

Table des matières

Partie M. MECANIQUE ET MECANISMES	11
M1. GEOMETRIE	13
Fermetures géométriques	13
Chaîne fermée de solides	
M1.1. Mécanisme de levage	
M1.2. Mécanisme oscillant	
M1.3. Moteur à palettes	
M1.4. Mandrin de tour à commande numérique	
M1.5. Dispositif d'ouverture de clapet d'aération	
M1.6. Bras manipulateur de déchargement	
M1.7. Mécanisme d'indexage et limiteur de couple	
M1.8. Pompe doseuse	
Chaîne ouverte de solides	25
M1.9. Plate-forme de levage	
M1.10. Préhenseur – mesureur	
M1.11. Dispositif de chargement d'outil sur centre d'usinage	
M1.12. Articulation du coude – Géométrie	
Torseur des petits déplacements	31
M1.13. Orientation d'une machine sur appuis élastiques	
M1.14. Dispositif de contrôle actif d'un miroir de télescope	
M1.15. Radar météorologique	
M1.16. Manipulateur à deux axes	
M1. Géométrie – Corrigés	
Fermetures géométriques	39
Torseur des petits déplacements	51
M2. CINEMATIQUE DU SOLIDE	55
Cinématique analytique	
Chaînes fermées de solides – Mécanismes plans	56
M2.1. Mécanisme de levage	
M2.2. Commande d'inclinaison de volet	
M2.3. Variateur à roues toriques	
M2.4. Variateur à galets	
Chaînes ouvertes de solides	61
M2.5. Robot manipulateur à deux axes	
M2.6. Roue support	
Mouvements épicycloïdaux plans et spatiaux	64
M2.7. Différentiel de voiture	
M2.8. Moteur-roue hydraulique	
M2.9. Glissements aux contacts dans les roulements à billes	
M2.10. Broche multiplicatrice	
M2.11. Variateur à base fuyante	
M2.12. Articulation du genou – Cinématique	

Cinématique graphique	76
M2.13. Mécanisme de levage	
M2.14. Commande d'inclinaison de volet	
M2.15. Mandrin de tour à commande numérique	
M2.16. Dispositif d'ouverture de clapet d'aération	
M2.17. Bras manipulateur de déchargement	
M2.18. Dispositif de chargement d'outil sur centre d'usinage	
M2.19. Machine à poinçonner	
M2.20. Presse hydraulique	
M2.21. Machine à doser la pâte à choux	
M2. Cinématique – Corrigés	
Cinématique analytique	86
Cinématique graphique	101
M3. STATIQUE DU SOLIDE	111
Statique analytique	111
Liaison composée	112
M3.1. Chariot transporteur mural	
M3.2. Pignon d'attaque conique	
M3.3. Fixation d'un joint tripode en vue de son usinage	
Chaînes fermées de solides. Mécanismes plans	116
M3.4. Mécanisme de pompe volumétrique	
M3.5. Mécanisme oscillant	
M3.6. Mécanisme d'indexage et limiteur de couple	
M3.7. Dispositif d'ouverture de clapet d'aération	
M3.8. Mandrin de tour à commande numérique	
M3.9. Mandrin de tour à commande numérique. Bis. Frottement	
M3.10. Commande de translation par came et levier	
M3.11. Machine à poinçonner	
M3.12. Pince de robot manipulateur	
M3.13. Pince de levage « hand-gripp »	
Chaînes fermées de solides. Mécanismes spatiaux	131
M3.14. Variateur à anneau	
M3.15. Pompe doseuse	
Chaînes ouvertes de solides. Mécanismes plans	135
M3.16. Plate-forme de levage	
M3.17. Articulation du coude – Statique	
Statique graphique	138
Mécanismes plans. Sans frottement	138
M3.18. Mécanisme de levage	
M3.19. Machine à poinçonner	
M3.20. Presse hydraulique	
M3.21. Bras de robot	
M3.22. Mandrin de tour à commande numérique	
Mécanismes plans. Sans et avec frottement	145
M3.23. Pince de robot manipulateur	
M3.24. Pince de préhension	
M3.25. Piston de pompe volumétrique	
M3.26. La pyramide	

