

TD3 : Asservissement d'un vérin de plateforme hexapode

1 Présentation

Le support de l'étude proposée est la plate-forme hexapode (voir figure 1) fabriquée par la société Symétrie pour le laboratoire de mécanique des fluides de l'École Centrale de Nantes.



FIG. 1 – Plate-forme hexapode équipée d'une maquette de cuve de méthanier.

Cette plate-forme permet le développement de deux thèmes de recherche :

- La mesure des coefficients hydrodynamiques de navires ou d'engins flottants. Les résultats obtenus concourent alors à la modélisation des comportements dans la houle et la validation de nouveaux concepts de sécurité.
- L'étude des efforts provoqués par le mouvement des liquides sur les parois intérieures d'une cuve ou d'un réservoir partiellement remplis, ceux-ci étant eux-mêmes en mouvement. Cette étude concerne particulièrement les navires tels que les pétroliers ou méthaniers mais aussi les véhicules de transports routiers, ferroviaires et aériens. Elle se fait en montant sur la plate-forme une maquette respectant des règles de similitude.

Plus généralement l'intérêt de ce type de robots, à six degrés de liberté, réside principalement dans son aptitude à des manipulations précises impliquant de lourdes charges et/ou des vitesses importantes. Pour l'étude envisagée dans la suite de ce sujet, une maquette (représentative d'une cuve de méthanier) est fixée rigidement sur la plate-forme mobile. Une platine de mesure des efforts exercés sur la maquette est montée entre la maquette et la plate-forme mobile : elle n'intervient pas dans l'étude proposée.

La plate-forme hexapode comporte 6 vérins identiques, dont la structure cinématique est représentée figure 2. La structure de commande est décrite en annexe (document 1 page 7).

L'étude proposée porte sur l'asservissement en position de chacun des vérins, et en particulier sur la modélisation de l'asservissement en position de la tige du vérin et détermination

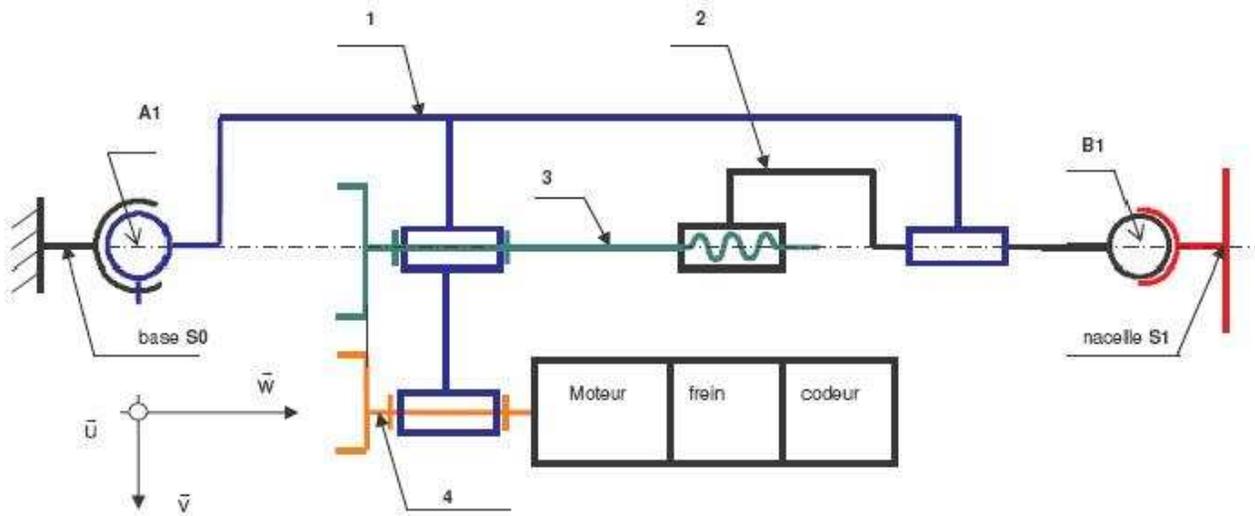


FIG. 2 – Structure cinématique d'un vérin.

de sa bande passante.

