

Système mobile d'imagerie interventionnelle Discovery IGS 730

Durée approximative : 2 heures

Inspiré de CCINP - 2017

1 Présentation du système

1.1 Mise en situation

Développé dans le cadre d'un projet ambitieux associant des industriels (GE Healthcare, BA Systèmes et C & K), deux laboratoires de recherche (CEA-LIST et IRCCYN) et un centre de recherche préclinique (laboratoire CR2i INRA AP-HP), le Discovery IGS 730 (figure 1) est le premier système mobile d'imagerie interventionnelle. Embarquant un ensemble de logiciels de traitement d'images pour les applications vasculaires, l'oncologie et la cardiologie (figure 2) et permettant un accès complet au patient, il guide les gestes de l'équipe médicale tout au long de l'intervention chirurgicale.

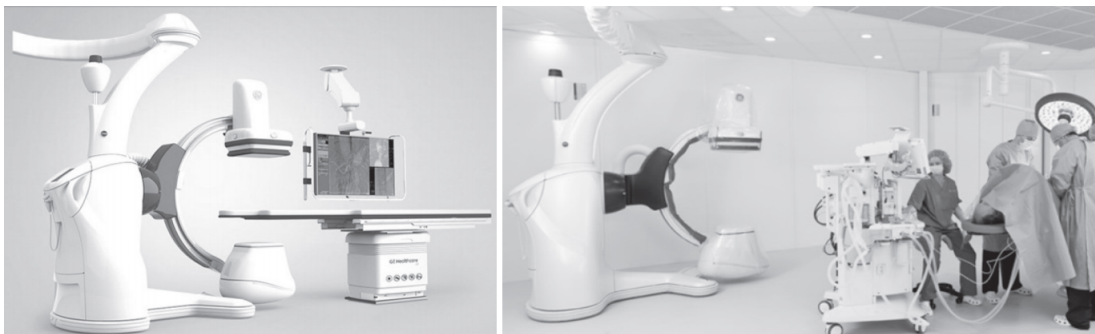


Figure 1: Système d'imagerie robotisé Discovery IGS 730 en situation de travail (photo de gauche) et en mode parking (photo de droite)



Figure 2: Images 3D obtenues avec le système d'imagerie du Discovery IGS 730

1.2 Analyse système partielle

La figure 3 présente un extrait du cahier des charges du système d'imagerie dans la phase de vie d'utilisation. La figure 4 présente son diagramme de définition des blocs.

