EPREUVE SPECIFIQUE - FILIERE PSI

SCIENCES INDUSTRIELLES (S.I.)

Durée : 4 heures

N.B. : Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Les calculatrices sont autorisées

Le sujet complet comporte 31 pages dont :

23 pages de texte de présentation et énoncé du sujet
4 pages d'annexes
4 pages de document réponse **à rendre obligatoirement avec la copie**

Toute documentation autre que celle fournie est interdite.

REMARQUES PRÉLIMINAIRES

- Il est conseillé d'utiliser des feuilles de papier brouillon afin de mettre au point les développements mathématiques, schémas, graphes et courbes, avant de les recopier au propre sur la copie à rendre.
- Il est demandé au candidat de bien vouloir inscrire les résultats et les développements nécessaires aux différentes questions sur sa copie, **en précisant bien le numéro de la question traitée et, si possible, dans l'ordre des questions.** Les résultats attendus seront obligatoirement entourés.

Prothèse myoélectrique

1. Présentation

Le groupe Otto Bock est leader mondial dans le secteur de l'appareillage orthopédique.
L'objet de cette étude est une prothèse de main myoélectrique fabriquée par Otto Bock (figure 1).

Figure 1. Prothèse de main

Chaque contraction d'un muscle engendre une tension électrique très faible qui peut être mesurée sur la peau. Ces tensions sont amplifiées et utilisées pour l'ouverture et la fermeture de la prothèse. La prothèse est recouverte d'un gant de protection esthétique en PVC (figure 3) qui donne à l'ensemble une finition naturelle.

Figure 2. Myoélectrodes

Le comportement attendu d'une prothèse est d'imiter le mieux possible le fonctionnement d'un membre humain dans toute sa complexité. Une prothèse myoélectrique est commandée à partir de la contraction des muscles sur lesquels sont placés des capteurs appelés myoélectrodes (figure 2).

Figure 3. Gant de protection

2. Description structurelle et fonctionnelle de la prothèse

L'ensemble de la prothèse (voir Figure 4) est constitué d'un motoréducteur à courant continu à double sens de rotation qui transmet son mouvement à un coupleur. Le mouvement de sortie de ce coupleur est transmis au préhenseur par un engrenage conique de rapport 1.

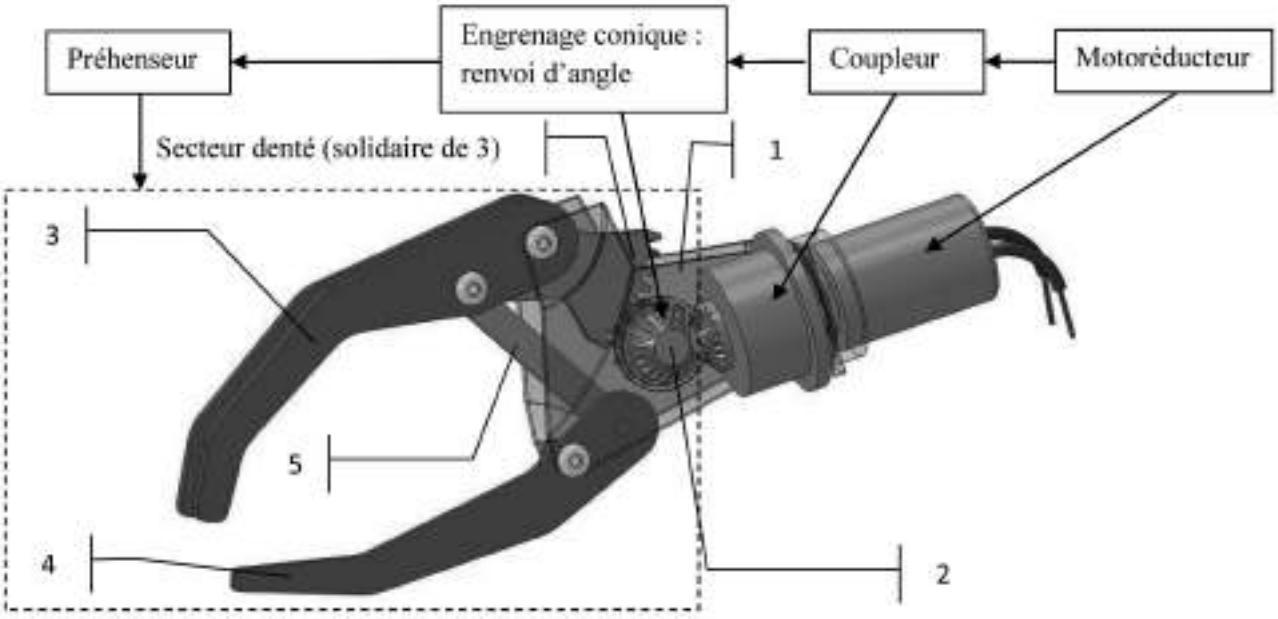


Figure 4. Vue globale de la prothèse

Le diagramme des inter-acteurs ci-dessous précise les fonctions de service (F.S.) de la prothèse.

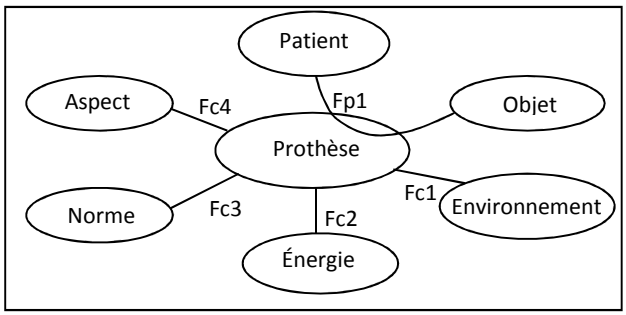


Figure 5. Diagramme des inter-acteurs

La fonction principale est de « permettre au patient de saisir un objet de façon naturelle ». Les Fonctions Techniques de la prothèse, définies à partir des fonctions de service, sont données dans le cahier des charges ci-dessous :

F.S.	Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité
Fp1	FT1 : capter la volonté du patient	La commande doit réagir à la volonté du patient exprimée à travers l'intensité des contractions musculaires.		
	FT2 : mettre les doigts en mouvement	- Pour un niveau de consigne donné, l'ouverture et la fermeture des doigts doivent se faire à vitesse d'approche constante pendant toute la plage de mouvement (vitesse indépendante de l'angle des doigts). - La vitesse d'approche des doigts doit pouvoir être réglable par modulation du niveau de commande.	Entre 15 et 130 $mm \cdot s^{-1}$.	± 15 % ± 15 %
	FT3 : pallier la perte de sensation tactile	La vitesse et le couple doivent s'adapter selon la présence d'un objet en contact avec les doigts.		
	FT4 : moduler l'effort au contact lors de la phase de serrage d'un objet	FT41 : L'effort de préhension est indépendant de l'angle des doigts. FT42 : La force de préhension doit pouvoir varier par modulation du niveau de commande. FT43 : Le serrage doit être conforme au serrage humain : • aucun dépassement ; • temps de réponse à 5 % de la phase de serrage (entre le contact avec l'objet saisi et la fin du serrage) ; • écart statique nul.	Entre 0 et 90 N. Entre 250 ms et 500 ms.	± 15 %
	FT 5 : s'adapter au membre amputé	Les formes doivent être adaptées au membre amputé et les fixations doivent rendre la prothèse et le membre parfaitement solidaires.		
Fc1	FT6 : être insensible aux perturbations électromagnétiques	La commande ne doit pas être perturbée par le « bruit » (perturbations électromagnétiques) : pas d'ouverture/fermeture intempestive.		
	FT7 : être insensible aux contextes d'utilisation	Le comportement doit être indépendant de la température extérieure, du gant, de la nature des objets à serrer.		
Fc2	FT8 : être énergiquement autonome	Batterie à grande autonomie, de poids et encombrement minimisés.	Autonomie : 100 h.	± 10 %
Fc3	Respecter les normes en vigueur	Respecter les normes médicales dans le domaine des prothèses.		
Fc4	Avoir un aspect naturel	Gant de couleur proche de celle de la peau du patient et en matériau antiallergique.		

Tournez la page S.V.P.

On se propose dans ce sujet d'analyser les solutions mises en jeu afin de remplacer au mieux le membre amputé. Pour cela, on suivra la démarche suivante :

- tout d'abord (partie 3), on analysera comment la vitesse des doigts est pilotée en fonction de l'intensité des contractions musculaires (fonction technique FT1) indépendamment de l'angle d'ouverture des doigts (FT2) ; on vérifiera par ailleurs que l'angle d'ouverture n'influe pas sur l'amplitude de l'effort de serrage (FT41) ;
- ensuite (partie 4), on analysera les solutions mises en jeu afin d'obtenir une évolution de l'effort de serrage qui soit naturelle (FT43) ;
- enfin, (partie 5), on analysera les solutions mises en jeu afin de pallier la perte de sensation tactile (FT3).

3. Gestion de l'alimentation, de la vitesse d'approche et du couple de serrage

3.1. Analyse de la commande (fonction technique FT1 : « capter la volonté du patient »)

3.1.1. Les électrodes de mesures

Un électromyogramme (EMG) est un potentiel électrique généré au niveau des fibres musculaires lorsque les muscles se contractent. La prothèse EMG utilise les signaux myoélectriques générés par les muscles. Les signaux sont mesurés par des électrodes de surface fixées sur la peau.
Les électromyogrammes sont proportionnels à l'amplitude des contractions musculaires. Cependant, ce sont de très faibles signaux (quelques microvolts), complexes, bruités par de nombreuses tensions parasites. Leur utilisation nécessite par conséquent un traitement du signal spécifique.
Le signal (en volts) issu de l'électrode après traitement (filtrage et amplification) sert de référence à la carte de commande de la prothèse (contrôleur de main). L'amplification permet d'atteindre une tension de référence en sortie de 0 à 3 V en fonction de l'amplitude de contraction musculaire du patient.

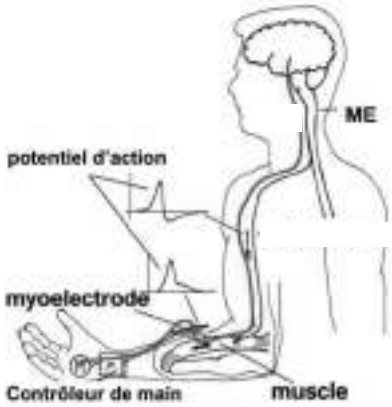


Figure 6. Schéma d'implantation des myoélectrodes

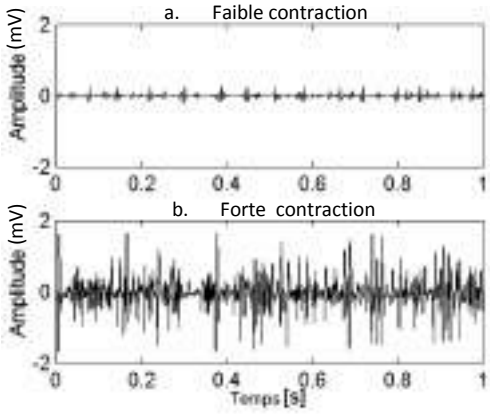


Figure 7. Signaux issus des myoélectrodes avant traitement

La Figure 6 montre l'implantation d'une seule électrode mais dans le cas général, le patient est muni de deux électrodes :

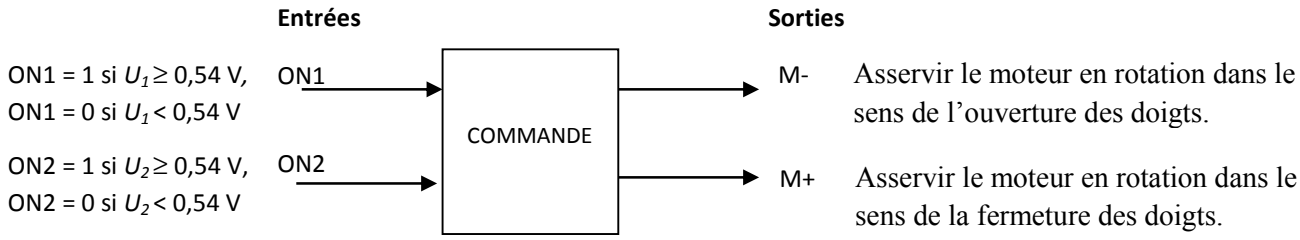
- l'électrode 1 est située sur le muscle extenseur et commande l'ouverture ;
- l'électrode 2 est située sur le muscle fléchisseur et commande la fermeture.

Problématique *: malgré le filtrage, les signaux issus des électrodes restent quelque peu bruités. On se propose ici d'analyser les solutions mises en œuvre afin de s'affranchir de ces variations de tensions.*

3.1.2. Optimisation de la commande

Afin de ne pas continuellement mettre à contribution la batterie, le moteur n'est piloté que lorsque les contractions musculaires dépassent une valeur seuil.
Dans une première approche (Figure 8.a), l'ouverture est déclenchée lorsque la tension après traitement numérique de l'électrode 1 notée U_1 dépasse le seuil de 0,54 V ($U_1 \geq 0{,}54$ V).
Il en est de même pour la fermeture qui se produit lorsque la tension U_2 de l'électrode 2 dépasse le seuil de 0,54 V ($U_2 \geq 0{,}54$ V).

Les variables d'entrée/sortie de type binaire sont les suivantes :



Cahier des charges :

- l'ouverture (respectivement la fermeture) débute dès que $U_1 \geq 0{,}54$ V (respectivement $U_2 \geq 0{,}54$ V) et s'arrête dès que $U_1 < 0{,}54$ V (respectivement $U_2 < 0{,}54$ V) ;
- si U_1 et U_2 dépassent toutes deux 0,54 V, alors le moteur est stoppé.

Question 1.

Justifier que cette première solution technique est de type combinatoire et exprimer alors les sorties M- et M+ en fonction des variables d'entrée.