Chaque vérin comporte un moteur électrique brushless associé à un réducteur, un système vis-écrou permettant de convertir la rotation en translation et un codeur incrémental.

L'asservissement doit satisfaire au cahier des charges, dont un extrait est donné dans le tableau 1.

| Fonction de service | Critère | Niveau |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| FS1 : Déplacer la plate-forme | Rapidité | Bande passante : 3 Hz |
| | Précision | < 1% |
| | Sensibilité aux perturbations | aucune |
| | Stabilité | Marge de phase : 60° |

TAB. 1 – Extrait du CdCF.

On admettra que l'autopilotage du moteur brushless conduit du point de vue comportemental à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu. Les équations du modèle équivalent sont rappelées ci-dessous où U et I représentent les grandeurs électriques équivalentes. L , R , K_E et K_T sont les paramètres du moteur brushless EC45-252464, dont la documentation constructeur est donnée en annexe.

Hypothèses et notations

$I_{eq} = 0.23 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$: moment d'inertie de toutes les parties en mouvement, ramené à l'arbre du moteur.

ω_m : vitesse de rotation du moteur, exprimée en rad/s . (vitesse nominale = 3830 tr/mn).

C_m : couple moteur.

U : tension aux bornes du moteur.

E : force contre électromotrice.

I : intensité du courant d'induit (intensité nominale = 3 A).

C_{req} : couple résistant équivalent.

$K_E = 0.104 \text{ V.s/rad}$: coefficient de force contre électromotrice.

$K_T = 0.104 \text{ N.m/A}$: coefficient de couple.

$R = 1.73 \Omega$: résistance d'induit.

$L = 0.686 \text{ mH}$: inductance d'induit.

La transformation de Laplace appliquée aux équations temporelles du modèle conduit aux résultats suivants :

$$C_m - C_{req} = I_{eq} p \Omega_m ;$$

$$U = E + (R + Lp)I ;$$

$$C_m = K_T I ;$$

$$E = K_E \Omega_m .$$

La structure de l'asservissement de position est la suivante :

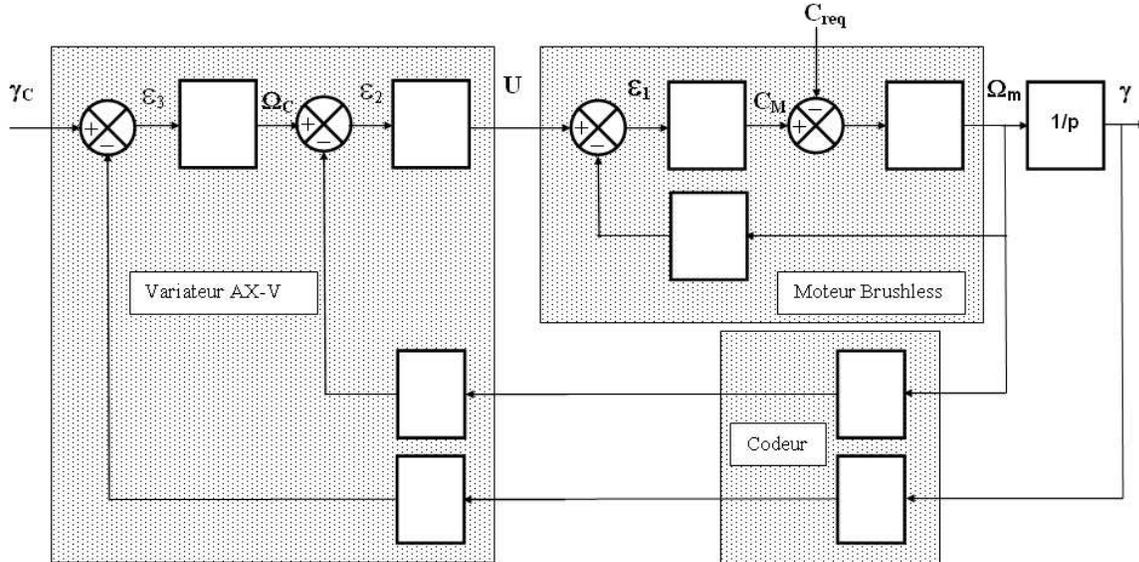


FIG. 3 – Structure de l'asservissement de position.