M3. Statique – Corrigés	
Statique analytique	157
Statique graphique	177
M4. DYNAMIQUE	195
Dynamique - PFD	195
Mouvements plans	196
M4.1. Rampe de transfert	
M4.2. Banc de mesure de moment d'inertie	
M4.3. Embrayage centrifuge	
M4.4. Robot manipulateur horizontal à axes orthogonaux	
M4.5. Robot manipulateur horizontal à axes parallèles	
M4.6. Pompe volumétrique	
M4.7. Transporteur horizontal	
Mouvements spatiaux	207
M4.8. Roue-support	
M4.9. Manège	
M4.10. Pales de ventilateur	
M4.11. Robot 3 axes	
M4.12. Régulateur de vitesse mécanique. PFD	
M4.13. Unité de translation	
M4.14. Equilibrage d'un arbre coudé	
M4.15. Régulateur de vitesse mécanique. Matrice d'inertie	
Théorème de la puissance ou de l'énergie cinétique	225
Solide seul	227
M4.16. Banc de mesure de moments d'inertie	
Ensemble de solides	228
M4.17. Elévateur	
M4.18. Réducteur à train épicycloïdal	
M4.19. Roue-support	
M4.20. Malaxeur	
M4.21. Boîte transfert pour véhicule tout terrain à quatre roues motrices	
M4.22. Mécanisme d'ouverture de porte	
M4.23. Régulateur de vitesse mécanique	
M4. Dynamique – Corrigés	
Dynamique – PFD	240
Théorème de la puissance ou de l'énergie cinétique	263
Partie R. RESISTANCE DES MATERIAUX	271
R1. TORSEURS DES EFFORTS INTERIEURS	272
Flexion - Torsion	273
R1.1. Arbre de transmission	
Flexion	273
R1.2. Poids propre des poutres	
Flexion - Compression - Traction	274
R1.3. Support d'élévateur	

R1.4. Commande de translation par levier	276
Sollicitations composées	276
R1.5. Arbre de renvoi	
R1.6. Efforts de coupe en tournage	
<i>R1. Torseurs des efforts intérieurs – Corrigés</i>	279
R2. RESISTANCE ET DIMENSIONNEMENT	285
Traction pure	285
R2.1. Structure porteuse	
R2.2. Presse	
Torsion pure	289
R2.3. Arbre plein ou arbre creux	
R2.4. Arbres de réducteur	
Flexion simple	290
R2.5. Poids propre des poutres	
Flexion – Compression	291
R2.6. Support d'élévateur	
R2.7. Dynamomètre	
<i>R2. Résistance et dimensionnement – Corrigés</i>	294
R3. FLECHE ET DEFORMEES	299
Flexion plane isostatique	299
R3.1. Capacité de charge d'une poutre support	
R3.2. Arbre de transmission	
R3.3. Rotulage des roulements	
R3.4. Poutre articulée soutenue par un câble	
R3.5. Liaison élastique – Liaison pivot à lame	
R3.6. Banc d'essai de clapet H.P.	
Flexion plane hyperstatique	307
R3.7. Défauts et autocontraintes	
R3.8. Liaison élastique – Liaison glissière à lames	
<i>R3. Flèches et déformées – Corrigés</i>	310
Partie T. THEORIE DES MECANISMES	319
T1. LIAISONS COMPOSEES	320
Liaison pivot	320
T1.1. Liaison pivot lisse	
T1.2. Liaison pivot à roulements	
Liaison glissière	322
T1.3. Liaison glissière lisse	
T1.4. Liaison glissière à galets	
<i>T1. Liaisons composées – Corrigés</i>	325