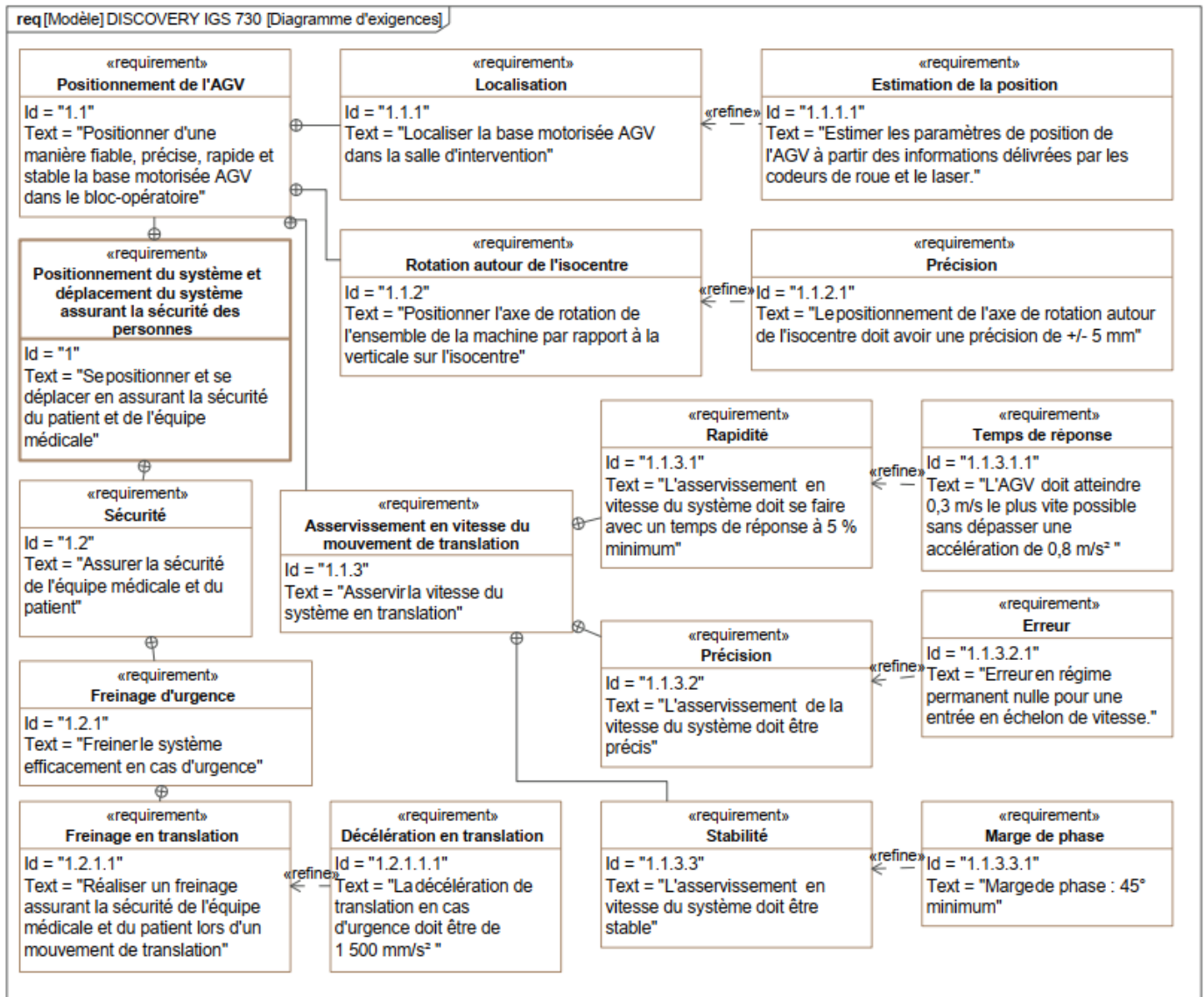


Figure 3: Diagramme d'exigences partiel du Discovery IGS 730

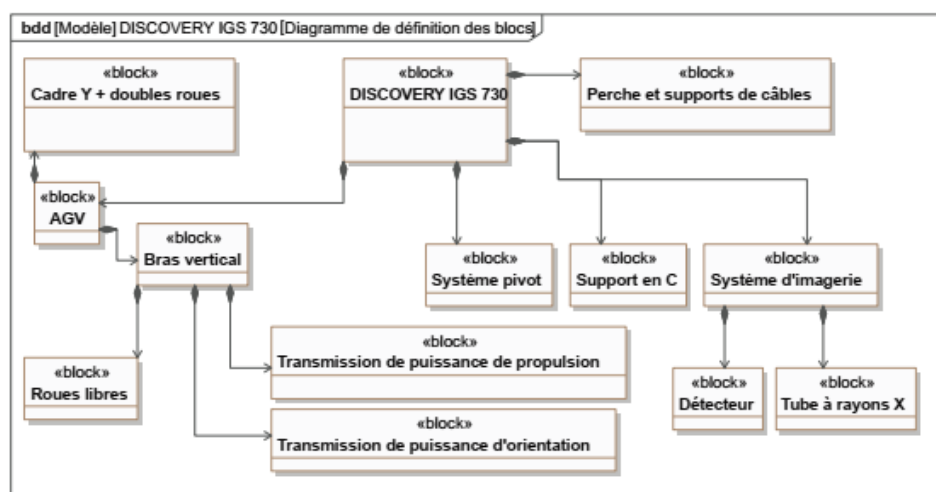


Figure 4: Diagramme de définition de blocs du Discovery IGS 730

Le système Discovery IGS 730 est constitué principalement (figure 4, page 3 et figure 5) :

- d'une base motorisée, aussi appelée AGV (pour Automated Guided Vehicle, soit véhicule à guidage automatique) ;

- d'une perche et d'un support de câbles ;
- du sous-système d'imagerie supporté par un bras en « C » ou arceau. Le système d'imagerie est lié à la base motorisée par l'intermédiaire de deux liaisons pivot. Un point caractéristique appelé « isocentre » (point IC) est rattaché au sous-système d'imagerie. Il est défini comme l'intersection de l'axe optique et de l'axe de la liaison pivot AGV/système pivot.