γ_c : consigne en position élaborée par la carte UMAC.

γ : position angulaire de l'arbre moteur.

2 Modélisation de la commande en tension du moteur

On considère le schéma bloc du moteur décrit figure 4.

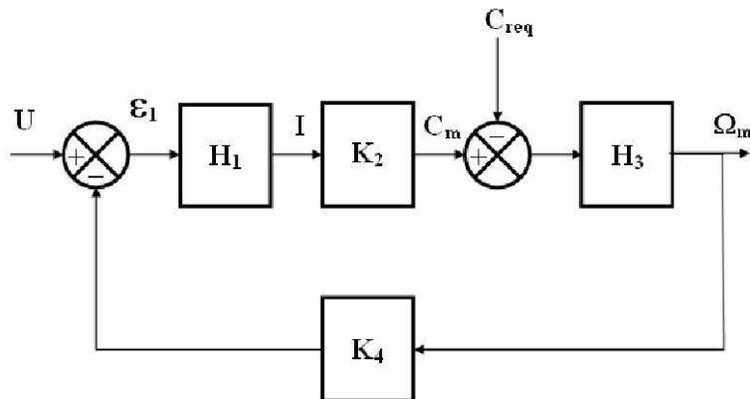


FIG. 4 – Schéma bloc du moteur brushless seul.

Q.1. Établir les expressions littérales des fonctions de transfert du schéma bloc de la figure 4. Donner l'expression de Ω_m en fonction de H_1, K_2, H_3, K_4, U et C_{req} .

Q.2. Montrer qu'en régime permanent (Ω_m constante) on peut écrire $\Omega_m = \frac{U}{K_E} - \frac{R}{K_E \cdot K_T} C_{req}$.

Quelle valeur U_0 faut-il donner à U pour obtenir une vitesse de 300 rad/s lorsque $C_{req} = 0.1 \text{ Nm}$? Quelle sera alors la valeur de l'intensité en ligne ?

Q.3. Le système respecte-t-il le cahier des charges en termes de sensibilité aux perturbations ?

Q.4. Calculer numériquement les pôles de la fonction de transfert. Proposer alors une expression simplifiée de la fonction de transfert du moteur.

3 Étude de la boucle de vitesse

Une première boucle de vitesse est implantée (figure 5).

La mesure de vitesse est effectuée par traitement numérique des informations délivrées par le codeur incrémental situé sur l'arbre moteur. Le traitement numérique est suffisamment rapide pour que l'on considère que la fonction de transfert du capteur K_5 est un gain pur. Le capteur délivre une tension de 8 V lorsque le moteur (donc le codeur) tourne à 3000 tr/mn . La fonction de transfert K_6 du variateur est un gain pur. La fonction de transfert du correcteur de la boucle de vitesse est $H_c = H_{c0} \left(1 + \frac{1}{\tau_i p} \right)$

