

CONCOURS NATIONAL D'INGÉNIEURS DE MAURITANIE

(CNIM)



CONCOURS 2018

ÉPREUVE DE SCIENCE DE L'INGENIEUR

Durée de l'épreuve : 3 heures

**L'usage de l'ordinateur, de la calculatrice ou
tout autre objet connecté est interdit.**

L'énoncé de cette épreuve comporte 15 pages de texte.

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 expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

Concasseur à mâchoire: PE400×600

Introduction :

Le concasseur à mâchoire (figure 1) est une machine à broyer les roches (granite, calcaire, etc.) pour des fins industrielles (métallurgie minière, industrie de construction, béton et décoration). Généralement, ce type de concasseur est constitué d'une mâchoire fixe et d'une autre mobile qui est animée d'un mouvement de va et vient à l'aide d'une excentrique commandée par un moteur. Les roches sont introduites à la partie supérieure du concasseur (Gape). Lorsque la mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe, elle écrase les fragments solides. Lorsqu'elle s'écarte, ceux-ci descendent dans une partie plus étroite où ils sont à nouveau écrasés et ainsi de suite jusqu'à ce qu'ils atteignent l'orifice de sortie.

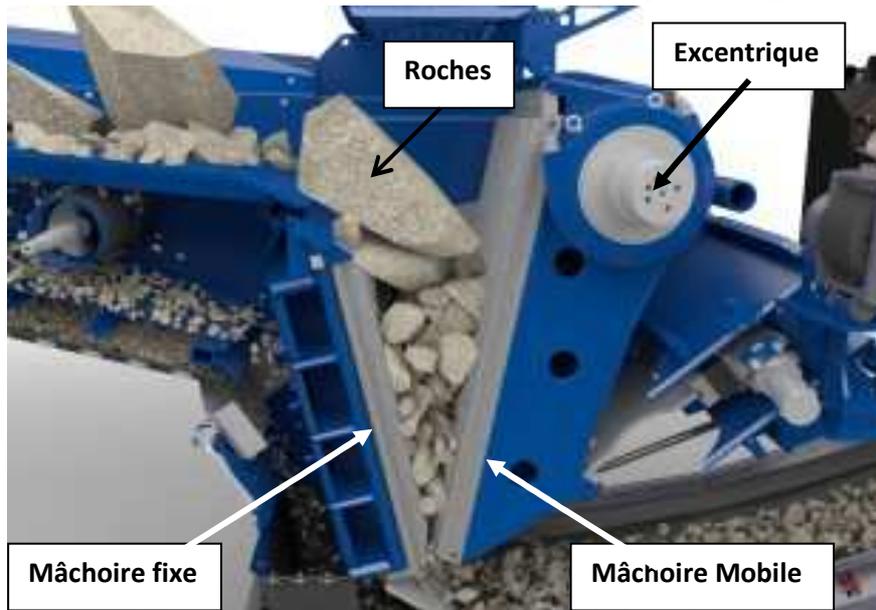


Figure 1: Concasseur à mâchoire.

La finesse du granulat, obtenue après la phase du concassage, dépend de l'écartement des deux mâchoires. Trois paramètres sont utiles pour caractériser cet écartement (figure 2) :

- *OSS* (Open Side Set) : distance maximale entre les deux mâchoires ;
- *CSS* (Closed Side Set) : distance minimale entre les deux mâchoires ;
- *Throw* : l'avance de la mâchoire mobile ($Throw = OSS - CSS$).

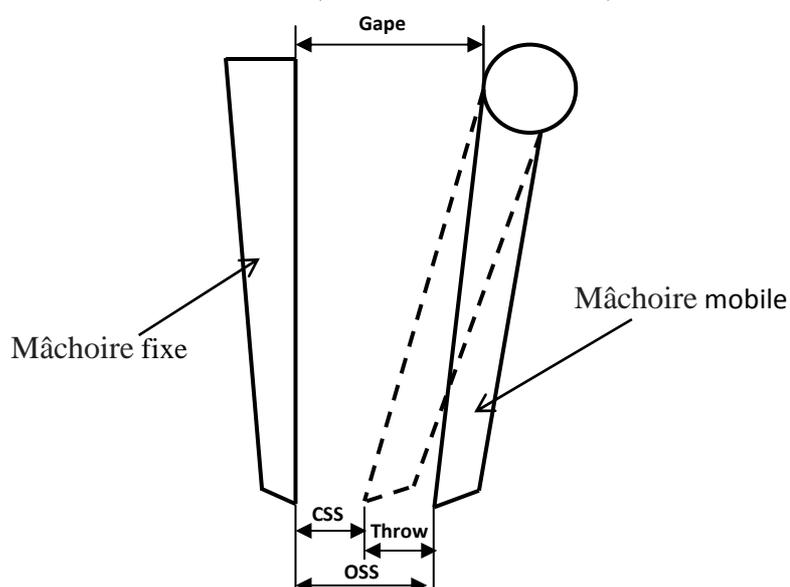


Figure 2 : Paramètres d'écartement de la mâchoire mobile.

Le réglage de ces trois paramètres (*CSS, OSS et Throw*) est d'une grande importance afin de maîtriser la finesse du granulat. Par exemple, les granulats pour le béton (figure 3), présentent plusieurs dimensions afin de répondre à la composition des matériaux pour la fabrication d'ouvrages du secteur du génie civil (BTP) (tableau 1).



Figure 3 : Gravier 10-14

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Sables	0/D	$d=0$ et $D \leq 4\text{mm}$
Graves	0/D	$D \geq 6,3\text{mm}$
Gravillons	d/D	$d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 63\text{mm}$
Ballasts	d/D	$d=31,5\text{mm}$ et $D=50$ ou 63mm

Tableau 1 : Les granulats les plus utilisés pour béton

Le concasseur, objet de ce sujet, est un concasseur à mâchoire de type PE400×600 (figure 4). Le mouvement de va et vient de la mâchoire mobile (phase de concassage) est assuré par un moteur alors que l'écartement des deux mâchoires est réglé par les vérins V_1 et V_2 (phase de réglage de l'écartement).

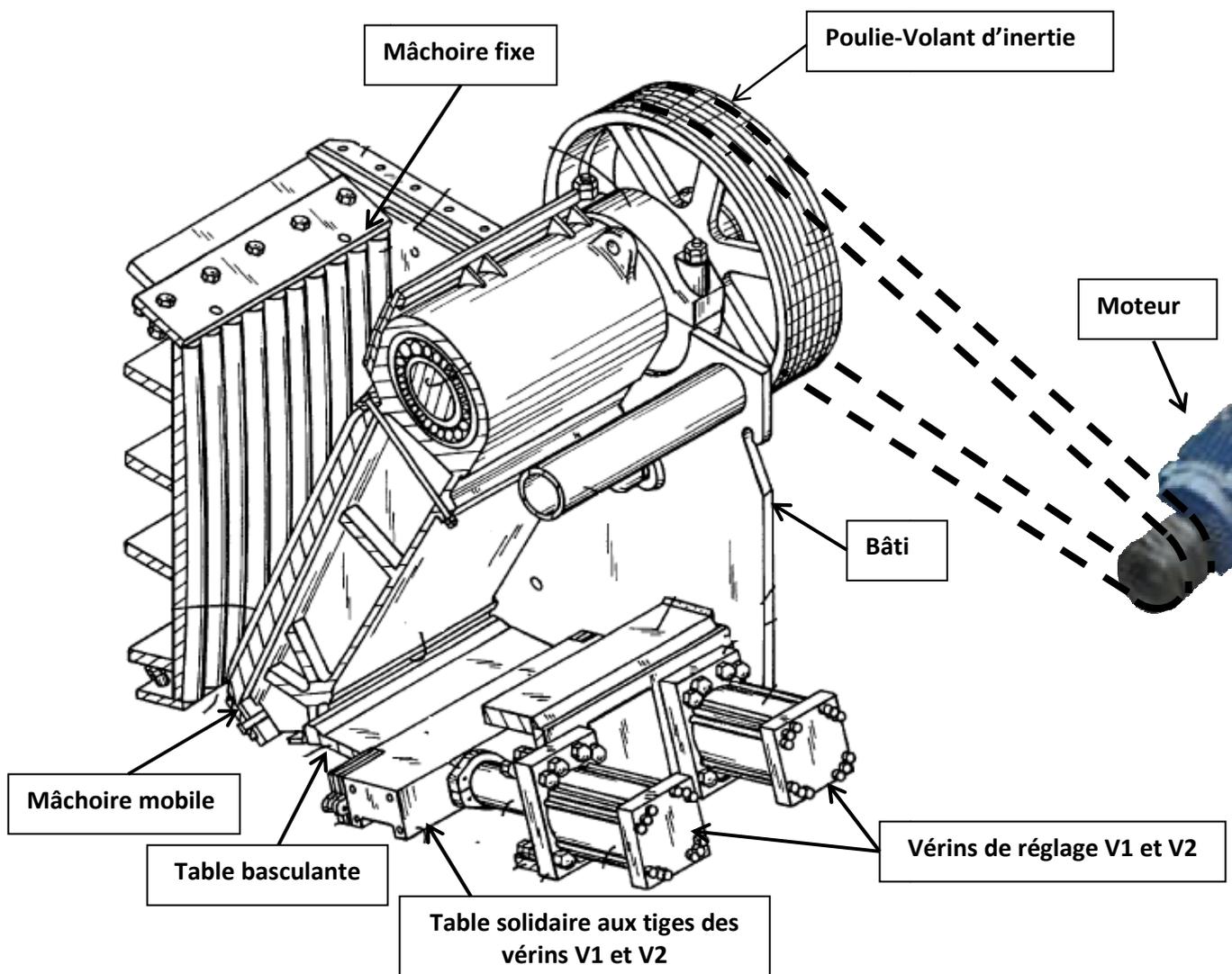


Figure 4 : Vue 3D du concasseur à mâchoire.

