

SESSION 2020

---

**AGREGATION  
CONCOURS INTERNE  
ET CAER**

**Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR**

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR  
ET INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE**

**ÉTUDE D'UN SYSTÈME, D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE  
ORGANISATION**

Durée : 4 heures

---

*Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.**

## INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1415A	102	7048

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1415A	102	7048

## Bras manipulateur ME3

Le sujet comporte 46 pages.

- **Questionnement** : pages 1 à 23 ;
- **Documents techniques DT1 à DT9** : pages 24 à 42 ;
- **Documents réponses DR1 à DR4** : pages 43 à 46.

Le sujet est constitué de plusieurs parties indépendantes qui sont toutes à traiter, dans l'ordre souhaité par les candidats.

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Lors du passage d'une forme littérale à son application numérique, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

**Si le texte du sujet, de ses questions ou de ses annexes, conduit les candidats à formuler une ou plusieurs hypothèses, il leur est demandé de la (ou les) mentionner explicitement dans la copie.**

## Introduction

La société AMTECH (Assistance Mécanique Tuyauterie Études et Chaudronnerie), basée dans le nord Cotentin, conçoit, réalise et commercialise des solutions globales de dépollution industrielle dans les domaines du nucléaire, de la pétrochimie, etc.

Le bras manipulateur ME3 (figure n°1) étudié dans ce sujet est un bras commandé à distance. Il est destiné aux travaux de démantèlement dans le domaine du nucléaire.



Figure n°1 : bras ME3 en phase de développement et de réglage

Les objectifs des travaux proposés dans ce sujet sont :

- dans la partie A de vérifier la capacité de levage et le dimensionnement des alimentations ;
- dans la partie B d'adapter au milieu nucléaire certaines solutions technologiques au niveau du bras ;
- dans la partie C d'exploiter le modèle du moteur synchrone du poignet pour calculer un point de fonctionnement pour une charge mécanique donnée en régime sinusoïdal permanent ;
- dans la partie D d'établir un modèle de simulation de l'onduleur à commande M.L.I. sinusoïdale ;
- dans la partie E de dimensionner les paramètres du correcteur proportionnel et intégral de la boucle de contrôle des courants du moteur synchrone, de comparer les résultats analytiques aux résultats de simulation et de réaliser une analyse critique des performances de la boucle ;
- dans la partie F de modifier un script Python3 ou Scilab afin de calculer la position angulaire du flux statorique à partir des relevés des courants dans les phases du moteur et de valider la quadrature entre le flux rotorique et le flux de réaction magnétique d'induit ;
- dans la partie G de gérer les positions des articulations en phase d'exploitation et lors des coupures d'alimentation de l'appareil.



### Structure et fonctionnement du bras ME3

Le pilotage du bras est assuré par deux joysticks analogiques intégrant des commandes logiques.

Un premier joystick (figure n°3) commande les mouvements du poignet ainsi que les mouvements du télescope et de la pince, tandis que le second joystick (figure n°4) commande les trois mouvements liés à l'épaule.

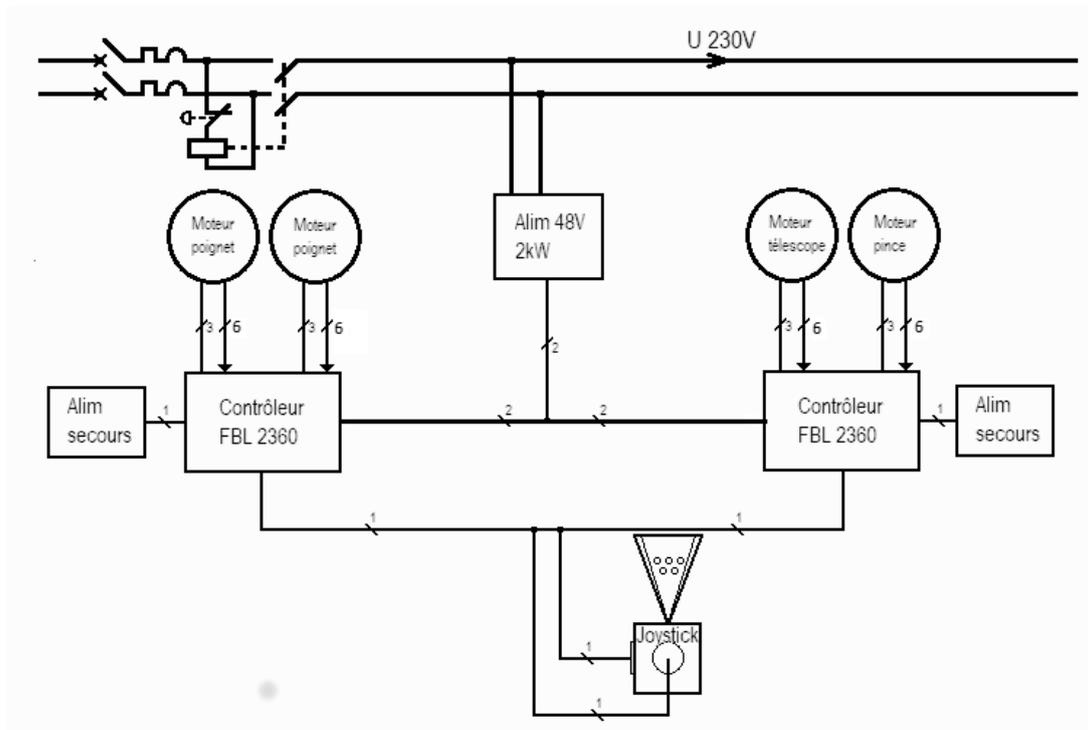


Figure n°3 : schéma électrique de la commande de poignet, du télescope et de la pince

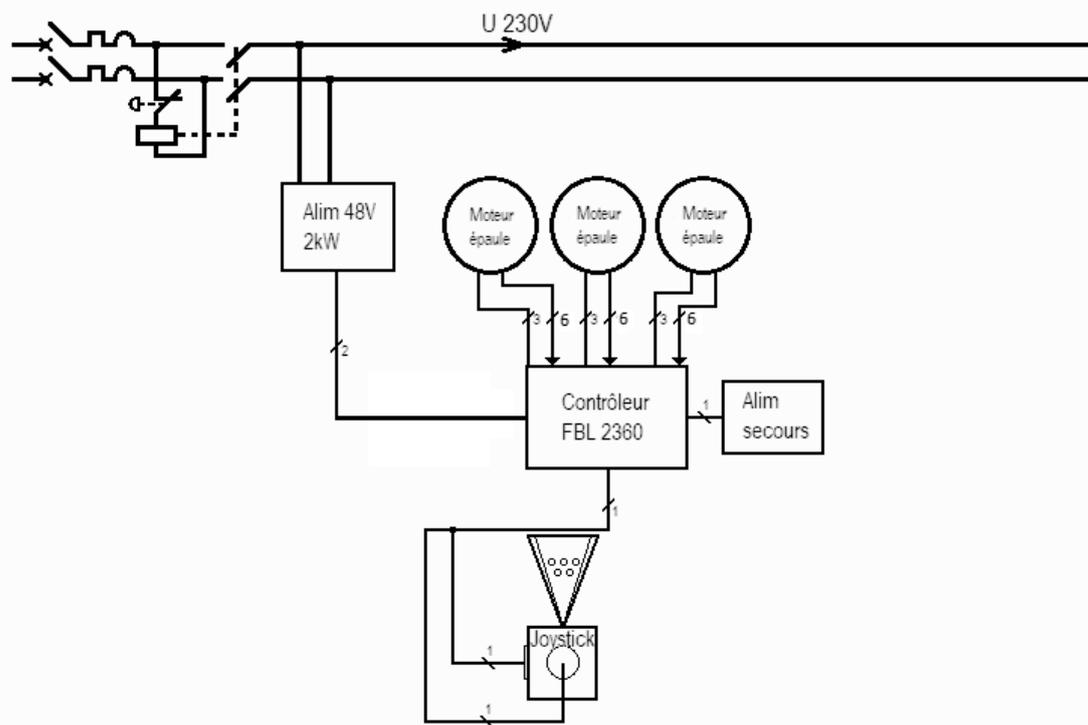


Figure n°4 : schéma électrique de la commande d'épaule

Le poignet et l'épaule ont une structure de différentiel inversé (figures n°5 et 6) qui permet de contrôler une rotation sur deux axes à partir de la commande de deux moteurs. Un calcul permet de combiner les mouvements sur les deux axes en fonction de la position des joysticks. Les couleurs des figures 5 et 6 sont en correspondance.

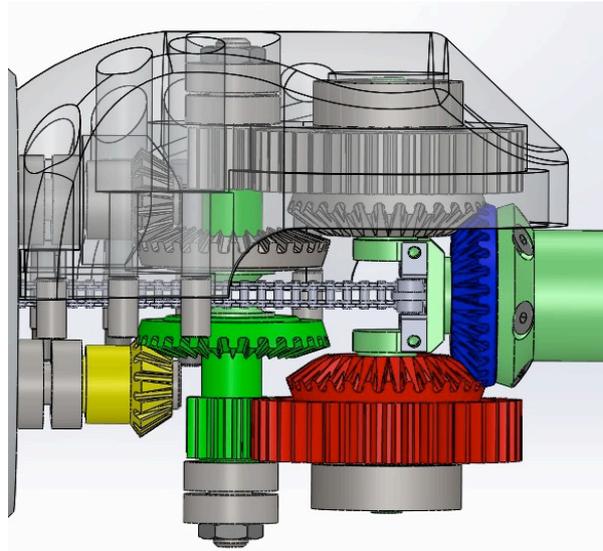


Figure n°5 : détail du poignet vu de dessus

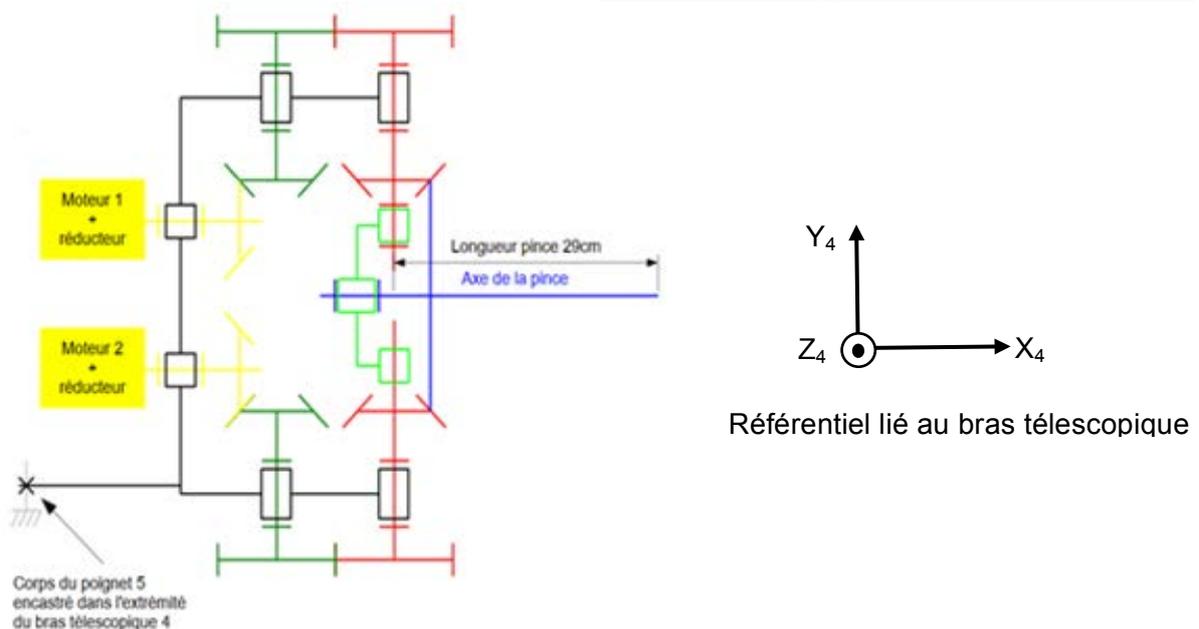


Figure n°6 : schéma cinématique du poignet

Les mouvements du différentiel inversé sont contrôlés selon le principe suivant :

- lorsque les deux moteurs sont pilotés dans le même sens et à la même vitesse, l'articulation est en rotation autour de l'axe  $X_4$  ;
- lorsque les deux moteurs sont pilotés dans le sens inverse et à la même vitesse, l'articulation est en rotation autour de l'axe  $Y_4$  ;
- toute autre combinaison de rotation des moteurs permet des mouvements combinés selon les axes  $X_4, Y_4$ .

La position de chaque axe moteur est acquise par des capteurs incrémentaux. Des compteurs internes aux contrôleurs moteurs permettent de connaître la position des moteurs afin de calculer la position du bras.

Une alimentation de secours est utilisée pour chaque contrôleur moteur. Elle permet, en cas de coupure d'alimentation, d'assurer la sauvegarde des positions de chaque articulation et les échanges sur le bus CAN.

## A. Vérification de la capacité de levage et du dimensionnement des alimentations

On souhaite vérifier au niveau du poignet que la capacité de levage en position horizontale est supérieure à 20 kg en fonctionnement normal.

Le document technique DT1 contient les éléments nécessaires pour traiter cette partie.

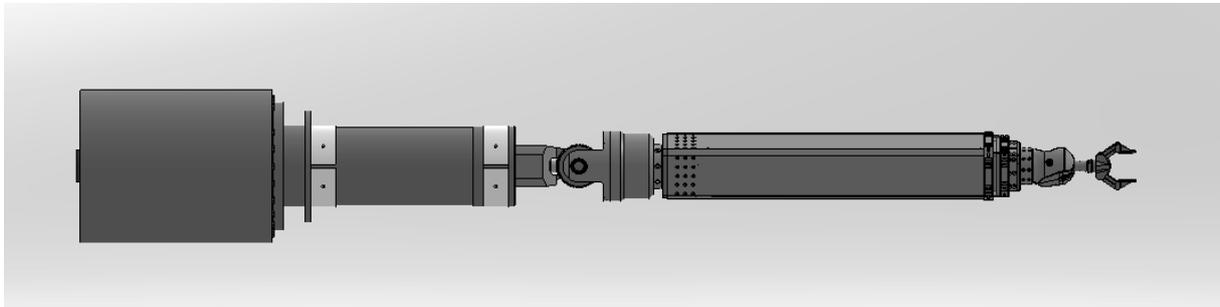


Figure n°7 : vue modélisée du bras en position horizontale

Hypothèses :

- le poignet est en position horizontale, pince à plat (figure n°7) ;
- l'effort de levage au point C selon l'axe (vertical)  $Z_4$  est notée  $F_C$  ;
- les efforts se répartissent équitablement sur les deux moteurs. Chaque réducteur moteur est capable d'appliquer en sortie un couple  $C_{sr}$  nominal de 15 Nm ;
- les réducteurs sont considérés comme parfaits ;
- les mouvements sont suffisamment lents pour que l'on fasse une étude en statique ;
- la distance entre l'axe de l'engrenage n°5 (figure n°8) et le point C est de 29 cm.

On applique une charge de 20 kg au point C.

**Question 1 :** calculer la norme des actions mécaniques  $F_C$ ,  $F_B$  puis  $F_A$ , selon l'axe  $Z_4$ , aux points C, B et A repérés sur la figure n°8.

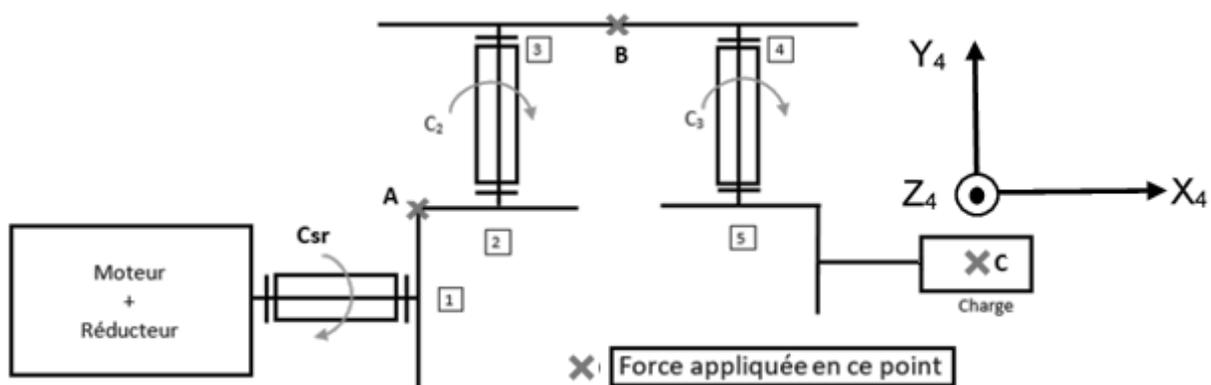


Figure n°8 : points d'application des efforts et repérage des pignons d'un demi-poignet

Numéro de pignon	Nombre de dents	Rayon (mm)
1	15	11,25
2	30	22,5
3	12	9
4	40	30
5	30	22,5

Figure n°9 : caractéristiques des engrenages

**Question 2 :** conclure sur le dimensionnement du réducteur (référence 203125) associé au moteur.

**Question 3 :** vérifier que le moteur de poignet (référence EC40, DT1) est capable de fournir le couple nécessaire au réducteur (référence 203125). Conclure sur la capacité de levage.

L'épaule a une capacité de levage de 74,6 kg, ce qui correspond à un couple de 2,1 Nm appliqué aux axes moteurs (référence moteur BL210.480).

**Question 4 :** en déduire la puissance mécanique  $P_{méca}$  délivrée lorsqu'un moteur d'épaule est alimenté sous sa tension nominale.

**Question 5 :** vérifier que l'alimentation continue 48 V, 2 kW est bien dimensionnée pour la commande des 3 moteurs d'épaule (figure n°4). On prendra une valeur de rendement de 90 % pour l'ensemble moteur-contrôleur.