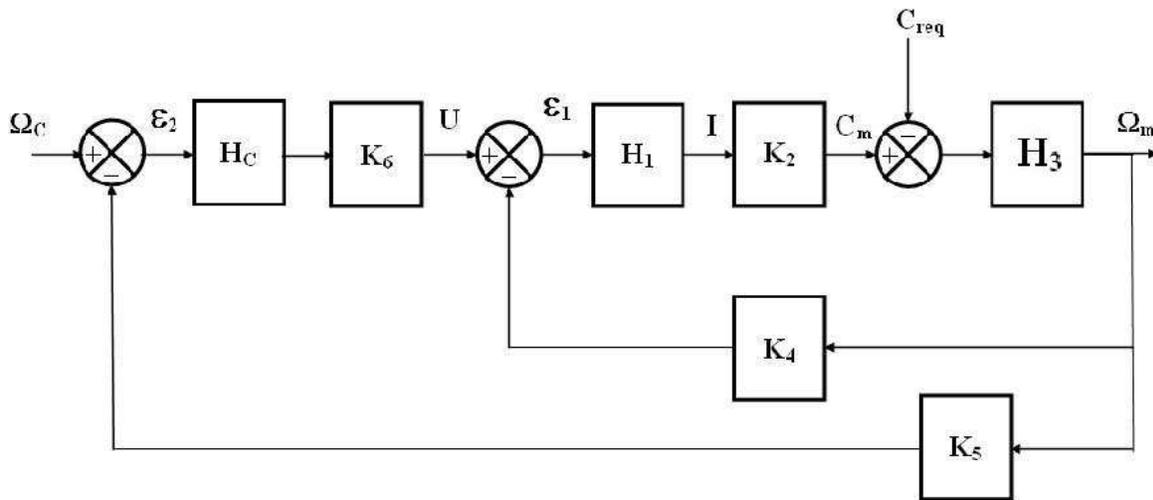


FIG. 5 – Schéma bloc de la boucle de vitesse.

La consigne vitesse Ω_c est une tension de valeur instantanée comprise entre -10 V et $+10 \text{ V}$.

Q.5. Déterminer la valeur de la constante K_5 .

Q.6. Déterminer une condition sur H_{c0}, K_6 et τ_i pour que le système soit stable en utilisant le critère de Routh.

Q.7. La consigne Ω_c et le couple C_{req} sont des échelons d'amplitudes respectives Ω_{c0} et C_{req0} . Étudier la sensibilité aux perturbations (sans nécessairement mener les calculs) et conclure sur l'intérêt de la boucle de vitesse.

4 Réglage de la stabilité de l'asservissement de position et prédétermination de sa bande passante

Objectif : assurer la stabilité et vérifier que la bande passante à -3 dB de l'asservissement de position du vérin est supérieure à 3 Hz.

La fonction de transfert

$$H_v = \frac{\Omega_m}{\Omega_c} = \frac{H_{v0}}{1 + 2z \frac{p}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

de la boucle de vitesse est assimilée à un passe-bas du second ordre de gain statique $H_{v0} = 40$ de pulsation $\omega_0 = 790$ rad/s et de coefficient d'amortissement $z = 0.68$.

On retient le schéma-bloc figure 6 pour modéliser la boucle de position.

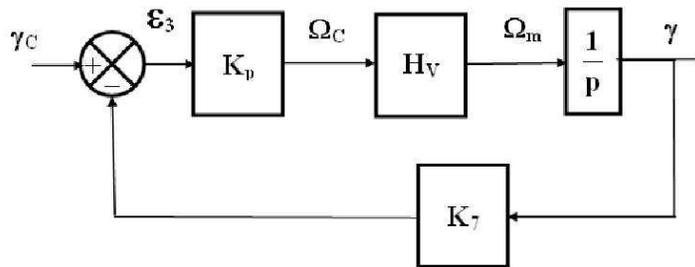


FIG. 6 – Schéma bloc de la boucle de position.

On donne : $K_7 = 0.02$ V/rad ; K_P (réel positif)

Q.8. Que représente la variable γ ?

Q.9. Donner l'expression littérale de la fonction de transfert en boucle ouverte.

On donne figure 7 les diagrammes de Bode de la boucle ouverte pour $K_P = 10$.

Q.10. Déterminer la valeur K_{P0} de K_P qui permet d'obtenir une marge de phase de 60° et conclure quant à la stabilité de la boucle fermée.

Q.11. Vérifier que la bande passante à -3 dB de la boucle fermée est supérieure à 3 Hz conformément au cahier des charges. Vous admettez que la bande passante à -3 dB en boucle fermée correspond à la pulsation de coupure à 0 dB en boucle ouverte.

Q.12. Expliquer succinctement (40 mots maximum en vous aidant éventuellement d'un dessin) comment vous procéderiez expérimentalement pour tracer les diagrammes de Bode de la boucle fermée et vérifier ainsi la performance en bande passante de la plate-forme hexapode.