T2. CHAINES FERMEES DE SOLIDES	332
Mécanismes plans	333
T2.1. Mécanisme de levage	
T2.2. Commande d'inclinaison de volet	
T2.3. Mécanisme de pompe volumétrique	
T2.4. Poste de soudage	
T2.5. Commande d'inclinaison de volet	
Mécanismes spatiaux	340
T2.6. Roue support	
T2.7. Elévateur	
T2.8. Pompe doseuse	
T2. Chaîne fermée de solides – Corrigés	343
Partie A. AUTOMATIQUE – ASSERVISSEMENTS	
A1. FONCTIONS DE TRANSFERT – FTBO – FTBF	355
Motorisation électrique - premier et second ordre	355
A1.1. Motorisation d'un axe vertical de radar	
A1.2. Motorisation d'un axe vertical de radar - bis	
Perturbations	358
A1.3. Broche de tour à commande numérique	
Motorisation hydraulique	360
A1.4. Asservissement en position d'un vérin de machine transfert	
Boucles imbriquées	361
A1.5. Régulation de la vitesse de rotation avec boucle de courant	
Boucles imbriquées et perturbations	363
A1.6. Asservissement de la position avec boucle de vitesse	
A1. Fonctions de transfert – FTBO – FTBF – Corrigés	365
A2. REPONSES INDICIELLES	371
Premier ordre	371
A2.1. Motorisation d'un axe vertical de plateau tournant	
A2.2. Régulation en vitesse d'un mécanisme de compression par vis	
A2.3. Asservissement en vitesse d'une poulie de train à bande	
Second ordre	378
A2.4. Dispositif d'orientation d'un panneau solaire	
A2.5. Asservissement en vitesse d'une roue de véhicule électrique	
A2.6. Amortisseur mécanique	
A2. Réponses indicielles - Corrigés	386

A3. ANALYSE FREQUENTIELLE	395
Réponse fréquentielle – Premier ordre	395
A3.1. Régulation en vitesse d'un mécanisme de compression par vis	
Réponse fréquentielle – Second ordre	397
A3.2. Asservissement en position d'un plateau de transfert de pièces	
A3.3. Mécanisme de basculement asservi en position	
A3.4. Augmentation de la marge de gain par correcteur proportionnel	
A3.5. Augmentation de la marge de phase par correcteur proportionnel	
A3.6. Utilisation d'un correcteur intégral	
A3. Analyse fréquentielle - Corrigés	410

M1. GEOMETRIE

Les exercices qui suivent démarrent par les **fermetures géométriques** des chaînes de solides. C'est un moyen commode et simple pour déterminer des lois entrée-sortie, des longueurs ou angles variables dans des mécanismes et pour rechercher des trajectoires.

FERMETURES GEOMETRIQUES

M1.1 Mécanisme de levage

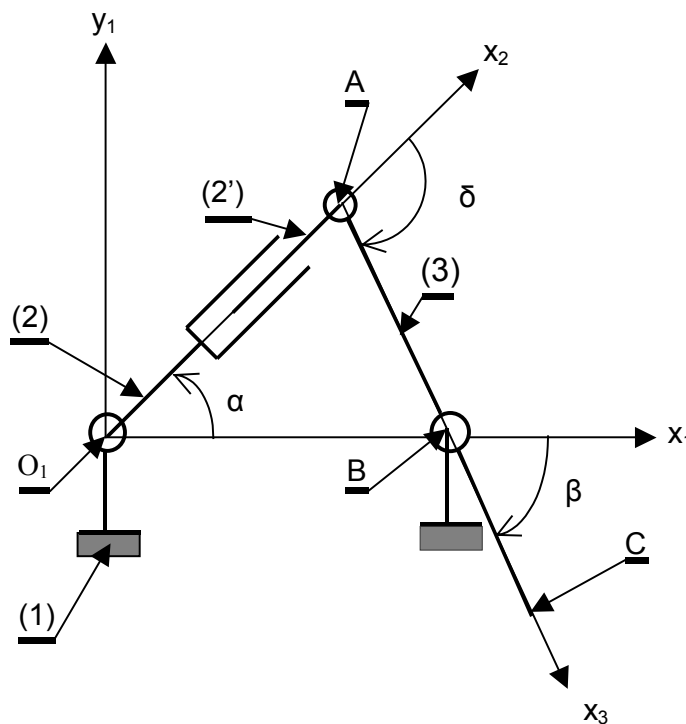
Fermeture géométrique
Chaîne fermée de solides - Mécanisme plan