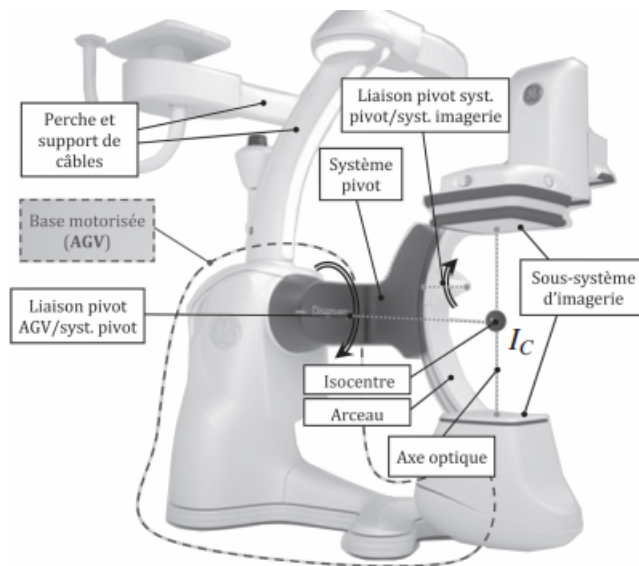


Figure 5: Composants du Discovery IGS 730

La base motorisée AGV (figure 6) est constituée :

- d'une structure support, ou châssis, composée du bras vertical et du cadre Y ;
- de deux sous-ensembles roue motrice et motorisation associée (un motoréducteur d'orientation et un motoréducteur de propulsion pour chaque roue) ;
- de deux doubles roues « folles » non motorisées.

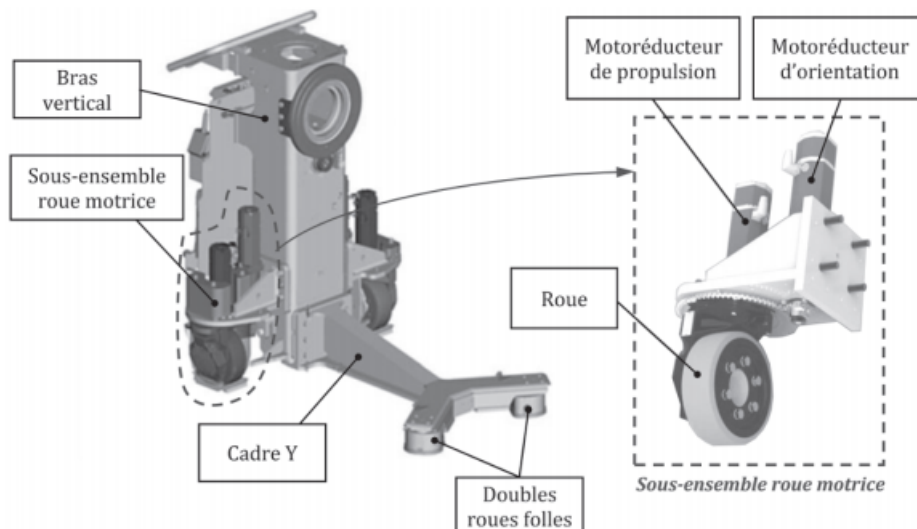


Figure 6: Éléments du sous-système AGV, carter et sous-système d'imagerie enlevés

2 Exigence de sécurité lors d'une procédure de freinage d'urgence



Objectif

Déterminer les valeurs de décélérations maximales en cas d'arrêt d'urgence garantissant la sécurité du patient et du personnel lors d'une manœuvre de translation. Une procédure de freinage d'urgence est prévue pour immobiliser le système au plus tôt lorsqu'un problème est rencontré au cours de son déplacement. Pour des raisons évidentes de sécurité, le système doit s'arrêter le plus rapidement possible sans toutefois que la décélération n'entraîne le basculement de l'engin ou encore du glissement au niveau des roues motrices.