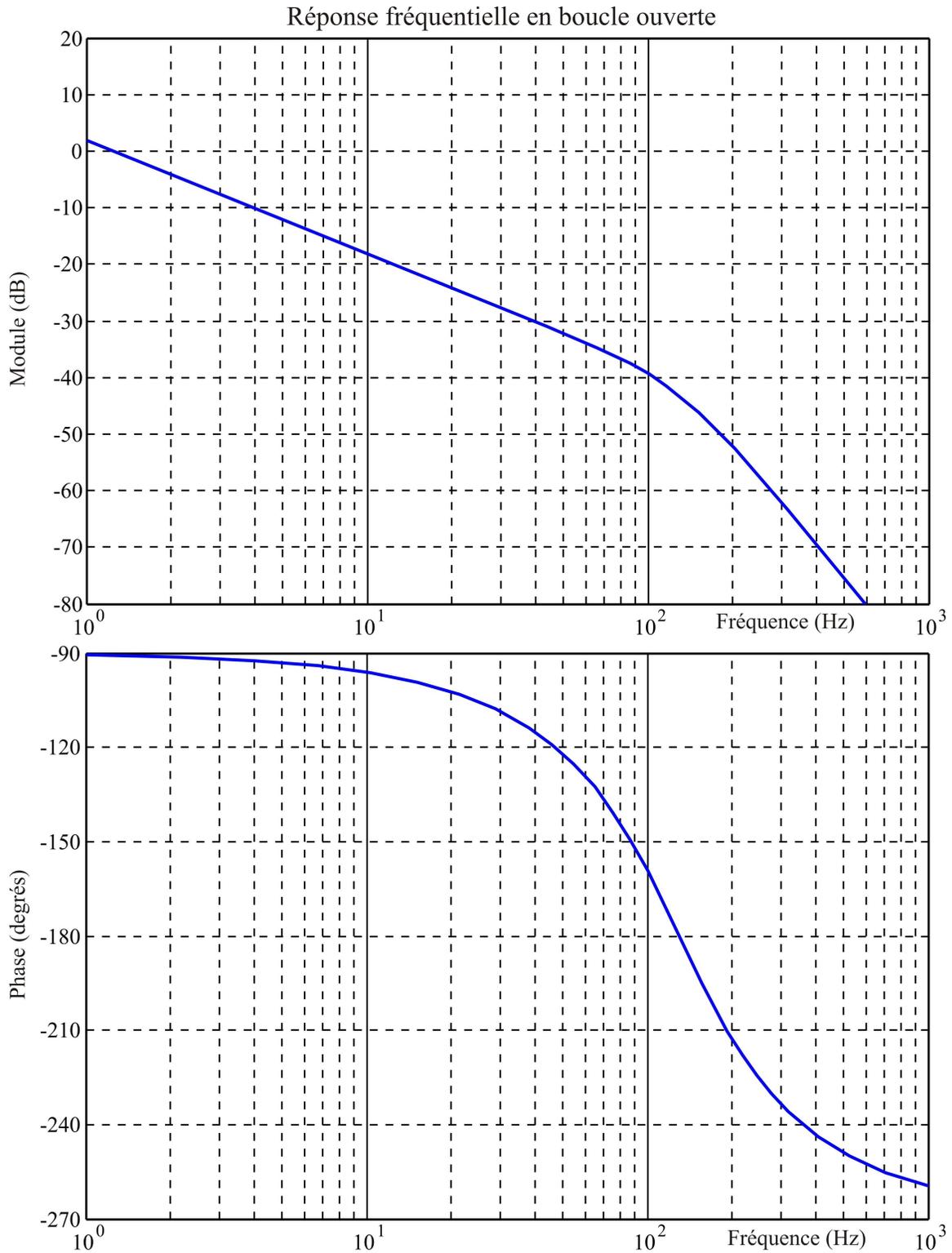


FIG. 7 – Diagrammes de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte pour $K_P = 10$.