### **B. Adaptation au milieu nucléaire des solutions technologiques au niveau du bras**

La durée de vie des capteurs à effet Hall des moteurs brushless étant limitée dans un environnement radioactif, il a été décidé d'utiliser des résolveurs Maxon 133405 pour le poignet (document technique DT2). Cette partie permet d'étudier les modifications à apporter au système pour les intégrer.

Le bureau d'étude de la société a développé une carte d'acquisition qui permet d'envoyer les informations de position – vitesse sous forme numérique au contrôleur.

Ces cartes d'acquisition exploitent des encodeurs Tamagawa AU6805 (document technique DT2) qui permettent de délivrer des signaux numériques de type A-B dont les impulsions, équivalentes à des impulsions issues d'un codeur incrémental, seront comptées-décomptées par les compteurs internes des contrôleurs moteurs (entrées ENC1A/B et ENC2A/B du contrôleur).

Le fonctionnement du circuit encodeur AU6805 est optimal lorsque certaines conditions de déphasage et de niveau de tension sont respectées. La documentation technique DT2 du circuit explicite et quantifie ces contraintes. L'objectif de cette partie est de vérifier que les composants et les structures définies à l'aide des notes d'application permettent bien de respecter ces critères.

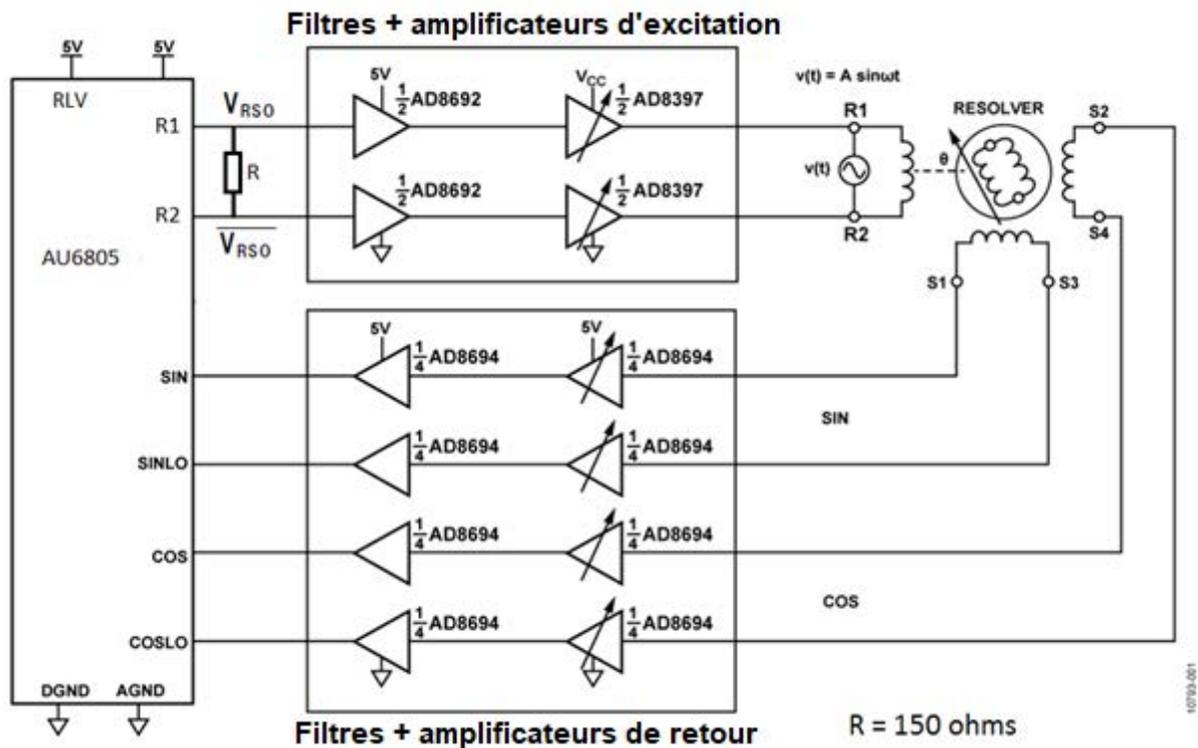
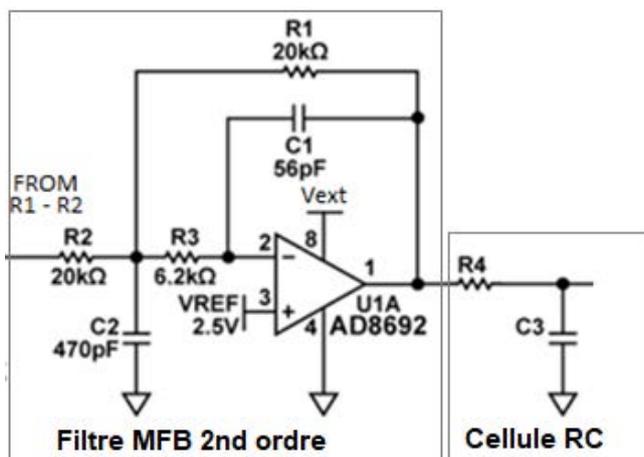


Figure n°10 : structure de la carte d'acquisition

Le circuit d'excitation intègre un filtrage passe-bas de type Butterworth du troisième ordre. Ce dernier permet d'éliminer les fréquences indésirables supérieures à la fréquence d'excitation du résolveur notée  $F_{excitation}$ . Le filtre est constitué d'un filtre MFB (Multiple Feed Back) du second ordre associé à une cellule RC.



Transmittance du filtre passe-bas MFB du deuxième ordre :

$$T(\omega) = A_0 \cdot \frac{1}{1 + 2 \cdot jm \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$$

Valeurs caractéristiques du filtre MFB :

- $m = 0,5$  ;
- $\omega_0 = 554323 \text{ rad/s}$  ;
- $A_0 = 1$ .

Figure n°11 : filtre d'excitation

**Question 6 :** proposer un couple de valeurs pour  $R4$  et  $C3$  afin de caler la fréquence de coupure de cette cellule RC sur la fréquence propre du filtre MFB.

Les diagrammes de Bode du filtre MFB sont disponibles sur le document technique DT3.

**Question 7 :** préciser l'influence du filtre global ainsi réalisé sur le signal d'excitation du résolveur (atténuation et déphasage) ainsi que sur les signaux de fréquence égale à  $10 \cdot F_{excitation}$ .

**Question 8 :** calculer le gain  $G_a$  des amplificateurs à associer aux filtres d'excitation et déterminer la valeur de la tension  $V_{cc}$  à utiliser pour alimenter les amplificateurs AD8397 afin d'optimiser le rapport Signal/Bruit.

**Question 9 :** calculer la valeur maximale du gain  $G_{rMax}$  du circuit de retour, formé par les amplificateurs ajustables (1/4 AD8694) associés aux filtres de butterworth d'entrée (1/4 AD8694) afin que l'amplitude du signal d'entrée du circuit d'encodage AU6805 ne soit pas supérieure à sa valeur maximale, soit  $2,3 V_{p-p}$ .

Il est précisé dans la documentation technique du circuit encodeur qu'afin de supprimer la procédure d'ajustement de déphasage entre les signaux d'excitation et ceux de retour Sin/Cos, la limite du déphasage entre ces deux signaux est de  $\pm 45^\circ$ .

**Question 10 :** le circuit de retour Sin/Cos induit un déphasage de  $-18,8^\circ$  à 10 kHz ; en déduire le déphasage maximal admissible  $\varphi_{exMax}$  pour l'amplificateur d'excitation.

La faible impédance  $Z_{ex}$  de la bobine d'excitation du résolveur ( $Z_{ex} = 70 + j \cdot 100$  à 10 kHz) impose de vérifier que la puissance maximale dissipable par les circuits AD8397 n'est pas dépassée.

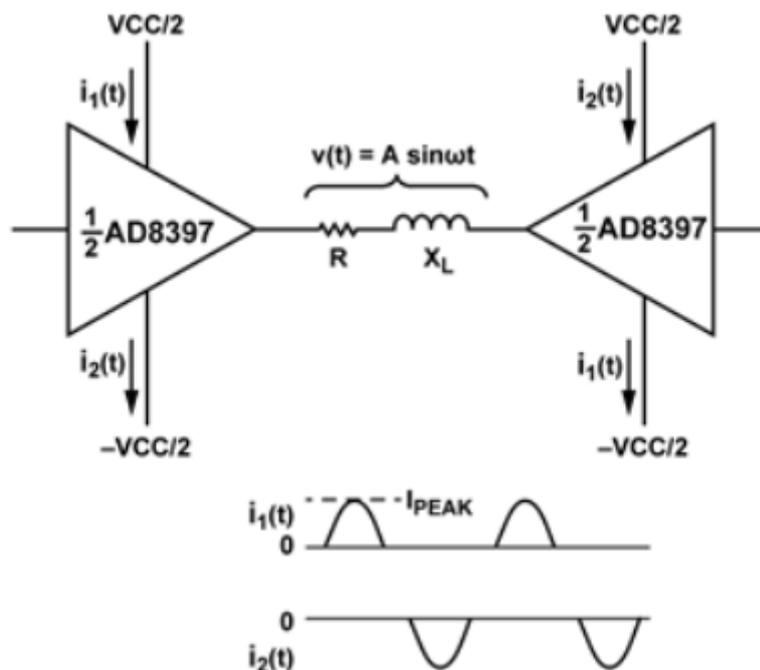


Figure n°12 : schéma d'excitation équivalent et allure des courants d'alimentation

Remarques :

- $V_{CC} = 24$  V pour les applications numériques ;
- la résistance thermique du boîtier  $R_{th_{j-a}}$  vaut  $47,2$  °C/W pour le type 8 broches SOIC EP ;
- la température maximale de jonction pour les boîtiers plastiques est d'environ  $150$  °C.

**Question 11 :** *calculer la puissance active  $P_{load}$  dissipée par le résolveur.*

Hypothèse : on considère que le courant débité par l'alimentation est en tout instant égal au courant dans la charge.

**Question 12 :** *calculer la valeur du courant d'alimentation moyen, qui sera noté  $I_{supply}$ , du circuit intégré AD8397.*

**Question 13 :** *calculer la puissance  $P_{supply}$  délivrée par l'alimentation au circuit intégré AD8397 puis en déduire la puissance  $P_{amp}$  dissipée par ce dernier.*

**Question 14 :** *vérifier que le circuit intégré AD8397 est en mesure de dissiper cette puissance si l'on considère une température ambiante  $\theta_A$  de  $25$ °C.*

**Question 15 :** *conclure sur l'adéquation entre la carte d'acquisition utilisée et les contraintes imposées par le circuit encodeur.*

### **C. Détermination d'un point de fonctionnement de la boucle de contrôle de couple des moteurs synchrones du poignet**

La complexité de la partie commande du poignet du bras manipulateur ME3 a nécessité l'utilisation d'un modèle numérique associant modèle mécanique du poignet et modèle de la chaîne de commande des moteurs synchrones. L'étude du modèle est ici limitée à la commande des moteurs synchrones MAXON et plus particulièrement à la boucle de contrôle des courants d'induit. Un modèle de simulation Scilab/Xcos sert de support à l'étude de la boucle de contrôle de courant. Le document technique DT4 fournit une représentation schématique de la seule boucle de contrôle de courant. Le document technique DT5 décrit le modèle de simulation Scilab/Xcos.

La partie C du sujet exploite le modèle du moteur synchrone pour calculer un point de fonctionnement pour une charge mécanique donnée en régime sinusoïdal permanent, étape préalable à l'étude critique des résultats de simulation du modèle Scilab/Xcos.

Les moteurs utilisés dans la commande du poignet sont référencés EC 393025 (document technique DT6). Ces moteurs synchrones sont alimentés par des onduleurs triphasés commandés en modulation de largeur d'impulsions sinusoïdale. Le schéma simplifié de la partie puissance est donné à la figure n°13. On utilise le repérage des grandeurs physiques suivant :

- $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  et  $v_3(t)$  : tensions simples d'alimentation du moteur synchrone ;
- $v_f(t)$  : fondamental de la tension  $v_1(t)$ , valeur efficace  $V_{fEFF}$  ;
- $u_{1-2}(t)$ ,  $u_{2-3}(t)$  et  $u_{3-1}(t)$  : tensions composées d'alimentation du moteur synchrone ;
- $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  et  $i_3(t)$  : courants de ligne du moteur synchrone ;
- $i_f(t)$  : fondamental du courant  $i_1(t)$ , valeur efficace  $I_{fEFF}$  ;
- $U_c$ ,  $I_c$  : grandeurs en entrée de l'onduleur triphasé.

On exploite le modèle monophasé de la figure n°14. Les paramètres linéaires du moteur synchrone sont définis en régime de fonctionnement sinusoïdal. On considère les valeurs numériques suivantes :  $R_m = 0,4 \Omega$ ,  $L_m = 0,17 \text{ mH}$ ,  $k_{fe} = 12 \text{ mV/rd/s}$ ,  $k_{fe}$  étant le rapport entre la valeur efficace de la f.e.m. induite  $e_f(t)$  et la vitesse angulaire du rotor  $\Omega_m$ .

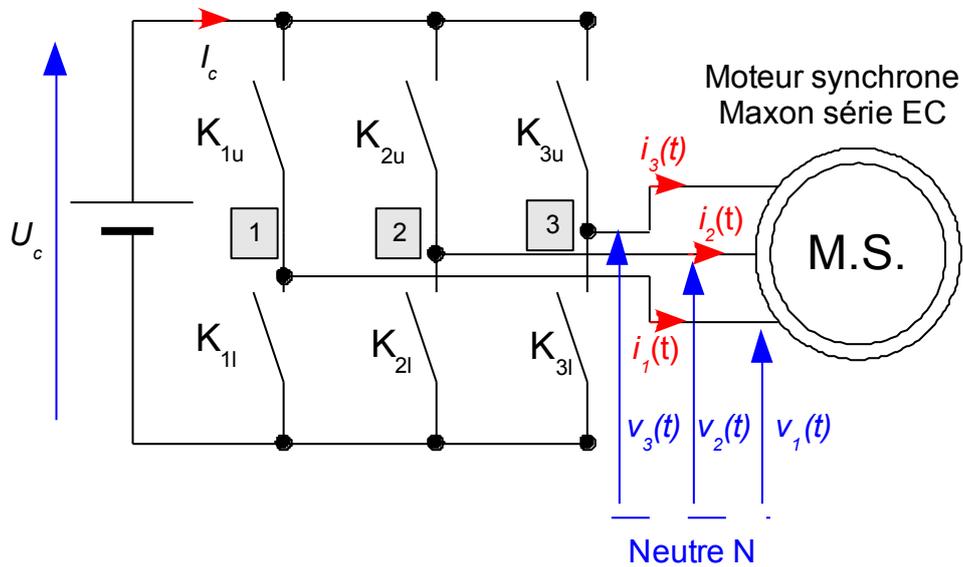


Figure n°13 : onduleur triphasé

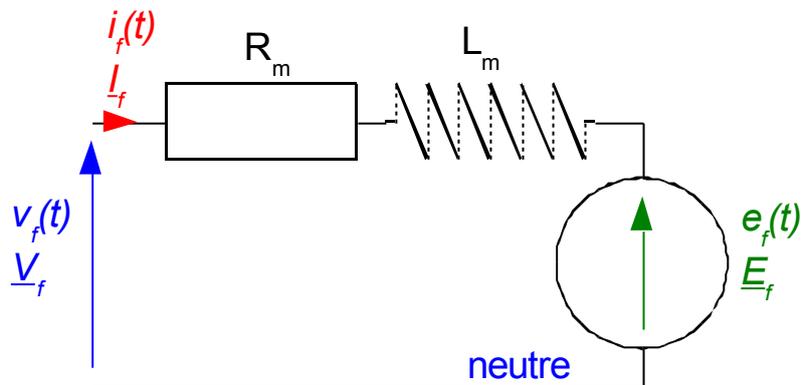


Figure n°14 : modèle monophasé en régime sinusoïdal permanent

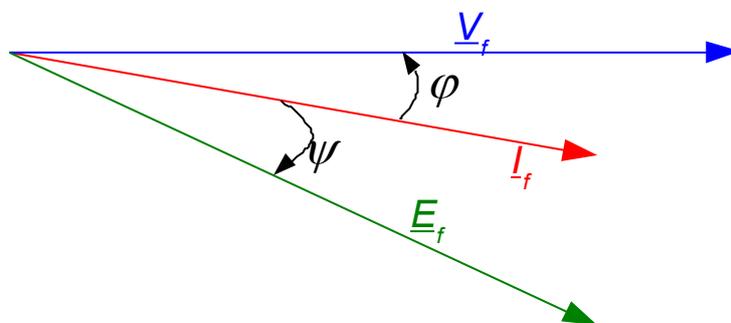


Figure n°15 : diagramme vectoriel de Behn-Eschenburg du moteur synchrone

Rappel sur l'autopilotage du moteur synchrone : la commande de l'onduleur triphasé contrôle les courants statoriques  $i_1(t)$  à  $i_3(t)$  permettant de maintenir en quadrature le champ magnétique de réaction d'induit  $\Phi_s$  et le champ magnétique  $\Phi_r$  créé par les aimants permanents du rotor. On parle de commande autopilotée ou d'autopilotage.

On associe au flux de réaction d'induit et au flux rotorique les grandeurs complexes suivantes :  $\underline{\Phi}_s$  et  $\underline{\Phi}_r$ .

On considère ici que la commande d'autopilotage n'est pas active. Le diagramme vectoriel de la figure n°15 est donc tracé pour un point de fonctionnement en régime sinusoïdal permanent quelconque. Les vecteurs sont repérés par la variable complexe associée.

**Question 16 :** *placer, sur la figure n°34 du document réponse DR1, les vecteurs associés aux deux grandeurs complexes  $\underline{\Phi}_s$  et  $\underline{\Phi}_r$ . Justifier le tracé de ces deux grandeurs vectorielles.*

**Question 17 :** *réaliser un bilan de puissance et montrer que l'on peut exprimer le couple électromagnétique sous la forme  $C_{em} = 3 \cdot k_{fe} \cdot I_{fEFF} \cdot \cos(\Psi)$ . Justifier que la commande d'autopilotage optimise le couple délivré par la machine.*

On considère maintenant que la commande d'autopilotage est active.