Modèle cinématique du concasseur :

La figure 5 représente le schéma cinématique du concasseur. Le système est composé de :

- Un bâti (S_0) lié au repère $R_0(O_2, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$.
- Une excentrique (S_2) liée au repère $R_2(O_2, \vec{x}_0, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$;
- Une mâchoire mobile (S_3) liée au repère $R_3(O_3, \vec{x}_0, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$;
- Une table basculante (S_4) liée au repère $R_4(O_4, \vec{x}_0, \vec{y}_4, \vec{z}_4)$;
- Une tige de vérin (S_5) liée au repère $R_5(O_1, \vec{x}_0, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$;

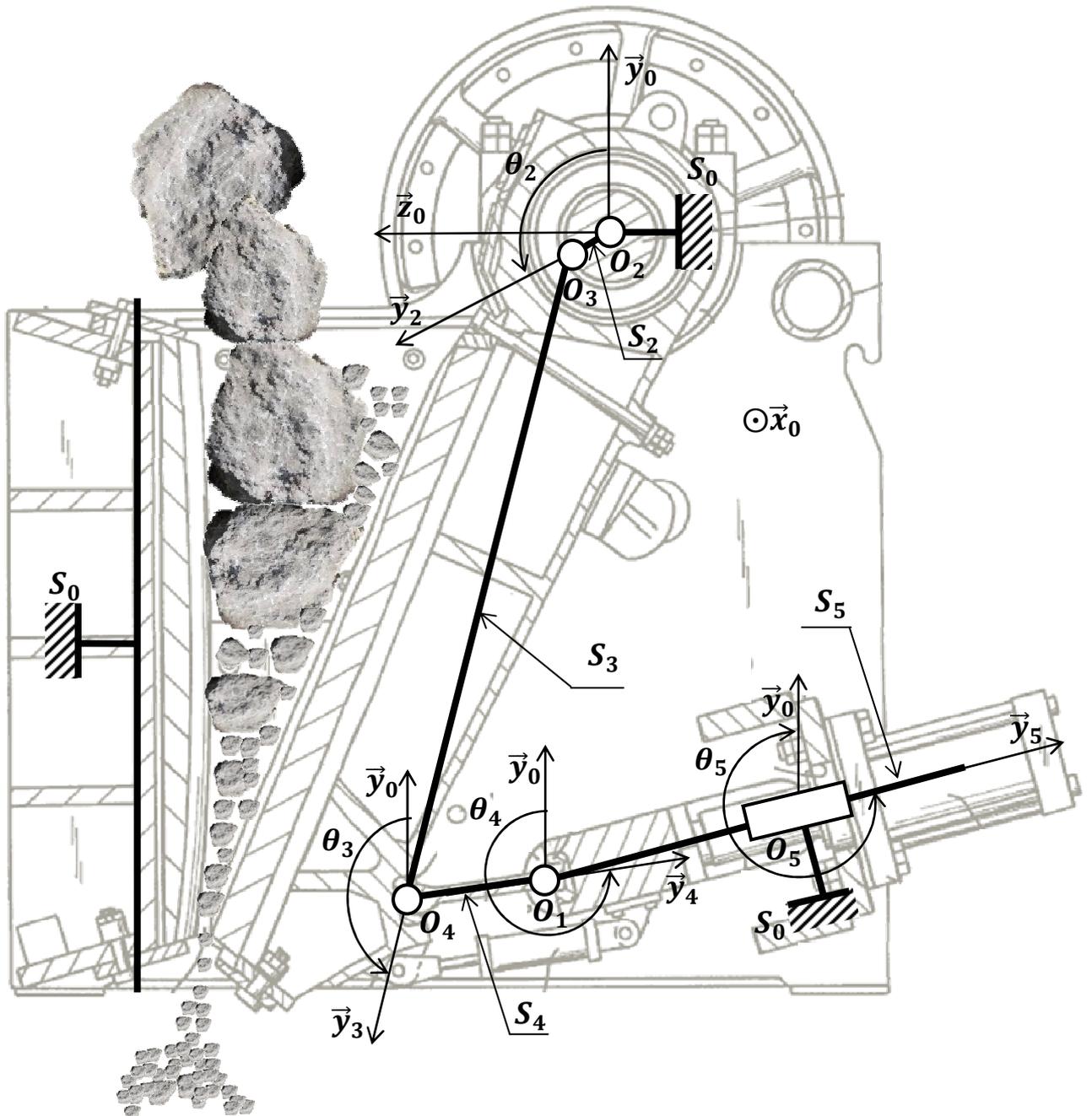


Figure 5 : Schéma cinématique du concasseur à mâchoire.

Cas d'utilisation et exigences fonctionnelles du concasseur :

La figure 6 correspond aux cas d'utilisation du concasseur à mâchoire.

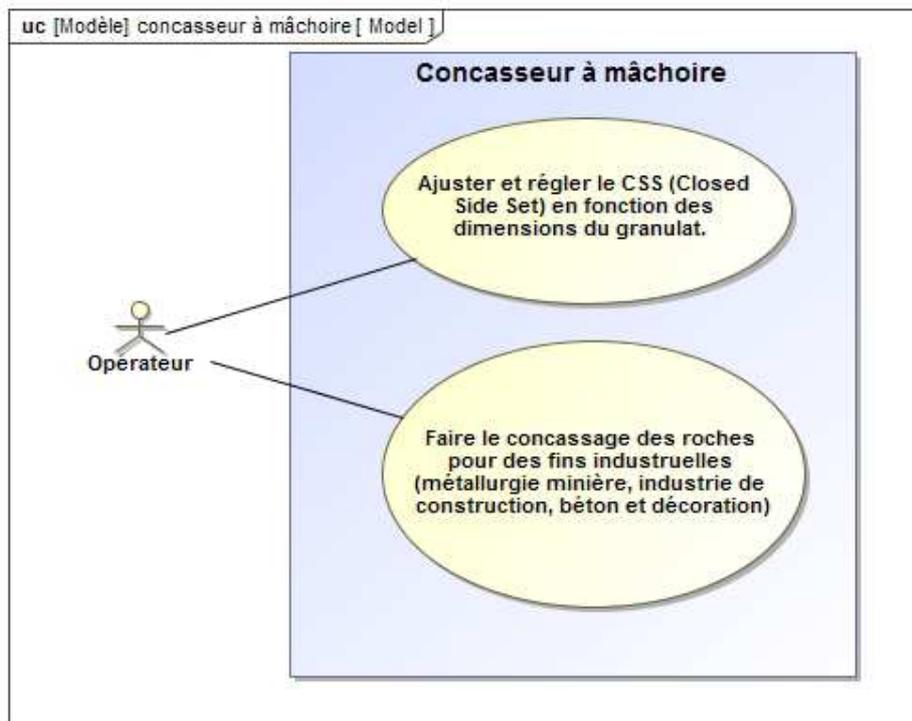


Figure 6 : Cas d'utilisations du concasseur à mâchoire.

La figure 7 correspond aux diagrammes des exigences fonctionnelles du concasseur à mâchoire.