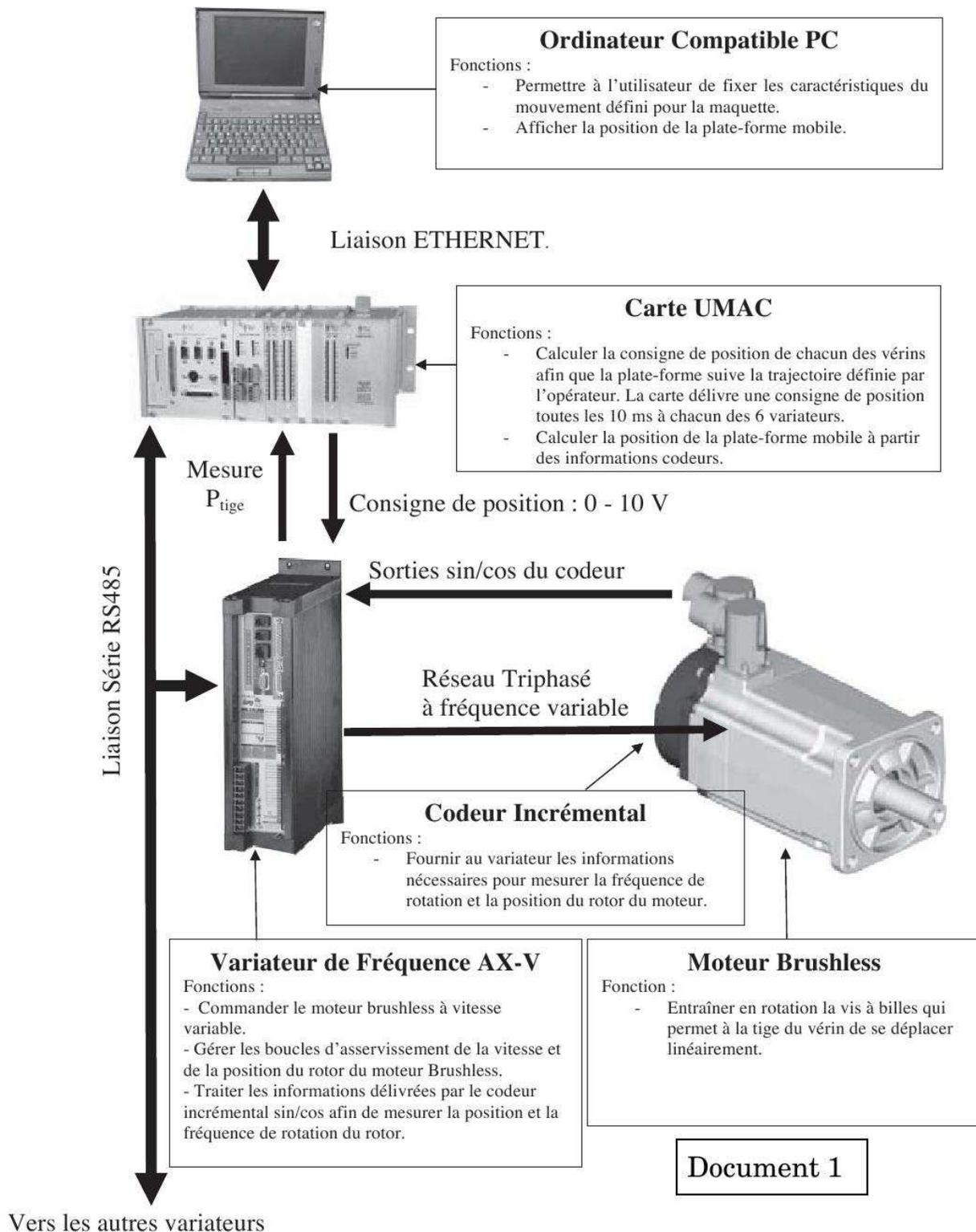
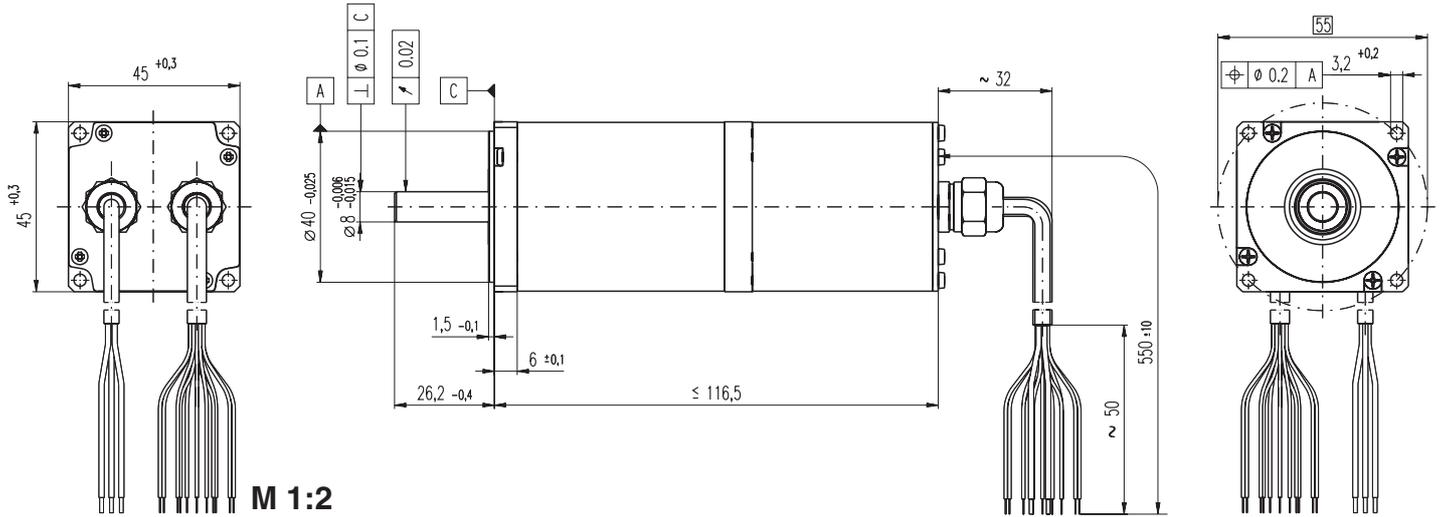