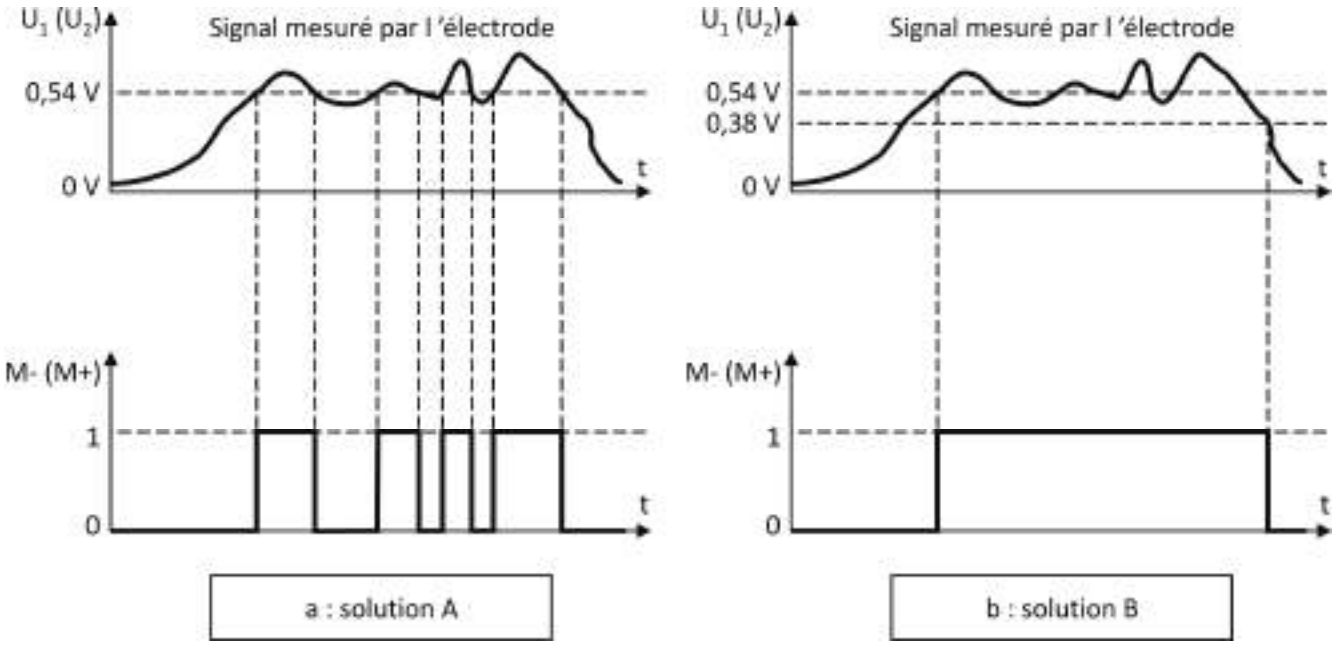
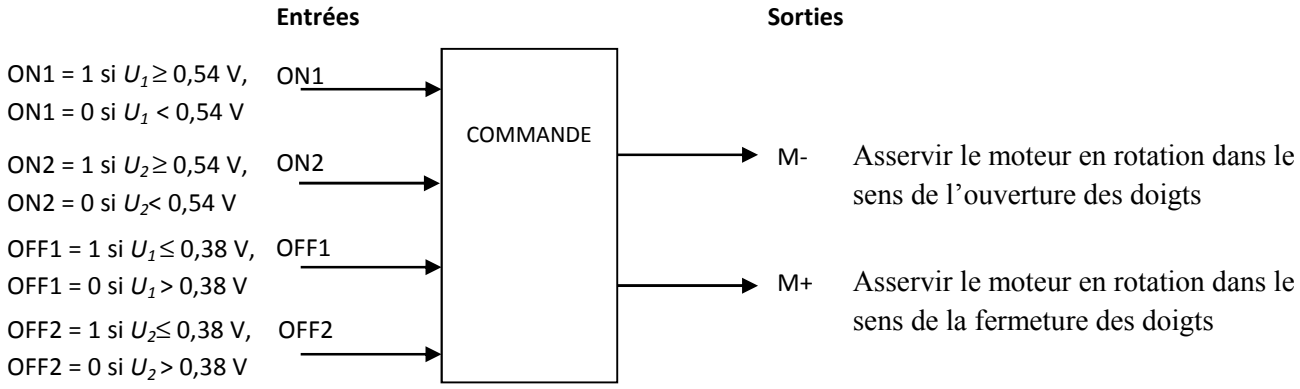


Figure 8. Commandes des moteurs

Tournez la page S.V.P.

On souhaite améliorer cette commande fortement perturbée par le bruit, car instable pour des tensions variant autour de 0,54 V.
Une autre solution (Figure 8.b) consiste à mettre en rotation le moteur dans le sens de l'ouverture (respectivement fermeture) des doigts dès que la tension délivrée par l'électrode 1 (respectivement électrode 2) passe au-dessus du seuil de 0,54 V et s'arrête dès que celle-ci passe en-dessous du seuil de 0,38 V.

Les variables d'entrées/sorties de la carte de commande sont alors les suivantes :



Cahier des charges :

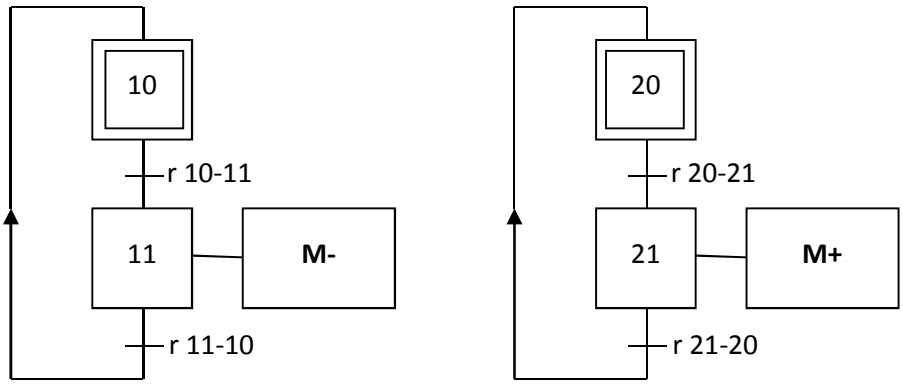
L'ouverture (respectivement la fermeture) débute dès que $U_1 \geq 0,54$ V (respectivement $U_2 \geq 0,54$ V) et s'arrête dès que $U_1 \leq 0,38$ V (respectivement $U_2 \leq 0,38$ V).

Hypothèse : dans un premier temps, on supposera que les tensions U_1 et U_2 ne peuvent pas être simultanément supérieures ou égales à 0,38 V.

Question 2.

a. Justifier qu'il s'agit alors d'un système séquentiel.

La structure du grafcet de commande du moteur est donnée ci-dessous.



b. Donner les expressions des réceptivités r 10-11, r 11-10, r 20-21 et r 21-20 en respectant l'hypothèse ci-dessus.

La qualité du signal dépend fortement de la position de l'électrode sur le muscle (Figure 9). De plus l'électrode inutilisée peut parasiter l'électrode active.

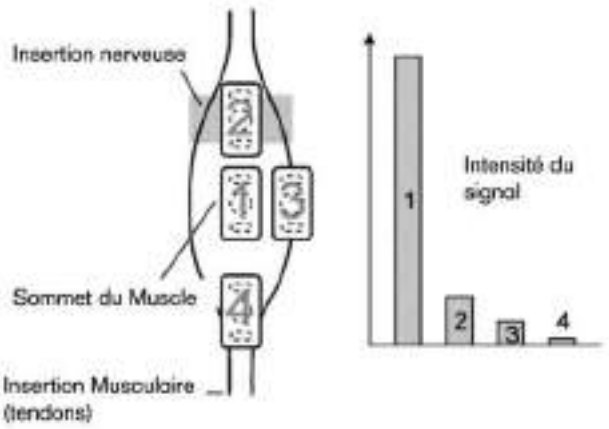


Figure 9. Influence de la position de l'électrode sur le signal mesuré

En conséquence, l'hypothèse précédente est inexacte et la commande doit être améliorée de la façon suivante :

- l'ouverture (respectivement la fermeture) débute dès que $U_1 \geq 0{,}54$ V (respectivement $U_2 \geq 0{,}54$ V) et s'arrête dès que $U_1 \leq 0{,}38$ V (respectivement $U_2 \leq 0{,}38$ V) ;
- si les tensions issues des électrodes dépassent toutes les deux le seuil de 0,54 V, alors le contrôle de l'ouverture ou de la fermeture est distingué par le premier signal à dépasser ce seuil (« first signal wins ») : l'électrode 2 (respectivement 1) n'a aucune influence sur la commande tant que le moteur est en phase d'ouverture (respectivement fermeture) (voir Figure 10) ;
- si les tensions des électrodes ne redescendent pas sous le seuil de 0,38 V, le moteur s'arrête au bout de 5 secondes ;
- dans le cas où U_1 et U_2 atteindraient simultanément le seuil 0,54 V, la priorité est donnée à l'ouverture.

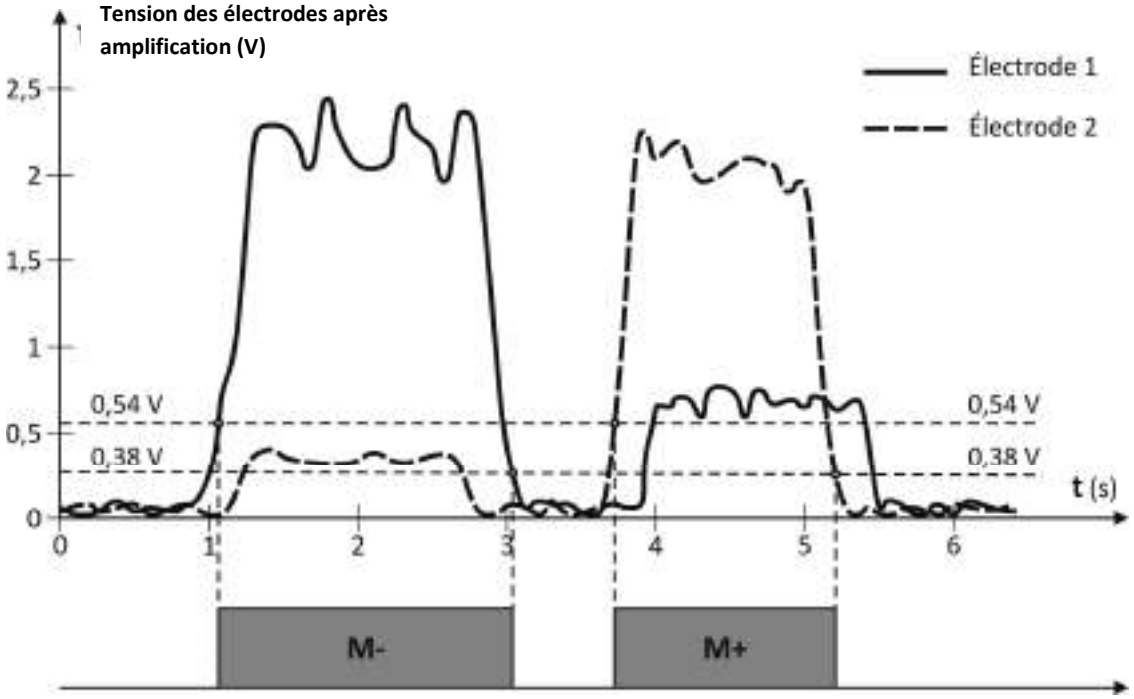


Figure 10. Nouvelle commande « first signal wins »

Tournez la page S.V.P.

Question 3.

Donner les nouvelles expressions des réceptivités r 10-11, r 11-10, r 20-21 et r 21-20.

3.2. Analyse de l'évolution de la vitesse d'ouverture des doigts (fonction technique FT2 : « mettre les doigts en mouvement »)

Le préhenseur (voir Figure 4) est constitué du bâti 1, du pignon moteur 2, du doigt supérieur 3, du doigt inférieur 4 et de la biellette 5. Un renvoi d'angle à pignons coniques transmet le mouvement issu du coupleur au pignon moteur. Celui-ci entraîne le doigt supérieur 3 par l'intermédiaire d'un secteur denté.

Le modèle d'étude retenu pour ce préhenseur est donné par le schéma cinématique plan ci-dessous (Figure 11). Le pignon 2 est en liaison pivot d'axe $O\vec{z}$ avec le bâti 1. Il entraîne le secteur denté lié au doigt supérieur 3 (JABE). Le contact entre le pignon 2 et le secteur denté est supposé ponctuel et se fait en J.

Le doigt supérieur 3 est en liaison pivot d'axe $A\vec{z}$ avec le bâti 1. Une biellette 5, en liaison pivot d'axe $B\vec{z}$ avec le doigt supérieur, transmet son mouvement au doigt inférieur 4 par la liaison pivot d'axe $C\vec{z}$. Le doigt inférieur 4 (CDF) est en liaison pivot d'axe $D\vec{z}$ avec le bâti 1.

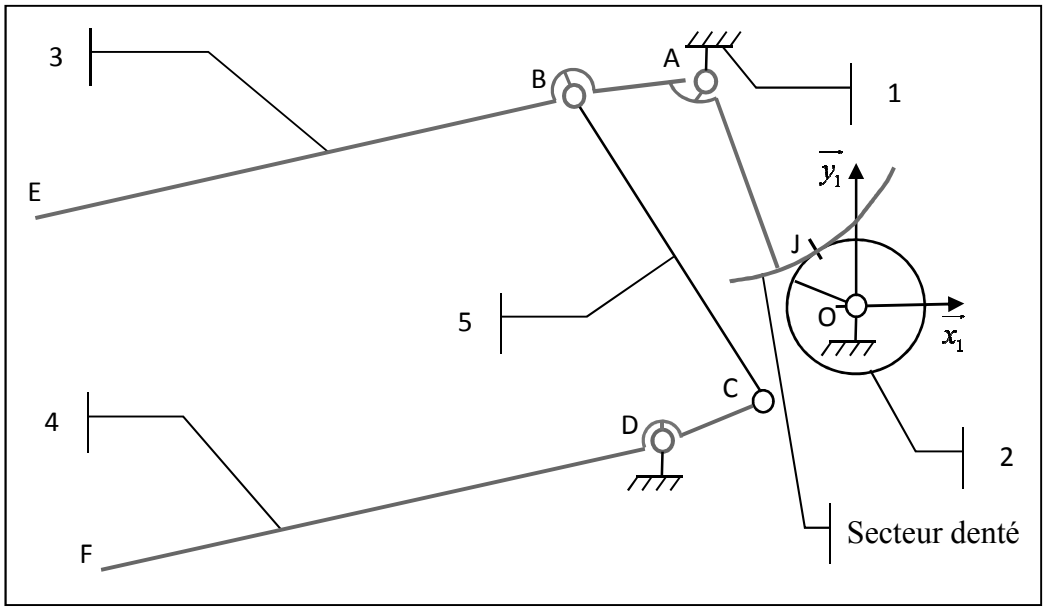


Figure 11. Schéma cinématique du préhenseur

Dans ce modèle d'étude, les épaisseurs des doigts et du gant sont négligées.

***Problématique** : L'objectif de cette étude est de vérifier que la vitesse d'approche des doigts est bien constante conformément à la fonction technique FT2 du cahier des charges.*

La vitesse d'approche V_{app} est définie à partir de la distance x entre les points E et F :

$$x = \left\|\overrightarrow{FE}\right\| \text{ et } V_{app} = -\frac{dx(t)}{dt}.$$

Cette vitesse d'approche correspond donc à la projection de la vitesse du point E de 3 par rapport à 4 sur la direction de (EF), soit : $V_{app} = \vec{V}(E,3/4\,).\frac{\overrightarrow{EF}}{\left\|\overrightarrow{EF}\right\|}$.