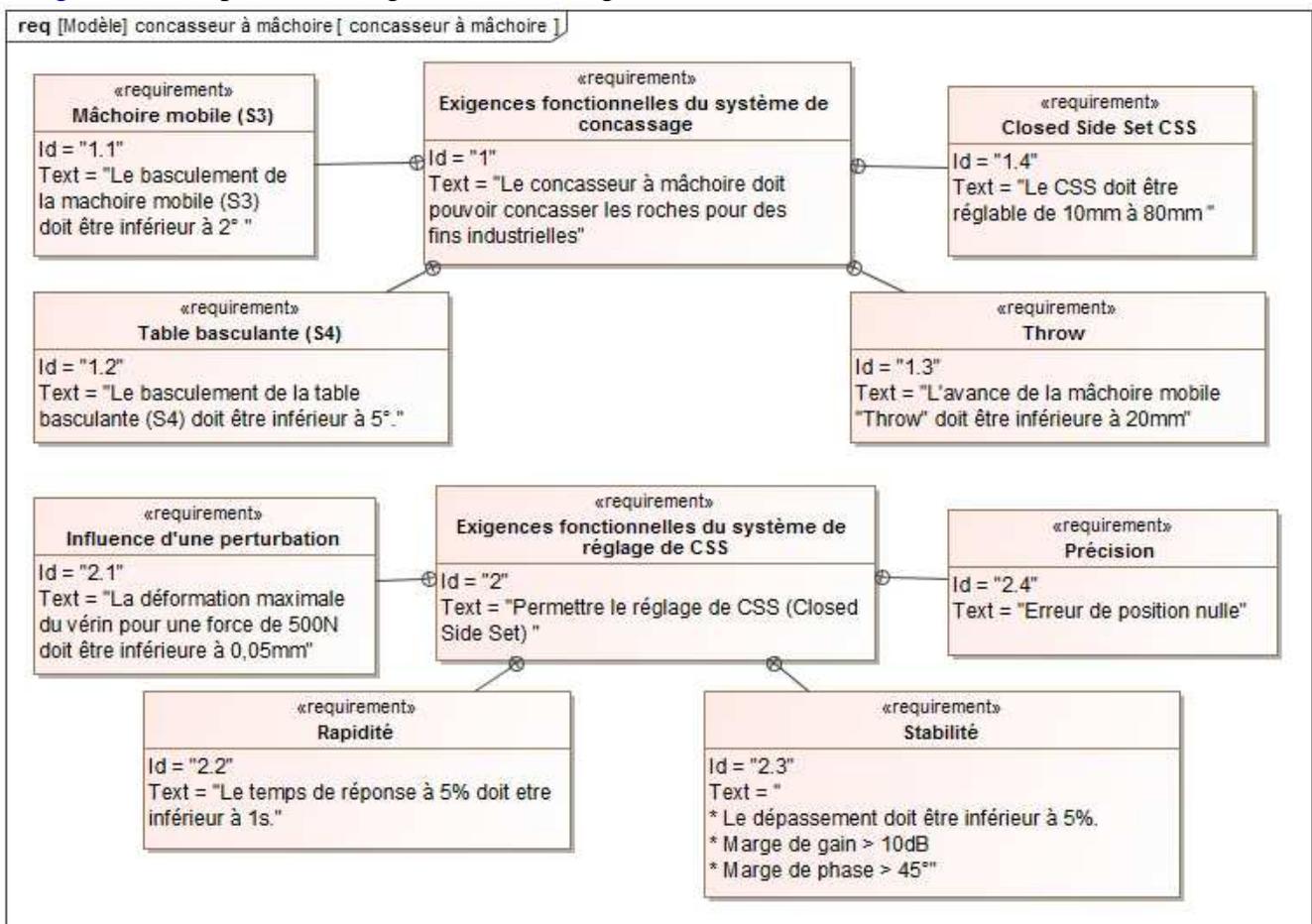


Figure 7 : Diagrammes des exigences fonctionnelles du concasseur à mâchoire.

Partie 1 : Vérification des performances cinématiques du concasseur à mâchoire

Phase de concassage :

Dans cette phase, la tige du vérin (S_5) est bloquée. Pour cela, le point O_1 , centre de la liaison pivot entre (S_5) et (S_4) est supposé fixe dans le bâti (S_0). Le concasseur se ramène donc à un système à quatre barres. La [figure 8](#) correspond au schéma cinématique du concasseur en phase de concassage.

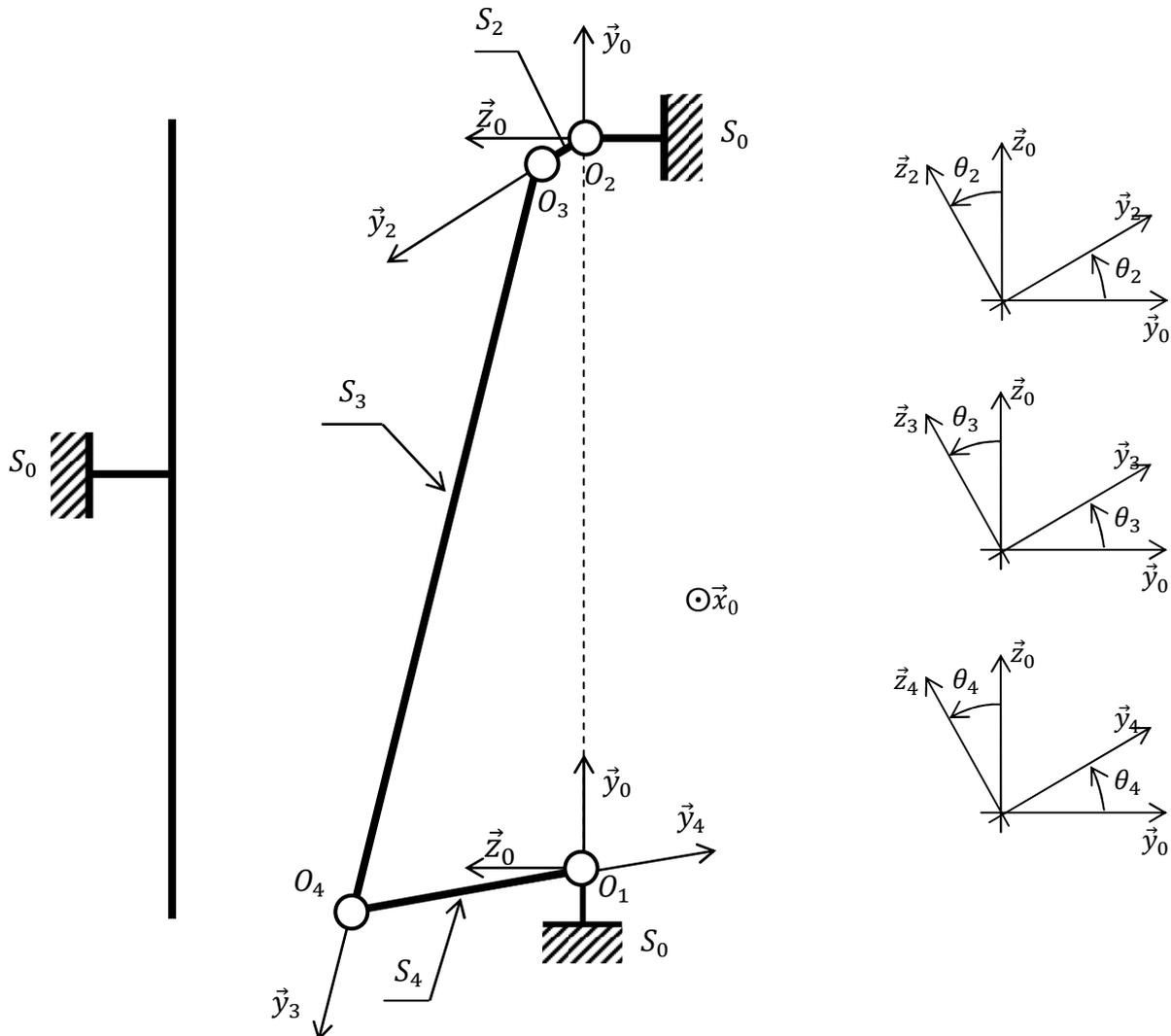


Figure 8 : Schéma cinématique du concasseur : Phase de concassage

Données :

$$\overrightarrow{O_1O_2} = r_0 \vec{y}_0 \quad \overrightarrow{O_2O_3} = r_2 \vec{y}_2 \quad \overrightarrow{O_3O_4} = r_3 \vec{y}_3 \quad \overrightarrow{O_4O_1} = r_4 \vec{y}_4$$

Pour un concasseur de type PE 400×600, les données numériques sont résumées dans le tableau suivant :

$r_0(\text{mm})$	$r_2(\text{mm})$	$r_3(\text{mm})$	$r_4(\text{mm})$
817	12	1085	455

Tableau 2 : Données numériques du concasseur à mâchoire de type PE 400×600.

Question 1 : Ecrire, en projection dans la base du repère R_0 , les équations qui découlent de la fermeture géométrique de la chaîne des solides ($S_0 - S_2 - S_3 - S_4$).

Question 2 : Montrer que les équations, déterminées dans la question précédente, peuvent se ramener aux équations de **Freudenstein** données par le système suivant :

$$\begin{cases} \cos(\theta_3 - \theta_2) = K_1 \cos \theta_3 + K_2 \cos \theta_2 + K_3 \\ \cos(\theta_4 - \theta_2) = K'_1 \cos \theta_4 + K'_2 \cos \theta_2 + K'_3 \end{cases} \quad (1)$$

Expliciter, en fonction de $(r_0, r_2, r_3$ et $r_4)$, les coefficients $K_1, K_2, K_3, K'_1, K'_2$ et K'_3

Dans la suite du sujet, les équations numériques qui expriment les angles θ_3 et θ_4 en fonction de l'angle θ_2 sont données par le système suivant :

$$\begin{cases} \cos(\theta_3 - \theta_2) = -68,08 \cos \theta_3 - 0,75 \cos \theta_2 - 62,89 \\ \cos(\theta_4 - \theta_2) = -68,08 \cos \theta_4 - 1,79 \cos \theta_2 + 27,70 \end{cases} \quad (2)$$

La résolution numérique du système d'équations (2), en utilisant la méthode de Newton Raphson avec une précision $\geq 10^{-3}$, permet de représenter les évolutions de θ_3 et θ_4 en fonction de θ_2 . Ces évolutions sont données par les courbes suivantes pour 1 tour complet (360°) de l'excentrique (S_2).