Le schéma ci-joint représente un dispositif de levage constitué :

- du vérin de corps (2) et de tige (2'),
- du levier (3),
- du bâti (1).

La charge se situe au point C.

L'objet de cet exercice est de déterminer la relation entre l'angle de basculement du levier (3) et l'amplitude de la translation de la tige de vérin (2'). Un prolongement en cinématique montre comment on peut relier la vitesse de montée de la charge à la vitesse d'ouverture du vérin à partir de considérations géométriques.



$$O_1A = \lambda, AB = b, O_1B = a, CB = c$$

$$(\vec{i}_1, \vec{i}_2) = \alpha, (\vec{i}_2, \vec{i}_3) = \delta \text{ et } (\vec{i}_1, \vec{i}_3) = \beta$$

M2.18 Dispositif de chargement d'outil sur centre d'usinage - Corrigé

- $\vec{V}(B \in 3/1)$? $\vec{V}(B \in 3/1) = \vec{V}(B \in 3/2) + \vec{V}(B \in 2/1)$: $\vec{V}(B \in 3/2)$ suivant AB, $\vec{V}(B \in 2/1)$ est perpendiculaire à AB et $\vec{V}(B \in 3/1)$ est perpendiculaire à EB car $\vec{V}(B \in 3/1) = \vec{V}(B \in 4/1)$ et $\vec{V}(B \in 4/1)$ est perpendiculaire à EB $\Rightarrow \vec{V}(B \in 3/1)$,

- $\vec{V}(B \in 4/1) = \vec{V}(B \in 3/1)$,

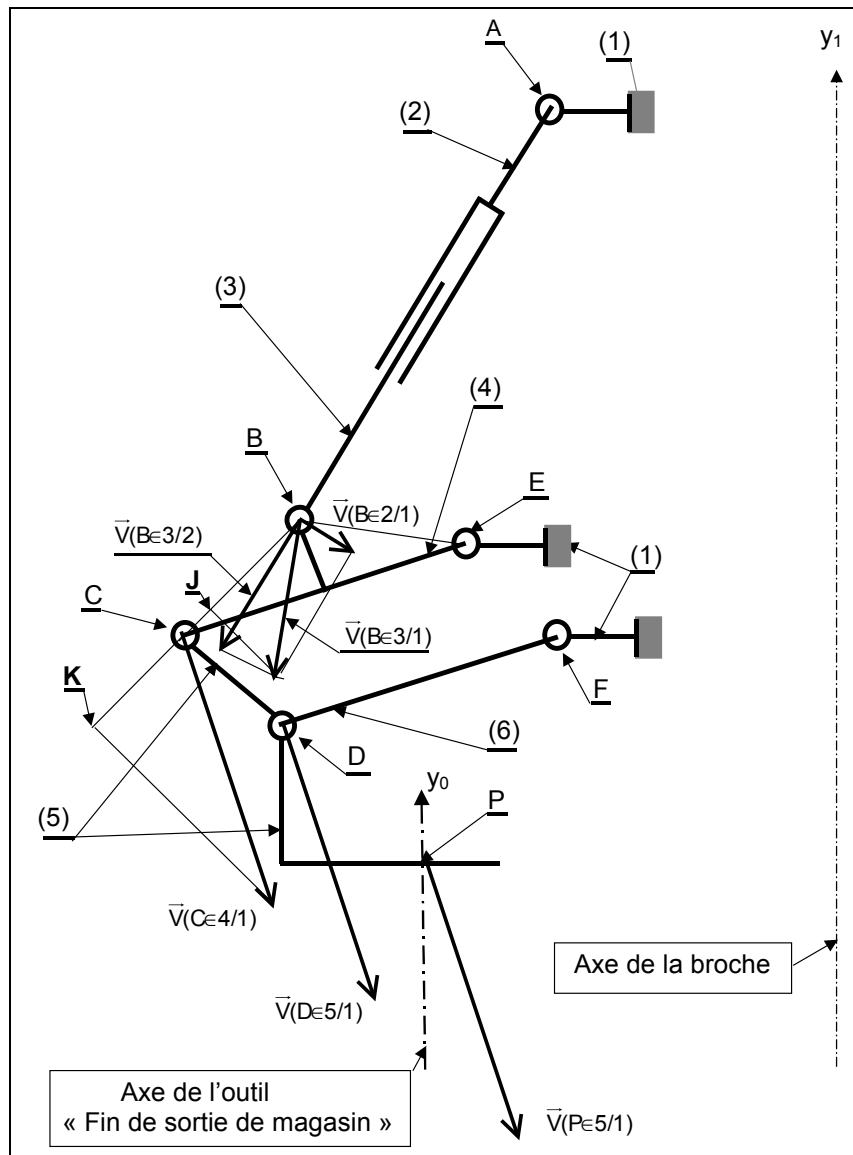
- $\vec{V}(C \in 4/1)$? Cette vitesse est perpendiculaire à EC. Equiprojectivité de $\vec{V}(C \in 4/1)$ et $\vec{V}(B \in 4/1)$ sur BC : $\overline{BJ} = \overline{CK} \Rightarrow \vec{V}(C \in 4/1)$,