La fréquence de rotation du pignon 2 par rapport au bâti 1 est de 20 tr·min^{-1}.
Le rayon primitif (R_{p2}) de ce pignon est de 6 mm.

Le rayon primitif du secteur denté (R_{p3}) est de 20 mm.
On prendra comme échelle des vitesses pour les constructions graphiques 0,01 m·s^{-1} ↔ 10 mm.

Le point J est le point de tangence des cercles primitifs des dentures.

Question 4.

Pour cette question, toutes les justifications de vos constructions seront clairement expliquées sur votre copie.

a. Calculer $\left\|\vec{V}(J,2/1)\right\|$, norme de la vitesse du point J de 2 par rapport à 1. Tracer à l'échelle cette vitesse sur le document réponse DR1 dans le cas de la fermeture des doigts.

b. Sur ce même document réponse, déterminer alors graphiquement $\vec{V}(E,3/1)$ la vitesse du point E du doigt supérieur 3 par rapport au support 1.

c. Expliquer pourquoi le Centre Instantané de Rotation (C.I.R.) de 3 par rapport à 4 (I_{34}) se trouve à l'intersection des droites (AD) et (BC).

d. En utilisant ce C.I.R., déterminer alors graphiquement la vitesse d'approche des points E et F telle qu'elle a été définie précédemment. Indiquer votre résultat sur le document réponse.

La courbe ci-dessous (Figure 12) a été obtenue en répétant cette construction pour un certain nombre de positions des doigts dans une plage de variation de *x* allant de 0 à 90 mm.

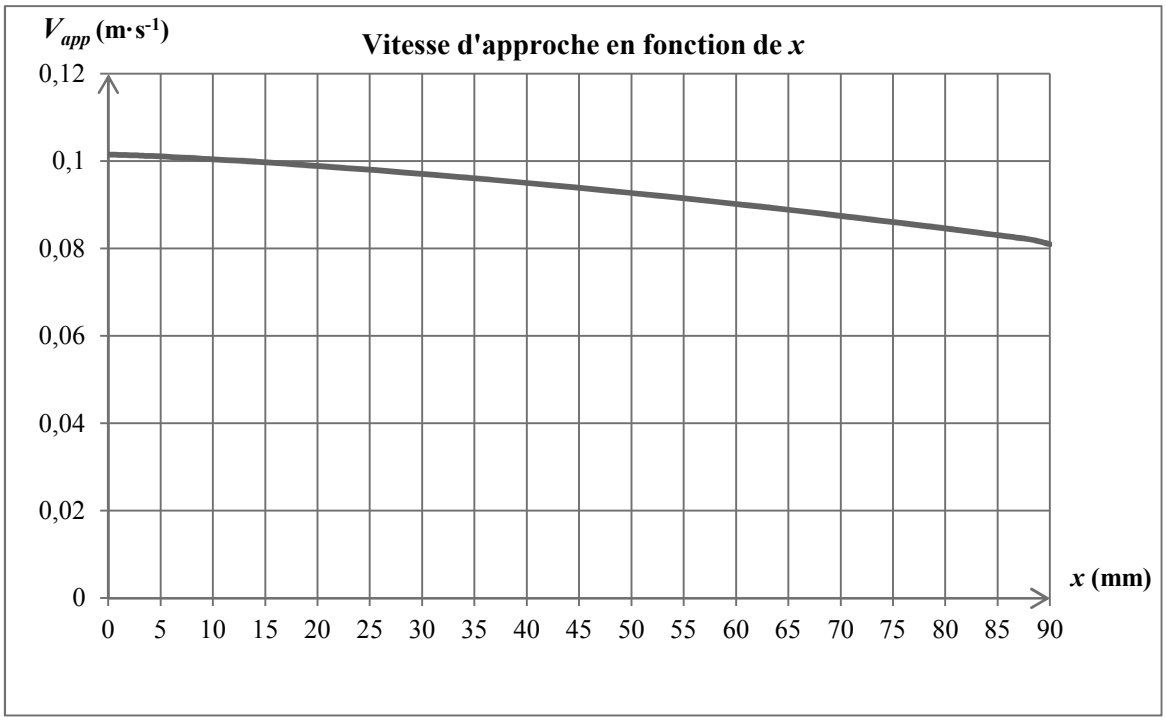


Figure 12. Vitesse d'approche en fonction de l'écartement des doigts

Question 5.

a. Le critère de la fonction technique FT2, « une vitesse d'approche constante pendant toute la phase du mouvement » avec une flexibilité de ± 15 % de sa valeur moyenne, est-il vérifié ?

Tournez la page S.V.P.

b. Dans la suite de l'étude, il sera nécessaire de connaître la relation entre la vitesse d'approche des doigts $\dot{x}(t)$ et la vitesse de rotation du doigt supérieur $\dot{\delta}(t)$.
La courbe ci-après (Figure 13) indique la variation de $x(t)$ en fonction de l'angle de rotation du doigt supérieur $\delta(t)$. Justifier le choix de la forme $\dot{x}(t) = -b.\dot{\delta}(t)$ pour la relation cherchée. Déterminer *b*.

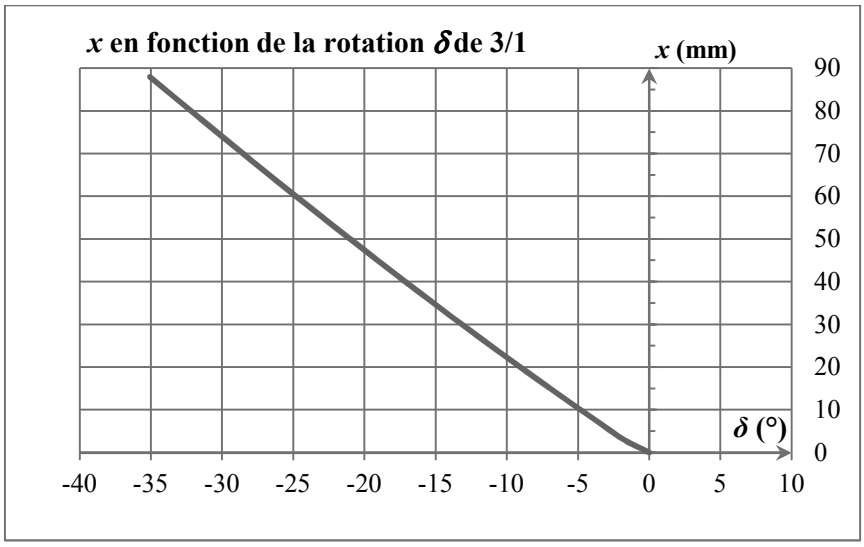


Figure 13. Distance x en fonction de l'angle de rotation δ du doigt 3

3.3. Analyse de l'effort de serrage des doigts (Fonction FT41 : « l'effort de préhension est indépendant de l'angle des doigts »)

Problématique : *l'objectif de cette partie est de déterminer l'effort de serrage en fonction du couple moteur et de vérifier qu'il est indépendant de la dimension de l'objet à saisir.*

Les hypothèses de l'étude sont les suivantes :

- le modèle retenu est le modèle défini sur la Figure 11 ;
- les liaisons sont sans frottement ;
- les poids des différents solides sont négligés par rapport aux efforts engendrés par le serrage ;
- l'objet à saisir est supposé déformable ;
- les efforts appliqués par l'objet à saisir sur chaque doigt (effort de serrage $\vec{\mathrm{F}} = \vec{F}(pi\grave{e}ce \to 3) = -\vec{F}(pi\grave{e}ce \to 4)$) sont portés par la direction (FE) ;
- les vitesses lors du serrage étant faibles, les effets dynamiques sont donc négligés.

Données et notations :

- le rayon primitif de 2 est $R_{p2} = 6$ mm, celui de 3 est $R_{p3} = 20$ mm ;
- le couple appliqué au pignon 2 est $C_{m2} = 1$ N · m dans le sens du serrage ;
- on note *F* la norme de l'effort de serrage : $\vec{F} = F\,\frac{\overrightarrow{FE}}{\|\overrightarrow{FE}\|}$;
- la vitesse d'approche est définie par : $V_{app} = -\dot{x}$ avec $\dot{x} = \vec{V}(E,3/4)\,.\frac{\overrightarrow{FE}}{\|\overrightarrow{FE}\|}$;
- la vitesse de rotation du doigt supérieur par rapport au bâti 1 est $\dot{\delta} = \omega_{31}$.

Question 6.

a. Définir en fonction des paramètres ci-dessus la puissance intérieure au système S constitué des pièces {2, 3, 4, 5, objet saisi}.

b. Après avoir exprimé la vitesse de rotation de 2 par rapport au bâti $\omega_{2/1}(t)$ en fonction de $\dot{\delta}(t)$, R_{p2} et R_{p3}, définir les puissances extérieures appliquées sur S dans son mouvement par rapport au bâti 1 supposé galiléen.

c. Sachant que lors du serrage, vitesse d'approche et vitesse de rotation des doigts sont liées par la relation simplifiée déterminée Question 5 : $\dot{x}(t) = -b.\dot{\delta}(t)$:
- appliquer le théorème d'énergie-puissance dans l'hypothèse où les effets dynamiques sont négligeables (l'énergie cinétique pourra être considérée constante pendant cette phase de serrage) ;
- en déduire l'expression littérale de l'amplitude de l'effort de serrage *F* en fonction du couple C_{m2} , de b, R_{p2} et R_{p3} ;
- application numérique : calculer cet effort en prenant $b = 0{,}15\ \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ indépendamment de la valeur déterminée Question 5.

L'étude cinématique de la Question 5 a montré que l'écartement x et l'angle δ ne sont pas exactement proportionnels. En conséquence, l'hypothèse $\dot{x}(t) = -b.\dot{\delta}(t)$ n'est pas tout à fait juste et l'effort de serrage n'est pas indépendant de l'écartement. La courbe ci-dessous obtenue par simulation informatique (Figure 14) donne l'effort de serrage en fonction de la distance x qui sépare les extrémités des doigts (EF).

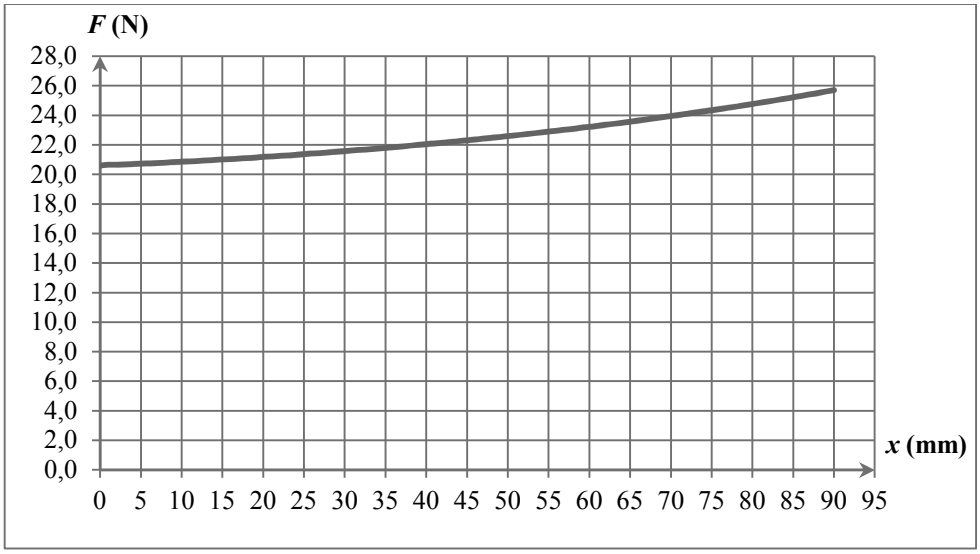


Figure 14. Effort de serrage *F(x)*

Question 7.

Le critère de la fonction technique FT41, à savoir, « un effort de serrage indépendant de l'angle des doigts » avec une flexibilité de ± 15 % de sa valeur moyenne, est-il vérifié ?

Tournez la page S.V.P.

4. Analyse dynamique du serrage (FT43 : « Le serrage doit être conforme au serrage humain »)

Problématique : *pour pallier la perte de sensation tactile du patient, la réponse en effort de serrage doit être suffisamment amortie :* ***aucun dépassement*** *et un temps de réponse à 5 % compris entre* ***250 ms et 500 ms.***

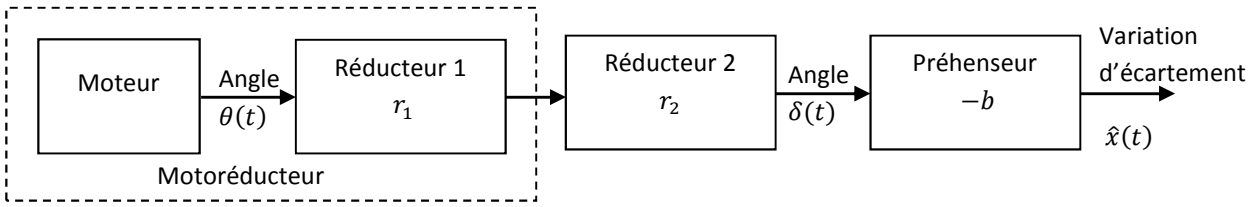
On se propose dans cette partie d'étudier la dynamique du serrage d'un objet et d'analyser les solutions techniques mises en jeu afin de répondre au cahier des charges.

4.1. Étude de la motorisation

On note :

- $x(t) = EF$ l'écartement des doigts à l'instant t, $x(0)$ l'écartement des doigts au moment du contact ;
- $\hat{x}(t) = x(t) - x(0)$ la variation d'écartement entre la position au moment du contact et la position à l'instant t ;
- $\theta(t)$ et $\omega(t) = \dot{\theta}(t)$ l'angle et la vitesse de rotation du moteur par rapport au bâti ;
- $\delta(t)$ et $\dot{\delta}(t)$ l'angle et la vitesse de rotation du doigt supérieur ;
- on suppose que le début du contact entre la pièce et les doigts a lieu à t = 0, et qu'alors : $\hat{x}(0) = 0, \theta(0) = \delta(0) = 0$ *;*
- $F(t)$ l'effort de serrage, défini par $\vec{F}(pièce \to 3) = -\vec{F}(pièce \to 4) = F\frac{\overrightarrow{FE}}{\|\overrightarrow{FE}\|}$;
- $c_m(t)$ le couple moteur.