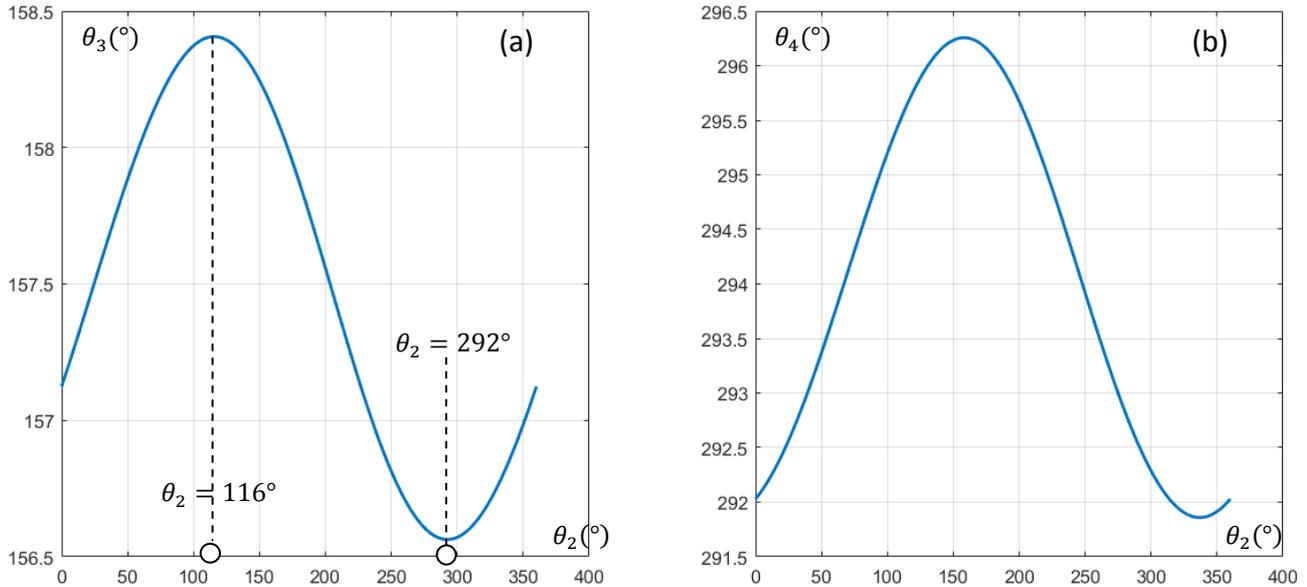


Figure 9 : (a) : Evolution de θ_3 ($^\circ$) en fonction de θ_2 ($^\circ$), (b) : Evolution de θ_4 ($^\circ$) en fonction de θ_2 ($^\circ$).

Question 3 : A partir de ces courbes, déterminer les plages de variation $\Delta\theta_3$ et $\Delta\theta_4$ respectivement de θ_3 et θ_4 pour un tour complet de l'excentrique (S_2). Conclure quant aux exigences imposées par le cahier des charges.

Question 4 : A partir de la courbe (a), laquelle des deux positions de l'excentrique S_2 ($\theta_2=116^\circ$ et $\theta_2=292^\circ$), que vous jugez utile pour le réglage de CSS (Closed Side Set). Justifier votre réponse.

La connaissance des trajectoires des points appartenant à la mâchoire mobile (S_3) est d'une grande importance. En effet, cela permet de savoir le point qui se rapproche le plus de la mâchoire fixe. Ce point servira au calcul de CSS.

Pour cela, on donne, pour un point P appartenant à S_3 , les vecteurs suivants :

$$\overrightarrow{O_1P} = y_p \vec{y}_0 + z_p \vec{z}_0 \text{ et } \overrightarrow{O_3P} = y_{p3} \vec{y}_0 + z_{p3} \vec{z}_0$$

Question 5 : Exprimer y_p et z_p en fonction de $r_0, r_2, \theta_2, \theta_3, y_{p3}$ et z_{p3} .

Les expressions de y_p et z_p permettent de représenter la trajectoire de tout point appartenant à la mâchoire mobile (S_3). En particulier, les courbes (a, b et c) de la figure 10, correspondent respectivement aux trajectoires des points O_3, G_3 et O_4 avec G_3 est le centre d'inertie de (S_3) tel que $\overrightarrow{O_3G_3} = y_{G3} \vec{y}_3$ avec $y_{G3} = 492,5\text{mm}$.

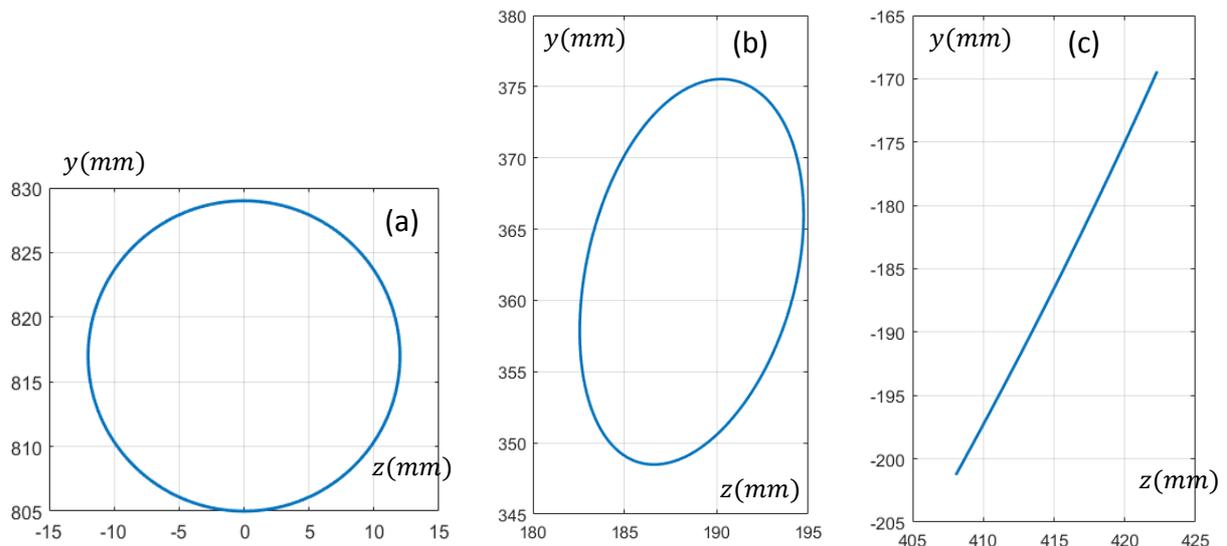


Figure 10 : (a) : Trajectoire de O_3 , (b) : Trajectoire de G_3 , (c) : Trajectoire de O_4

Question 6 : à partir des trajectoires de la figure 10, indiquer le point qui servira le plus pour le réglage de CSS. Dédurre alors l'avance « *Throw* » (voir figure 2). Conclure quant aux exigences imposées par le cahier des charges.

Phase de réglage de l'écartement : Closed Side Set (CSS)

Dans cette phase, l'excentrique (S_2) est bloqué. Pour cela, le point O_3 , centre de la liaison pivot entre (S_2) et (S_3) est supposé fixe dans le bâti (S_0). La figure 11 correspond au schéma cinématique du concasseur en phase de réglage.