- $\vec{V}(D \in 5/1)$?

- $\vec{V}(C \in 5/1) = \vec{V}(C \in 4/1)$ et $\vec{V}(C \in 5/1)$ est perpendiculaire à EC,

- $\vec{V}(D \in 6/1)$ est perpendiculaire à FD et $\vec{V}(D \in 5/1) = \vec{V}(D \in 6/1)$,

- EC est toujours parallèle à FD (voir particularités géométriques citées en énoncé) alors $\vec{V}(D \in 5/1)$ est parallèle à $\vec{V}(C \in 5/1)$: le solide (5) est donc en translation circulaire. Le point P appartient au solide (5) $\Rightarrow \vec{V}(P \in 5/1) = \vec{V}(D \in 5/1) = \vec{V}(C \in 4/1)$. $V(P \in 5/1) = 1,8$. $V(B \in 3/2) = 0,014$ m/s.



M4. DYNAMIQUE DU SOLIDE

Les exercices sont de deux types :

- **dynamique du solide** : application du principe fondamental de la dynamique,
- **énergétique** : application du théorème de la puissance (ou de l'énergie cinétique).

Ils concernent des mécanismes plans et spatiaux, avec et sans frottement.

PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA DYNAMIQUE

Dans cette série, est développée en particulier la notion d'équation scalaire utile pour répondre à un besoin précis. Cette notion évite dans certains cas l'écriture systématique des 3 ou 6 équations issues du principe fondamental de la dynamique alors qu'une seule peut suffire pour déterminer la relation ou l'inconnue recherchée.