La chaîne cinématique est définie sur la Figure 4. Dans cette partie, on ne prend pas en compte la présence du coupleur. La chaîne est donc la suivante :



- l'étude cinématique préalable (Question 5) a permis de relier la vitesse de serrage $\dot{x}(t)$ $\left(\dot{x}(t) = \vec{V}(E,3/4).\frac{\overrightarrow{FE}}{\|\overrightarrow{FE}\|}\right)$ à la vitesse de rotation du doigt supérieur $\dot{\delta}$:
  $\dot{x}(t) = -b\,.\dot{\delta}(t)$, $\quad b = 0{,}15\ \text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$;
- le réducteur 1 est intégré au moteur ; le réducteur 2 comprend l'engrenage conique et l'engrènement pignon/secteur denté. Les rapports de réduction sont $r_1 = 1/10$ pour le réducteur 1 et $r_2 = 3/10$ pour le réducteur 2 ;
- afin d'affiner le modèle, les effets dynamiques et les frottements ne sont plus négligés ;
- l'équation de mouvement de l'ensemble {motoréducteur + réducteurs + préhenseur} est alors : $J.\frac{d\omega(t)}{dt} = c_m(t) - c_r(t) - f.\omega(t)$ (1)
  où :
  - J est l'inertie équivalente de l'ensemble ramenée à l'axe moteur ($J = 2.10^{-7}\text{kg}\cdot\text{m}^2$);
  - f est le coefficient de frottement visqueux équivalent ramené à l'arbre moteur ($f = 2{,}5.10^{-6}\ \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$);
  - $c_r(t)$ est le couple résistant ramené à l'arbre moteur : $c_r(t) = b.r_1.r_2.F(t)$; (2)

- l'effort de serrage est supposé lié à la variation d'écartement $\hat{x}$: $F(t) = -K.\hat{x}(t)$ avec K la raideur de l'objet saisi.

Dans la suite de cette partie, on imposera en entrée un échelon de couple moteur.

Question 8.

a. Compléter le schéma-bloc du document réponse DR2.

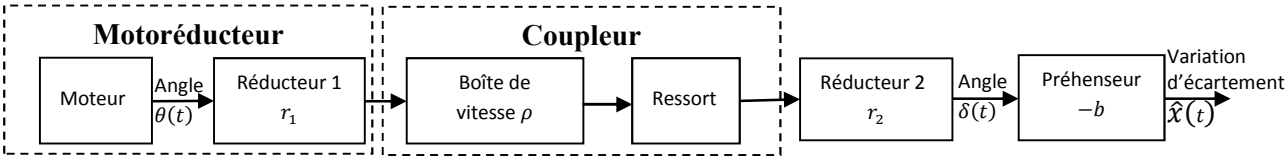
b. Déterminer la fonction de transfert $H_{ser1}(p) = \frac{F(p)}{C_m(p)}$ sous forme canonique littérale en fonction de $J,\ f,\ r_1,\ r_2$ et K. Donner ses caractéristiques (ordre, gain, pulsation propre non amortie, coefficient d'amortissement).

c. Application numérique pour un objet de raideur $10^4\ \mathrm{N \cdot m^{-1}}$.

d. Les caractéristiques du système permettent-elles un comportement répondant au cahier des charges ? Justifier votre réponse.

4.2. Solution avec coupleur

Afin de pallier mécaniquement ce problème, un coupleur, dont le fonctionnement détaillé sera abordé dans la partie 5, est inséré entre le motoréducteur et le préhenseur (voir Figure 4).
Ce coupleur est composé de deux sous-ensembles : une boîte de vitesse et un ressort en spirale. Son rôle est de contrôler les mouvements et les actions du préhenseur lors des phases de fermeture, de saisie et d'ouverture.
La chaîne cinématique précédente devient :



4.2.1. La boîte de vitesse

Lors des phases d'ouverture et de fermeture rapides, l'axe de sortie du motoréducteur transmet directement son mouvement au renvoi d'angle à pignons coniques (voir Figure 4). Dans ce cas le rapport ρ vaut 1.
Lors du contact avec l'objet, la vitesse est réduite afin d'augmenter le couple transmis pour le serrage.

Cette fonction est réalisée à l'aide d'un train épicycloïdal (Figure 15). Celui-ci est constitué de l'arbre 16 en sortie du motoréducteur (nombre de dents $Z_{16} = 9$), d'une couronne dentée 18 liée au bâti 1 (nombre de dents $Z_{18} = 63$), de 3 satellites 17 (nombre de dents $Z_{17} = 27$) et d'un porte-satellites 9 en forme de cloche qui transmet cette fois le mouvement de sortie au renvoi d'angle.

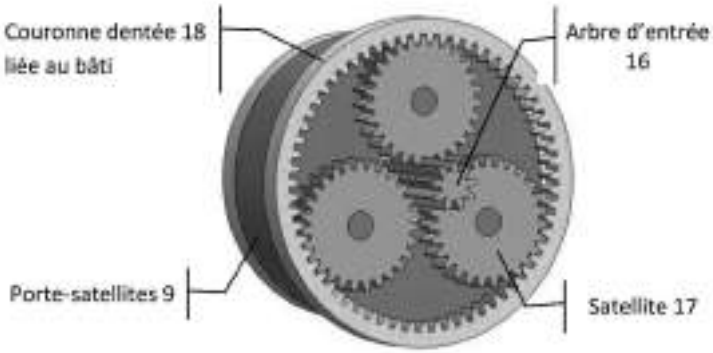


Figure 15. Train épicycloïdal

Question 9.

Déterminer le rapport de réduction ρ : $\rho = \frac{\omega_{9/1}}{\omega_{16/1}}$ pendant la phase de serrage.

Tournez la page S.V.P.

4.2.2. Le ressort

Le ressort en spirale exerce un couple entre la sortie de la boîte de vitesse et le pignon d'entrée du renvoi d'angle (Figure 16). Une pièce intermédiaire, le chapeau, relie une extrémité du ressort au pignon.

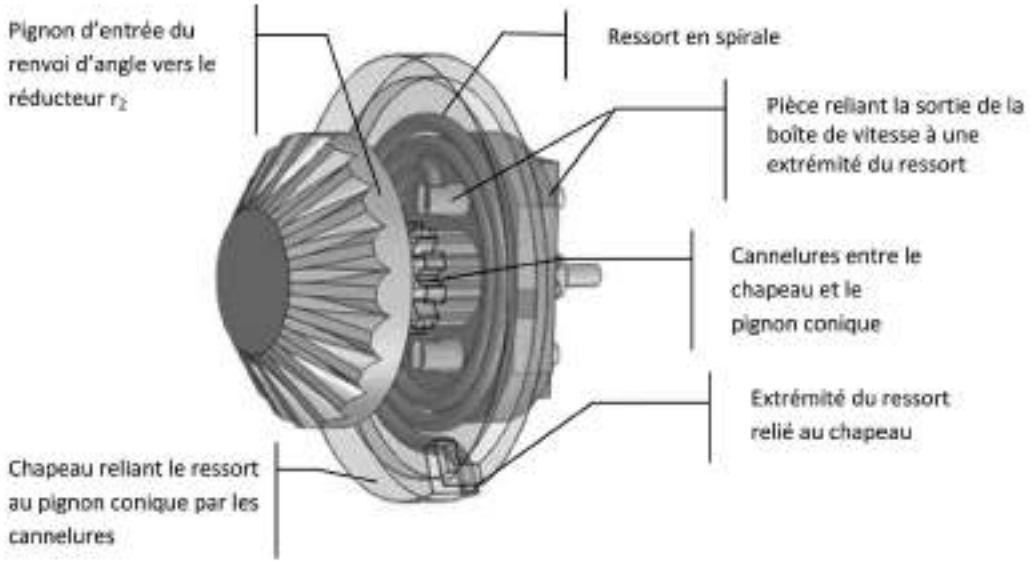


Figure 16. Ressort en spirale

Ce coupleur modifie donc les actions mécaniques suivant les lois ci-dessous :

- le ressort exerce un couple entre l'axe de sortie de la boîte de vitesse et l'entrée du réducteur 2 :

$$c_{res}(t) = K_r(r_1.\rho.\theta(t) - \frac{\delta(t)}{r_2})$$

où K_r est la raideur du ressort : $K_r = 1\ \mathrm{N \cdot m \cdot rad^{-1}}$;

- l'équation (2) (page 12) n'est plus valable, le couple résistant ramené à l'arbre moteur devient :

$$c_r(t) = r_1.\rho.c_{res}(t) \qquad (2')$$

L'inertie ramenée à l'arbre moteur de l'ensemble E2 {préhenseur + pièce saisie + réducteur 2} est négligeable devant l'inertie propre de l'ensemble E1 {moteur + coupleur + réducteur 1}. De même les frottements sont essentiellement dus à l'ensemble E1.
Avec ces hypothèses, l'équation de mouvement de l'ensemble E1 {moteur, réducteur 1, coupleur} reste celle définie précédemment :

$$J.\frac{d\omega}{dt} = c_m(t) - c_r(t) - f.\omega(t) \qquad (1)$$

On rappelle que J est l'inertie équivalente de l'ensemble E1 ramenée à l'axe moteur et f le coefficient de frottement visqueux équivalent. On prendra d'après les hypothèses précédentes :
$J = 2.10^{-7}\ \mathrm{kg \cdot m^2}$, $f = 2{,}5.10^{-6}\ \mathrm{N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}}$.

Question 10.

Les actions mécaniques appliquées à l'ensemble E2 {préhenseur + pièce saisie + réducteur 2} sont $c_{res}(t)$ (moteur pour E2) et $F(t)$ (résistant). En supposant les frottements et l'inertie de E2 négligeables, écrire le théorème de l'énergie-puissance appliqué à E2.

En déduire que les angles de rotation du doigt supérieur et du moteur sont liés par la relation :

$$\delta(t) = D.\theta(t) \text{ avec : } D = \frac{K_r.r_1.\rho}{\left(\frac{K_r}{r_2}+r_2.K.b^2\right)}$$

Question 11.

Compléter le schéma bloc du document réponse DR2.

Question 12.

Déterminer la fonction de transfert $H_\Omega(p) = \frac{\Omega(p)}{C_m(p)}$ et la mettre sous la forme $H_\Omega(p) = \frac{Ap}{Cp^2+Bp+1}$; préciser les expressions de A, B et C en fonction des grandeurs caractéristiques (K_r, r_1, r_2, J, f et D).

Question 13.

En déduire $H_{ser2}(p) = \frac{F(p)}{C_m(p)}$. Donner ses caractéristiques.

Comparer celles-ci avec les caractéristiques sans coupleur déterminées précédemment (Question 8) sachant que $K_r \ll {r_2}^2 K b^2$. Quel est le rôle du ressort sur le comportement de la prothèse ? Remarque : on pourra admettre que $A.D = \frac{1}{\rho.r_1.r_2.K.b^2}$.

Question 14.

La réponse à un échelon de couple d'amplitude 0,01 N·m lors du serrage d'un objet de raideur 10^4 N · m^{-1} est donnée Figure 17. Le cahier des charges est-il respecté ?

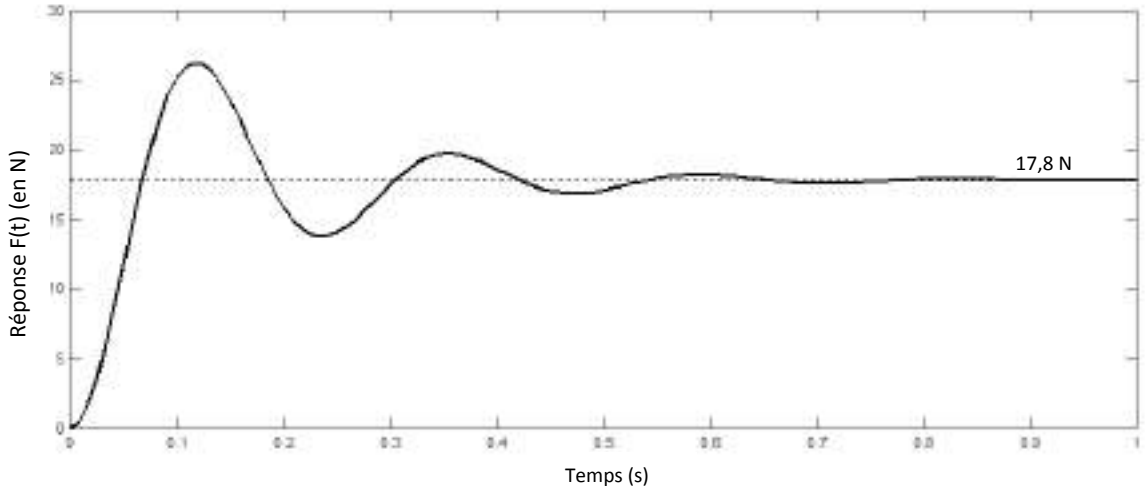


Figure 17. Réponse temporelle : effort de serrage pour un échelon de couple moteur de 0,01 N·m

Tournez la page S.V.P.

4.3. Optimisation de la commande

Afin d'améliorer le comportement lors de la saisie d'un objet, l'effort de serrage est modulé en fonction de la volonté du patient, c'est-à-dire en fonction de l'amplitude des contractions musculaires mesurées par les électrodes myoélectriques : une boucle de courant permet de réguler le couple moteur et donc l'effort de serrage.
L'ensemble peut être modélisé par le schéma-bloc :

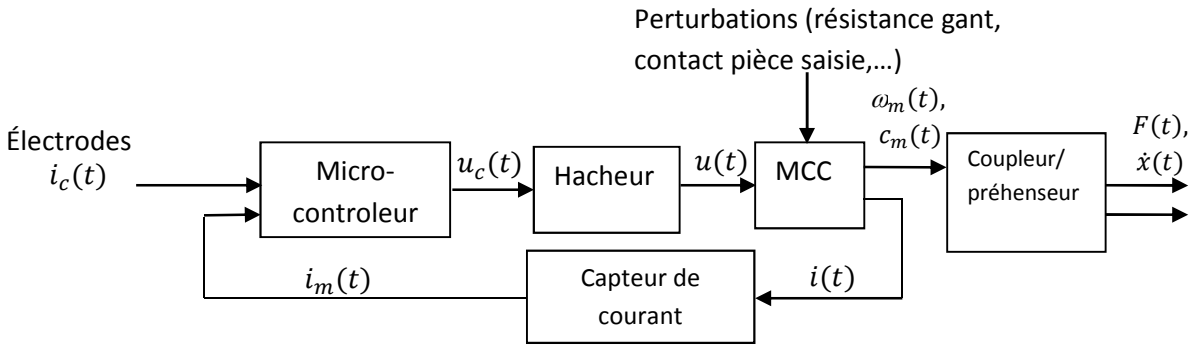


Figure 18. Schéma bloc du système

Problématique : *l'objectif de cette partie est d'optimiser les paramètres de la commande afin de répondre au mieux au cahier des charges :* ***écart statique nul (écart défini en régime permanent en réponse à un échelon), aucun dépassement*** *et une durée d'ouverture comprise entre* ***250 ms et 500 ms.***

4.3.1. Modélisation de l'asservissement

On désigne par

- $u(t)$: la tension d'alimentation du moteur ;
- $e(t)$: la force contre électromotrice ;
- $\omega_m(t) = \dot{\theta}(t)$: la vitesse de rotation du moteur ;
- $\dot{\delta}(t)$: la vitesse de rotation du pignon du doigt 3 ;
- $c_m(t)$: le couple moteur ;
- $i(t)$: le courant d'induit ;
- $i_c(t)$: la consigne de courant (définie à partir de la tension mesurée par les électrodes) ;
- $i_m(t)$: la mesure du courant par le capteur d'intensité.