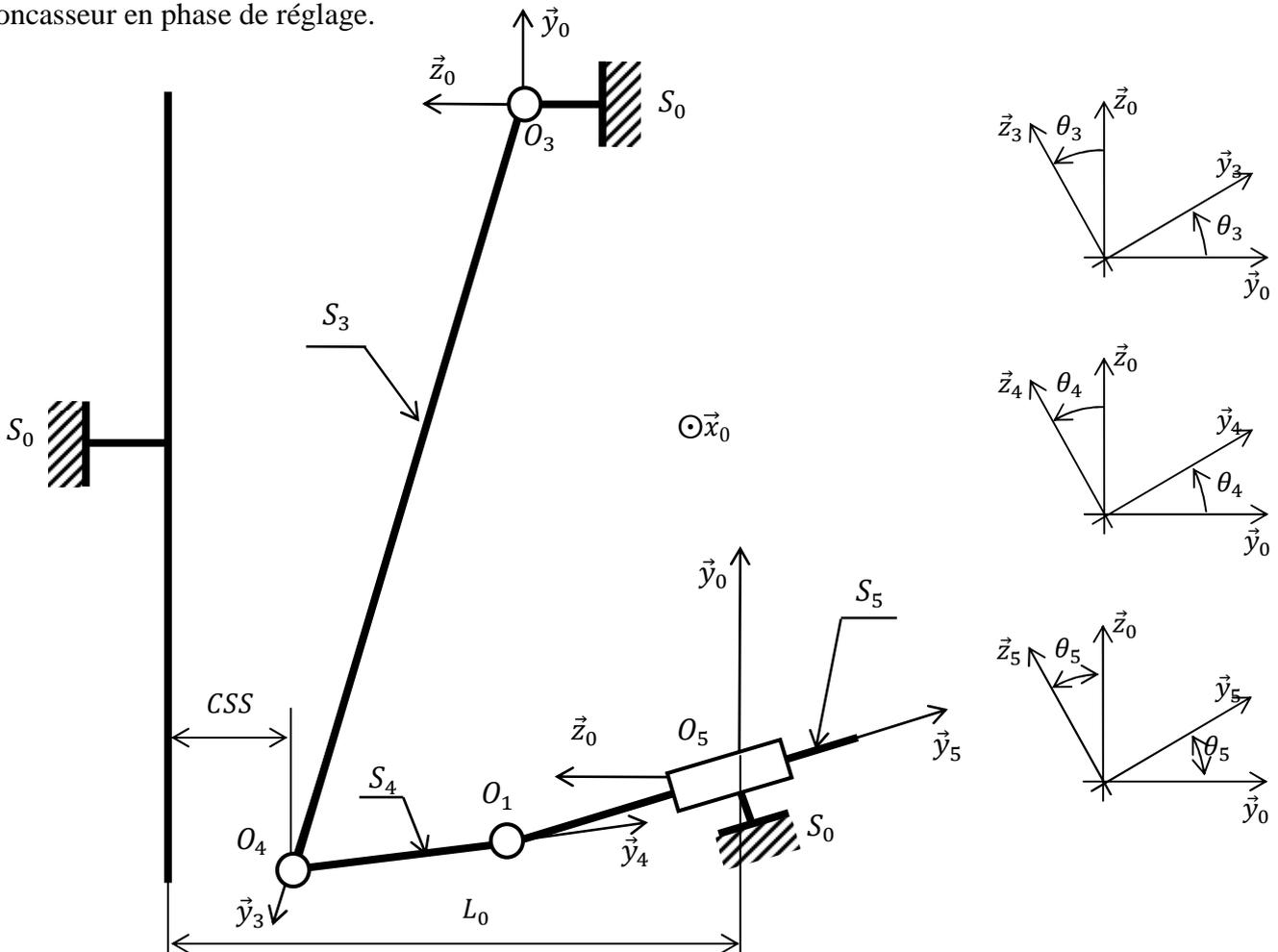


Figure 11 : Schéma cinématique du concasseur : Phase de réglage

Données :

$$\overrightarrow{O_5O_3} = a_0\vec{y}_0 + b_0\vec{z}_0 \quad \overrightarrow{O_3O_4} = r_3\vec{y}_3 \quad \overrightarrow{O_4O_1} = r_4\vec{y}_4 \quad \overrightarrow{O_1O_5} = y(t)\vec{y}_5$$

Pour un concasseur de type PE 400×600, les données numériques sont résumées dans le tableau suivant :

$a_0(\text{mm})$	$b_0(\text{mm})$	$L_0(\text{mm})$	$r_3(\text{mm})$	$r_4(\text{mm})$	$\theta_5(^{\circ})$
760	245	840	1085	455	290

Tableau 3 : Données numériques du concasseur à mâchoire de type PE 400×600.

Question 7 : Ecrire, en projection dans la base du repère R_0 , les équations qui découlent de la fermeture géométrique de la chaîne des solides ($S_0 - S_3 - S_4 - S_5$).

Question 8 : Montrer que les équations, déterminées dans la question précédente, peuvent se ramener au système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \cos(\theta_3 - \alpha) = \frac{r_4^2 - r_3^2 - (a_0 + y(t) \cos \theta_5)^2 - (b_0 + y(t) \sin \theta_5)^2}{2r_3\sqrt{(a_0 + y(t) \cos \theta_5)^2 + (b_0 + y(t) \sin \theta_5)^2}} \\ \cos(\theta_4 - \beta) = \frac{r_3^2 - r_4^2 - (a_0 + y(t) \cos \theta_5)^2 - (b_0 + y(t) \sin \theta_5)^2}{2r_4\sqrt{(a_0 + y(t) \cos \theta_5)^2 + (b_0 + y(t) \sin \theta_5)^2}} \end{cases} \quad (3)$$

Expliciter les paramètres α et β en fonction de a_0 , b_0 , $y(t)$ et θ_5

La résolution du système d'équations (3) permet de représenter les évolutions de θ_3 et θ_4 en fonction de y . Le déplacement de la tige du vérin s'effectue dans le sens négatif de y (respect du paramétrage proposé précédemment, figure 11). Les courbes suivantes (figure 12) représentent l'évolution de θ_3 et θ_4 dans le domaine de fonctionnement du vérin défini par : $y \in [-700\text{mm}, -400\text{mm}]$.

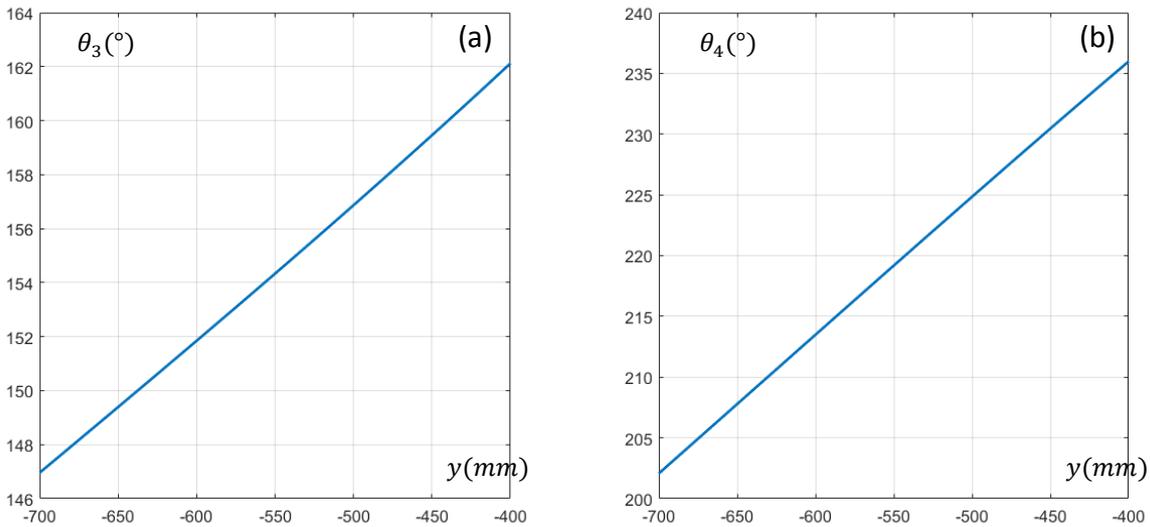


Figure 12 : (a) : Evolution de $\theta_3(^{\circ})$ en fonction de $y(\text{mm})$, (b) : Evolution de $\theta_4(^{\circ})$ en fonction de $y(\text{mm})$.

Question 9 : Donner deux équations linéaires représentant les positions angulaires $\theta_3(^{\circ})$ et $\theta_4(^{\circ})$ en fonction de $y(\text{mm})$.

Question 10 : Exprimer le CSS (Closed Side Set) en fonction de L_0 , y , r_4 , θ_4 et θ_5 (voir figure 11).

La figure 13(a) représente l'évolution de CSS en fonction de l'allongement du vérin y autorisé alors que la figure 13(b) correspond au pourcentage de la production du concasseur en gravillon en fonction des dimensions des nœuds du tamis pour différentes valeurs de CSS.

Question 11 : Déterminer *CSS* minimal et *CSS* maximal du concasseur faisant l'objet de l'étude et conclure quant aux exigences imposées par le cahier des charges. Déduire la consigne de position y_c à imposer au vérin afin d'assurer une production de 60% du gravillon passant à travers un tamis dont les mailles sont carrées et de côté 30mm.

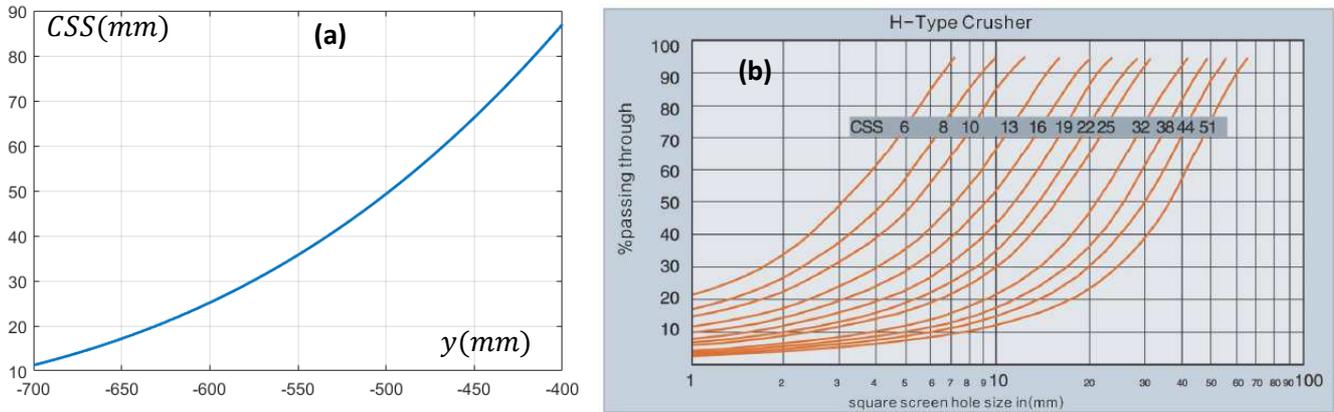


Figure 13 : (a) Evolution du CSS (Closed Side Set) en fonction de l'allongement y du vérin.
(b) Courbe de production de concasseur type PE400x600

Partie 2 : Vérification des performances du système de réglage de *CSS*

Masse équivalente ramenée sur l'axe du vérin :

Afin de vérifier les performances d'asservissement de position du vérin, il est utile de déterminer la masse équivalente M_{eq} du système (S_3 , S_4 et S_5) ramenée sur l'axe du vérin (O_5, \vec{y}_5). Pour cela, on rajoute les données et les hypothèses suivantes :