Notations

* **Torseurs d'action mécanique** : $\{\mathfrak{A}(1 \rightarrow 2)\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{R}(1 \rightarrow 2) \\ \vec{M}_A(1 \rightarrow 2) \end{array} \right\}_A$

* **Torseur cinématique** : $\{\mathfrak{V}(i/j)\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{\Omega}(i/j) \\ \vec{V}(M \in i/j) \end{array} \right\}_M$

* **Torseur cinétique** du solide S en mouvement par rapport au repère R : $\{\mathfrak{C}(S/R)\}$. Ses éléments de réduction sont la quantité de mouvement ou résultante cinétique $\vec{P}(S/R)$ et le

moment cinétique $\vec{\sigma}_A(S/R)$ en A : $\{\mathfrak{C}(S/R)\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{P}(S/R) \\ \vec{\sigma}_A(S/R) \end{array} \right\}_A$

* **Torseur dynamique** du solide S en mouvement par rapport au repère R : $\{\mathfrak{D}(S/R)\}$. Ses éléments de réduction sont la quantité d'accélération ou résultante dynamique $\vec{R}_d(S/R)$ et le

moment dynamique $\vec{\delta}_A(S/R)$ en A : $\{\mathfrak{D}(S/R)\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{R}_d(S/R) \\ \vec{\delta}_A(S/R) \end{array} \right\}_A$.

* **Tenseur d'inertie** d'un solide S en A : $\overline{\overline{I}}_A(S)$ dans les relations formelles, $\overline{\overline{I}}_A(S)_{B_S}$ lorsque l'on donne son expression matricielle au point A dans la base B_S en général liée au solide :

$$\overline{\overline{I}}_A(S)_{B_S} = \begin{bmatrix} A_1 & -F_1 & -E_1 \\ -F_1 & B_1 & -D_1 \\ -E_1 & -D_1 & C_1 \end{bmatrix}_{A, B_S}$$

Formules

* Quantité de mouvement : $\vec{P}(S/R) = m \cdot \vec{V}(G \in S/R)$

* Moment cinétique :

- en un point C quelconque fixe dans R : $\vec{\sigma}_C(S/R) = \overline{\overline{I}}_C(S) \cdot \vec{\Omega}(S/R)$

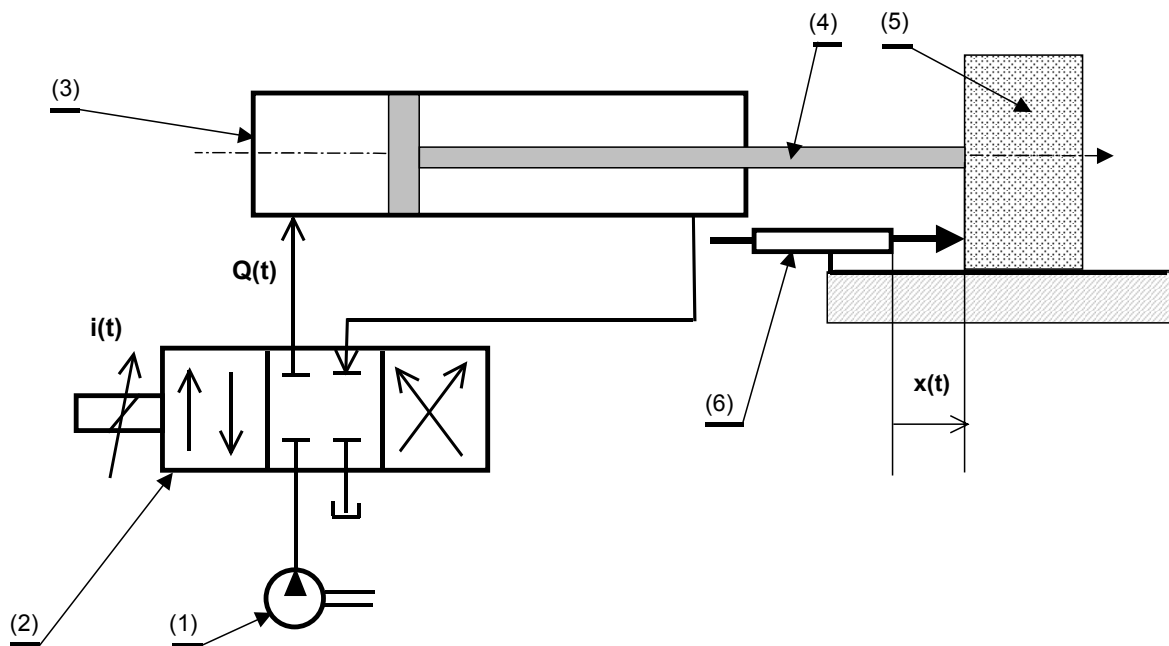
- en G, centre d'inertie fixe ou non : $\vec{\sigma}_G(S/R) = \overline{\overline{I}}_G(S) \cdot \vec{\Omega}(S/R)$

