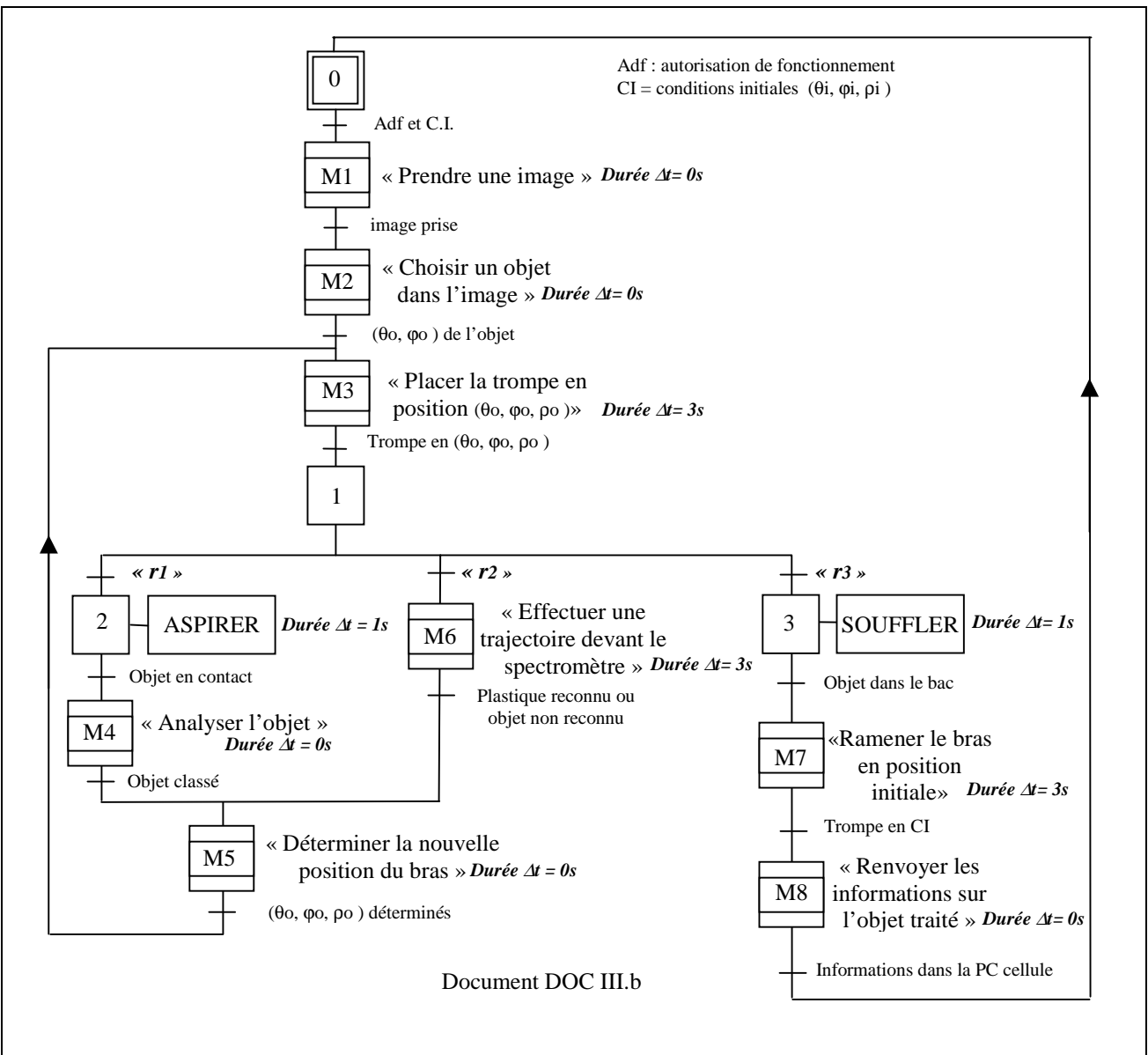
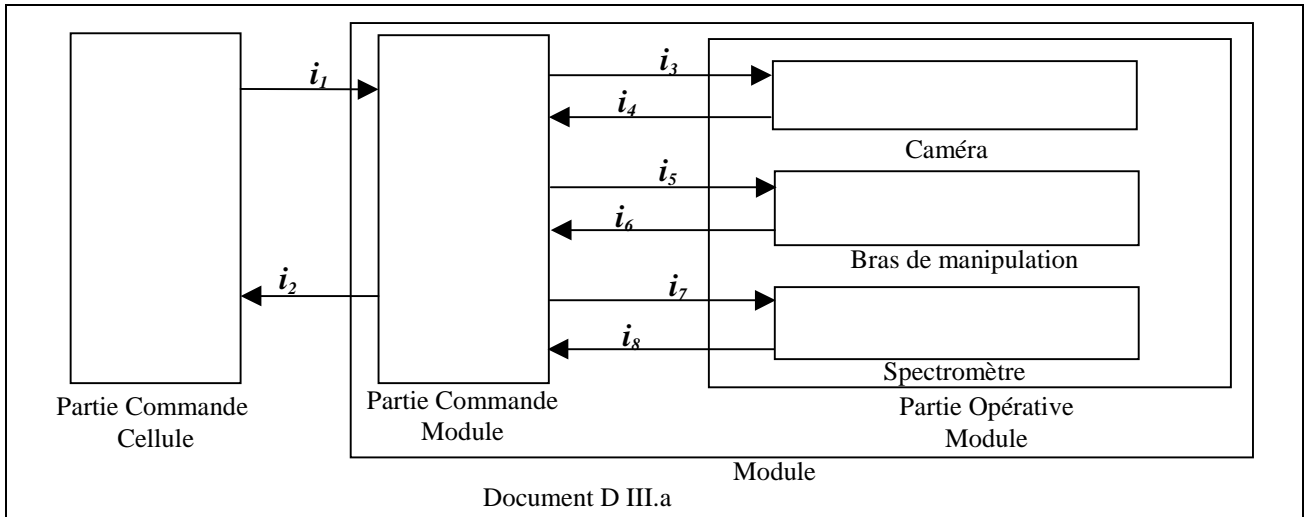
La liaison (3)-(2) pilote Phi

La chaîne {(3) (4) (5) (6)} pilote Rho (Ce mécanisme est détaillée sur le document DII.1)

Document DI.2.b



Documents II.2



Documents III