**Question 18 :** *tracer, sur la figure n°35 du document réponse DR1, un diagramme de Behn-Eschenburg dans une stratégie de commande d'autopilotage. Faire apparaître les vecteurs associés au courant  $I_f$  et aux chutes de tension dans  $R_m$  et  $L_m$ . Exprimer la valeur complexe de ces chutes de tension en fonction de  $I_f$ .*

Le modèle de simulation Scilab/Xcos de la boucle de courant (document technique DT5) comporte une perturbation modélisée par un couple résistant de type frottement visqueux :  $C_r = K_{FV} \cdot \Omega_m$  avec  $K_{FV} = 172 \cdot 10^{-6}$  Nm.s. La consigne de courant impose une valeur  $I_{fEFF} = 2,8$  A dans les enroulements d'induit. On suppose la boucle de contrôle du courant sans erreur. On considère le moteur sans pertes mécaniques.

**Question 19 :** *pour le régime de fonctionnement et les paramètres de simulation décrits ci-dessus, déterminer l'expression littérale de  $\Omega_m$  en fonction de  $k_{fe}$ ,  $K_{FV}$  et  $I_{fEFF}$ . Calculer les valeurs numériques de  $\Omega_m$  et  $C_{em}$ .*

**Question 20 :** *pour le même point de fonctionnement, déterminer l'expression littérale de  $V_{fEFF}$  en fonction de  $R_m$ ,  $L_m$ ,  $\Omega_m$ ,  $I_{fEFF}$ ,  $k_{fe}$  et  $p$  (nombre de paires de pôles du moteur, voir document technique DT6). Calculer la valeur numérique de la tension  $V_{fEFF}$ .*

Les résultats des deux questions précédentes seront exploités ultérieurement pour une analyse critique des résultats de simulation du modèle Scilab/Xcos.

#### D. Élaboration d'un modèle de simulation de l'onduleur triphasé

Dans cette partie de l'étude, nous allons définir le modèle Scilab/Xcos de l'onduleur triphasé en établissant les relations liant les trois tensions simples d'alimentation du moteur aux signaux de commande binaires des interrupteurs de l'onduleur triphasé. La figure n°16 illustre l'association des modèles du moteur synchrone et de l'onduleur. La figure n°17 décrit la structure interne du modèle de l'onduleur triphasé où trois expressions sont à définir pour valider ce modèle. Aucune connaissance sur la sémantique graphique Scilab/Xcos n'est demandée dans cette partie.

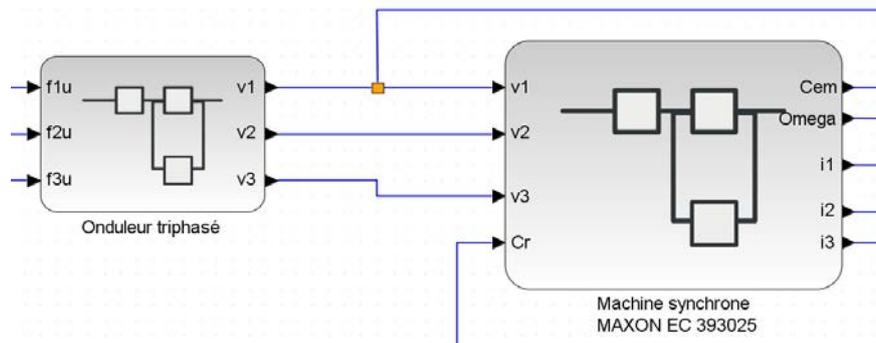


Figure n°16 : modèles de l'onduleur triphasé et du moteur synchrone

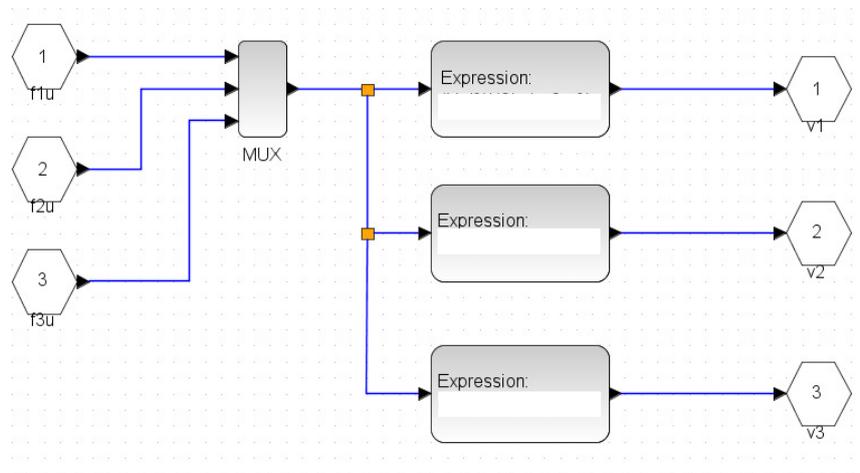


Figure n°17 : blocs internes de l'onduleur triphasé

Fonction de l'onduleur triphasé de tension : transformer la tension continue  $U_c$  en un système de tensions triphasées. Si l'on ne s'intéresse qu'au fondamental des tensions simples triphasées, on peut les exprimer en régime permanent sous la forme :

$$v_{f1}(t) = V_{fEFF} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t)$$

$$v_{f2}(t) = V_{fEFF} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3})$$

$$v_{f3}(t) = V_{fEFF} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3})$$

La commande M.L.I. sinusoïdale de l'onduleur triphasé permet de régler la fréquence  $f_s$  et la valeur efficace  $V_{fEFF}$  des tensions.

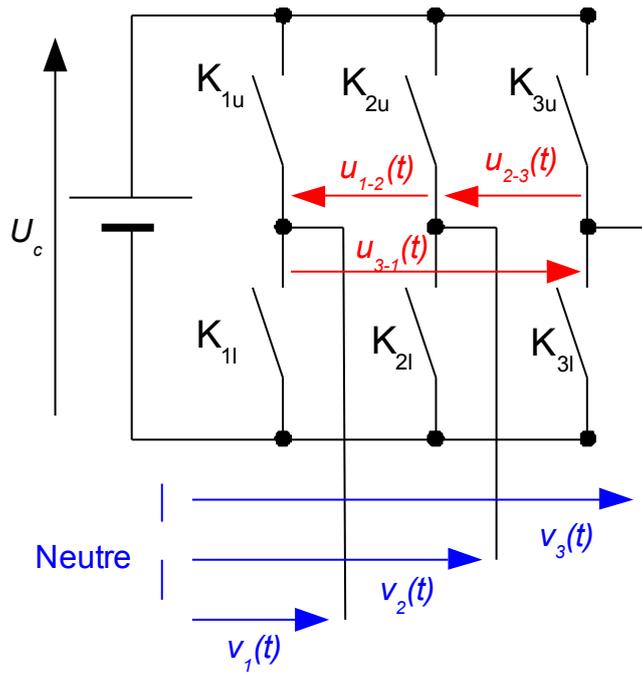


Figure n°18 : onduleur triphasé

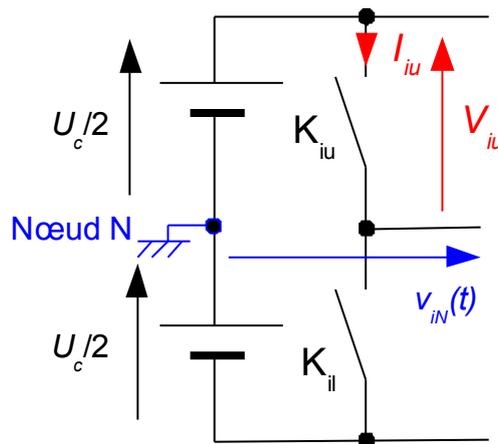


Figure n°19 : bras d'onduleur

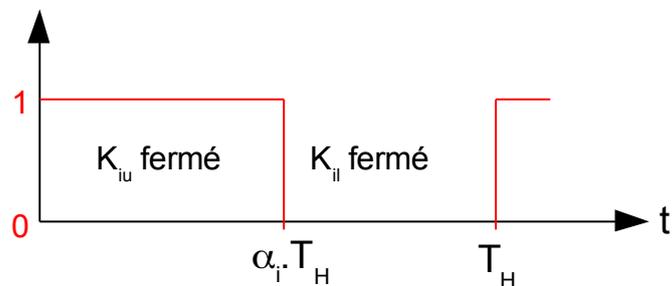


Figure n°20 : commande de l'interrupteur  $K_{iu}$

Constitution de l'onduleur triphasé : la figure n°18 précise la structure de l'onduleur triphasé constitué de trois bras numérotés  $i$  ( $i$  varie de 1 à 3). Chaque bras est constitué de deux interrupteurs  $K_{iu}$  et  $K_{il}$ . Le système de tensions triphasées et le réglage de ses paramètres

(tension efficace, phase et fréquence) est obtenu par la synthèse des six signaux de commande binaires : signaux  $f_{iu}$  et  $f_{il}$  pour le bras n°i.

Commande de l'interrupteur  $K_{iu}$  (voir figures n°19 et n°20) :

- $f_{iu} = 0$ , interrupteur  $K_{iu}$  ouvert,  $I_{iu} = 0$  ;
- $f_{iu} = 1$ , interrupteur  $K_{iu}$  fermé,  $V_{iu} = 0$ .

La commande des deux interrupteurs d'un même bras étant complémentaire on utilise dans les questions suivantes la relation arithmétique :  $f_{il} = 1 - f_{iu}$ .

On cherche à établir les relations liant tensions composées et tensions simples avec les trois signaux de commande  $f_{1u}$ ,  $f_{2u}$  et  $f_{3u}$ . Toutes les tensions sont repérées sur la figure n°18.

La tension  $v_{iN}(t)$  est repérée sur la figure n°19.

**Question 21** : exprimer  $v_{iN}(t)$  en fonction de  $f_{iu}$ ,  $f_{il}$  et  $U_c$  puis exprimer  $v_{iN}(t)$  en fonction de  $f_{iu}$  seul et  $U_c$ .

**Question 22** : exprimer  $u_{1-2}(t)$ ,  $u_{2-3}(t)$  et  $u_{3-1}(t)$  en fonction de  $f_{1u}$ ,  $f_{2u}$ ,  $f_{3u}$  et  $U_c$ .

On s'appuie sur le schéma de la figure n°18. On considère que toutes les composantes harmoniques des tensions sont triphasées et équilibrées. Les expressions déterminées à la question suivante servent à l'élaboration du modèle Scilab/Xcos de la figure n°17.

**Question 23** : exprimer  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  et  $v_3(t)$  en fonction de  $f_{1u}$ ,  $f_{2u}$ ,  $f_{3u}$  et  $U_c$ .

### E. Étude analytique de la boucle de contrôle de courant et analyse critique du modèle de simulation

L'étude analytique de la boucle de contrôle de courant est ici menée afin de définir les valeurs numériques du correcteur P.I. du modèle de simulation Scilab/Xcos et réaliser une analyse critique des performances de la boucle.

Dans cette partie,  $p$  représente l'opérateur de Laplace. La figure n°21 représente le diagramme fonctionnel simplifié de boucle de contrôle du courant. Dans un premier temps par souci de simplification, on ne prend pas en compte l'influence de la f.e.m. induite  $E_f(p)$ .

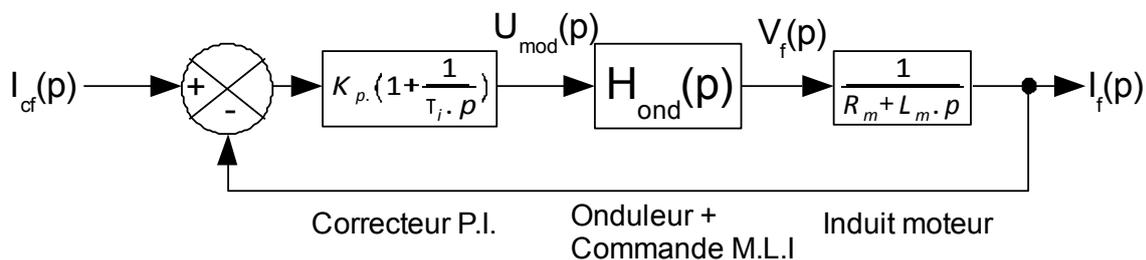


Figure n°21 : boucle de contrôle du courant

- $I_{cf}(p)$  : consigne de courant pour une phase ; en régime de rotation permanent cette consigne est sinusoïdale.
- $U_{mod}(p)$  : entrée du modulateur M.L.I.
- $V_f(p)$  : fondamental de la tension simple.
- $I_f(p)$  : courant dans une phase de moteur.

Pour le dimensionnement des paramètres du correcteur P.I. (constante proportionnelle  $K_p$  et constante d'intégration  $\tau_i$ ), on considère la transmittance  $H_{ond}(p)$  constante telle que  $H_{ond}(p) = H_{ond} = 2,4$ .

**Question 24 :** dimensionner l'un des paramètres du correcteur P.I. afin d'annuler l'effet du pôle non nul de la transmittance en boucle ouverte du diagramme la figure n°21. Donner la valeur numérique de ce paramètre.

**Question 25 :** dimensionner le deuxième paramètre du correcteur P.I. pour qu'au point de fonctionnement nominal du moteur synchrone (document technique DT6, référence EC 393025), l'erreur sur l'amplitude du courant de ligne soit inférieure à 5%.

Pour la suite des questions, on prend  $K_p = 0,206$ .

**Question 26 :** pour le point de fonctionnement nominal du moteur, donner l'expression, en fonction de  $H_{ond}$ ,  $K_p$ ,  $L_m$  et  $\Omega_m$ , de l'écart de phase entre  $i_{1f}(t)$ , fondamental du courant dans la phase n°1, et  $i_{1cf}(t)$  consigne de la boucle de courant pour la phase n°1. Calculer la valeur numérique de cet écart de phase en radian et en degré.

En analysant l'élaboration des consignes de courant sur le schéma de la figure n°30 (document technique DT4) on peut montrer qu'en régime sinusoïdal permanent les grandeurs  $I_{cf}(j\cdot\omega)$  et  $E_f(j\cdot\omega)$  sont en phase ( $p = j\cdot\omega$  en régime sinusoïdal).

**Question 27 :** en exploitant la remarque précédente et le résultat de la question 17, déterminer si l'écart de phase entre  $i_{1f}(t)$  et  $i_{1cf}(t)$  a une influence sur la valeur du couple électromagnétique  $C_{em}$  développé par le moteur.

Dans le modèle de simulation Scilab/Xcos exploité dans les questions qui suivent, l'onduleur triphasé associé à sa commande M.L.I. sinusoïdale est remplacé par la transmittance  $H_{ond}(p) = H_{ond}$ . Le modèle de simulation Scilab/Xcos de contrôle du courant moteur fournit les résultats présentés sur la figure n°22, consigne de courant de la phase n°1 et les trois courants de ligne en régime établi. La consigne de courant maximale est fixée à la valeur de  $I_{cMAX} = 2,8 \cdot \sqrt{2}$  A.

**Question 28 :** analyser les graphes de la figure n°22 et réaliser une étude critique de l'évolution des courants de ligne  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  et  $i_3(t)$ . Déterminer si ces évolutions sont compatibles avec le modèle de la figure n°21.

**Question 29 :** conclure sur la pertinence de négliger l'influence de la f.e.m. induite  $E_f(p)$  dans le modèle de la figure n°21.

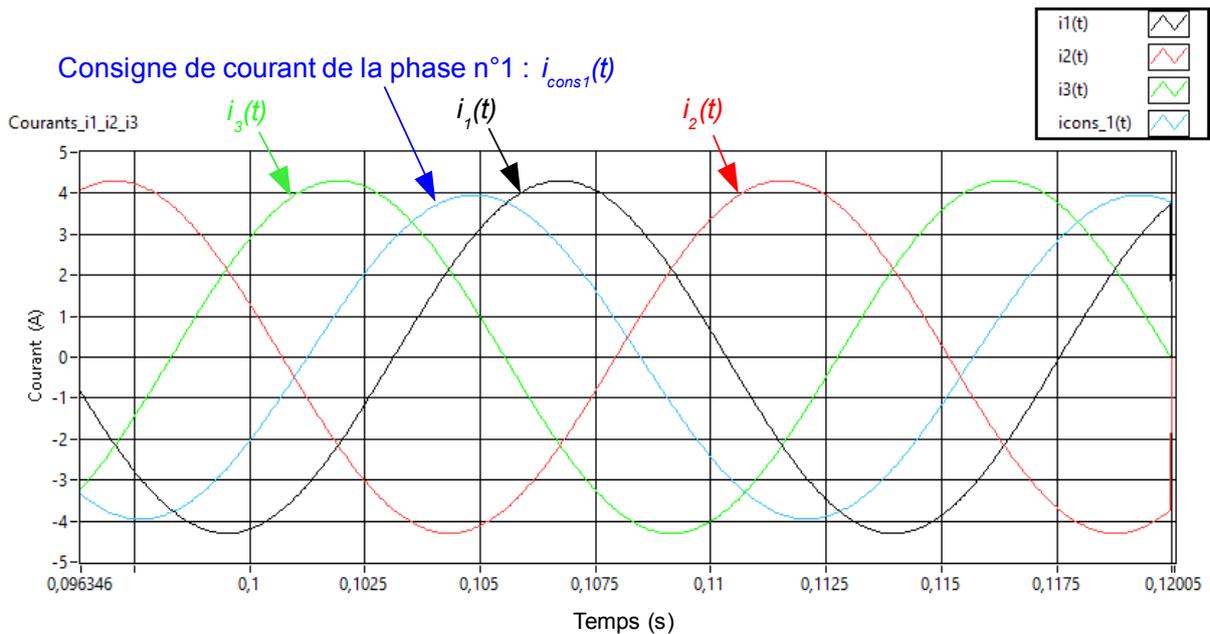


Figure n°22 : courants dans les phases du moteur en régime de vitesse établi

Dans un deuxième temps, on prend en compte la f.e.m. induite  $E_f(p)$  afin de mettre en évidence son influence sur la boucle de contrôle des courants d'induit.