A1.4 Asservissement en position d'un vérin de machine transfert

Motorisation hydraulique
Fonction de transfert du premier ordre

Le sous-ensemble représenté ci-après est constitué :

- d'une pompe hydraulique (1), à un seul sens de flux, délivrant le fluide de commande,
- d'un distributeur (2) dont la commande en intensité $i(t)$ engendre un débit qui lui est proportionnel : $Q(t) = K_d \cdot i(t)$,
- d'un vérin (3), de section utile S , dont la tige (4) pousse la pièce à transférer (5).

**Questions**

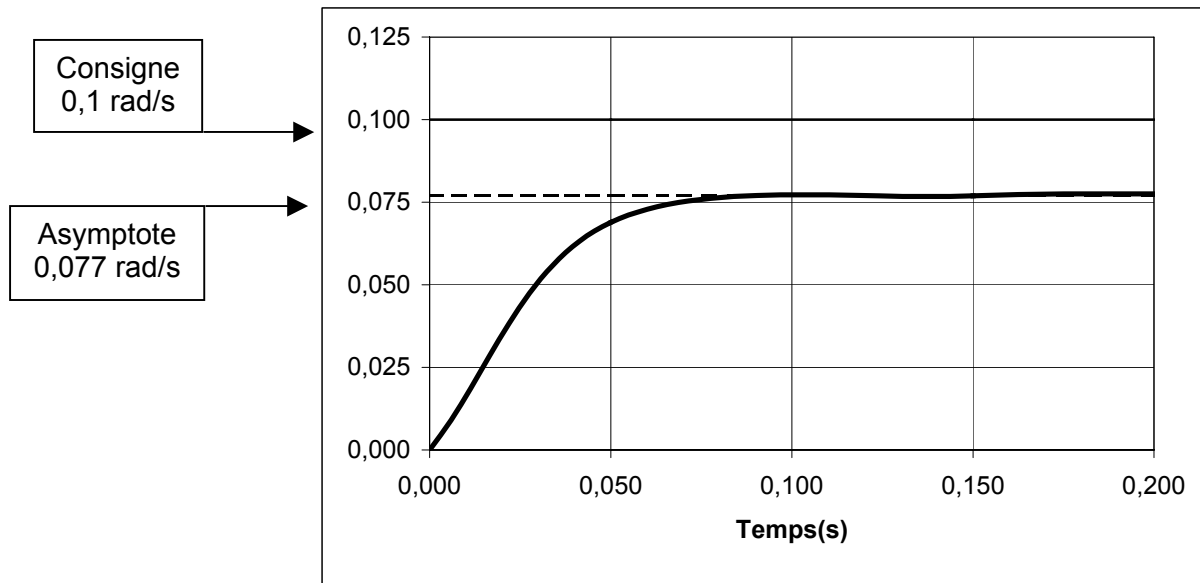
Le schéma-bloc de l'asservissement est représenté ci-après. Un capteur de position (6) de constante K_c repère la position $x(t)$ de la tige de vérin et délivre une tension $u'(t)$ envoyée dans le comparateur de la boucle d'asservissement. La consigne est la position $x_{\text{cons}}(t)$ de la tige de vérin. Un amplificateur électronique de rapport K_a transforme la tension de sortie du comparateur en intensité.

1. Compléter les différents blocs (figure-réponse 1) :
 - indiquer, pour chacun d'eux, la fonction de transfert,
 - préciser, entre chaque bloc, la variable et son unité (on notera v la vitesse de déplacement de la tige de vérin).