- Le modèle cinématique utilisé dans cette partie est celui de la figure 11 ;
- La tige du vérin S_5 est de masse m_5 avec $m_5 = 178Kg$;
- La table basculante S_4 est de masse m_4 , de centre d'inertie G_4 tel que $\vec{O_1G_4} = -y_{G_4}\vec{y}_4$ et de matrice d'inertie suivante :

$$[I_{G_4}(S_4)] = \begin{bmatrix} A_4 & 0 & 0 \\ 0 & B_4 & -D_4 \\ 0 & -D_4 & C_4 \end{bmatrix}_{R_4} \text{ avec } \begin{cases} m_4 = 143Kg \\ y_{G_4} = 216mm \\ A_4 = 2,41Kgm^2 \end{cases}$$

- La mâchoire mobile S_3 est de masse m_3 et de matrice d'inertie suivante :

$$[I_{O_3}(S_3)] = \begin{bmatrix} A_3 & 0 & 0 \\ 0 & B_3 & -D_3 \\ 0 & -D_3 & C_3 \end{bmatrix}_{R_3} \text{ avec } \begin{cases} m_3 = 776,7Kg \\ A_3 = 295,50Kgm^2 \end{cases}$$

- Les positions angulaires $\theta_3(rad)$ et $\theta_4(rad)$ varient linéairement en fonction de l'allongement $y(m)$ du vérin et elles sont données par :

$$\begin{cases} \theta_3(rad) = a_3y(m) + b_3 \\ \theta_4(rad) = a_4y(m) + b_4 \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} a_3 = 0,87rad/m \\ b_3 = 3,17rad \\ a_4 = 2rad/m \\ b_4 = 4,94rad \end{cases}$$

Question 12 : Déterminer le torseur cinématique de la table basculante S_4 au point G_4 dans son mouvement par rapport à R_0 .

Question 13 : Déterminer le torseur cinétique de la table basculante S_4 au point G_4 dans son mouvement par rapport à R_0 .

Question 14 : Déterminer l'énergie cinétique du système Σ , formé par les solides : S_3 , S_4 et S_5 , dans son mouvement par rapport à R_0 . Déduire la masse équivalente M_{eq} du système Σ ramenée sur l'axe du vérin.

L'équation suivante représente l'équation de la masse équivalente $M_{eq}(Kg)$ en fonction de l'allongement de la tige du vérin $y(mm)$.

$$M_{eq}(Kg) = 557,84 + 123,5 \sin(0,12 - 0,002y(mm)) \quad (4)$$

La courbe donnée par la [figure 14](#) correspond à l'évolution de $M_{eq}(Kg)$ en fonction de $y(mm)$ dans la plage de fonctionnement du vérin.

Question 15 : Déterminer la variation de la masse équivalente $\Delta M_{eq}(Kg)$ pour la plage de fonctionnement du vérin. A votre avis, est ce que l'hypothèse d'un système invariant est valable ? Justifier votre réponse.

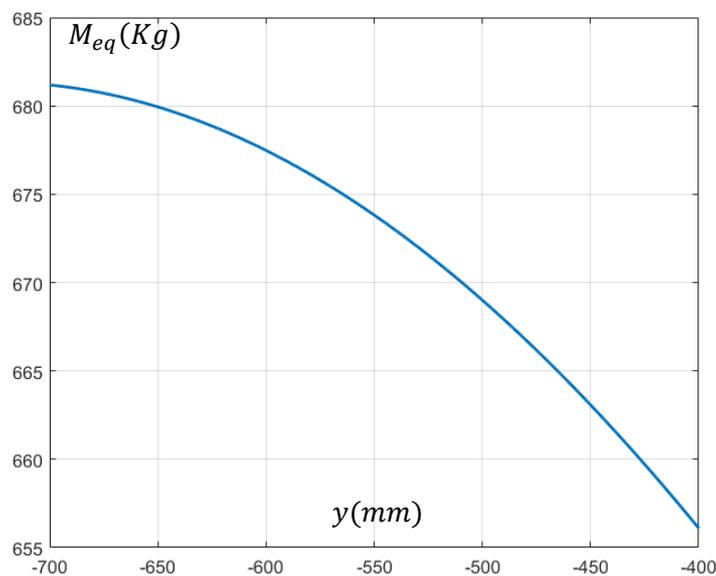


Figure 14 : Evolution du $M_{eq}(Kg)$ en fonction de l'allongement $y(mm)$ du vérin.

Asservissement de position du système de réglage de l'écartement CSS :

Le réglage de CSS (Closed Side Set) est assuré par deux vérins hydrauliques V_1 et V_2 qui sont montés en parallèles. Les commandes de ces deux vérins sont synchronisées. Chacun d'eux est équipé d'un détecteur inductif permettant de mesurer la position. Chaque vérin est piloté par un servo-distributeur, commandé par une tension $u(t)$ qui permet de gérer le débit d'entrée $q_1(t)$.

Afin de mener l'étude d'asservissement de position et le contrôle de CSS, on isole le vérin V_1 . Son comportement est modélisé à partir du modèle de structure donné par la [figure 15](#).

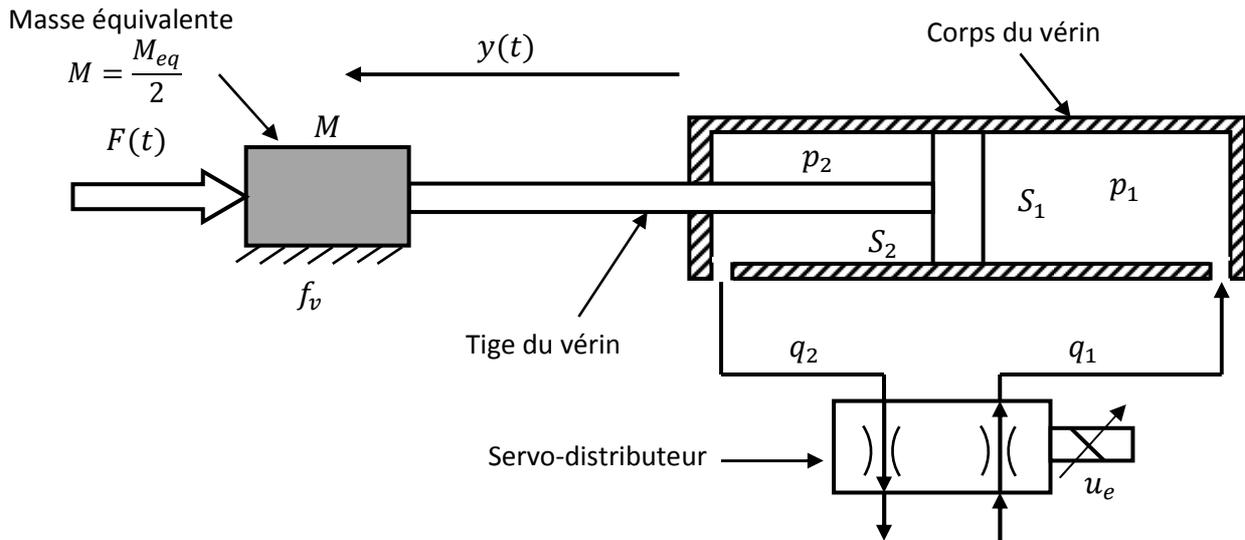


Figure 15 : Modèle de comportement du vérin

La position notée $y(t)$ de la tige du vérin est fonction du débit d'huile $q_1(t)$ à l'entrée de la chambre d'admission du vérin et la force due au concassage des roches $F(t)$. On se place dans l'hypothèse de petit déplacement autour d'un point de fonctionnement. Le système est donc supposé linéaire, continu et invariant.

On donne :

- $M = \frac{M_{eq}}{2} = 400Kg$: masse équivalente ramenée sur l'axe du vérin V_1 ;
- $f_v = 2 \cdot 10^6 Nm^{-1}s^{-1}$: coefficient des frottements visqueux ;
- $K_h = 5 \cdot 10^6 N/m$: raideur hydraulique du vérin ;
- $S_1 = 8 \cdot 10^{-3} m^2$: aire de la section intérieure de la chambre d'admission ;
- $F(t)$: effort variable due au concassage des roches.