Les caractéristiques sont :

- R la résistance de l'induit, $R = 2{,}9\ \Omega$;
- L son inductance, $L = 0{,}1$ mH ;
- J le moment d'inertie équivalent ramené à l'arbre moteur de l'ensemble : $J = 2.10^{-7}\text{kg} \cdot \text{m}^2$;
- f le coefficient de frottement visqueux de l'ensemble ramené à l'arbre moteur : $f = 2{,}5.10^{-6}\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$;
- k_c la constante de couple : $k_c = 7{,}12.10^{-3}\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$;
- k_e la constante de force contre électromotrice : $k_e = 7{,}12.10^{-3}\ \text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$;
- le gain du hacheur G_0 est supposé égal à 10 ;
- le capteur de courant est modélisable par un premier ordre de gain statique $k_i = 1$ et de constante de temps $\tau = 10^{-3}s$.

Le microcontrôleur détermine la commande $u_c(t)$ en fonction de l'écart d'intensité. La fonction de transfert du correcteur est notée $C_i(p)$.

Les équations du moteur sont les équations du Moteur à Courant Continu (M.C.C.) :

$$c_m(t) = k_c.i(t)\ ;\quad e(t) = k_e.\omega(t)\ ;\ u(t) = R.i(t) + L.\frac{di}{dt} + e(t).$$

L'analyse du mécanisme de serrage a permis d'obtenir les résultats suivants :

$$\delta(t) = D.\theta(t)\ ;\qquad \frac{\Omega(p)}{C_m(p)} = \frac{\mathrm{A}p}{\mathrm{C}p^2+\mathrm{B}p+1} = \frac{6716\,p}{\frac{p^2}{27^2}+2.\frac{0{,}23}{27}p+1}\qquad ;\qquad \text{avec : } A.D = \frac{1}{\rho.r_1.r_2.K.b^2}.$$

Le schéma bloc de l'asservissement est donné Figure 19 ci-dessous.

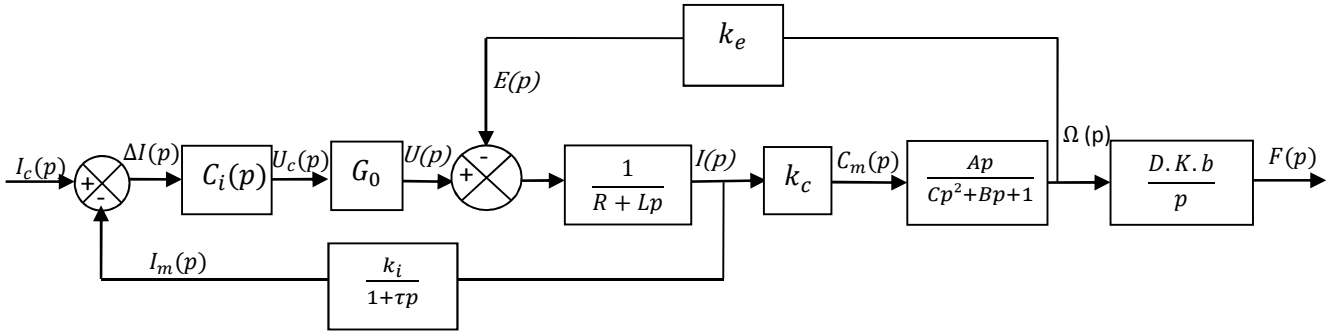


Figure 19. Schéma bloc de la prothèse en boucle fermée

La fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée est de la forme :

$$\frac{I_m(p)}{U_c(p)} = \frac{3{,}45\left(\frac{p^2}{27^2}+2.\frac{0{,}23}{27}p+1\right)}{\left(1+\frac{p}{28912}\right)\left(1+\frac{p}{91{,}8}\right)\left(1+\frac{p}{8{,}1}\right)\left(1+\frac{p}{1000}\right)}.$$

Le schéma bloc de la Figure 19 peut se mettre sous la forme :

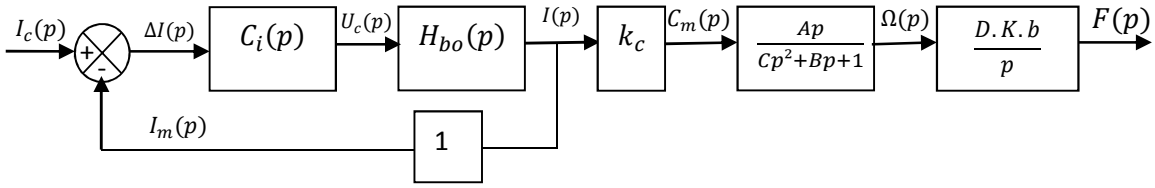


Figure 20. Schéma bloc simplifié de l'asservissement en intensité

Seuls les pôles dominants sont pris en compte. On trouve ainsi numériquement que la fonction de transfert non corrigée, $H_{bo}(p)$ définie par $\frac{I_m(p)}{U_c(p)}$, est : $H_{bo}(p) = \frac{3{,}45\left(\frac{p^2}{27^2}+2.\frac{0{,}23}{27}p+1\right)}{\left(1+\frac{p}{91{,}8}\right)\left(1+\frac{p}{8{,}1}\right)}$.

Tournez la page S.V.P.

4.3.2. Réglage du correcteur

Question 15.

a. On choisit de corriger l'asservissement par un correcteur Proportionnel Intégral

$$C_i(p) = K_p \frac{1+T_i p}{T_i p}.$$

Quel critère du cahier des charges impose ce choix d'un correcteur PI ?
Justifier la réponse.

b. Déterminer la valeur de T_i de telle sorte que le correcteur compense le pôle dominant de la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée $H_{bo}(p)$.

c. Donner l'expression numérique de la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée $H_{bo}^{c}(p) = \frac{I_m(p)}{\Delta I(p)}$ en fonction de K_p.

On se propose désormais de régler le gain afin d'obtenir une réponse en effort sans aucun dépassement.

Question 16.

Donner l'expression de $H_{bf}(p)$ définie par $H_{bf}(p) = \frac{F(p)}{I_c(p)}$ dans ce modèle simplifié. Donner son ordre et son gain statique. La raideur de l'objet saisi influe-t-elle sur l'amplitude de l'effort de serrage ?

On rappelle que $A\,.\,D = \frac{1}{\rho.r_1.r_2.K.b^2}$ et $\frac{\Omega(p)}{C_m(p)} = \frac{Ap}{Cp^2+Bp+1} = \frac{6716\,p}{\frac{p^2}{27^2}+2.\frac{0,23}{27}p+1}$.

Question 17.

Déterminer la valeur de K_p de telle sorte que la réponse en effort soit la plus rapide possible sans présence de dépassement.

La figure ci-dessous (Figure 21) donne la réponse temporelle de la prothèse pour $K_p = 0,4$ et $T_i = 0,12\ s$ à un échelon de consigne d'amplitude 1 A à partir du modèle de calcul de la Figure 19.

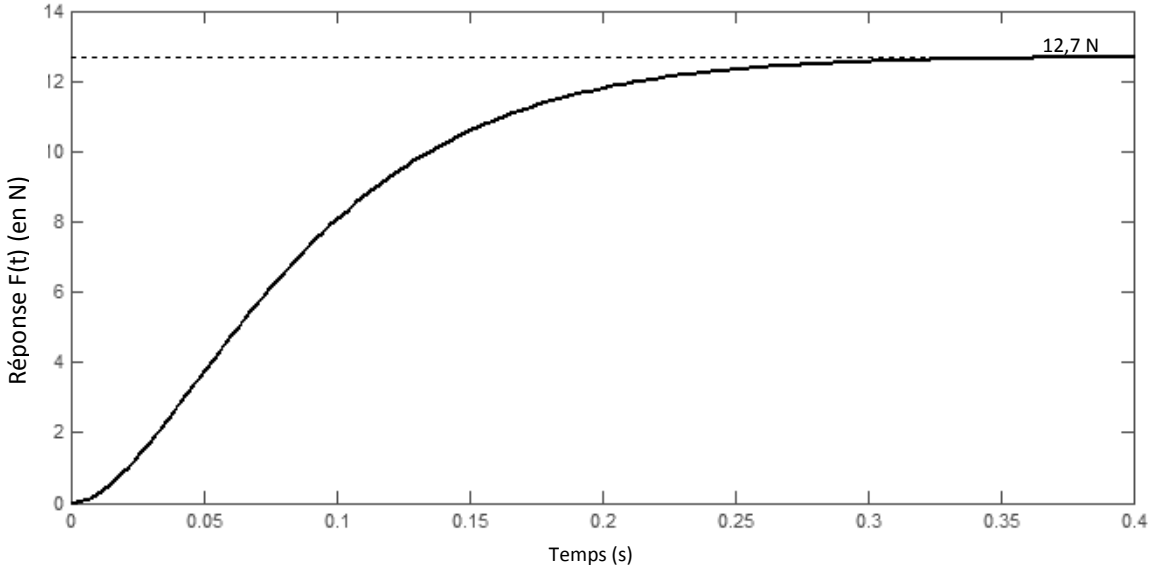


Figure 21. Réponse temporelle pour $K_p = 0,4$ et $T_i = 0,12\ s$.

Question 18.

a. Le cahier des charges est-il validé ? Justifier la réponse.

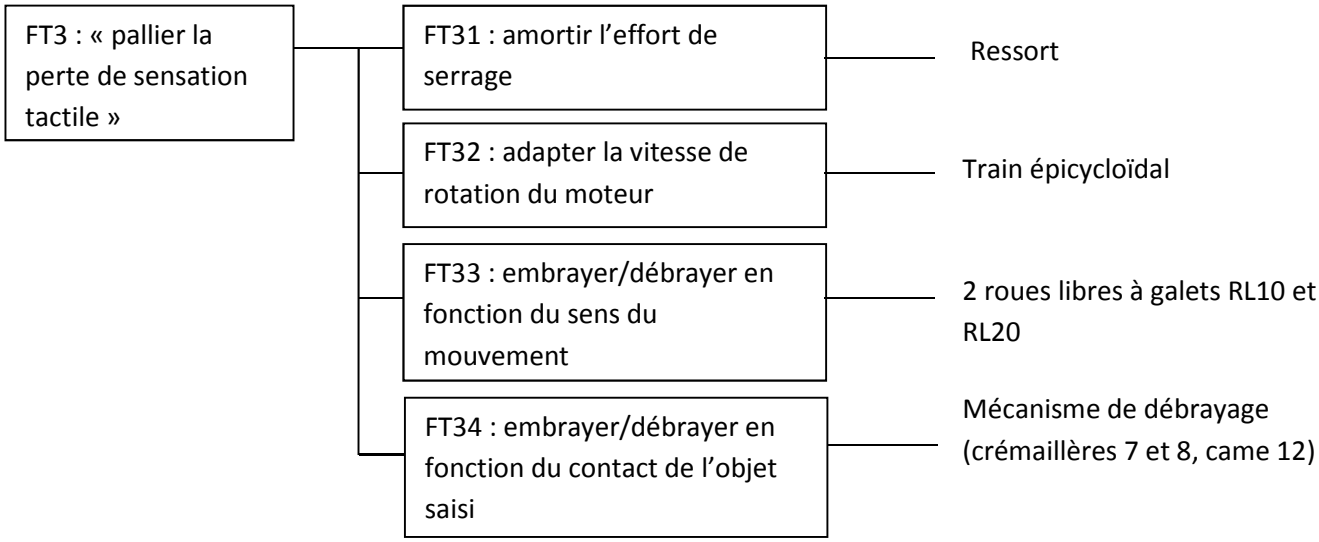
b. Justifier la validité de l'hypothèse simplificatrice de ne conserver que les pôles dominants.

5. Analyse et dimensionnement du coupleur (FT3 : « pallier la perte de sensation tactile »).

Comme il a été vu lors de l'analyse dynamique du serrage (partie 4), le bon fonctionnement de la prothèse nécessite l'utilisation d'un coupleur entre le motoréducteur et les doigts. Ce coupleur a deux fonctions essentielles :

1- Il permet grâce à un ressort situé entre la boîte de vitesse et l'axe de sortie, d'amortir l'effort de serrage sur l'objet.
2- Il permet de faire varier le rapport de vitesse et donc d'adapter le couple de serrage dès le contact avec l'objet à serrer, malgré la perte de sensation tactile du patient.

Le diagramme FAST du coupleur est donné ci-dessous (les composants indiqués sont représentés dans les annexes 1, 2 et 3) :



5.1. Dimensionnement des galets d'embrayage (FT33 : « embrayer/débrayer en fonction du sens du mouvement »).

Problématique *: l'objectif de cette partie est de déterminer les paramètres influant la transmission du couple issu du motoréducteur au travers des roues libres, en vue de dimensionner les galets.*

5.1.1. Étude des phases de fermeture et d'ouverture rapide des doigts (voir annexe 1).

Lorsque les doigts ne sont pas en contact avec l'objet à saisir, l'ouverture et la fermeture ont lieu à vitesse rapide. L'annexe 1 présente les constituants en jeu lors de ces phases de fonctionnement.

Lorsque les doigts se ferment, l'arbre moteur 16 tourne dans le sens positif autour de $\vec{z}$ (et inversement lors de l'ouverture) et entraîne l'arbre de sortie coupleur 14 par l'intermédiaire de la **Roue libre RL10**. Cette dernière est représentée seule sur le document réponse DR3, figure 1.

Question 19.

Il est supposé que :

- le mécanisme se trouve en phase de fermeture rapide des doigts ;
- les effets de masse sont négligés par rapport aux efforts mis en jeu ;
- les galets 10 sont maintenus dans leur position par des ressorts de rappel (non visibles sur le document réponse) dont les efforts sont négligeables devant les actions mécaniques de contact.

Tournez la page S.V.P.