2. Déterminer la fonction de transfert du moteur $H(p) = \frac{X(p)}{X_{\text{cons}}(p)}$. La mettre sous la forme canonique, préciser son ordre, son gain et sa constante de temps.

3. Lorsque le vérin est à l'arrêt à la position $x = 0$, on désire analyser son comportement face à une variation brusque et brève de la consigne de position. On rappelle que la transformée d'une consigne du type impulsion de Dirac d'amplitude x_0 est $E(p) = x_0$.

- a. Déterminer la valeur de la position finale x_f du vérin soumis à une telle impulsion.



e. Erreur statique : $\varepsilon_s = \lim_{t \rightarrow \infty} [U_{\text{cons}}(t) - K_g \cdot \Omega_{\text{roue}}(t)]$ ou directement (voir rappel en tête de chapitre) $\varepsilon_s = \lim_{t \rightarrow \infty} [U_{\text{cons}}(t) \cdot \frac{1}{1+FTBO(t)}] = \lim_{t \rightarrow \infty} [U_{\text{cons}}(t) \cdot \frac{1}{1+C \cdot H_m(t) \cdot K_g}]$

soit en appliquant le théorème de la valeur finale :

$$\varepsilon_s = \lim_{p \rightarrow 0} [p \cdot \frac{0,02}{p} \cdot \frac{1}{1+C \cdot \frac{1}{1+0,1 \cdot p + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot p^2} \cdot K_g}] = \frac{0,02}{1+C \cdot 16,7 \cdot K_g} = \underline{4,6 \cdot 10^{-3} \text{ volt}} \text{ pour}$$

$C = 1$ soit un écart par rapport à la consigne de 23 % : valeur importante, une correction s'impose.

f. $\frac{\varepsilon_s}{U_{\text{cons}}} = \frac{\varepsilon_s}{5} = \frac{1}{1+C \cdot 16,7 \cdot K_g}$ et $\frac{\varepsilon_s}{U_{\text{cons}}} < 0,05 \Rightarrow \underline{C > 5,7}$

A2.5 Asservissement en vitesse d'une roue de véhicule électrique - Corrigé

1. $K_m = \frac{150}{10} = \underline{15}$. $D = 14$ tours/min et $D = K_m \cdot 10 \text{ e}^{-\frac{z \cdot \pi}{\sqrt{1-z^2}}}$ $\Rightarrow z_m = \underline{0,6}$ (courbe en fin de corrigé).

$t_D = 0,045 \text{ s}$ et $t_D = \frac{\pi}{\omega_0 m \cdot \sqrt{1-z^2}} \Rightarrow \omega_0 = \underline{87 \text{ rad/s}}$

b. $H_m(p) = \frac{15}{1+1,5 \cdot 10^{-2} \cdot p + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot p^2}$

On pourra vérifier que le dénominateur a des pôles complexes, ce qui est caractéristique d'un système peu amorti ($z < 1$).

2. a. C'est une chaîne à retour unitaire : $H(p) = \frac{\Omega_{\text{roue}}(p)}{U_{\text{cons}}(p)} = \frac{FTBO(p)}{1+FTBO(p)} = \frac{C \cdot H_m(p)}{1+C \cdot H_m(p)}$ qui

donne $H(p) = \frac{\frac{C \cdot K_m}{1+C \cdot K_m}}{1+\frac{1,4 \cdot 10^{-2}}{1+C \cdot K_m} \cdot p + \frac{1,3 \cdot 10^{-4}}{1+C \cdot K_m} \cdot p^2}$ ou $H(p) = \frac{\frac{15 \cdot C}{1+15 \cdot C}}{1+\frac{1,4 \cdot 10^{-2}}{1+15 \cdot C} \cdot p + \frac{1,3 \cdot 10^{-4}}{1+15 \cdot C} \cdot p^2}$