Remarque : l'un des paramètres du correcteur P.I. annule toujours l'effet du pôle non nul de la transmittance en boucle ouverte.

**Question 30 :** compléter le diagramme fonctionnel de la figure n°36 du document réponse DR1 afin de prendre en compte la f.e.m.  $E_f(p)$ . Déterminer l'expression de  $I_f(p)$  en la mettant sous la forme :  $I_f(p) = H_1(p) \cdot I_c(p) + H_2(p) \cdot E_f(p)$ . Déterminer  $H_1(p)$  et  $H_2(p)$ . Montrer que l'on peut mettre l'expression sous la forme :

$$I_f(p) = \frac{1}{1 + \tau_n \cdot p} \cdot (I_c(p) - \frac{1}{R_m} \cdot \frac{\tau_n \cdot p}{1 + \tau_m \cdot p} \cdot E_f(p))$$

avec  $\tau_n = 344 \mu s$  et  $\tau_m = 425 \mu s$ .

Donner les expressions littérales de  $\tau_n$  et  $\tau_m$  en fonction de  $K_p$ ,  $\tau_i$ ,  $R_m$ ,  $L_m$  et  $H_{ond}$ .

**Question 31 :** en exploitant la figure n°22, estimer la vitesse en régime établi  $\Omega_m$  (rad/s).

En régime de vitesse établi, les grandeurs physiques sont à variation sinusoïdale ; on remplace donc l'opérateur de Laplace  $p$  par  $j \cdot \omega$ .

**Question 32 :** justifier que l'écart de phase en régime sinusoïdal établi entre  $I_c(j \cdot \omega)$  et  $E_f(j \cdot \omega)$  est nul.

Dans les deux questions suivantes, on utilise la coïncidence de phase entre  $I_c(j \cdot \omega)$  et  $E_f(j \cdot \omega)$ .

**Question 33 :** exprimer et calculer l'écart de phase entre  $i_{1f}(t)$ , le fondamental du courant dans la phase n°1, et  $i_{1cf}(t)$ , la consigne de la boucle de contrôle de courant pour la phase n°1, pour le point de fonctionnement en régime établi des graphes de la figure n°22. Commenter le résultat en comparant avec l'écart de phase relevé sur les graphes de la figure n°22.

**Question 34 :** exprimer et calculer la valeur efficace de  $i_{1r}(t)$  pour le point de fonctionnement en régime établi des graphes de la figure n°22. Comparer avec les résultats de simulation des graphes de la figure n°22. Conclure sur la pertinence de prendre en compte la f.e.m. induite  $E_r(p)$  dans le modèle de la boucle de contrôle de courant.

On peut constater que l'écart entre la consigne de courant et le courant dans la phase du moteur est significative, particulièrement pour la phase.

**Question 35 :** indiquer sur quel paramètre on peut agir pour réduire cette erreur. Exploiter l'expression de  $I_r(p)$  de la question 30 pour justifier la réponse en analysant la (ou les) constante(s) de cette expression modifiée(s) par ce changement de paramètre.

Pour les questions suivantes le modèle de simulation Scilab/Xcos inclut l'onduleur triphasé associé à sa commande M.L.I. sinusoïdale (bruit de découpage sur les courants). Les résultats de simulation présentés sur la figure n°23 sont obtenus avec une forte augmentation du paramètre évoqué à la question précédente, d'un facteur multiplicatif 25 environ.

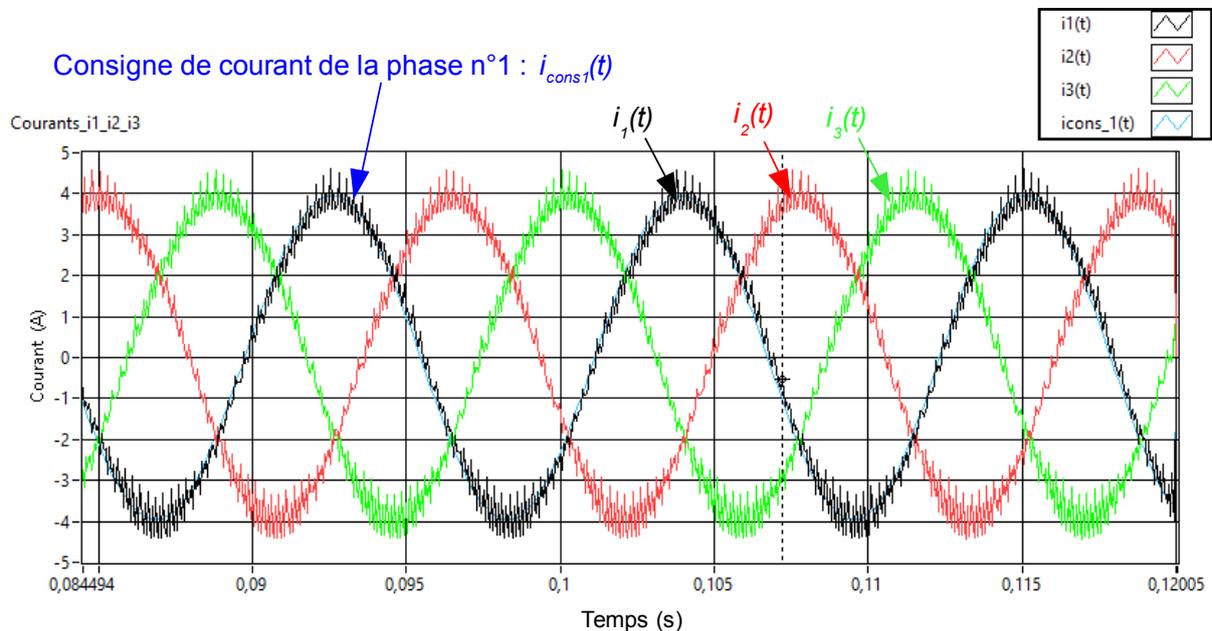


Figure n°23 : courants dans les phases du moteur en régime de vitesse établi

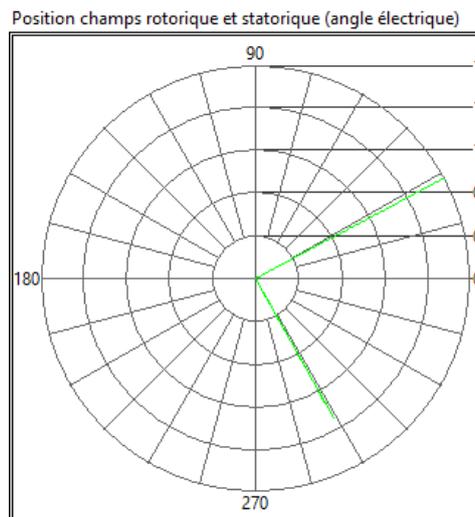
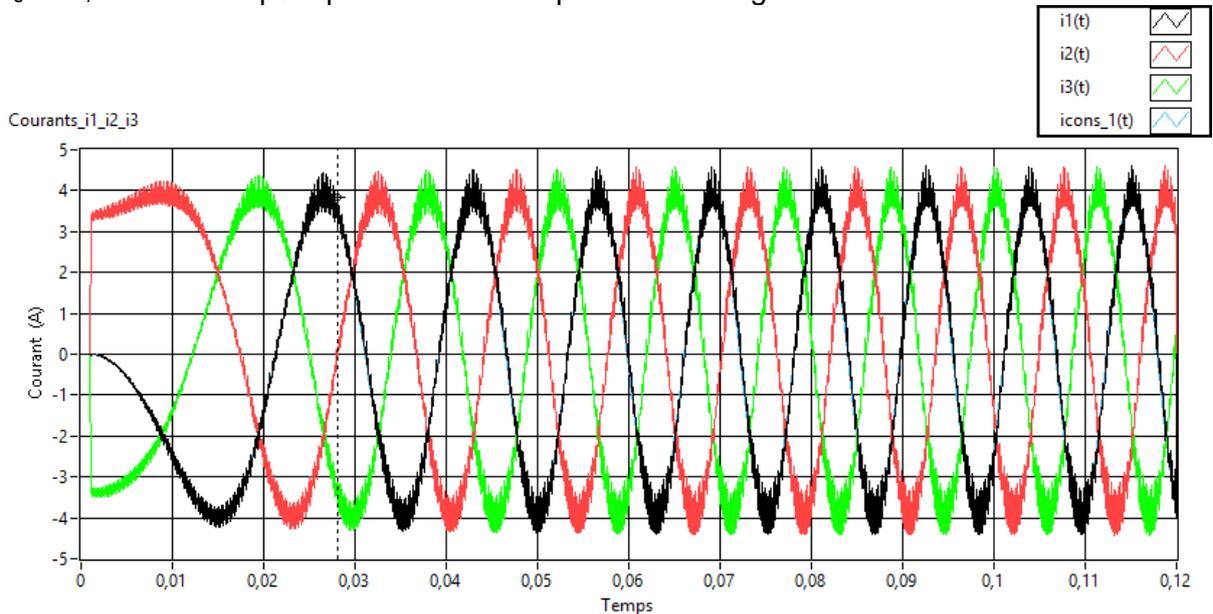
**Question 36 :** analyser les graphes de la figure n°23, déterminer la vitesse  $\Omega_m$  et commenter l'évolution des courants lignes  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  et  $i_3(t)$ . Comparer avec les résultats de la question 19 et conclure sur les performances de la boucle de contrôle des courants du moteur synchrone.

#### F. Modification et exploitation d'un script pour calculer la position du flux statorique et valider la quadrature des flux

Des feuilles de calculs Python3 ou Scilab sont utilisées afin de calculer la position angulaire du flux  $\phi_s$  à partir des relevés des courants dans les phases du moteur. Il s'agit de valider que la boucle de courant assure la quadrature entre le flux rotorique et le flux de réaction magnétique d'induit.

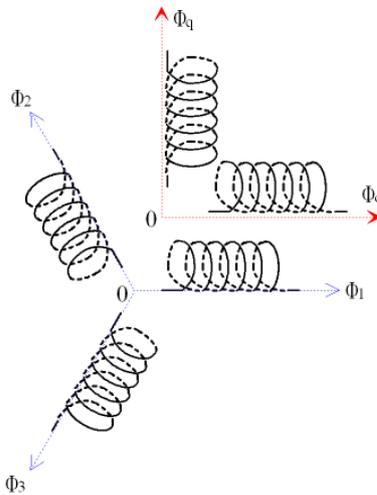
L'ensemble des résultats de simulation du modèle Scilab/Xcos est disponible dans un seul fichier texte (format CSV). L'affichage de certains résultats nécessite un traitement préalable

sur les données du fichier, en particulier la détermination de la position angulaire du flux  $\Phi_s$  de réaction magnétique d'induit afin de vérifier la quadrature avec la position du flux rotorique  $\Phi_r$ . La figure n°25 illustre l'affichage dans un diagramme polaire des positions angulaires de  $\Phi_s$  et  $\Phi_r$  à l'instant repéré par le curseur en pointillé de la figure n°24.



Le flux de réaction magnétique d'induit  $\Phi_s$  est maximal dans un bobinage statorique lorsque le courant dans ce bobinage est maximal, ou encore que l'axe du champ de réaction magnétique d'induit  $\Phi_s$  est en coïncidence avec l'axe du bobinage lorsque le courant est maximal dans ce bobinage (champ tournant). Pour déterminer la position de cet axe et la valeur du champ de réaction magnétique d'induit  $\Phi_s$ , il suffit d'exploiter les courants d'induit  $i_1(t)$  à  $i_3(t)$  et calculer la valeur du flux suivant deux axes orthogonaux de la machine, ce qui revient à trouver deux bobinages en quadrature spatiale équivalents à trois bobinages décalés de  $2 \cdot \pi/3$  (figure n°26). La relation matricielle ci-dessous permet la détermination des composantes  $\Phi_d$  et  $\Phi_q$ .

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{bmatrix}$$



Deux bobinages en quadrature spatiale équivalents à trois bobinages décalés de  $2\pi/3$

Figure n°26 : bobinages en quadrature équivalents

Suivant le langage à script choisi pour répondre aux questions suivantes, Python3 ou Scilab, consulter le document technique DT7 ou DT8 pour prendre connaissance de quelques méthodes des bibliothèques mathématiques de ces langages. Le document réponse DR2 ou le document réponse DR3 est à exploiter ; ces documents présentent le script à modifier. Les commentaires du script sont à analyser pour identifier les actions des lignes d'instructions ainsi que les différents tableaux exploités dans celui-ci.

**Question 37 :** compléter le script du document réponse DR2 ou DR3 dans la zone située après le bloc de commentaires débutant par "**# Partie à modifier :**" pour le script Python ou par "**// Partie à modifier :**" pour le script Scilab ; la boucle à compléter doit calculer toutes les valeurs du tableau *tetaPhis* décrivant l'évolution de la position angulaire du flux  $\Phi_s$  en degré.

La figure n°27 représente l'évolution de la position du rotor en radian, lors d'une phase de démarrage du moteur, courbe résultant d'une simulation du modèle Scilab/Xcos de l'étude. Les courbes de la figure n°28 représentent l'évolution des positions angulaires de  $\Phi_s$  (courbe bleue) et  $\Phi_r$  (courbe verte), résultat de l'exécution du script étudié dans cette partie du sujet. Les positions angulaires de la figure n°28 sont tracées modulo  $360^\circ$ , dans l'intervalle  $[-180^\circ, +180^\circ]$ .

Pour valider la quadrature des flux rotorique et statorique, il faut que les deux positions angulaires aient le même intervalle de variation. Le tableau *tetaRotor* du script est initialisé avec les valeurs décrivant la courbe de la figure n°27.

**Question 38 :** sur le document réponse DR2 ou DR3, proposer une ou des lignes d'instructions à inclure dans la boucle de la question précédente pour que le tableau *tetaRotor* ait le même intervalle de variation que le tableau *tetaPhis* en degré. Exploiter et

commenter les courbes de la figure n°28 pour valider ou non la quadrature des deux champs  $\Phi_s$  et  $\Phi_r$ . Apporter une conclusion sur la commande d'autopilotage abordée dans cette étude.

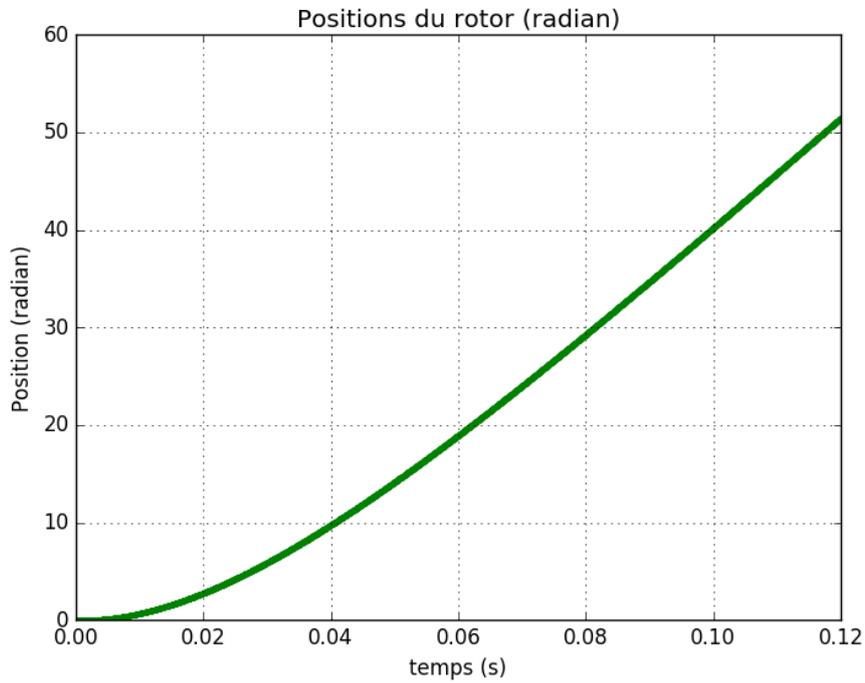


Figure n°27 : résultat de simulation Scilab/Xcos de l'évolution de la position du rotor

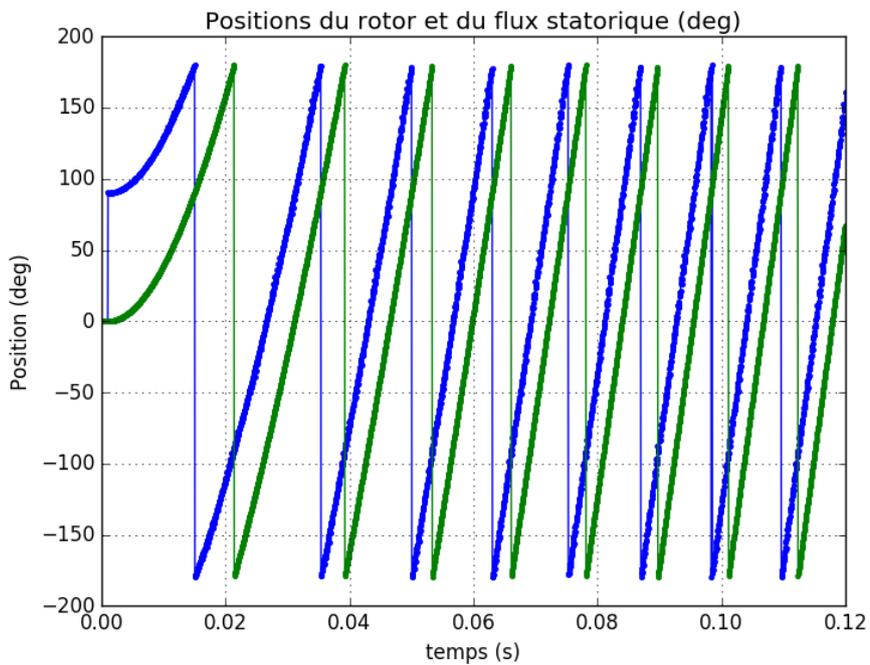


Figure n°28 : résultat du script de l'évolution de la position du rotor et du flux statorique

## G. Étude de la gestion de la position des articulations

L'épaule a une amplitude de  $125^\circ$  en articulation et de  $500^\circ$  en rotation. Ces positions sont calculées à partir des valeurs de deux compteurs  $Cép_1$  et  $Cép_2$ . Ces compteurs comptent respectivement les impulsions issues des encodeurs reliés aux synchro-résolveurs des moteurs M1 et M2 de l'épaule (entrées ENC1A/B et ENC2A/B du contrôleur).