2.1 Modèle retenu pour l'étude et paramétrage associé

Le problème est supposé plan et se ramène à l'étude du système Σ (voir modèle sur la figure 7) composé des éléments :

- (1) : roue motrice ;
- (2) : roue folle ;
- (3) : cadre et arceau d'imagerie.

Le repère \mathcal{R} ayant pour origine le point O et muni de la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ est attaché à la salle d'intervention (0). Le référentiel associé est supposé galiléen.

Le système est animé d'un mouvement de translation rectiligne suivant $+\vec{x}$ (sens 1) tel que $\vec{V}_{\Sigma/\mathcal{R}}(G) = u(t)\vec{x}$, avec $u(t) > 0$. Lors de ce mouvement, les roues sont animées d'un mouvement de rotation. L'angle de rotation d'une roue par rapport à \mathcal{R} est défini par : $\theta_R = (\vec{x}, \vec{x}_R) = (\vec{z}, \vec{z}_R)$.

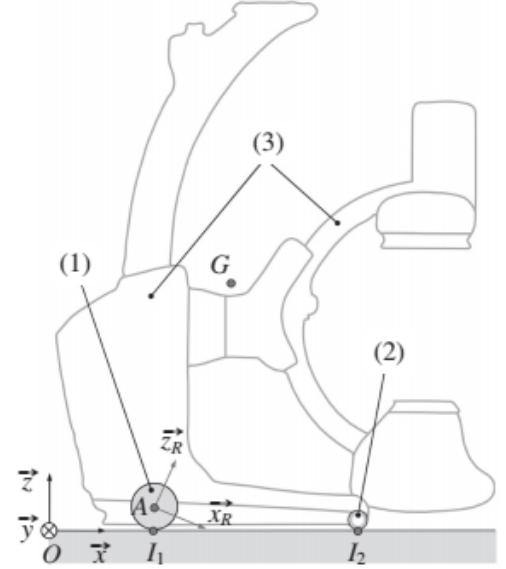


Figure 7: Modèle retenu

Hypothèses

Les roues (1) et (2) sont en liaison pivot avec le cadre (3) respectivement d'axe (A, \vec{y}) et (B, \vec{y}) , où B est le centre de la roue (2).

La roue motrice (1) roule sans glisser sur le sol (0) au point I_1 . La résistance au roulement est négligée.

Caractéristiques géométriques et d'inertie des solides

- ensemble du système Σ : centre d'inertie G tel que $\vec{I_1 G} = x_G \vec{x} + z_G \vec{z}$, avec $x_G = 450$ mm et $z_G = 950$ mm, masse $m_\Sigma = 840$ kg ;
- roue motrice (1) : rayon $r = 115$ mm ;
- empattement du système : $I_1 I_2 = \ell = 1$ m ;
- l'inertie des roues est négligée.

Actions mécaniques.

- action du sol sur la roue motrice (1) : $\{\mathcal{T}_{0 \rightarrow 1}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{0 \rightarrow 1} = X_{01} \vec{x} + Z_{01} \vec{z} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{I_1}$
- action du sol sur la roue folle (2) : $\{\mathcal{T}_{0 \rightarrow 2}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{0 \rightarrow 2} = Z_{02} \vec{z} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{I_2}$
- action de la pesanteur : $\{\mathcal{T}_{pes \rightarrow \Sigma}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{pes \rightarrow \Sigma} = -m_\Sigma g \vec{z} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_G$
- action de freinage sur la roue motrice (1) : $\{\mathcal{T}_{frein \rightarrow 1}\} = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \vec{M}_{frein \rightarrow 1}(A) = -C_f \vec{y} \end{array} \right\}_A$

2.2 Condition de non-basculement

Au cours du freinage, le système subit une décélération $\vec{\Gamma}_{\Sigma/\mathcal{R}}(G) = \gamma \vec{x} = r\ddot{\theta} \vec{x}$, avec $\ddot{\theta} < 0$.

Afin de s'assurer du non-basculement du système, il est nécessaire de déterminer la valeur de décélération limite γ_{NB} pour laquelle apparaît un décollement de la roue motrice.

Question 1. Par application du théorème de la résultante dynamique à l'ensemble Σ suivant l'axe du mouvement, déterminer l'expression de la composante tangentielle X_{01} appliquée à la roue motrice (1) en fonction de la décélération γ .