Sur le document réponse DR3, en isolant le galet 10a et en justifiant vos constructions **sur ce même document** :

a. Définir et tracer les sens et directions des composantes normale $\overrightarrow{N_{6\to10a}}$ et tangentielle $\overrightarrow{T_{6\to10a}}$, de l'action mécanique de contact entre la cloche 6 et le galet 10a $\overrightarrow{F_{6\to10a}}$ si la cloche 6 est entraînée dans le sens correspondant à une fermeture. De même définir et tracer les composantes de l'action mécanique de contact entre la came 11 et le galet 10a $\overrightarrow{F_{11\to10a}}$.
b. En isolant le galet 10a, après un bilan d'actions mécaniques extérieures, déterminer puis tracer les supports de $\overrightarrow{F_{6\to10a}}$ et $\overrightarrow{F_{11\to10a}}$ pour que ce galet soit en équilibre.
c. Le facteur de frottement entre le galet et les autres pièces a pour valeur $f_r = 0{,}3$. Après mesure sur le document réponse, donner les explications sur ce même document qui permettent de dire s'il y a glissement entre ce galet 10a et la cloche 6 ou entre ce galet et la came 11.
d. En appliquant le même raisonnement au galet 10d, déterminer graphiquement si ce galet peut être en équilibre et donc entraîner la came 11.

Le document réponse DR4 est un document de synthèse du fonctionnement du coupleur. Pour répondre aux questions relatives à ce document il faut cercler la bonne réponse dans les cases indexées (1).

Question 20.

À partir des résultats de la question précédente et en faisant un raisonnement similaire pour la phase d'Ouverture Rapide, compléter ce document réponse DR4 uniquement pour la partie **Roue libre RL10**, phases **Fermeture rapide** et **Ouverture rapide**.

5.1.2. Étude de la phase de serrage de la pièce (voir annexe 2).

Lors du serrage de la pièce, le couple est transmis de l'arbre d'entrée (16) vers l'arbre de sortie (14). La **Roue libre RL20** est représentée ci-après (Figure 22) .

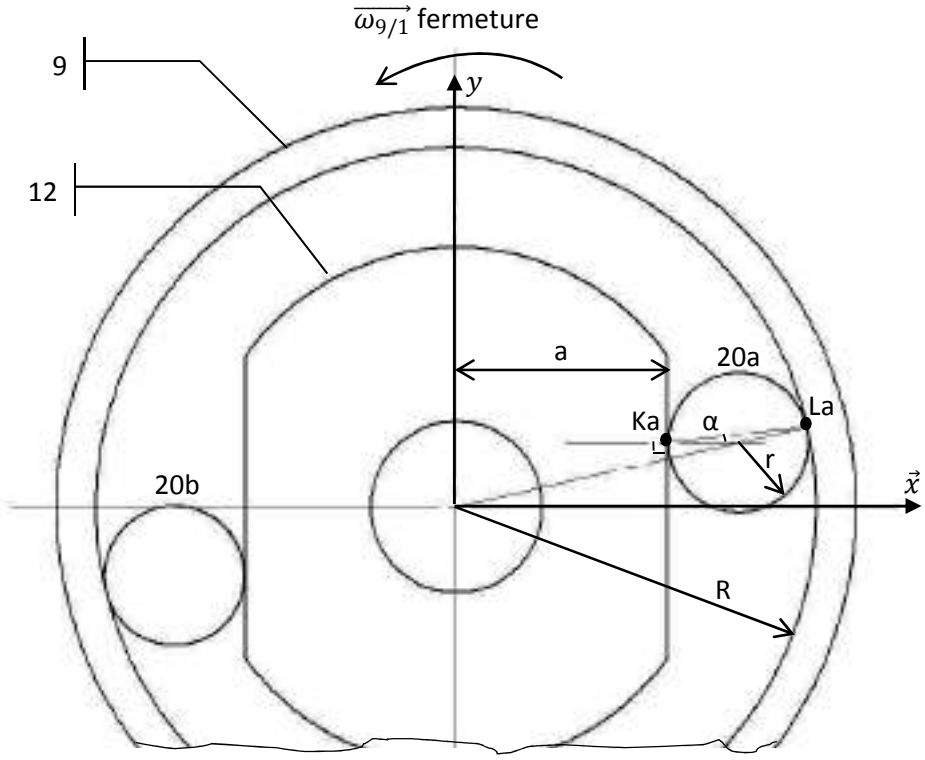


Figure 22. Roue libre RL20

On note :

- α l'angle entre la droite joignant les points de contact (Ka La) et la normale au contact ;
- f_r et φ le facteur et l'angle de frottement, ayant pour valeurs : $f_r = tan\,\varphi = 0{,}3$.

Question 21.

a. Dans le cas de la fermeture, en poursuivant le raisonnement de la Question 19, donner une condition entre α et φ pour que le galet transmette la puissance sans qu'il y ait glissement entre le galet 20a et la cloche 9.
b. La **Roue libre RL20** peut-elle être embrayée dans les phases d'ouverture ? Justifier.
c. À l'aide de ces conclusions, compléter le document réponse DR4 pour la partie **Roue libre RL20**, phases **Serrage** et **Relâchement de l'effort**.

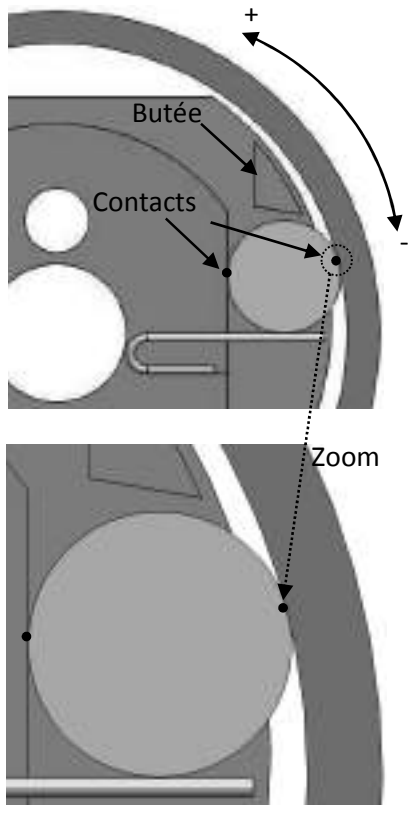
5.2. Étude de la fonction FT34 : « embrayer/débrayer en fonction du contact de l'objet saisi »

Dans les annexes 1 et 2, il a été précisé que :

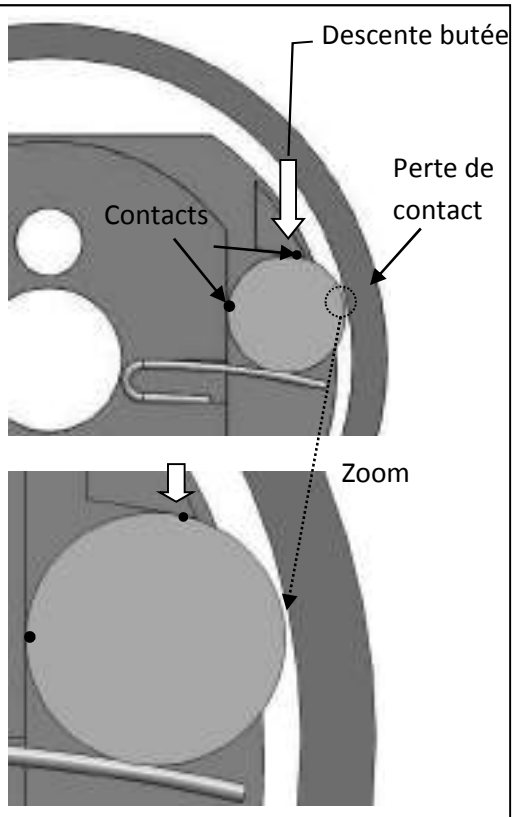
- en phase de fermeture rapide et en phase d'ouverture rapide, la **Roue libre RL20** était débrayée ;
- en phase de serrage de l'objet, la **Roue libre RL10** était débrayée.

Problématique : *l'objet de cette partie est dans un premier temps d'étudier le fonctionnement du mécanisme permettant ce débrayage, afin d'en déduire l'évolution du couple transmis lors des différentes phases de fonctionnement.*

Un galet peut être embrayé ou débrayé. Le débrayage d'un galet peut avoir deux causes :



Cas 1 : Embrayage / débrayage cinématique selon le sens relatif de rotation.



Cas 2 : Débrayage mécanique provoqué par une butée (perte du contact entre la cloche et le galet).

Cas 1 : le galet transmet les efforts entre la cloche et la came centrale ou ne les transmet pas en fonction du sens de rotation relatif des deux pièces.
Cas 2 : une butée descend et rompt le contact entre le galet et la cloche.

Tournez la page S.V.P.

Remarque : la lame flexible a pour fonction de maintenir le galet dans sa zone de fonctionnement. Il exerce un effort négligeable par rapport aux autres efforts mis en jeu.

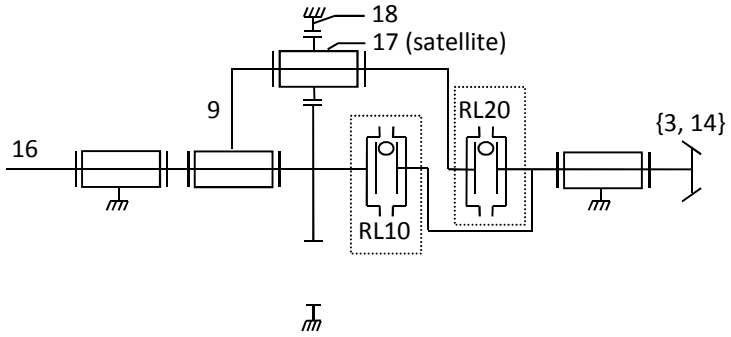
Ces solutions de « débrayage/embrayage en fonction du sens » et de « débrayage mécanique par butée » sont celles utilisées pour commander les **Roues libres RL10 et RL20**.

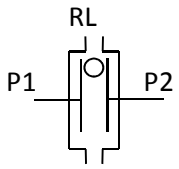
Les documents annexe 3a et 3b illustrent le fonctionnement du mécanisme de changement de vitesse : deux crémaillères 7 et 8 sont en liaison glissière avec la came 12. Leur translation est provoquée par la rotation relative entre l'arbre de sortie 14 et la came 12. Elles supportent des butées susceptibles de débrayer mécaniquement les **Roues libres RL10 et RL20** par appui sur leurs galets respectifs.

Question 22.

À l'aide de la description du mécanisme donnée en annexes 3a et 3b, compléter les cases indexées (1) du document réponse DR4 pour la partie **Roue libre RL10** phase de **Serrage**, et pour la partie **Roue libre RL20** phase **Ouverture rapide**.

Le schéma cinématique général du coupleur peut être décrit comme suit :



Il est rappelé la représentation cinématique d'une roue libre RL : 

.

Cette représentation ne donne pas d'indication sur l'état embrayé ou non de la roue libre.
Pour la question suivante, on prendra la convention suivante :

- lorsque la roue libre est débrayée, il n'y a pas de liaison cinématique entre la pièce P1 et la pièce P2 : la roue libre est donc équivalente à : P1 P2 « Pas de liaison » ;
- lorsque la roue libre est embrayée, on peut dire en première approximation qu'il y a encastrement entre la pièce P1 et la pièce P2 : la roue libre est donc équivalente à : {P1, P2} « Liaison complète ».

Question 23.

a. Sur le document réponse DR4, compléter les schémas cinématiques équivalents (dernière colonne) en remplaçant selon le cas les roues libres par la représentation « Pas de liaison » ou « Liaison complète ».
Dans les cas « pas de liaison » vous placerez le signe « Ø » entre les deux arbres afin de lever toute ambiguïté :

P1 Ø P2

b. Compléter sur le DR4 la valeur du couple disponible en sortie du coupleur en fonction du couple en entrée noté C_e (le rapport de réduction du train est supposé égal à 8).

Synthèse

Question 24.

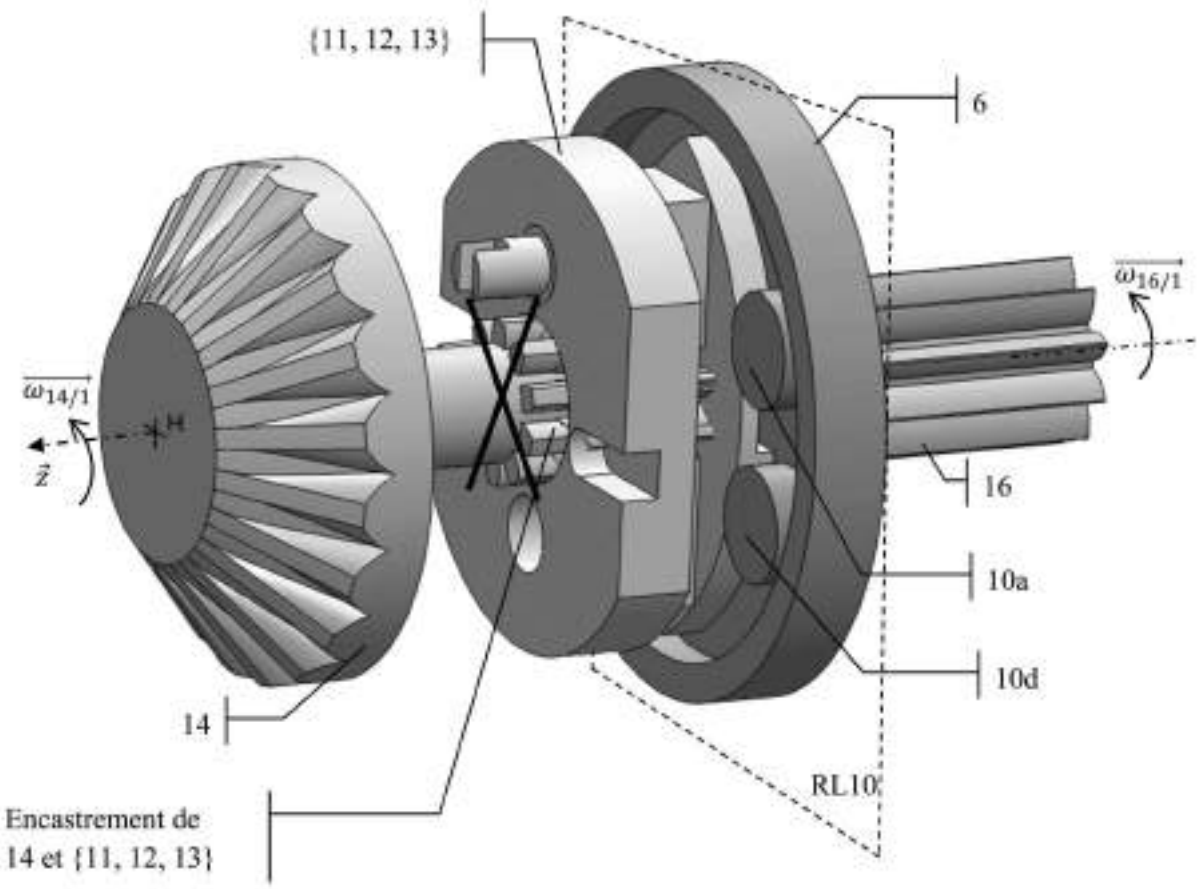
a. Rappeler de façon synthétique les solutions retenues pour répondre à la fonction FT3 « pallier la perte de sensation tactile ».

b. En quelques mots proposer une autre solution.