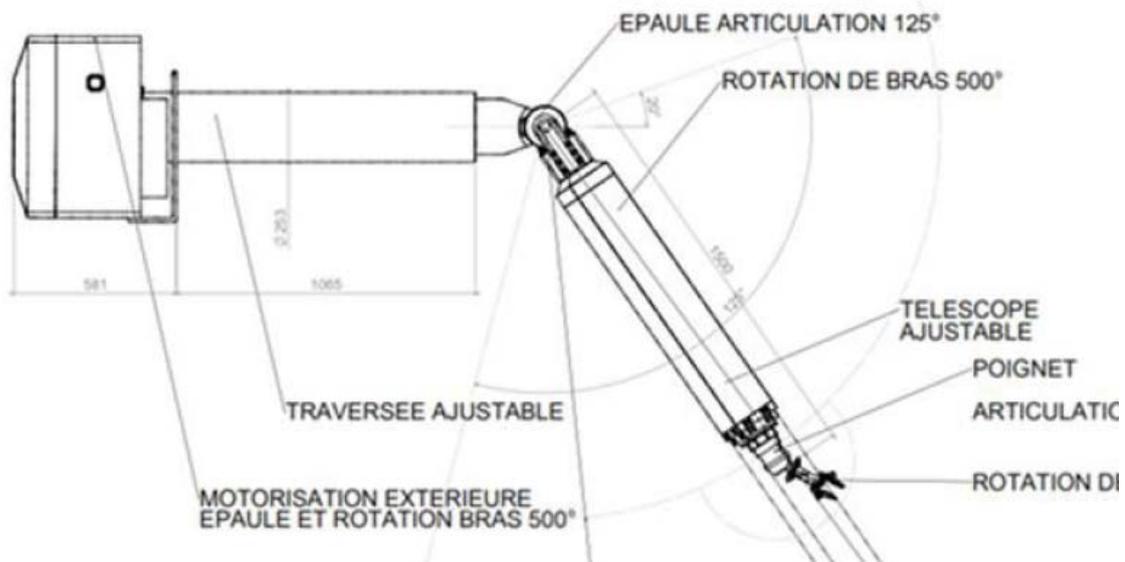


Figure n°29 : détail des mouvements de l'articulation d'épaule

Convention des sens de rotation :

- lorsque les moteurs tournent dans le sens positif, le compteur correspondant s'incrémente (compteur  $Cép_1$  pour moteur épaule 1,  $Cép_2$  pour moteur épaule 2) ;
- lorsque les deux moteurs tournent dans le sens positif, la variable représentant l'angle de rotation selon l'axe x «  $Cép_x$  » s'incrémente ;
- lorsque M1 tourne dans le sens positif et M2 dans le sens négatif, la variable représentant l'angle de rotation selon l'axe y «  $Cép_y$  » s'incrémente.

Lors des coupures d'alimentation, accidentelles ou non, il est nécessaire de mémoriser les positions de toutes les articulations afin d'éviter tout mouvement indésirable à la remise sous tension.

Lorsque la tension d'alimentation des moteurs descend en dessous du seuil défini  $V_{min}$ , les moteurs sont stoppés et leur position est mémorisée.

Deux alimentations de secours alimentent les contrôleurs durant le laps de temps nécessaire à cette opération.

Les contrôleurs moteurs sont programmables en MicroBasic. Un extrait de la liste d'instruction comprenant celles nécessaires à cette application est fourni dans le document technique DT9.

**Question 39** : proposer un script MicroBasic permettant de paramétrer les entrées ENCxA/B du contrôleur des moteurs d'épaule dans le bon mode.

**Question 40 :** *proposer une solution pour quantifier, à partir des valeurs des compteurs Cép<sub>1</sub> et Cép<sub>2</sub>, les positions angulaires de l'articulation selon l'axe x (Cép\_x) et de la rotation de l'épaule selon l'axe y (Cép\_y).*

**Question 41 :** *proposer un algorithme permettant de gérer la sauvegarde des positions des articulations lors d'une coupure d'alimentation.*

**Question 42 :** *rédigier le script MicroBasic correspondant en justifiant la solution retenue.*

Remarque : on considère que le contrôleur gère la sauvegarde des variables en 32 bits.

Si une seule des deux alimentations est défaillante, les mouvements du bras pilotés par l'autre contrôleur doivent être inhibés. Pour cela, chaque contrôleur concerné par une coupure d'alimentation émet un ordre d'arrêt d'urgence à destination de l'autre contrôleur en utilisant la liaison bus CAN intégrée au contrôleur.

La phase de sauvegarde est validée lorsque le contrôleur qui a émis l'ordre d'arrêt d'urgence reçoit une trame d'acquiescement émise par l'autre contrôleur.

L'exploitation de ce bus par les contrôleurs moteurs est détaillée dans le document technique DT9.

**Question 43 :** *compléter sur le document réponse DR4 la trame émise par le contrôleur d'épaule (contrôleur n°1) lorsqu'il détecte une anomalie sur son alimentation.*

**Question 44 :** *compléter sur le document réponse DR4 la trame émise par le contrôleur de poignet (contrôleur n°2) une fois qu'il est passé avec succès en mode arrêt d'urgence.*

**Question 45 :** *conclure sur la conformité de ces solutions vis-à-vis du cahier des charges et comparer la solution retenue avec une autre solution intégrant par exemple des batteries.*

## Document technique DT1 : données relatives aux articulations

### Réducteurs de poignet



Constructeur « MAXON »

Gearhead Data		
Reduction		91 : 1
Absolute reduction		91/1
Max. motor shaft diameter		10 mm
Number of stages		3
Max. continuous torque		15 Nm
Max. intermittent torque		22 Nm
Direction of rotation, drive to output		=
Max. efficiency		72 %
Average backlash no load		1 °
Mass inertia		15 gcm <sup>2</sup>
Gearhead length (L1)		70 mm
Max. transmittable power (continuous)		140 W
Max. transmittable power (intermittent)		200 W

### Moteurs de poignet (MAXON Ref EC40 Brushless 170 W)



brushless « INTECNO »

Values at nominal voltage		
Nominal voltage		48 V
No load speed		9840 rpm
No load current		193 mA
Nominal speed		9150 rpm
Nominal torque (max. continuous torque)		165 mNm
Nominal current (max. continuous current)		3.69 A
Stall torque		2760 mNm
Stall current		59.6 A
Max. efficiency		89 %

Extrait de la note de calcul d'alimentation de contrôleur

Note : dans les applications multi-axes, la puissance de l'alimentation peut être réduite de 30%. Si la puissance maximale calculée est supérieure à 6 kVA, contacter le fabricant.

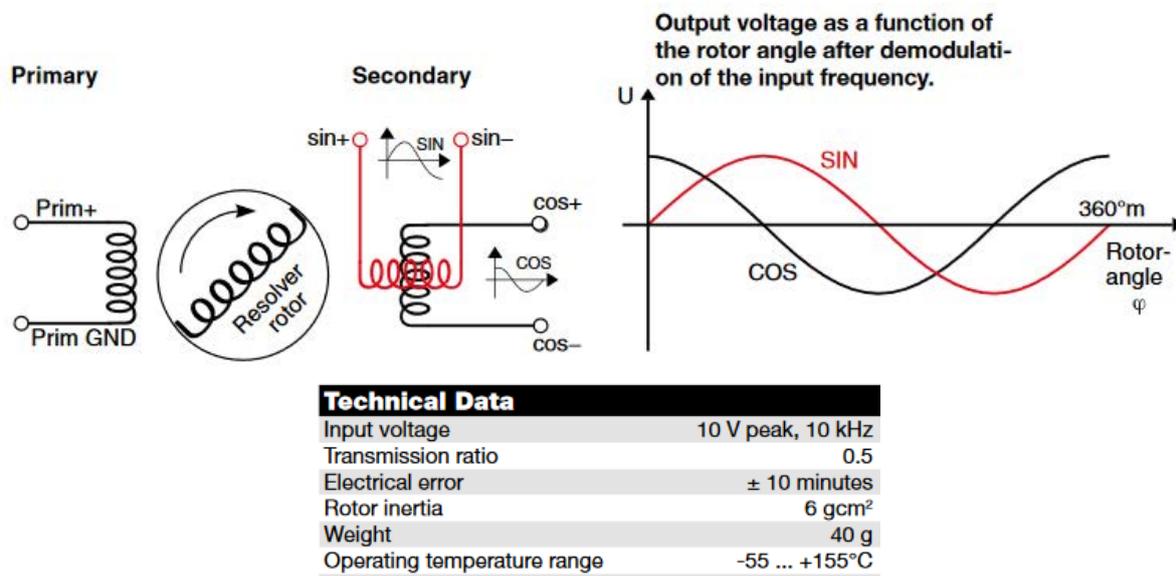
### Moteurs d'épaule fournisseur « Green Line » référence BL210.480

Model	Poles	Phases	Rated voltage	Rated speed	Rated torque	Rated power	Peak torque	Rated current
			[V]	[min <sup>-1</sup> ]	[Nm]	[W]	[Nm]	[A]
BL210.480	8	3	48	3000	2.1	660	6.3	18.7

Model	Peak current	Line to line resistance	Line to line inductance	Torque constant	Back EMF	Rotor inertia	Weight
	[A]	Ω	[mH]	[Nm/A]	V/k RPM	[gcm <sup>2</sup> ]	[kg]
BL210.480	56	0.115	0.31	0.112	9.5	2.4	4.2

## Document technique DT2 : données relatives à la mesure de la position des articulations

- **Résolveur Maxon**



- **Encodeur AU6805**

L'encodeur AU6805 est un circuit de conversion R/D (Resolver to Digital). Utilisé avec un résolveur brushless (BRX) tel que Singlsyn, Smartsyn, etc. Il convertit le signal électrique correspondant à l'angle de rotation mécanique du résolveur en un signal numérique.

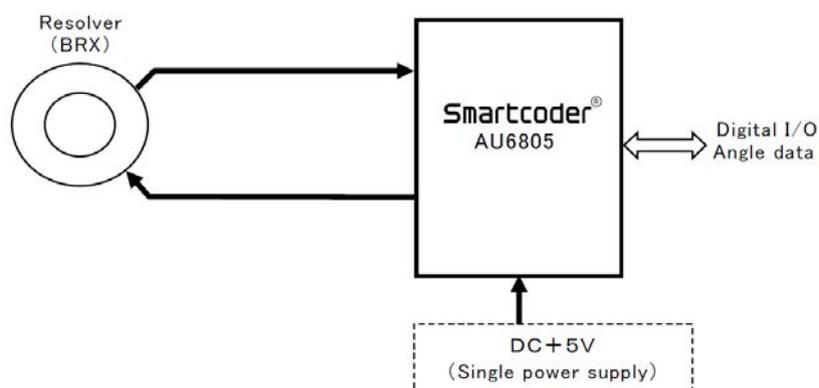
Ce circuit utilise une méthode de conversion R/D "Digital Tracking Method" et permet d'assurer de nombreux types de détection d'angles de rotation à bas coût et avec une grande fiabilité.

- Conception "tout en un"

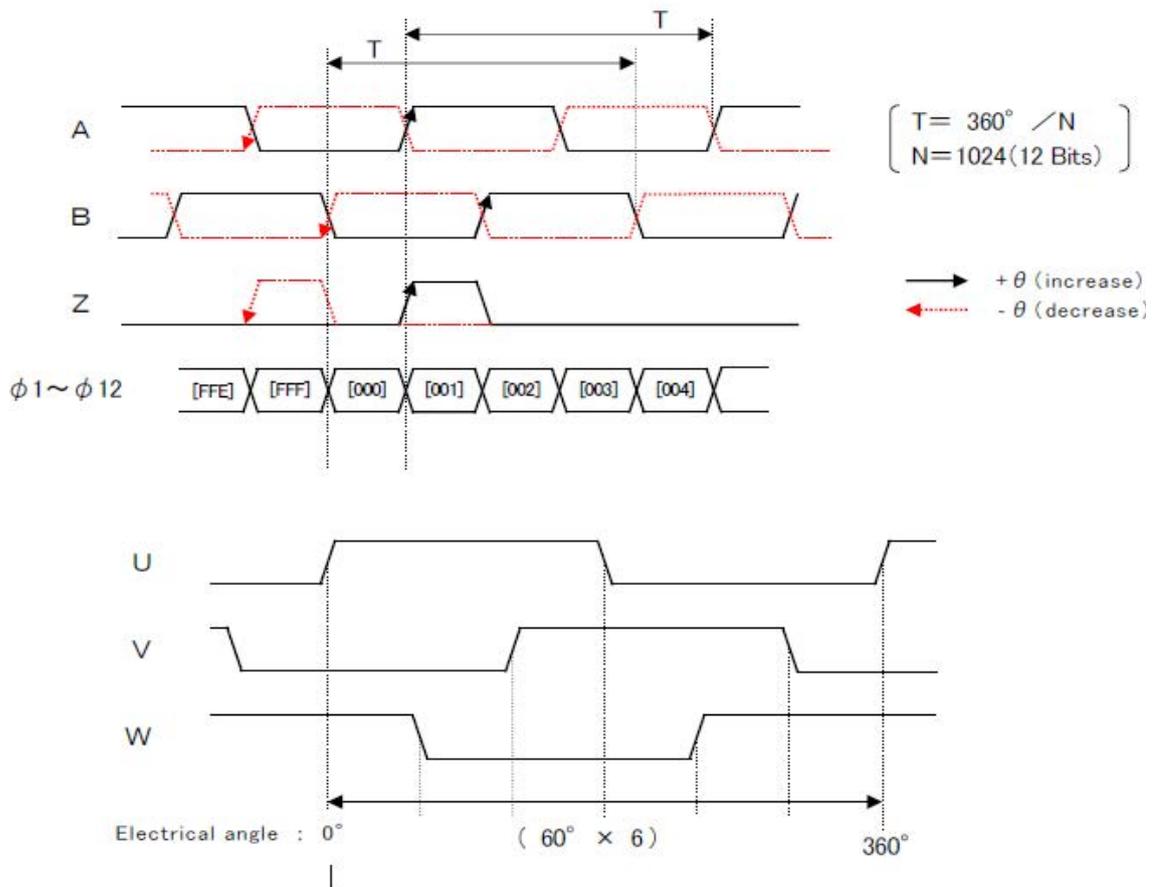
Élimine les phases d'ajustement du signal d'excitation (déphasage maximal admissible :  $\pm 45^\circ$  avec une période du signal d'excitation correspondant à  $360^\circ$ ).

- Large choix de signaux de sortie

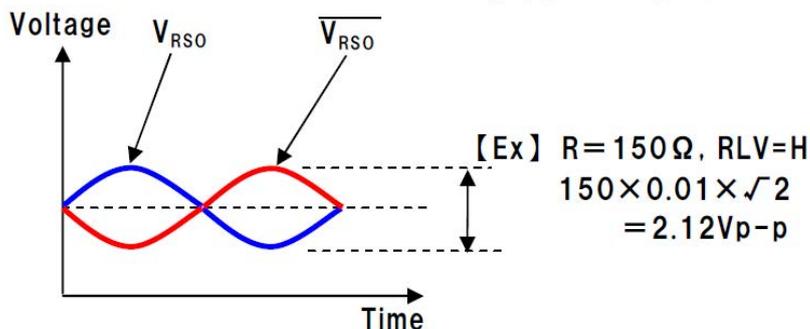
Binary-code Parallel 12bit Bus compatible, Positive logic + **A,B,Z** + Serial I/F



## Chronogrammes typiques des signaux de sortie d'un encodeur (type A,B,Z)



## Tension d'excitation issue du circuit AU6805 (avec $R=150\Omega$ )



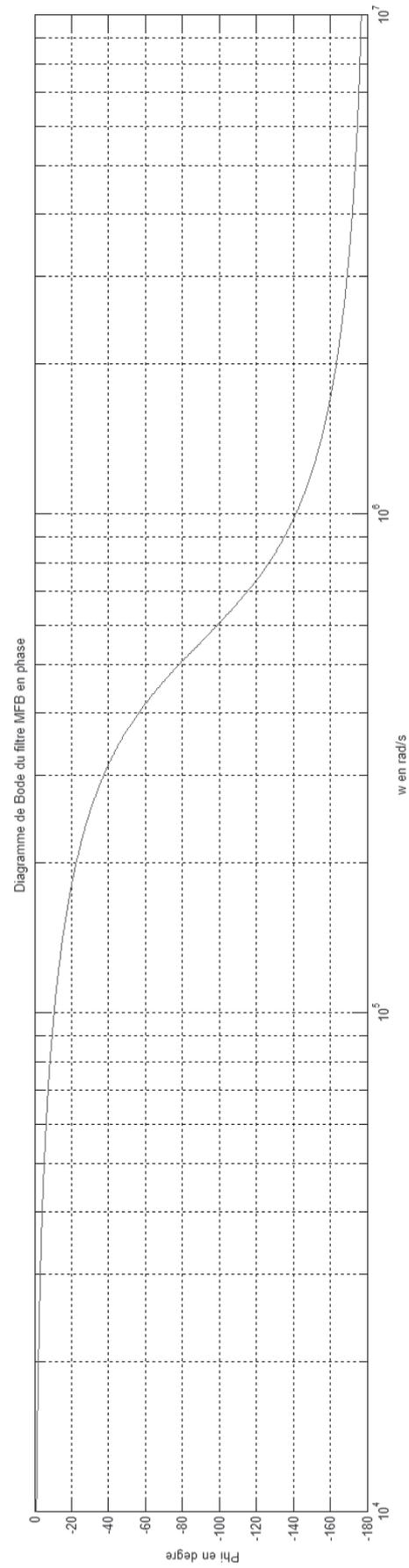
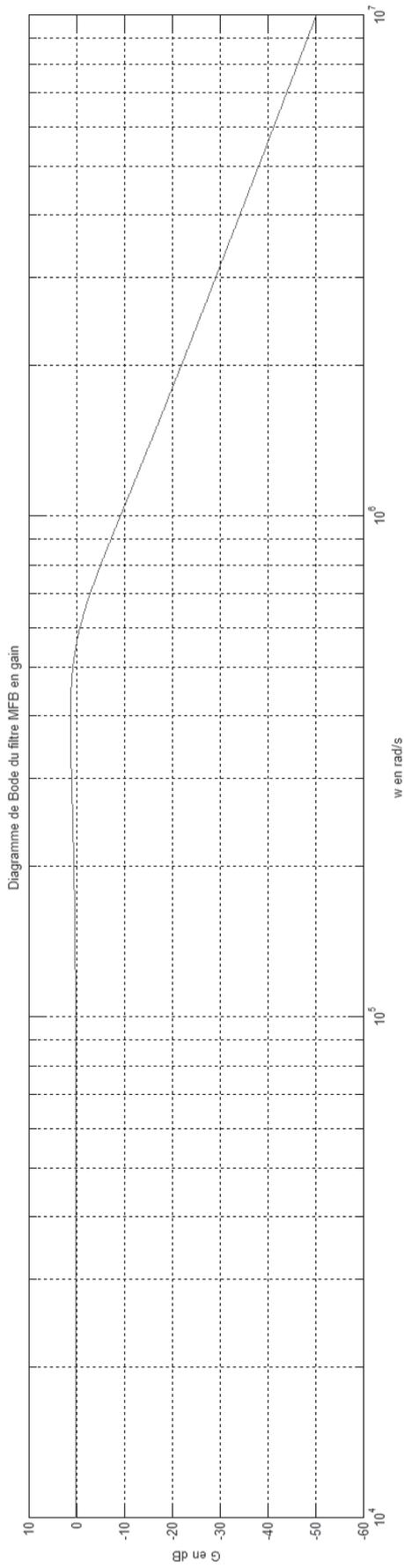
Le signal d'excitation est appliqué au bobinage du rotor du résolveur, lequel est une inductance imparfaite et présente une résistance typique de  $50 \Omega$  à  $200 \Omega$  et une partie réactive comprise entre  $0 \Omega$  et  $200 \Omega$ . Par exemple, l'impédance du résolveur Tamagawa TS2620N21E11 est  $70 \Omega + j \cdot 100 \Omega$  à  $10 \text{ kHz}$ .