Question 2. Par application du théorème du moment dynamique à la roue motrice (1) suivant l'axe (A, \vec{y}) et en utilisant la relation établie à la question précédente, déterminer l'expression du couple de freinage C_f en fonction de la décélération γ .

Question 3. Déterminer l'expression du moment dynamique de l'ensemble Σ par rapport à \mathcal{R} au point I_2 .

Question 4. Par application du théorème du moment dynamique en I_2 , déterminer la relation liant l'accélération γ et la composante normale Z_{01} . En déduire l'expression de la décélération limite $\gamma_{NB,1}$ pour laquelle $Z_{01} = 0$. Réaliser l'application numérique.

2.3 Condition de non-glissement

L'exigence de sécurité conduit également à prévenir le glissement au niveau des roues motrices. Il est pour cela nécessaire de déterminer la valeur de la décélération limite γ_{NG} correspondant à une perte d'adhérence. Le facteur d'adhérence au niveau du contact roue motrice/sol (assimilé ici au facteur de frottement) est noté μ .

Question 5. En se plaçant à la limite du glissement, déterminer à partir des expressions établies aux questions 1 et 4 (avant la simplification $Z_{01} = 0$), l'expression de la décélération limite $\gamma_{NG,1}$. Réaliser l'application numérique pour un facteur d'adhérence $\mu = 0,5$.

2.4 Synthèse

Une étude similaire à celle qui vient d'être menée conduit dans le cas d'une translation suivant $-\vec{x}$ (sens 2) aux valeurs limites : $\gamma_{NB,2} = 4,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (accélération limite pour le non-basculement) et $\gamma_{NG,2} = 5,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (accélération limite pour le non-glissement).

Question 6. En réalisant la synthèse de l'ensemble de ces résultats, conclure sur la valeur d'accélération/décélération proposée dans l'exigence Id. 1.1.3.1.1.

3 Asservissement en vitesse

Les déplacements de la base motorisée AGV sont contrôlés de la manière suivante : au niveau de chacun des 2 moteurs, des boucles de vitesse et de position assurent l'asservissement en vitesse et position du système. Nous ne nous intéresserons dans le sujet qu'à la boucle de vitesse. L'objectif de cette partie est de déterminer les paramètres de réglage de chacune des boucles d'asservissement en vitesse lors d'un mouvement de translation de l'AGV par rapport au sol.

Pour une consigne de vitesse $V_c(t)$ [m/s], les microcontrôleurs de pilotage génèrent une tension de consigne de rotation à appliquer à chaque moteur $u_c(t)$ [V]. Un traitement numérique de la vitesse relevée sur l'axe de chaque moteur fournit une tension mesurée $u_m(t)$ [V], image de la vitesse de rotation du moteur $\omega_m(t)$ [rad/s]. Un correcteur (défini par la suite) adapte le signal écart entre la tension de consigne et la tension mesurée, ce qui permet après correction et amplification, de définir la tension d'alimentation $u(t)$ [V] à appliquer aux moteurs.

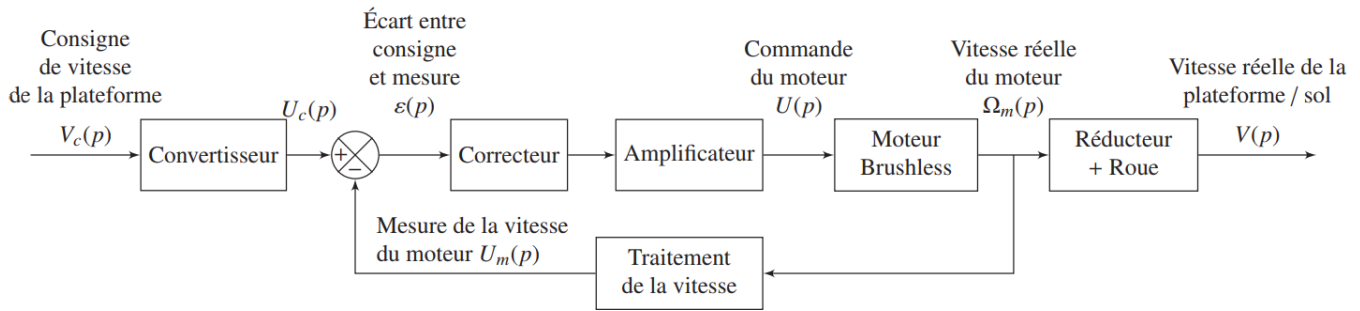


Figure 8: Schéma-bloc fonctionnel de l'asservissement en vitesse d'un des deux moteurs