Modélisation du comportement du (Vérin + Masse équivalente)

Dans la figure 16, le vérin est modélisé par un ressort de raideur K_h attaché à son extrémité à la masse équivalente M . Le bilan des efforts extérieurs est comme suit :

- Le ressort exerce une force de rappel $\vec{T}_h(t) = -K_h y(t) \vec{y}$;
- Le servo-distributeur exerce une force hydraulique $\vec{F}_h(t) = K_h \left(\int_0^t \frac{q_1(\tau)}{S_1} d\tau \right) \vec{y}$;
- La force due aux frottements visqueux est modélisée par $\vec{F}_f = -f_v \frac{dy(t)}{dt} \vec{y}$;
- L'effort engendré par le concassage des roches est donné par $\vec{F}(t) = -F(t) \vec{y}$;

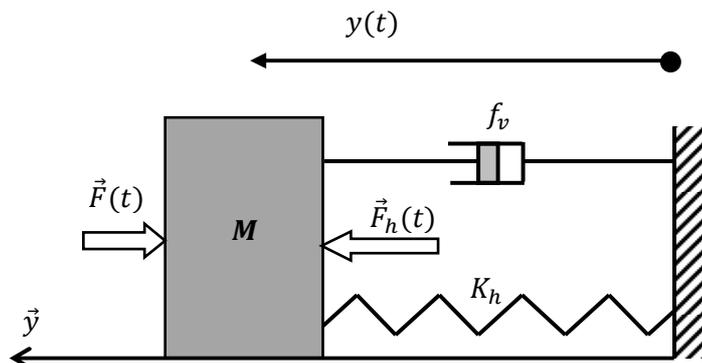


Figure 16 : Modèle de comportement équivalent du (vérin+Masse équivalente)

Question 16 : En appliquant le théorème de la résultante dynamique en projection sur l'axe \vec{y} , montrer que l'équation de mouvement de la masse équivalente est donnée par :

$$M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + f_v \frac{dy(t)}{dt} + K_h y(t) = K_h \int_0^t \frac{q_1(\tau)}{S_1} d\tau - F(t) \quad (5)$$

Question 17 : Traduire l'équation de mouvement (5) dans le domaine de Laplace sachant que les conditions initiales sont supposées nulles. Compléter le schéma bloc de la figure 17 :

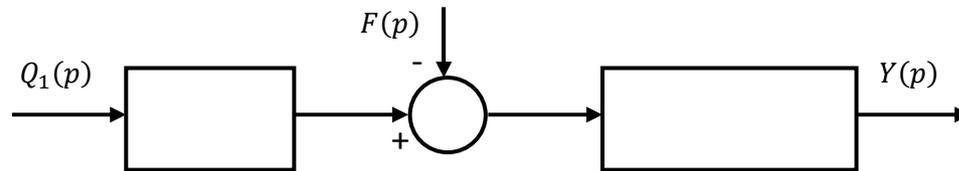


Figure 17 : Schéma bloc du système (Vérin + masse équivalente)

Question 18 : Etudier l'influence Δy d'une force $F(t) = F_0 u(t)$ pour un débit $q_1(t) = 0$. Conclure quant aux exigences du cahier des charges si $F_0 = 500N$.

Modélisation du système bouclé avec perturbation

Afin de boucler le système, on rajoute les données et les hypothèses suivantes :

- Le servo-distributeur délivre un débit d'huile $q_1(t)$ proportionnel à sa tension de commande $u_e(t)$ tel que $q_1(t) = K_e u_e(t)$, avec $K_e = 210^{-4} m^3/sV$.
- Le détecteur de position délivre une tension $u_s(t)$ proportionnelle à la position $y(t)$ telle que : $u_s(t) = K_c y(t)$ avec $K_c = 10^3 V/m$.
- Le signal de tension de consigne est élaboré à partir de la consigne de position $y_c(t)$ et d'un potentiomètre modélisable par un gain pur identique à K_c .
- Le signal de la commande du distributeur proportionnel $u_e(t)$ est élaboré à partir :
 - ✓ d'un élément permettant de comparer $u_s(t)$ à la tension de consigne $u_c(t)$.
 - ✓ d'un correcteur proportionnel K_p .

Question 19 : Compléter le schéma bloc de la figure 18 pour une entrée de consigne $Y_c(p)$, une perturbation $F(p)$ et une réponse $Y(p)$.

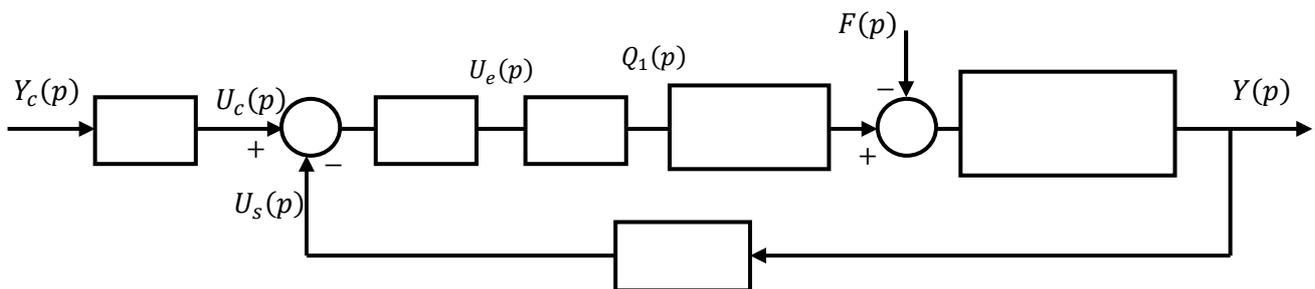


Figure 18 : Schéma bloc du système bouclé avec perturbation

Question 20 : Déterminer la fonction de transfert $P(p) = \frac{Y(p)}{F(p)}$ pour $Y_c(p) = 0$.

Question 21 : Etudier l'influence Δy d'une force $F(t) = F_0 u(t)$ et $F(t) = F_0 t u(t)$ pour $Y_c(p) = 0$. A votre avis, comment peut-on pallier à la perturbation engendrée par une force de perturbation qui varie linéairement. On rappelle que $L(F_0 t u(t)) = \frac{F_0}{p^2}$.

Modélisation du système bouclé sans perturbation

Dans la suite du problème, la force de perturbation $F(t)$ est négligée. Le système de réglage de CSS est modélisé par le schéma bloc de la figure 19 :

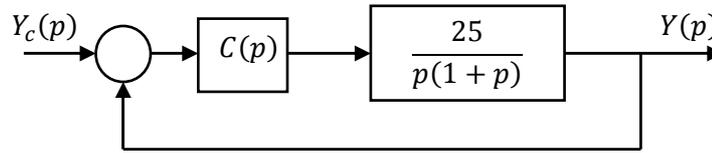


Figure 19 : Schéma bloc du système bouclé sans perturbation

Pour une première approche, on prend $C(p) = 1$:

Question 22 : Déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte $FTBO(p)$; Donner la classe du système et conclure par rapport à la précision du système.

On donne ci après la réponse temporelle du système pour une consigne de position $y_c = 450mm$ (figure 20) et le diagramme de Bode de la $FTBO$ (figure 21).

Question 23 : Déterminer, graphiquement, le temps de réponse à 5%, $t_{r5\%}$, le dépassement pourcent $D\%$, la marge de gain MG et la marge de phase $M\varphi$. Conclure quant aux exigences imposées par le cahier des charges.

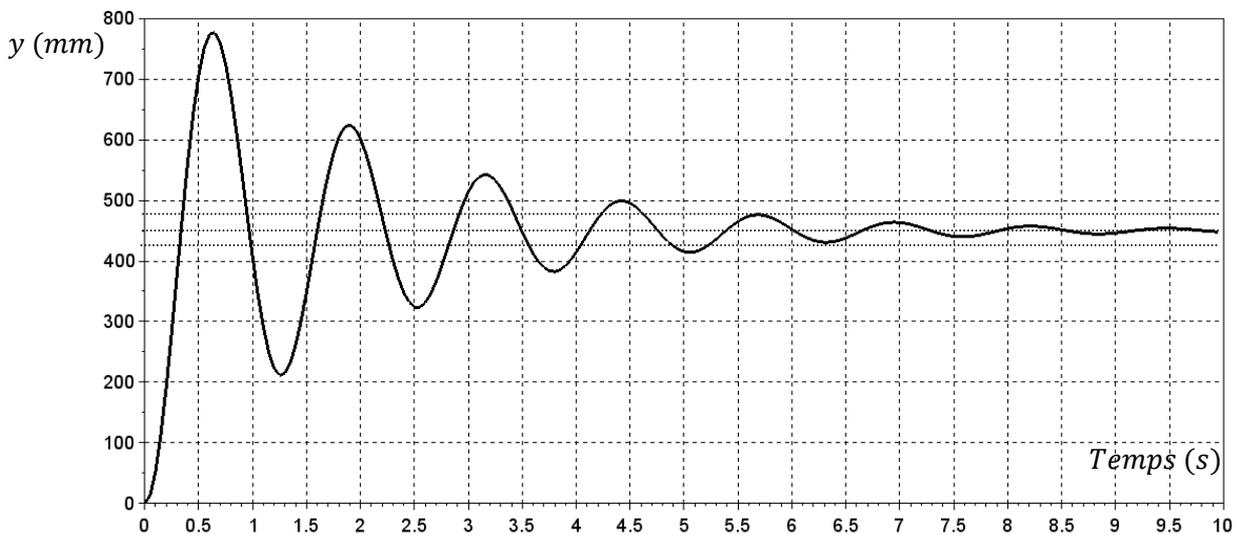


Figure 20 : Réponse indicielle pour un échelon de position $y_c = 450mm$, $C(p)=1$