Une alimentation séparée (VEXT) est nécessaire pour l'amplificateur d'excitation, en plus de l'alimentation  $+5 \text{ V}$  du AU680.

Une valeur d'alimentation d'excitation plus élevée entraîne une tension de sortie du résolveur plus élevée et cela permet d'améliorer le S/N rapport signal/bruit ou l'immunité au bruit.

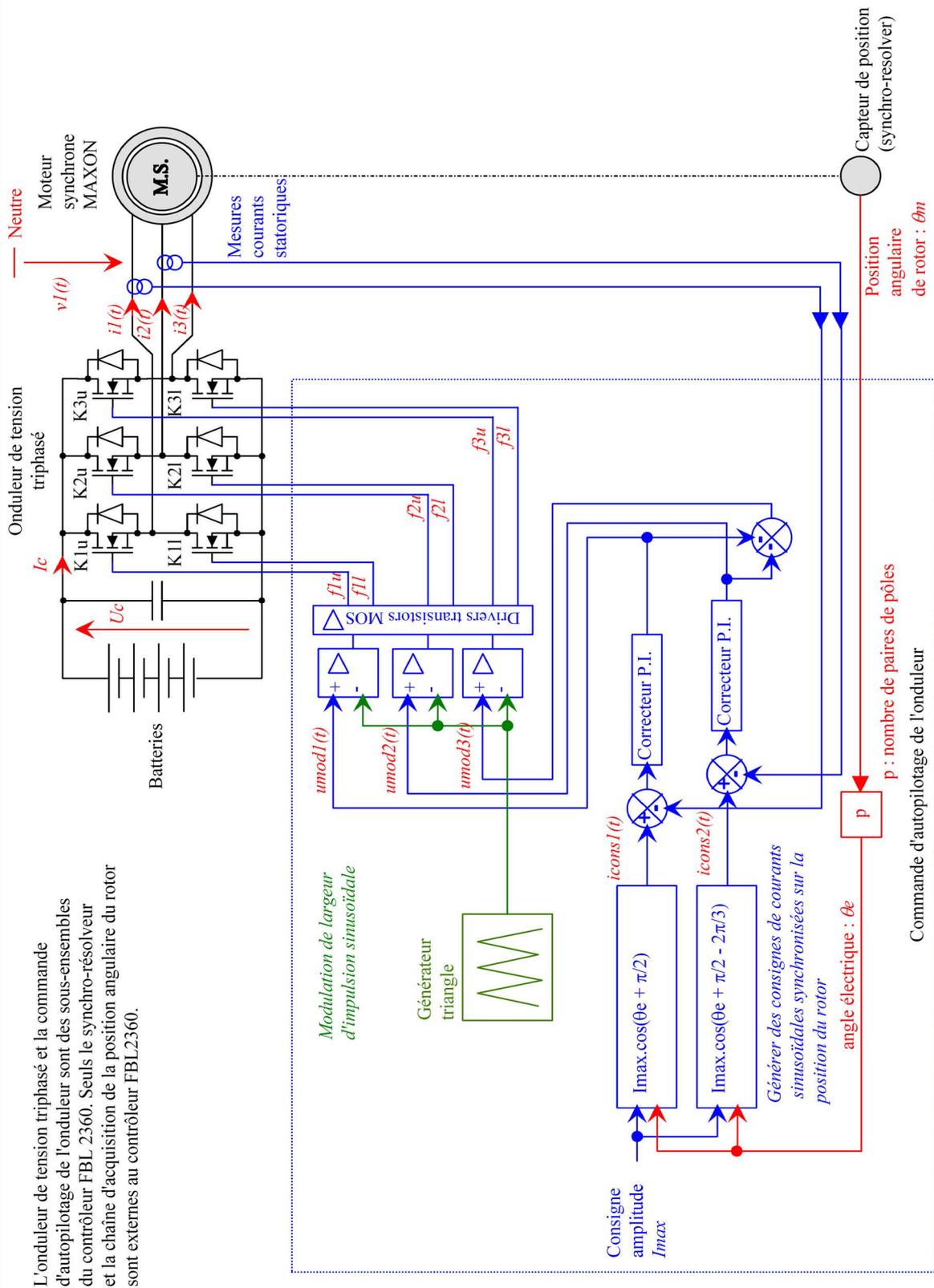
Cela signifie qu'il faut une alimentation DC adaptée. Par exemple, un signal d'excitation de  $7 \text{ Vrms}$  ( $= 20 \text{ Vp-p} : 7 \text{ V} \times \sqrt{2} \times 2$ ) nécessite  $+24 \text{ V}$  pour une source simple ou  $\pm 15 \text{ V}$  pour une alimentation symétrique.

## Document technique DT3 : diagrammes de Bode du filtre MFB



## Document technique DT4 : schéma simplifié de la boucle de contrôle courant

Figure n°30 : décomposition de la boucle de contrôle des courants d'induit du moteur synchrone autopiloté MAXON



## Présentation de la boucle de contrôle des courants au stator

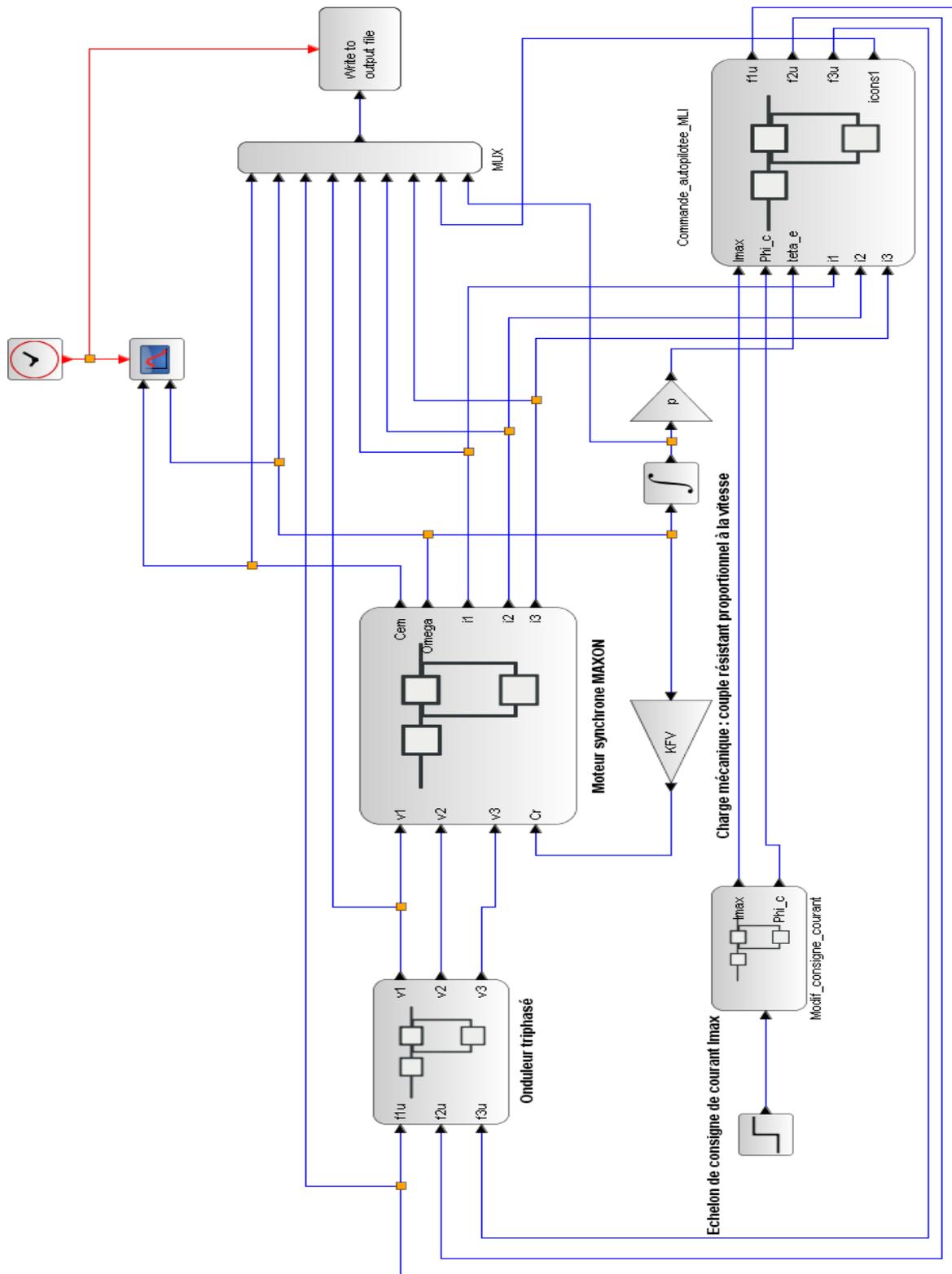
La stratégie de commande de la boucle présentée sur la figure n°30 est de contrôler les trois courants  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  et  $i_3(t)$  en amplitude mais aussi de garantir que le flux statorique créé par ces trois courants soit en quadrature avec le flux rotorique créé ici par des aimants permanents. Cette quadrature des flux assure un couple moteur optimum pour une valeur de courant statorique donné.

La boucle de contrôle de couple étudiée est constituée du moteur synchrone MAXON alimenté par un onduleur de tension triphasé. Une électronique de commande contrôle le courant dans les enroulements statoriques. La figure n°30 illustre la configuration de ce sous-système. Les grandeurs étudiées sont repérées sur la figure n°30.

- $U_c$  : tension d'alimentation continue de l'onduleur triphasé.
- $v_1(t)$  : tension simple au stator du moteur synchrone.
- $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  et  $i_3(t)$  : courants lignes d'alimentation du moteur synchrone.
- $\Omega_m$  : vitesse angulaire du rotor.
- $\theta_m$  : position angulaire du rotor, grandeur obtenue par traitement des signaux issus d'un synchro-résolveur solidaire de l'axe du rotor.
- $\theta_e$  : angle des grandeurs électriques,  $\theta_e = p \cdot \theta_m$ ,  $p$  nombre de paire(s) de pôles.
- $i_{cons1}(t)$ , respectivement  $i_{cons2}(t)$  : consigne du courant de la phase 1, respectivement de la phase 2 du moteur ; consignes calculées par l'électronique de commande à partir de la consigne  $I_{max}$  d'amplitude du courant et de l'angle électrique  $\theta_e$  issu de la chaîne de mesure de la position angulaire du rotor  $\theta_m$ .
- $u_{mod1}(t)$ ,  $u_{mod2}(t)$ ,  $u_{mod3}(t)$  : signaux modulateurs de la commande M.L.I. sinusoïdale ; signaux de commande calculés à partir de la différence consigne de courant moins mesure du courant (exemple :  $i_{cons1}(t) - i_1(t)$  pour  $u_{mod1}(t)$ ), et de la correction proportionnelle et intégrale. Les courants sont équilibrés donc :  
 $u_{mod3}(t) = -u_{mod1}(t) - u_{mod2}(t)$ .
- $f_{1u}$ ,  $f_{1l}$ ,  $f_{2u}$ ,  $f_{2l}$ ,  $f_{3u}$ ,  $f_{3l}$  : signaux de sortie de la commande M.L.I. sinusoïdale ; signaux de commande des six interrupteurs de l'onduleur triphasé représentés de façon symbolique sous forme logique.

**Document technique DT5 : modèle Scilab/Xcos de la boucle de contrôle courant**

Figure n°31 : modèle de simulation graphique Scilab/Xcos de la boucle de contrôle des courants du moteur synchrone autopiloté MAXON



La figure n°31 représente le modèle de simulation Scilab/Xcos de la boucle de contrôle des courants du moteur synchrone MAXON. Ce modèle est constitué de trois blocs principaux :

- le moteur synchrone MAXON ;
- l'onduleur triphasé ;
- le bloc de commande en autopilotage.

### Description des entrées/sorties des différents blocs

Moteur synchrone MAXON :

- $V_1, V_2, V_3$ , tensions simples triphasées d'alimentation des enroulements statoriques ;
- $C_r$ , couple résistant exercé sur l'arbre moteur ;
- $C_{em}$ , couple électromagnétique développé par le moteur ;
- $\Omega_m$  ( $\Omega_m$ ), vitesse angulaire de l'arbre moteur ;
- $i_1, i_2, i_3$ , courants statoriques.

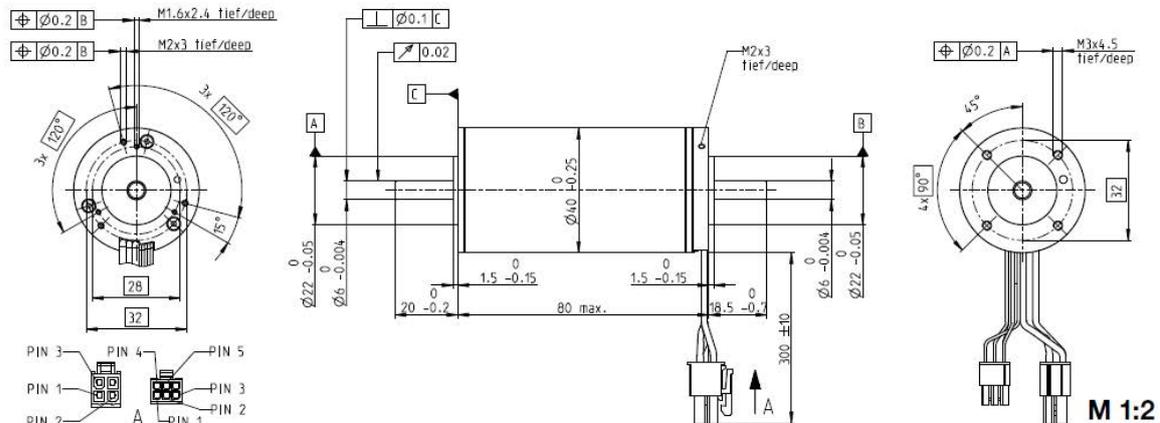
Onduleur triphasé :

- $f_{1u}, f_{1l}, f_{2u}$ , signaux de commande de l'onduleur triphasé ;
- $V_1, V_2, V_3$ , tensions simples triphasées d'alimentation des enroulements statoriques.

Commande d'autopilotage du moteur synchrone :

- $I_{max}$ , consigne d'amplitude des courants statoriques ;
- $\Phi_c$ , phase à l'origine des courants lignes, ici nulle ;
- $\theta_e$  ( $\theta_e$ ), angle électrique issu de la mesure de la position angulaire de rotor  $\theta_m$  ;
- $i_1, i_2, i_3$ , mesures des courants statoriques ;
- $f_{1u}, f_{1l}, f_{2u}$ , signaux de commande de l'onduleur triphasé ;
- $i_{cons1}$ , consigne de la boucle de contrôle du courant ligne  $i_1(t)$ .