| Blocs | Fonctions de transfert |
|------------------------------------|---|
| Convertisseur | K_{conv} (à déterminer) |
| Correcteur | $C(p)$ (réglé par la suite) |
| Amplificateur | $K_A = 7,9$ sans unité |
| Traitement numérique de la vitesse | $K_{\text{vit}} = 1,4 \times 10^{-3}$ V/(rad/s) |
| Réduction et roue | K_R (à déterminer) |

Indépendamment des résultats trouvés précédemment, la fonction de transfert du moteur brushless sera prise égale à :

$$H_m(p) = \frac{K_m}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)}$$

Avec $K_m = 8,85$ (rad/s)/V ; $\tau_1 = 0,027$ s ; et $\tau_2 = 0,0023$ s.

Le moteur est suivi d'un réducteur à deux étages : le premier avec un rapport de réduction $k_1 = \frac{1}{4}$ et le second avec un rapport de réduction $k_2 = \frac{1}{28,9}$. Le rayon r des roues motrices est de 115 mm.

Question 7. Déterminer les valeurs numériques et unités des gains K_R (ensemble réducteur et roue) et K_{conv} (convertisseur) en sachant que lorsque la vitesse réelle de l'AGV $V(t)$ est égale à la vitesse de consigne $V_c(t)$, l'écart $\varepsilon(t)$ doit être nul.

Question 8. Compléter le schéma-bloc sur le document-réponse en y faisant figurer les fonctions de transfert sous forme littérale dans le domaine de Laplace avec des conditions initiales nulles, ainsi que les signes des sommateurs

3.1 Étude du système avec une correction proportionnelle : $C(p) = K_p$

Question 9. Déterminer l'erreur en régime permanent de la boucle de vitesse pour une entrée en échelon d'amplitude V_0 . Permet-elle de satisfaire l'exigence Id. 1.1.3.2.1 ? Sinon, comment satisfaire cette exigence ?

3.2 Étude du système corrigé : $C(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right)$

Question 10. Déterminer, en fonction notamment de K_m , K_R , K_{vit} , τ_1 et τ_2 , l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte, sous la forme canonique suivante : $H_{BO}(p) = \frac{K_{BO}(1 + T_i p)}{p(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)}$. Donner l'expression littérale de K_{BO} .

On choisit de "compenser le pôle dominant", ce qui revient à choisir $T_i = \tau_1$.

Question 11. Déterminer l'erreur en régime permanent de la boucle de vitesse pour une entrée en échelon avec ce nouveau correcteur. Permet-elle de satisfaire l'exigence Id. 1.1.3.2.1 ?

L'exigence de stabilité Id. 1.1.3.3.1 impose une marge de phase de 45° ou supérieure. Indépendamment des réponses précédentes, on prendra $K_{BO} = 37.K_p$.

Question 12. Tracer les asymptotes et les courbes réelles avec $K_p = 1$ dans le plan de Bode du document-réponse. Déterminer le gain $K_p = K_p^*$ du correcteur permettant d'obtenir une marge de phase égale à 45° .

Question 13. Justifier par un calcul que, pour cette valeur de K_p^* , le système asservi présentera des dépassements.

Question 14. Déterminer, toujours pour cette valeur de K_p^* , le temps de réponse à 5% du système asservi en utilisant l'abaque du document-réponse.

La figure du document-réponse présente sur un même graphe les réponses à une consigne en échelon d'amplitude 0,3 m/s obtenues par simulation pour différentes valeurs de K_p .

Question 15. Conclure vis-à-vis des trois valeurs proposées du gain K_p , en faisant le lien avec les exigences de stabilité et de rapidité (notamment l'accélération qui ne doit pas dépasser $0,8 \text{ m/s}^2$). Appuyez votre réponse par des tracés que vous laisserez apparents sur votre document.