- Fin de l'énoncé -

IMPRIMERIE NATIONALE – 12 1249 – D'après documents fournis

Annexe 1. Comportement du coupleur lors de l'ouverture ou de la fermeture en vitesse rapide



Le motoréducteur (non représenté ici) transmet la puissance à l'arbre d'entrée du coupleur 16.

Cet arbre entraîne directement la cloche 6 en rotation.

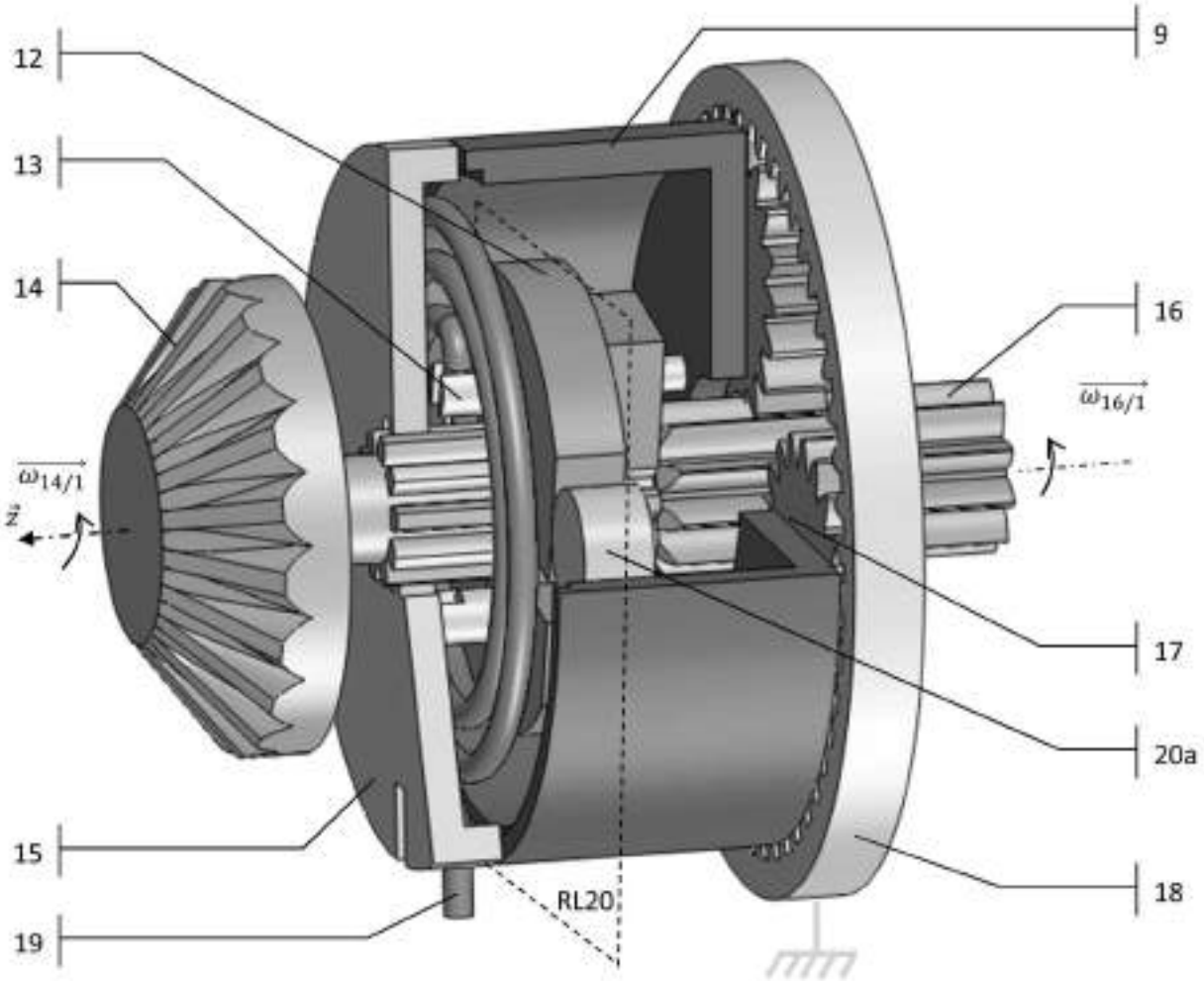
La **Roue libre RL10** est constituée de la cloche 6 qui entraîne l'équipage {11, 12, 13} en rotation autour de l'axe $H\vec{z}$ par l'intermédiaire des galets 10a, 10b, 10c, 10d (10b et 10c non visibles sur cette vue).

L'équipage {11, 12, 13} est normalement en liaison pivot autour de l'axe du pignon de sortie 14. Mais dans cette configuration, le ressort précontraint 19 (non représenté ici) lie le mouvement de {11, 12, 13} à celui de 14. En conséquence, l'axe 14 et l'équipage {11, 12, 13} peuvent être supposés encastrés (liaison complète) dans le cas présent.

La **Roue libre RL20** (non représentée ici) est débrayée.

Remarque : pour faciliter la lecture, le ressort précontraint ainsi que les pièces du coupleur n'intervenant pas dans cette phase de fonctionnement ont été cachés.

Annexe 2. Comportement du coupleur lors du serrage d'un objet



L'arbre d'entrée 16 du coupleur entraîne la cloche 9 par l'intermédiaire du réducteur à train épicycloïdal, dont la couronne 18 est liée au bâti.

La cloche 9 solidaire du porte-satellites transmet la puissance à la came 12 par l'intermédiaire des galets de la **Roue libre RL20** : 20a et 20b (20b non visible sur la figure).

La came 12 transmet la puissance au ressort 19 par l'intermédiaire d'un doigt 13.

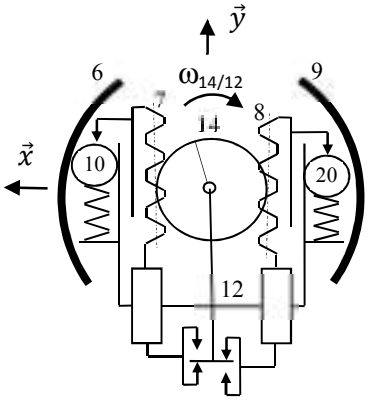
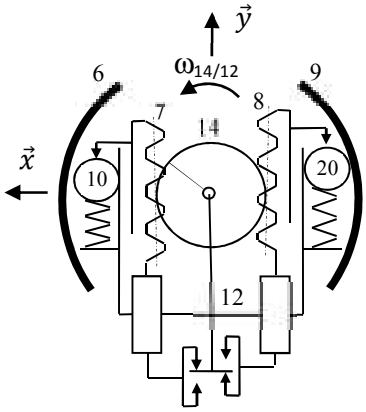
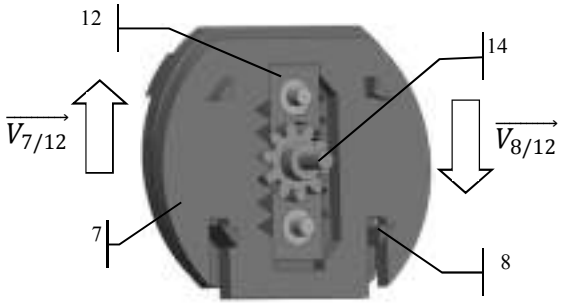
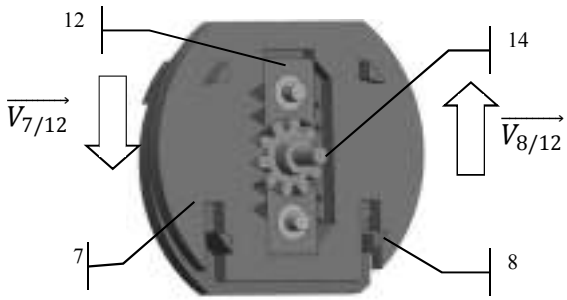
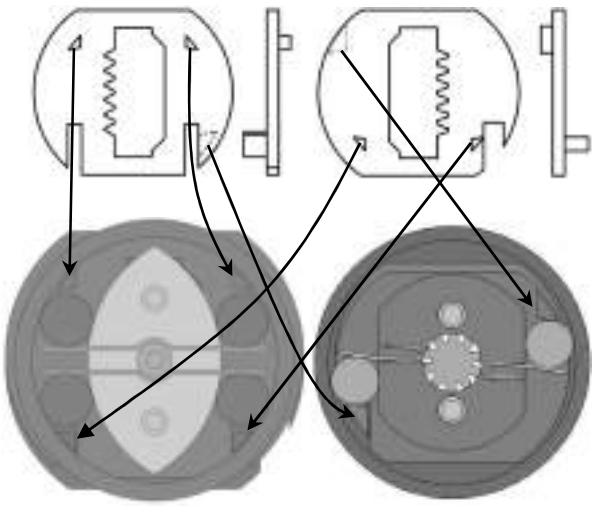
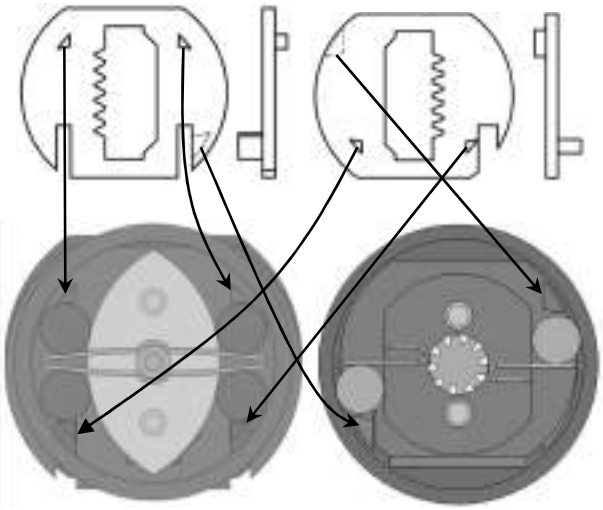
L'ensemble 14/15 est bloqué par le contact de la pièce saisie avec le préhenseur. La rotation de 12 provoque donc la torsion du ressort 19. Ce ressort exerce alors un couple de serrage sur la pièce 15 qui, elle-même, le transmet au pignon de sortie 14 par l'intermédiaire de cannelures.

Le pignon 14 tourne lentement et transmet le couple aux doigts.

La **Roue libre RL10**, non représentée ici, est débrayée par un mécanisme non visible ici et détaillé plus tard.

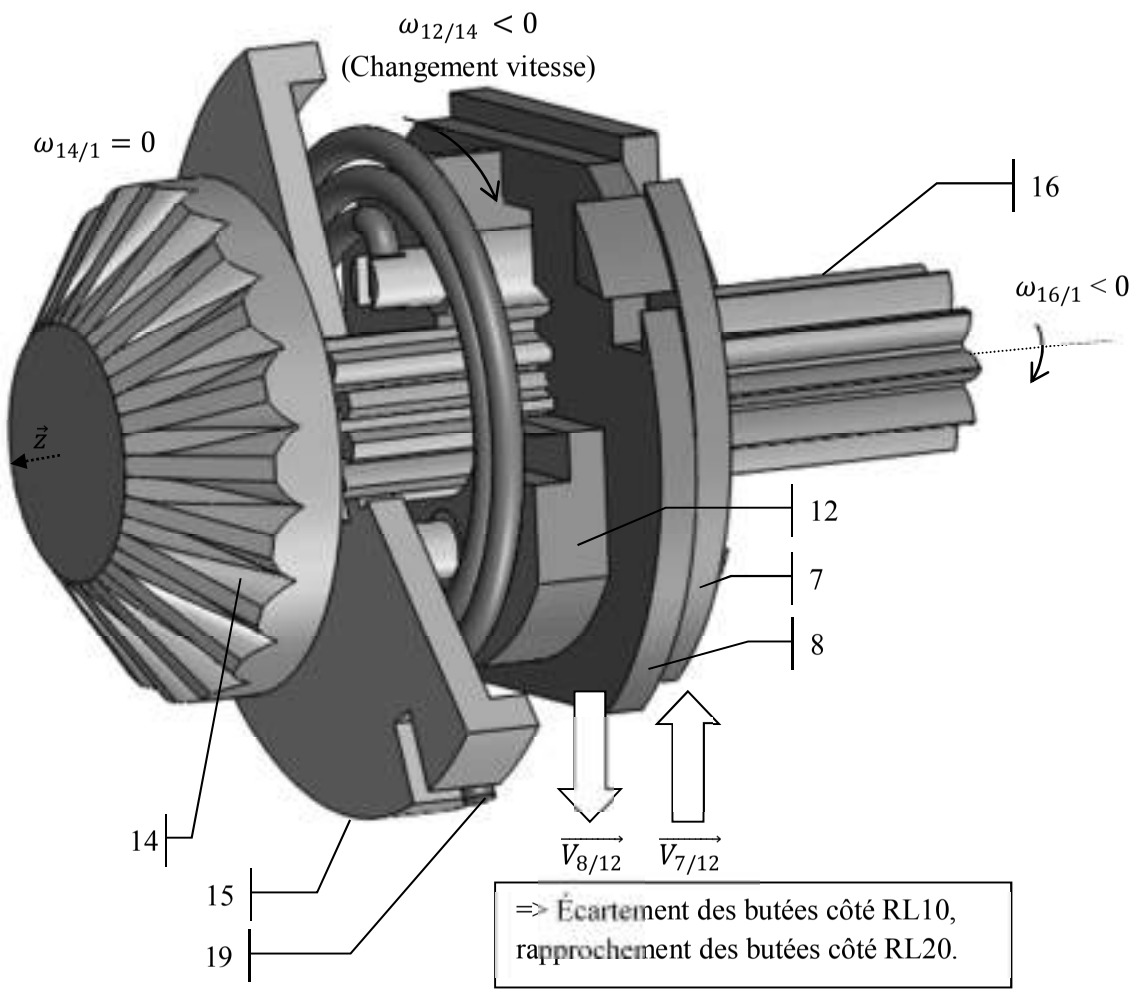
Remarque : pour faciliter la lecture, les pièces du coupleur n'intervenant pas dans cette phase de fonctionnement ont été cachées.