**EC 40** Ø40 mm, brushless, 170 Watt



- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

**Part Numbers**

369146	393023	393024	393025
--------	--------	--------	--------

**Motor Data** (provisional)

Values at nominal voltage			15	24	42	48
1	Nominal voltage	V	15	24	42	48
2	No load speed	rpm	9840	9840	10100	9840
3	No load current	mA	617	386	230	193
4	Nominal speed	rpm	9090	9120	9380	9150
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	171	165	161	165
6	Nominal current (max. continuous current)	A	12.2	7.39	4.24	3.69
7	Stall torque	mNm	2620	2660	2740	2760
8	Stall current	A	181	115	69.1	59.6
9	Max. efficiency	%	89	89	89	89
<b>Characteristics</b>						
10	Terminal resistance phase to phase	Ω	0.0829	0.209	0.608	0.806
11	Terminal inductance phase to phase	mH	0.0329	0.0843	0.246	0.337
12	Torque constant	mNm/A	14.5	23.2	39.6	46.4
13	Speed constant	rpm/V	659	412	241	206
14	Speed/torque gradient	rpm/mNm	3.77	3.71	3.7	3.57
15	Mechanical time constant	ms	2.12	2.09	2.08	2.01
16	Rotor inertia	gcm <sup>2</sup>	53.8	53.8	53.8	53.8

**Specifications**

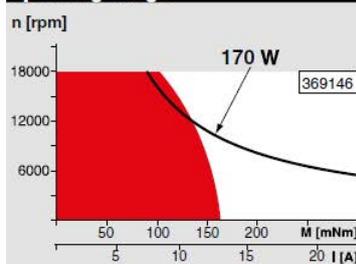
<b>Thermal data</b>		
17	Thermal resistance housing-ambient	5.21 K/W
18	Thermal resistance winding-housing	1.05 K/W
19	Thermal time constant winding	18.7 s
20	Thermal time constant motor	1910 s
21	Ambient temperature	-40...+100°C
22	Max. winding temperature	+155°C
<b>Mechanical data (preloaded ball bearings)</b>		
23	Max. speed	18000 rpm
24	Axial play at axial load < 9 N	0 mm
	> 9 N	max. 0.14 mm preloaded
25	Radial play	23 N
26	Max. axial load (dynamic)	106 N
27	Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	5500 N
28	Max. radial load, 5 mm from flange	75 N
<b>Other specifications</b>		
29	Number of pole pairs	1
30	Number of phases	3
31	Weight of motor	580 g

Values listed in the table are nominal.

<b>Connection motor</b> (Cable AWG 16)			
red	Motor winding 1	Pin 1	
black	Motor winding 2	Pin 2	
white	Motor winding 3	Pin 3	
	N.C.	Pin 4	
<b>Connector</b>			
Molex	Part number		
	39-01-2040		
<b>Connection sensors</b> (Cable AWG 26)			
yellow	Hall sensor 1	Pin 1	
brown	Hall sensor 2	Pin 2	
grey	Hall sensor 3	Pin 3	
blue	GND	Pin 4	
green	V <sub>Hall</sub> 3...24 VDC	Pin 5	
	N.C.	Pin 6	
<b>Connector</b>			
Molex	Part number		
	430-25-0600		

Wiring diagram for Hall sensors see p. 41

**Operating Range**

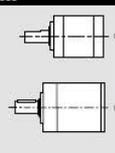


**Comments**

- Continuous operation**  
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.  
= Thermal limit.
- Short term operation**  
The motor may be briefly overloaded (recurring).
- Assigned power rating**

**maxon Modular System**

1	<b>Planetary Gearhead</b>
3	Ø42 mm
	3 - 15 Nm
	Page 345
580 g	<b>Planetary Gearhead</b>
	Ø52 mm
	4 - 30 Nm
	Page 350



<b>Recommended Electronics:</b>	
Notes	Page 32
ESCON Mod. 50/5	427
ESCON Mod. 50/4 EC-S	427
ESCON 50/5	428
ESCON 70/10	428
DEC Module 50/5	430
EPOS2 24/5, 50/5, 70/10	435
EPOS2 P 24/5	438
EPOS4 Module/CB 50/5	442
EPOS4 Module 50/8	443
EPOS4 Comp. 50/8 CAN	443
EPOS4 Module 50/15	444
EPOS4 Comp. 50/15 CAN	444
MAXPOS 50/5	447

**Overview on page 28-36**

<b>Encoder HED_5540</b>
500 CPT,
3 channels
Page 414/416
<b>Resolver Res 26</b>
Ø26 mm
10 V
Page 422
<b>Brake AB 32</b>
24 VDC
0.4 Nm
Page 460

## Document technique DT7 : note d'informations sur le langage à script Python3

La documentation ci-dessous est issue de l'aide Python sur les méthodes trigonométriques `math.atan(x)` et `math.atan2(y,x)`.

`math.atan(x)`

Return the arc tangent of  $x$ , in radians.

`math.atan2(y, x)`

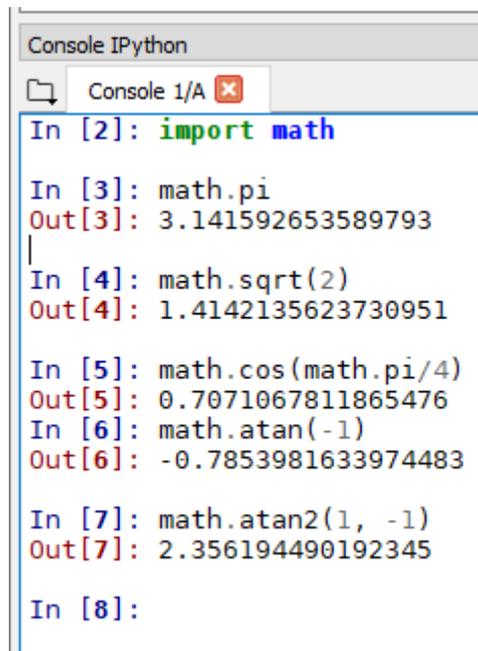
Return `atan(y / x)`, in radians. The result is between  $-\pi$  and  $\pi$ . The vector in the plane from the origin to point  $(x, y)$  makes this angle with the positive X axis. The point of `atan2()` is that the signs of both inputs are known to it, so it can compute the correct quadrant for the angle. For example, `atan(1)` and `atan2(1, 1)` are both  $\pi/4$ , but `atan2(-1, -1)` is  $-3\pi/4$ .

La copie d'écran d'une console IPython de la figure n°32 permet d'identifier l'écriture de certaines constantes mathématiques et de certaines fonctions trigonométriques.

### Remarque

In [x] : est l'invite de commande d'une console IPython en attente de l'entrée d'une expression Python.

Out[x] : affiche le résultat après l'interprétation et l'exécution de cette expression par le noyau Python.



```
Console IPython
Console 1/A
In [2]: import math
In [3]: math.pi
Out[3]: 3.141592653589793
In [4]: math.sqrt(2)
Out[4]: 1.4142135623730951
In [5]: math.cos(math.pi/4)
Out[5]: 0.7071067811865476
In [6]: math.atan(-1)
Out[6]: -0.7853981633974483
In [7]: math.atan2(1, -1)
Out[7]: 2.356194490192345
In [8]:
```

Figure n°32 : extraits d'une console Python

## Document technique DT8 : note d'informations sur le langage à script Scilab

La documentation ci-dessous est issue de l'aide Scilab sur la fonction trigonométrique `atan(x)` et `atan(y,x)`.

### **atan**

2-quadrant and 4-quadrant inverse tangent

### **Syntax**

```
phi = atan(x)
phi = atan(y, x)
```

### **Arguments**

*x* : a real  
*phi* : a real

*x, y* : a real scalars  
*phi* : a real scalar

### **Description**

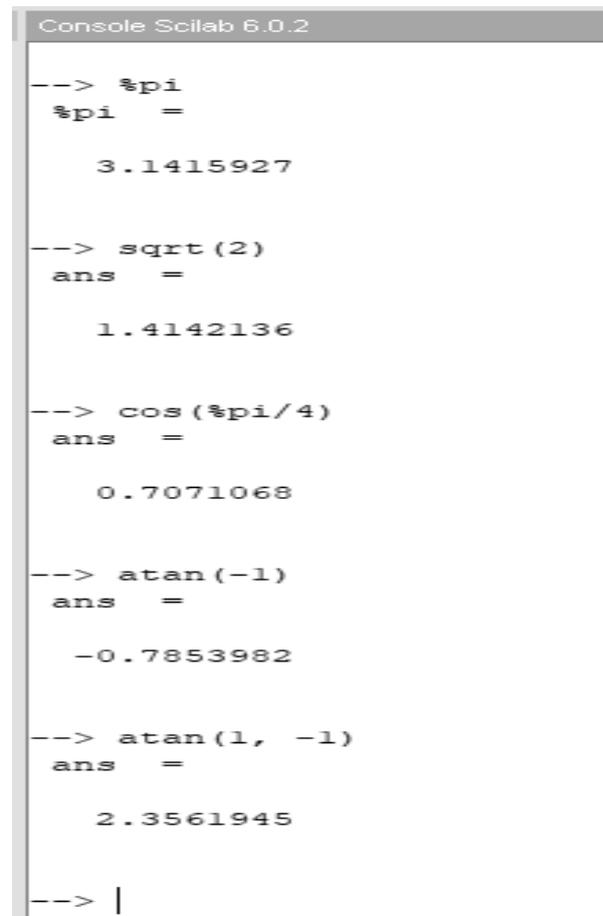
The first form computes the 2-quadrant inverse tangent, which is the inverse of  $\tan(\text{phi})$ . For real  $x$ ,  $\text{phi}$  is in the interval  $(-\pi/2, \pi/2)$ . The second form computes the 4-quadrant arctangent (`atan2` in Fortran), this is, it returns the argument (angle) of the complex number  $x+i*y$ . The range of `atan(y, x)` is  $(-\pi, \pi]$ . For real arguments, both forms yield identical values if  $x > 0$ .

La copie d'écran d'une console Scilab de la figure n°33 permet d'identifier l'écriture de certaines constantes mathématiques et de certaines fonctions trigonométriques.

### **Remarques**

--> est l'invite de commande d'une console Scilab en attente de l'entrée d'une expression Scilab.

ans = affiche le résultat après l'interprétation et l'exécution de cette expression par le noyau Scilab.



```
Console Scilab 6.0.2
--> %pi
%pi =
    3.1415927

--> sqrt(2)
ans =
    1.4142136

--> cos(%pi/4)
ans =
    0.7071068

--> atan(-1)
ans =
   -0.7853982

--> atan(1, -1)
ans =
    2.3561945

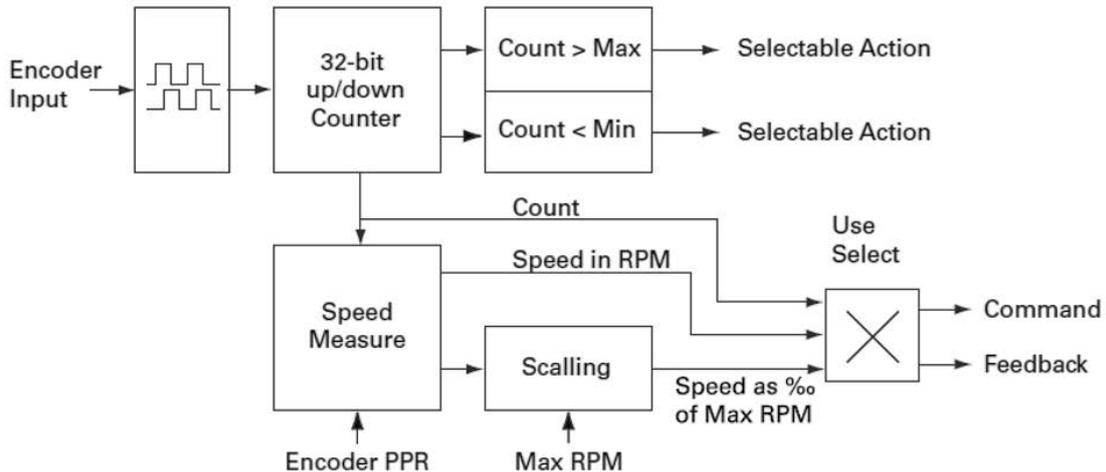
--> |
```

Figure n°33 : extraits console Scilab

## Document technique DT9 : données relatives aux contrôleurs moteurs

### Configuration et utilisation des encodeurs

Sur les contrôleurs moteurs équipés d'entrées d'encodage, les encodeurs externes permettent une gamme de configurations pour le contrôle de mouvement de précision. Le diagramme ci-dessous présente la chaîne de traitement pour chaque entrée d'encodage.



Les deux signaux en quadrature de l'encodeur sont traités afin de générer un comptage / décomptage dépendant du sens de rotation du moteur. Le comptage est réalisé par un compteur 32 bits. Ce compteur peut être directement lu en utilisant les commandes série, ou utilisé comme retour de position dans la boucle du mode position.

### Extrait de la liste d'instructions

**BLFB** – Encodeur ou capteur à effet Hall pour boucle de régulation

Hexcode : **3B**

#### Description

Ce paramètre est utilisé pour définir quel capteur de retour est utilisé pour mesurer la vitesse/position. Sur les moteurs brushless équipés d'encodeurs optiques, ce paramètre permet de choisir l'encodeur ou les capteurs brushless (ie Hall, sin/cos, or SPI) comme source du retour de vitesse/position. Les encodeurs permettent une meilleure précision et doivent être utilisés autant que possible. Le choix « Other » est aussi utilisé pour sélectionner les impulsions « Pulse » ou un retour analogique dans certains modes « position ».

Syntax Serial: ^BLFB cc nn  
~BLFB

Syntax Scripting: setconfig\_BLFB, cc, nn)

Number of Arguments: 2

Argument 1: Channel

Min: 1

Max: Total Number of Motors

Argument 2: Sensor

Type: Unsigned 8-bit

Min: 0

Max: 1

Default: 0 = Other Sensor

Where:

cc = Motor channel

nn =

0: Other feedback

1: Brushless sensor feedback (Hall, SPI, Sin/Cos)

**V – Read Volts**Alias : **VOLTS** – Hexcode : **0D** – CANOpen id : **0x210D****Description**

Retourne les tensions mesurées en trois points du contrôleur : la tension de la batterie principale, la tension interne au niveau de l'étage de commande du moteur, et la tension disponible sur la sortie 5 V du connecteur SubD15 ou 25 en façade. Par sécurité, la tension au niveau de l'étage de commande du moteur doit rester en dessous de 12 V. La sortie 5 V correspondra à la tension interne de 5 V du contrôleur moins le seuil de la diode utilisée pour la protection, ce qui donnera environ 4,7 V. La tension de batterie est surveillée pour détecter des conditions de sous-tension ou de surtension.

Syntax Serial: ?V [ee]

Argument: SensorNumber  
Min: 1 Max: 3Syntax Scripting: result = getvalue(\_V, ee)  
result = getvalue(\_VOLTS, ee)

Reply:

V = nn Type: Unsigned 16-bit

```
ee =
1 : Internal volts
2 : Battery volts
3 : 5V output
nn = Volts * 10 for internal and battery volts. Millivolts for 5V output
```

Example:

```
Q: ?V
R:V=135:246:4730
Q: ?V 3
R:V=4730
```

**EX – Emergency Stop**Alias : **ESTOP** Hexcode : **0E**CANOpen id : **0x200C****Description**

La commande EX entrainera l'arrêt d'urgence du contrôleur de la même manière que si un arrêt d'urgence câblé était détecté sur l'entrée physique d'arrêt d'urgence. Cet état d'arrêt d'urgence sera maintenu jusqu'à ce qu'un reset ou une commande de libération « MG » soit reçu.

Syntax Serial: !EX

Syntax Scripting: setcommand(\_EX, 1)  
setcommand(\_ESTOP, 1)

Number of Arguments: 0

**BEE – Stockage utilisateur dans la RAM sauvegardée sur batterie**HexCode : **64****Description**

Sauvegarde et récupère les données utilisateur dans la RAM sauvegardée sur batterie. Le stockage est quasi-permanent, limité seulement par la batterie embarquée (usuellement plusieurs années). Contrairement au stockage sur mémoire Flash utilisant les commandes de configuration de type EE, il n'y a pas de limite sur la quantité ou la fréquence des cycles d'écriture – lecture. Cette fonctionnalité est valable uniquement sur certains modèles, se référer à la documentation technique. Une batterie doit être installée sur le contrôleur afin de rendre ce mode de fonctionnement possible.

Syntax Serial: ^BEE aa dd  
~BEE aa

Syntax Scripting: setconfig(\_BEE, aa, dd)

Number of Arguments: 2

Argument 1: Address

Min: 1

Max: Total Number of BEE

Argument 2: Value

Type: Signed 16-bit

Min: -32768

Max: 32767

Default: 0

Where:  
aa = Address

dd = Data

Example:

^BEE 1 555 : Store value 555 in Battery Backed RAM location 1  
~BEE 1: Read data from RAM location 1

## EE – Sauvegarde des données utilisateur dans la mémoire Flash HexCode : 00

### Description

Lit et écrit les données définies par l'utilisateur comme étant à sauvegarder dans la mémoire Flash. La capacité de stockage est typiquement de 32 mots de 16 bits mais peut varier d'un modèle à l'autre. La commande modifie les données contenues dans la zone de stockage RAM. Les commandes de type maintenance %EESAV ET celle en temps réel !EES doivent être utilisées pour copier les données de la zone de stockage RAM vers la mémoire Flash. La mémoire Flash est recopiée dans la RAM à chaque mise sous tension.

Syntax Serial: ^EE aa dd  
~EE aa

Syntax Scripting: setconfig(\_EE, aa, dd)

Number of Arguments: 2

Argument 1: Address

Min: 1

Max: Total Number of Storage words

Argument 2: Data

Type: Signed 16-bit

Min: -32768

Max: +32767

Default: 0

Where:  
aa = Address

dd = Data

Example:

^EE 1 555 : Store value 555 in RAM location 1  
%EESAV or !EES : Copy data from temporary RAM to Flash  
~EE 1 : Read data from RAM location 1

### Note

Ne pas transférer les données vers la mémoire Flash avec %EESAV ou !EES à haute fréquence car le nombre de cycles de la mémoire Flash est limité à environ 10000.

Éviter de sauvegarder dans la Flash alors que le produit est utilisé pour des opérations critiques.

Écrire dans les adresses 1 et supérieures. Écrire à l'adresse 0 remplira toute la RAM avec la valeur.

## If...then traitement

If...then traitement est l'opérateur conditionnel de base. Si l'expression du If est vrai, les actions du block If sont exécutées. Si l'expression du If est fausse, chacune des expressions Elseif est évaluée. Si seule une des expressions Elseif est vraie, le block correspondant est exécuté. Si aucune expression n'est vraie et qu'il y a une expression Else, le block Else correspondant est exécuté. Une fois un block exécuté, le programme passe à la fin du If...Then traitement.