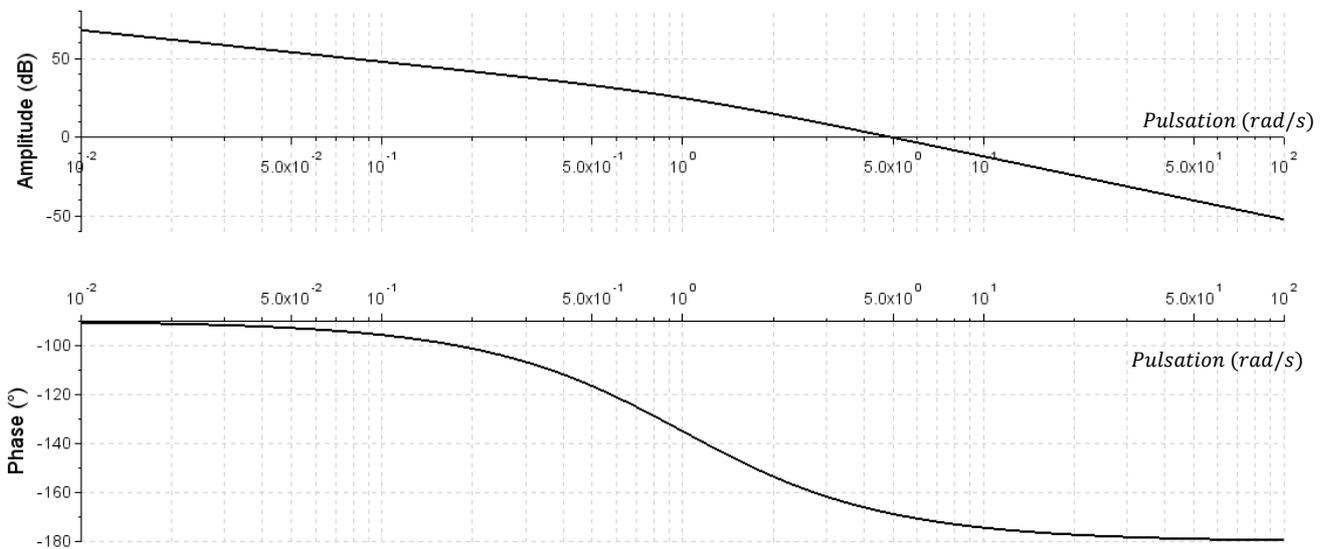


Figure 21 : Diagramme de Bode de la FTBO, $C(p)=1$

Pour une deuxième approche, on prend $C(p) = \frac{1+a\tau p}{1+\tau p}$;

Afin de pallier au problème de stabilité, nous proposons d'utiliser **un correcteur à avance de phase** dont la fonction de transfert est de la forme :

$$C(p) = \frac{1+a\tau p}{1+\tau p} \text{ avec } a > 1$$

L'intérêt de ce type de correcteur est de modifier légèrement le comportement du système aux basses et hautes fréquences et de rajouter une phase positive autour du point critique de fonctionnement. Pour ce type de correcteur, on a :

- Le déphasage maximal est obtenu pour la pulsation : $\omega_m = \frac{1}{\tau\sqrt{a}}$
- Le déphasage maximal correspond à : $\sin \varphi_m = \frac{a-1}{a+1}$

Pour déterminer les paramètres de ce correcteur, on prendra ω_m , la pulsation pour laquelle le gain s'annule (la pulsation qui servira à la mesure de la marge de phase) et φ_m la marge de phase minimal imposée par le cahier des charges.

Question 24 : Déterminer les paramètres a et τ de $C(p)$ et donner son tracé asymptotique dans le plan de bode. On prendra $\sqrt{2} \approx 1,4$; $\sqrt{5,6} \approx 2,4$.

Pour la suite, on prendra $C(p) = \frac{1+0,47p}{1+0,08p}$.

On donne ci après la réponse temporelle du système corrigé pour une consigne de position $y_c = 450mm$ (figure 22) et le diagramme de Bode de la FTBO (figure 23).

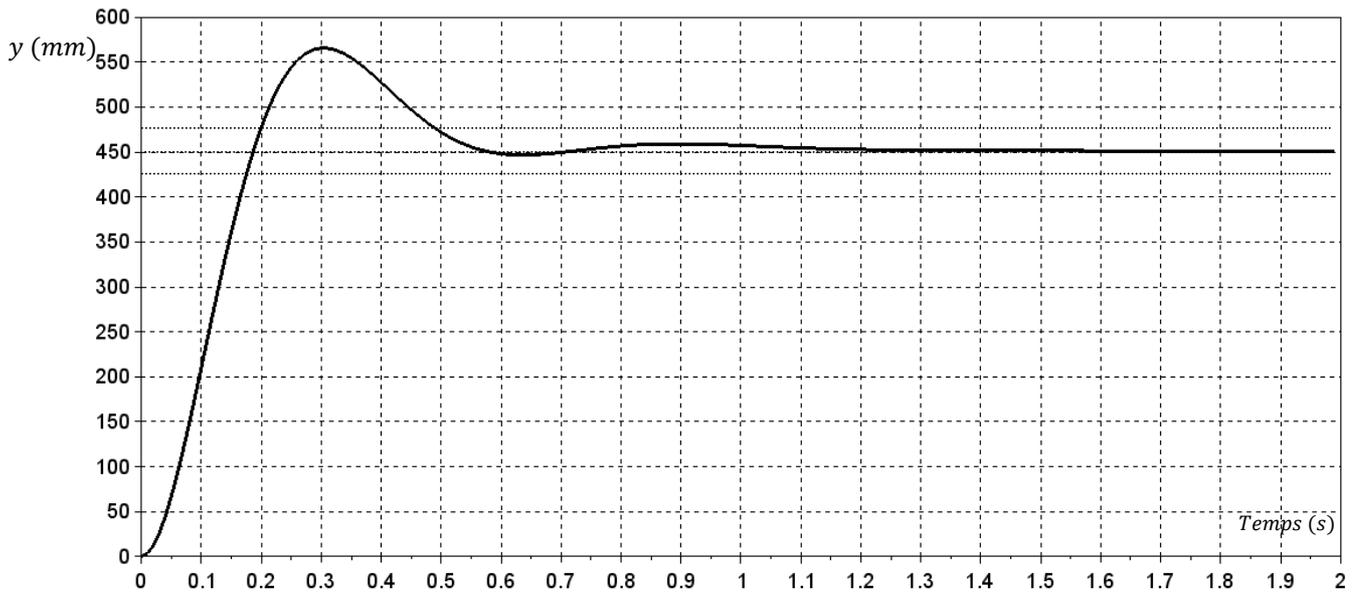


Figure 22 : Réponse indicielle pour un échelon de position $y_c = 450\text{mm}$, $C(p) = \frac{1+0,47p}{1+0,08p}$

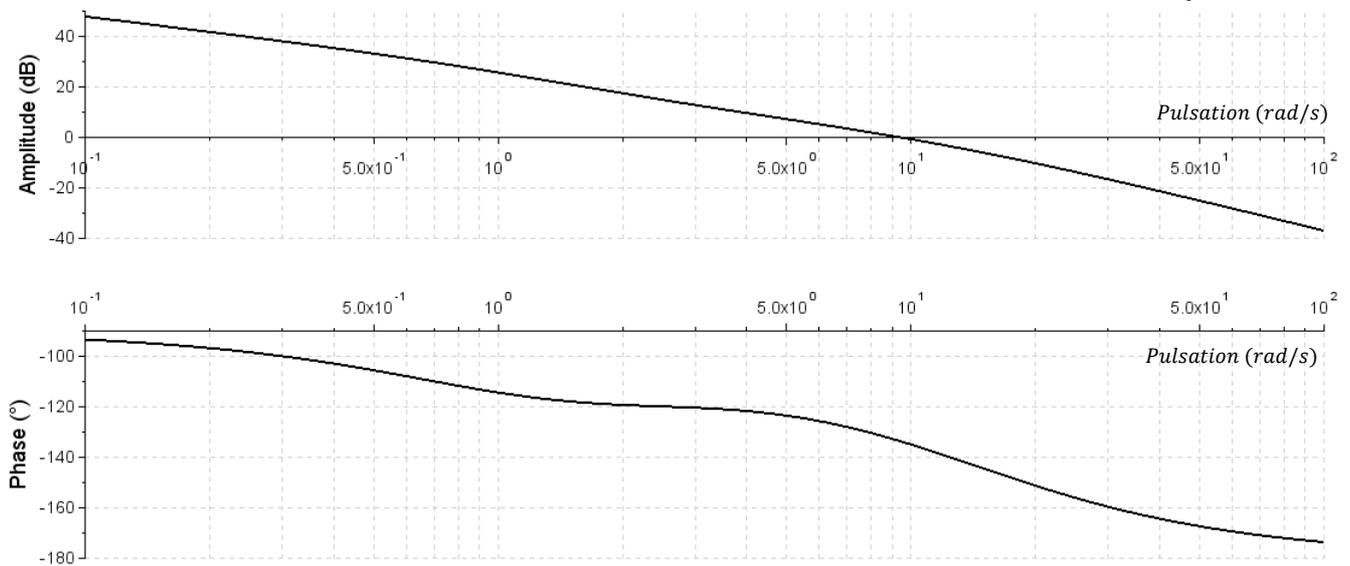


Figure 23 : Diagramme de Bode de la FTBO, $C(p) = \frac{1+0,47p}{1+0,08p}$

Question 25 : Déterminer, graphiquement, le temps de réponse à 5% du système $t_{r5\%}$, le dépassement pourcent $D\%$, la marge de gain MG et la marge de phase $M\phi$. Conclure quant aux exigences imposées par le cahier des charges.

|*/**/ FIN */**/