Annexe 3a. Mécanisme de changement de vitesse

Situation 1 : passage en phase d'ouverture rapide (relâchement de l'effort → ouverture rapide)	Situation 2 : passage en phase de serrage (fermeture rapide → serrage)
	
Vue des crémaillères de changement de vitesse :	Vue des crémaillères de changement de vitesse :
	
Crémaillère 7 : Crémaillère 8 :	Crémaillère 7 : Crémaillère 8 :
	
Roue libre RL10 **Roue libre RL20**	**Roue libre RL10** **Roue libre RL20**

Tournez la page S.V.P.

Annexe 3b. Changement de vitesse lors du relâchement de l'effort



En fin du serrage :

- le ressort 19 est comprimé ;
- la **Roue libre RL10** est débrayée mécaniquement (contact galets 10/butées) ;
- la **Roue libre RL20** peut embrayer ou débrayer cinématiquement (pas de contact galets 20/ butée).

En début de relâchement de l'effort :

- l'arbre d'entrée du coupleur (16) possède une vitesse négative ;
- l'arbre de sortie du coupleur (14) a une vitesse nulle.

Comme la **Roue libre RL10** est débrayée mécaniquement par butée et que **RL20** est débrayée cinématiquement (sens de rotation), le mouvement n'est pas transmis entre l'arbre d'entrée 16 et l'arbre de sortie 14. Les doigts ne s'ouvrent pas.

Le ressort 19 restitue son énergie potentielle en faisant tourner la came 12. On a alors : $\omega_{12/14} < 0$. (situation 1 de l'annexe 3a).

Les crémaillères 7 et 8 se déplacent dans le sens indiqué. Ceci a pour effet de supprimer le débrayage mécanique par butée de la **Roue libre RL10**.

Cette roue libre est alors embrayée. Le mouvement est transmis entre l'arbre d'entrée 16 et l'arbre de sortie 14 avec un rapport de réduction = 1.

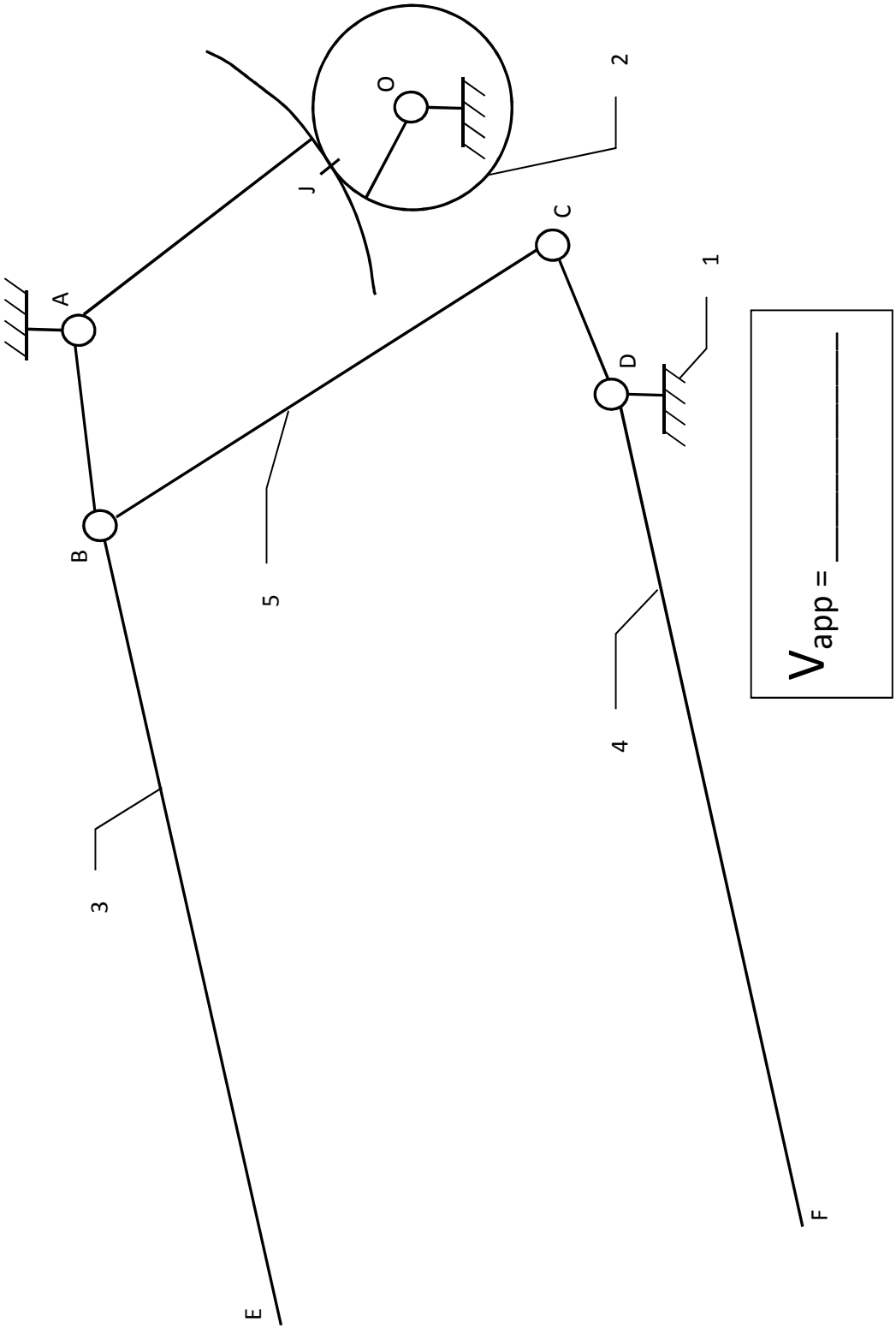
Les doigts s'ouvrent en vitesse rapide.

Remarque : pour faciliter la lecture du dessin, les pièces du coupleur n'intervenant pas dans cette phase de fonctionnement ont été cachées, ainsi que les roues libres.

Document réponse DR1

Question 4

Échelle cinématique : 10 mm ↔ 0,01 m/s

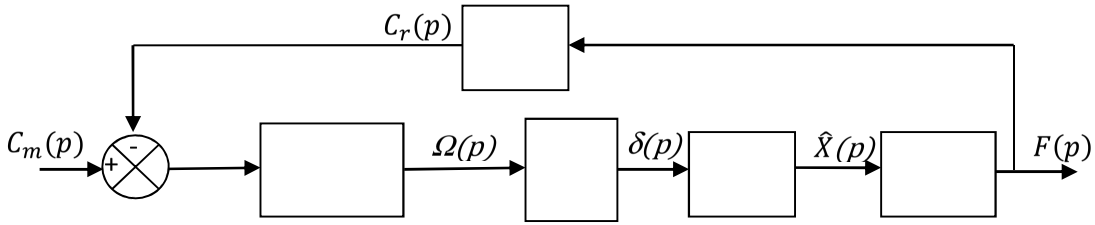


V_{app} = _____

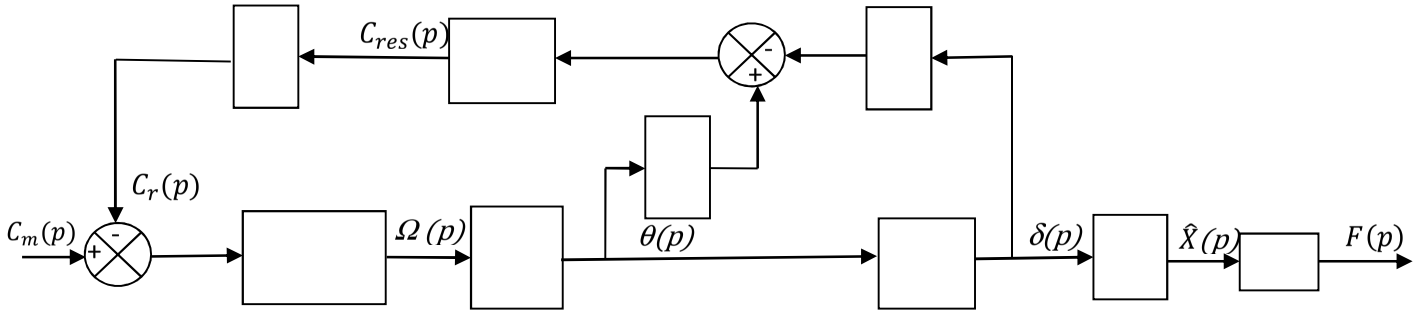
C

Document réponse DR2

Question 8



Question 11



Document réponse DR3

Question 19

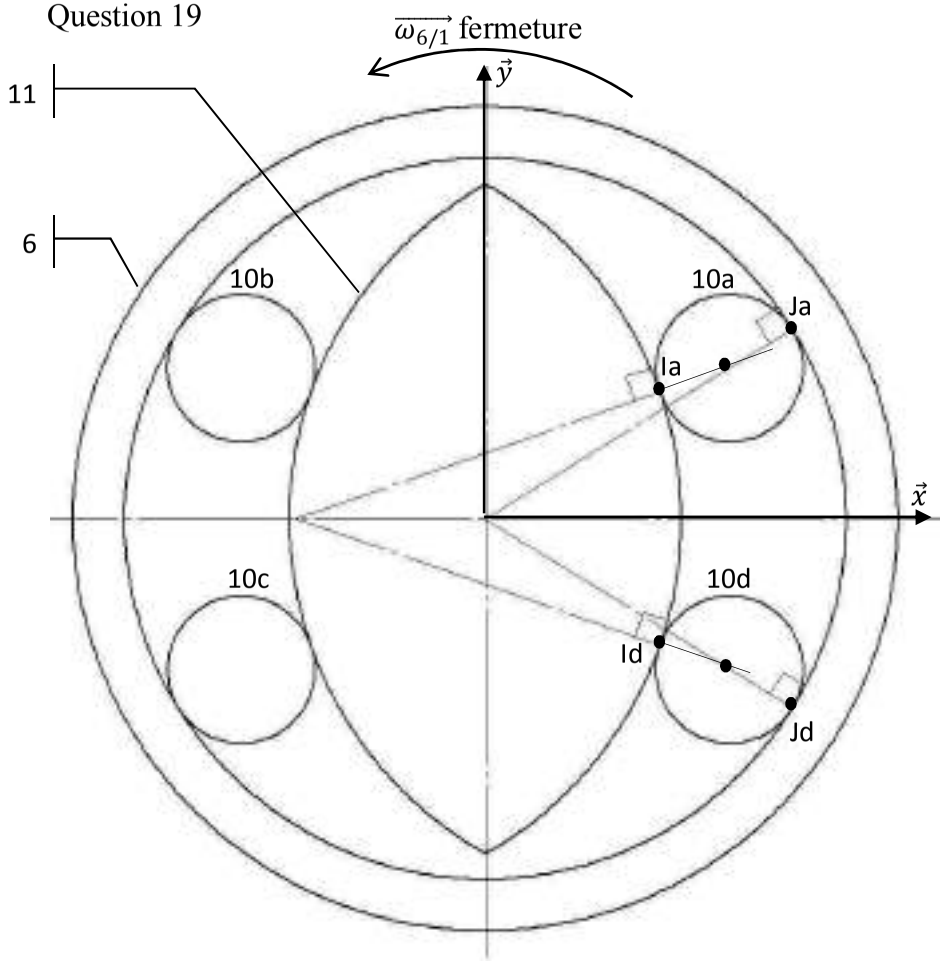


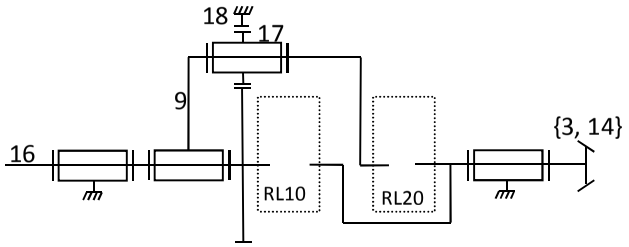
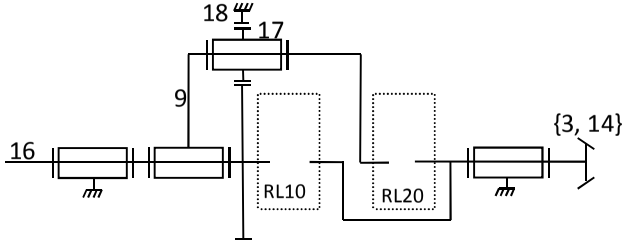
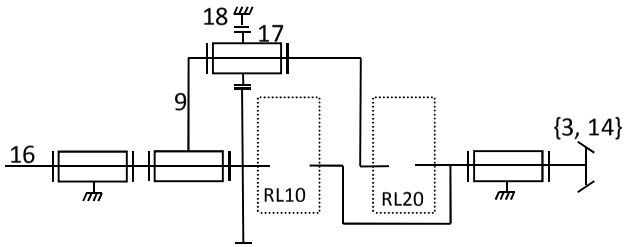
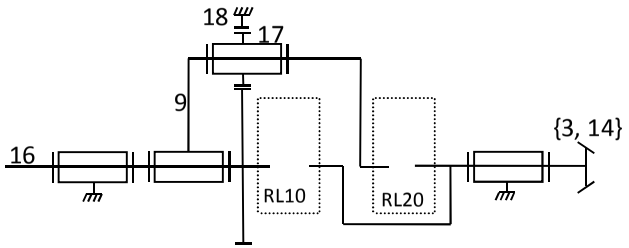
Figure 1. Roue libre RL10, la cloche 6 est motrice.

Question 19b - Bilan des actions mécaniques extérieures à 10a :

Question 19c - Présence de glissement 10a/6 ou 10a/11 :

Question 19d - Possibilité pour le galet 10d de transmettre les efforts :

Tournez la page S.V.P.

Question 20 Question 21c Question 22 Questions 23a, b		Roue libre RL10 (Q 20 et Q 22)			Roue libre RL20 (Q 21c et Q 22)		Résultats	
		Galets 10a 10c	**Galets 10b 10d**	**Roue libre RL10**	**Galets 20**	**Roue libre RL20**	**Couple disponible sortie coupleur (Q 23b)**	**Schéma cinématique équivalent (Q 23a)**
Fermeture	**Rapide (sans contact des doigts avec l'objet)**	E D (1)	E D (1)	E D (1)	D	D		
	Serrage (contact des doigts avec l'objet à serrer)	E D (1)	E D (1)	E D (1)	E D (1)	E D (1)		
Ouverture	**Relâchement de l'effort**	D	D	D	E D (1)	E D (1)		
	Rapide	E D (1)	E D (1)	E D (1)	E D (1)	E D (1)		

Question 20 : Galets 10a 10c, Galets 10b 10d, Roue libre RL10

Question 22 : Galets 10a 10c, Galets 10b 10d, Roue libre RL10

Question 21c : Galets 20, Roue libre RL20

Question 20 : Galets 20, Roue libre RL20

(1) : E = Embrayé (transmet les efforts) ; D = Débrayé (ne transmet pas les efforts). **Cercler la bonne réponse.**