La version en ligne du If...Then traitement a un traitement simple si l'expression est vraie, et un traitement optionnel à exécuter si l'expression est fausse.

Par exemple :

- Line If
 

```
If <condition> Then <stmt> [Else <stmt>]
```
- Block If
 

```
If <condition> [Then]
    <block>
[ElseIf <condition> [Then]
    <block>]
[ElseIf <condition> [Then]
    <block>]
...
[Else
    <block>]
End If
```

```
Dim a As Integer
Dim b As Integer

a = 10
b = 20
` Block If statement.
If a < b Then
    a = b
```

## Scripting

TABLE 11.

Parameter	Measure Point	Min	Typ	Max	Units
Scripting Flash Memory	Internal		32K		Bytes
Max Basic Language programs	Internal	2000		3000	Lines
Integer Variables	Internal		4096		Words (1)
Boolean Variables	Internal		8192		Symbols
Execution Speed	Internal	50 000	100 000		Lines/s
Note 1: 32-bit words					

## Interface CANopen du contrôleur

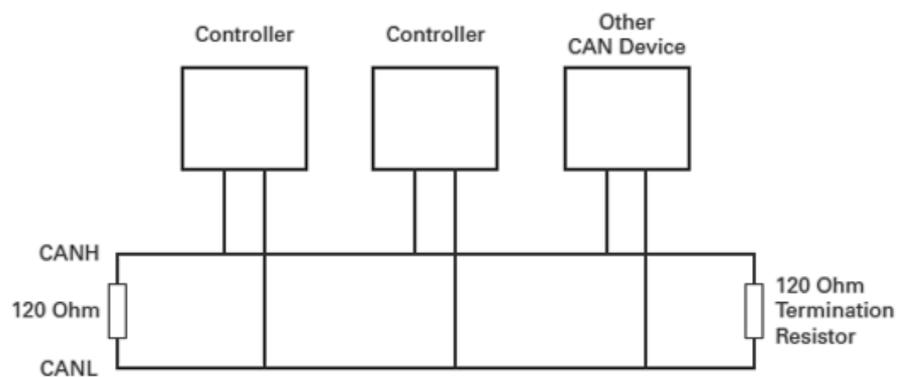
### Utilisation et intérêt de CANopen

Le protocole CANopen permet de connecter plusieurs contrôleurs sur un réseau unifié et extensible. Ses capacités souples de configuration offrent un accès facile au paramétrage des constituants du réseau un transfert de données en temps réel (cyclique ou sur commande événementielle).

Les avantages de CANopen incluent :

- standard EN50325-4 ;
- largement implémenté et non propriétaire ;
- hautement extensible ;
- offre une structure flexible (peut être utilisé dans de nombreux domaines d'application) ;
- adapté aux structures décentralisées ;
- large palette d'outil de monitoring et de solutions.

### Connexion CAN



La connexion sur un bus CAN est aussi simple que le montre la figure ci-dessus. Les résistances de terminaison de 120 ohms doivent être insérées à chaque extrémité du câble. Le câble réseau CAN peut aller jusqu'à 120 m de long. Se référer aux spécifications CAN pour les longueurs maximales selon les débits souhaités.

### Configuration du bus CAN

Pour configurer les paramètres de communication via l'utilitaire RoborunPlus PC, votre contrôleur doit être connecté à un PC via un port RS232/USB.

Utiliser le menu CAN dans la table de configuration afin d'autoriser le mode CANopen. De plus, cet utilitaire peut-être utilisé pour configurer les paramètres suivants :

- Node ID ;
- Bit rate ;
- Heartbeat(ms) ;
- Autostart ;
- TPDO Enable and Send rate.

### **Node ID**

Chaque équipement du réseau doit avoir un identifiant unique Node ID, compris entre 1 et 127. La valeur 0 est utilisée pour la diffusion (broadcast) des messages et ne peut être assignée à un élément.

### **Bit Rate**

Le bus CANopen supporte des vitesses de transmission de 10Kbps jusqu'à 1Mbps. La vitesse par défaut est réglée à 125Kbps. Les vitesses supportées par le contrôleur sont :

- 1000K
- 800K
- 500K
- 250K
- 125K

### **Commandes accessibles via CANopen**

Presque toutes les commandes et requêtes temps-réel du contrôleur accessibles via la communication série/USB sont accessibles via CANopen. Les commandes utiles pour le sujet sont listées page suivante.

### **Type de messages CANopen**

Le contrôleur opérant en mode CANopen peut accepter les types de messages suivants :

- Service Data Object (SDO messages) pour écrire / lire des valeurs de paramètres ;
- Process Data Object (PDO messages) pour transmettre automatiquement des paramètres ET/OU accepter des commandes « runtime » ;
- Network Management (NMT) comme défini dans les spécifications CANopen.

### **Service Data Object (SDO) messages d'écriture / lecture**

Les requêtes et commandes temps-réel peuvent être envoyées au contrôleur en utilisant ces messages de type SDO.

La liste des commandes accessibles avec les messages SDO peut être trouvée dans le tableau « Object dictionary » page suivante avec la description du format des données associées dans la colonne Data type :

- U = Unsigned ;
- S = Signed ;
- WO = Word ;
- n = n bits.

## Object dictionary (extrait)

TABLE 17-3. Motor Controllers Object Dictionary

Index	Sub (Hex)	Entry Name	Data Type & Access	Command Name
<b>Runtime Commands</b>				
0x2000	01	Set Motor Command, ch1	CG	CANGO
	02	Set Motor Command, ch2		
0x2001	01 to mm (1)	Set Position, ch.1	S32 WO	P
0x2002	01 to mm (1)	Set Velocity	S16 WO	S
0x2003	01 to ee (2)	Set Encoder Counter	S32 WO	C
0x2004	01 to mm (1)	Set Brushless Counter	S32 WO	CB
0x2005	01 -vv (3)	Set User Integer Variable	S32 WO	VAR
0x2006	01 to mm (1)	Set Acceleration	S32 WO	AC
0x2007	01 to mm (1)	Set Deceleration	S32 WO	DC
0x2008	00	Set All Digital Out bits	U8 WO	DS
0x2009	00	Set Individual Digital Out bits	U8 WO	D1
0x200A	00	Reset Individual Digital Out bits	U8 WO	D0
0x200B	01 to ee (2)	Load Home Counter	U8 WO	H
0x200C	00	Emergency Shutdown	U8 WO	EX
0x200D	00	Release Shutdown	U8 WO	MG
0x200E	00	Stop in all modes	U8 WO	MS
0x200F	01 to mm (1)	Set Pos Relative	S32 WO	PR

### Détails d'un message de type SDO

La trame d'un message SDO peut facilement être créée manuellement et utilisée pour envoyer des commandes et requêtes à un appareil Robotec. Les indications ci-dessous sont une description simplifiée du mécanisme CANopen SDO.

Une requête/commande vers un appareil Robotec peut être analysée comme suit :

Header	DLC	Payload					
		Byte0			Byte1-2	Byte 3	Bytes4-7
		bits 4-7	bits2-3	bits0-1			
0x600+nd	8	css	n	xx	index	subindex	data

- nd = Node Id de destination ;
- ccs est l'indicateur de commande (2 = commande, 4 = requête) ;
- n est le nombre d'octets de la partie « Data » qui ne contient pas de données ;
- xx n'est pas nécessaire pour les opérations basiques (cf standard CANopen) ;
- index est l'index du dictionnaire de la donnée à laquelle on souhaite accéder ;
- subindex est le subindex de la variable du dictionnaire objet ;
- data contient la donnée à charger.

La réponse de l'appareil Robotec est décrite ci –dessous :

Header	DLC	Payload					
		Byte0			Byte1-2	Byte 3	Bytes4-7
		bits 4-7	bits2-3	bits0-1			
0x580+nd	8	css	n	xx	index	subindex	Data

- nd = Node Id de la source ;
- ccs est l'indicateur de commande client (4 = réponse à une requête, 6 = commande réalisée avec succès, 8 = erreur dans le message reçu) ;
- n est le nombre d'octets de la partie « Data » qui ne contient pas de données ;
- xx n'est pas nécessaire pour les opérations basiques (cf standard CANopen) ;
- index est l'index du dictionnaire de la donnée à laquelle on souhaite accéder ;
- subindex est le subindex de la variable du dictionnaire objet ;
- data contient la donnée à charger, applicable seulement si css = 4.

**Exemple : positionner à la valeur 10 le compteur d'encodage 2 du node 1**

Trame envoyée :

Header	DLC	Payload					
		Byte0			Byte1-2	Byte 3	Bytes4-7
		bits 4-7	bits2-3	bits0-1			
0x600+1	8	2	0	0	0x2003	0x02	0x0A
601h	8	20			03 20	02	0A 00 00 00

Analyse :

- nd = 1, numéro du nœud de destination ;
- ccs = 2, indiquant une commande ;
- n = 0, car les 4 octets de la donnée sont utilisés (32 bits signés)
- index = 0x2003 et subindex = 0x02 conformément au dictionnaire d'objet

La réponse sera :

Header	DLC	Payload					
		Byte0			Byte1-2	Byte 3	Bytes4-7
		bits 4-7	bits2-3	bits0-1			
0x580+1	8	6	0	0	0x2003	0x02	0x00
581h	8	60			03 20	02	00 00 00 00



**NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE**

Document réponse DR1

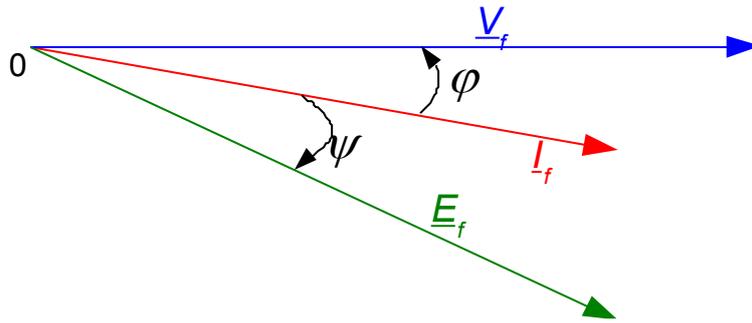


Figure n°34 : diagramme vectoriel de Behn-Eschenburg du moteur synchrone à compléter

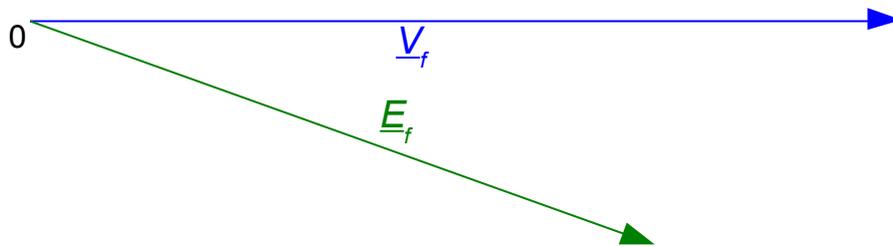


Figure n°35 : diagramme vectoriel de Behn-Eschenburg du moteur synchrone en mode autopilotage à compléter

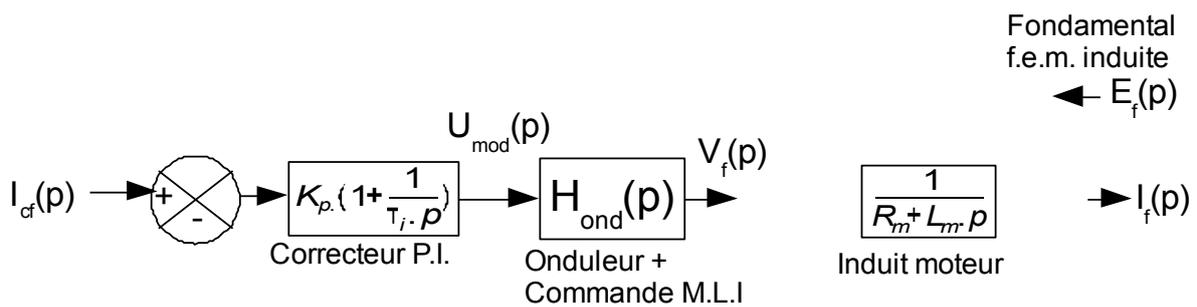


Figure n°36 : boucle de contrôle du courant à compléter

## Document réponse DR2 : script Python3 à compléter

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math

# Nom du fichier CSV à traiter
csvfilename = 'graphes.txt'

# Récupérer le nombre nrow de lignes du fichier CSV
with open(csvfilename, newline='') as csvfile:
    csvreader = csv.reader(csvfile)
    nrow = 0
    for row in csvreader:
        nrow += 1

# Initialiser les tableaux de nrow éléments nuls de type flottant
timex = np.zeros(nrow, dtype=float) # Tableau de l'axe des temps : "timex"
i1 = np.zeros(nrow, dtype=float) # Tableau des mesures du courant i1
i2 = np.zeros(nrow, dtype=float) # Tableau des mesures du courant i2
i3 = np.zeros(nrow, dtype=float) # Tableau des mesures du courant i3
tetaRotor = np.zeros(nrow, dtype=float) # Tableau de la position angulaire du rotor

# Remplir les tableaux avec les mesures du fichier CSV
# Le fichier CSV comporte 10 colonnes : temps, Cem, omega, flu, v1, i1, i2, i3, icons1,
with open(csvfilename, newline='') as csvfile:
    csvreader = csv.reader(csvfile, delimiter=' ', skipinitialspace=True, quotechar='|')
    nrow = 0
    for row in csvreader:
        timex[nrow] = float(row[0]) # colonne 0 : temps (s)
        i1[nrow] = float(row[5]) # colonne 5 : courant i1 (A)
        i2[nrow] = float(row[6]) # colonne 6 : courant i2 (A)
        i3[nrow] = float(row[7]) # colonne 7 : courant i3 (A)
        tetaRotor[nrow] = float(row[9]) # colonne 9 : position du rotor (radian)
        nrow += 1

# Initialiser le tableau de la position angulaire du flux d'induit
tetaPhis = np.zeros(nrow, dtype=float)

# Calculer les valeurs du tableau tetaPhis de la position angulaire du flux d'induit
# Boucle de nrow itérations, l'indice de boucle i varie de 0 à nrow-1
for i in range(nrow):
    # Partie à modifier : Le corps de la boucle for est constitué de toutes les instructions
    # respectant la même indentation, ici une tabulation

# Afficher la position angulaire du flux d'induit et la position du rotor
plt.subplots()
plt.title('Positions du rotor et du flux statorique (deg)')
plt.grid(True)
plt.xlabel('temps (s)')
plt.ylabel('Position (deg)')
plt.plot(timex, tetaPhis, linestyle='-', marker='.')
plt.plot(timex, tetaRotor, linestyle='-', marker='.')
plt.show()
```



**NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE**

## Document réponse DR3 : script Scilab à compléter

```
0001 // Nom du fichier CSV à traiter
0002 chdir("D:\MyWorks\Scilab_6.0_works\AfficherGraphesAgregInt2019\");
0003 csvfilename = 'graphes_espace.csv';
0004
0005 // Lecture du fichier CSV, valeurs rangées dans le tableau "Mesures"
0006 // de nLig lignes (nombre d'instant de mesure) et nCol colonnes
0007 // Le fichier CSV comporte 10 colonnes : temps, Cem, omega, flu, v1, i1, i2, i3, icons1, tetam
0008 Mesures = csvRead(csvfilename, ' ');
0009 dimTab = size(Mesures);
0010 nLig = dimTab(1); // Nombre de lignes du fichiers CSV
0011 nCol = dimTab(2); // Nombre de colonnes du fichier CSV
0012
0013 // Initialiser les tableaux unilignes de flottants
0014 timex = []; // Tableau de l'axe des temps : "timex"
0015 i1 = []; // Tableau des mesures du courant i1
0016 i2 = []; //Tableau des mesures du courant i2
0017 i3 = []; //]Tableau des mesures du courant i3
0018 tetaPhis = []; // Tableau de la position du champ statorique
0019 tetaRotor = []; //Tableau de la position angulaire du rotor
0020
0021 // Remplir les tableaux avec les mesures du fichier CSV présentes dans le tableau "Mesures"
0022 // Le fichier CSV comporte 10 colonnes : temps, Cem, omega, flu, v1, i1, i2, i3, icons1, tetam
0023 timex = Mesures(1:nLig, 1); // colonne 1 : temps (s)
0024 i1 = Mesures(1:nLig, 6); // colonne 6 : courant i1 (A)
0025 i2 = Mesures(1:nLig, 7); // colonne 7 : courant i2 (A)
0026 i3 = Mesures(1:nLig, 8); // colonne 8 : courant i3 (A)
0027 tetaRotor = Mesures(1:nLig, 10); // colonne 10 : position du rotor (radian)
0028
0029 // Calculer les valeurs du tableau "tetaPhis" de la position angulaire du flux d'induit
0030 // Boucle de nLig itérations, l'indice de boucle i varie de 1 à nLig
0031 for i=1:nLig;
0032     // Partie à modifier : Le corps de la boucle "for" est constitué de toutes les instructions
0033     // comprises entre les deux lignes débutant par les mots clés "for" et "end"
0034
0035
0036
0037
0038
0039
0040
0041
0042 end;
0043
0044 // Afficher la position angulaire du flux d'induit et la position du rotor
0045 fig_1 = scf(1); //Création figure n°1, figure par défaut
0046 clf;
0047 titre_fig = strcat(["Fig n°1 : Positions du rotor et du champ statorique ", " Nbre points
= ", string(nLig), " , ", " Te (s) = ", string(timex(1))]);
0048 xname(titre_fig);
0049 plot2d(timex, tetaPhis, style=[color("green")]);
0050 plot2d(timex, tetaRotor, style=[color("red")]);
```

### Document réponse DR4

Trame de commande d'arrêt d'urgence à compléter

Header	DLC	Payload					
		Byte0			Byte1-2	Byte 3	Bytes4-7
		bits 4-7	bits2-3	bits0-1			

Trame d'acquiescement à compléter

Header	DLC	Payload					
		Byte0			Byte1-2	Byte 3	Bytes4-7
		bits 4-7	bits2-3	bits0-1			