FIG. 8 – Descriptif des composants participant à l'asservissement.

EC 45 4-poles □45 mm, brushless, 200 Watt



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

Order Number

| | | | | |
|--|--------------|--------|--------|--------|
| | with encoder | 266052 | 252463 | 252464 |
|--|--------------|--------|--------|--------|

Motor Data (provisional)

| Values at nominal voltage | | | | | |
|---------------------------|---|------------------|-------|-------|-------|
| 1 | Nominal voltage | V | 48.0 | 48.0 | 48.0 |
| 2 | No load speed | rpm | 8730 | 6120 | 4370 |
| 3 | No load current | mA | 473 | 261 | 153 |
| 4 | Nominal speed | rpm | 8150 | 5580 | 3830 |
| 5 | Nominal torque (max. continuous torque) | mNm | 237 | 297 | 308 |
| 6 | Nominal current (max. continuous current) | A | 4.93 | 4.16 | 3.04 |
| 7 | Stall torque | mNm | 4420 | 4070 | 2890 |
| 8 | Starting current | A | 84.8 | 54.7 | 27.7 |
| 9 | Max. efficiency | % | 86 | 87 | 86 |
| Characteristics | | | | | |
| 10 | Terminal resistance phase to phase | Ω | 0.566 | 0.878 | 1.73 |
| 11 | Terminal inductance phase to phase | mH | 0.172 | 0.350 | 0.686 |
| 12 | Torque constant | mNm / A | 52.2 | 74.5 | 104 |
| 13 | Speed constant | rpm / V | 183 | 128 | 91.6 |
| 14 | Speed / torque gradient | rpm / mNm | 1.99 | 1.51 | 1.52 |
| 15 | Mechanical time constant | ms | 4.16 | 3.16 | 3.18 |
| 16 | Rotor inertia | gcm ² | 200 | 200 | 200 |

Specifications

- Thermal data**
- 17 Thermal resistance housing-ambient 3.1 K / W
 - 18 Thermal resistance winding-housing 1.0 K / W
 - 19 Thermal time constant winding 31.8 s
 - 20 Thermal time constant motor 1550 s
 - 21 Ambient temperature -10 ... +100°C
 - 22 Max. permissible winding temperature +125°C
- Mechanical data (preloaded ball bearings)**
- 23 Max. permissible speed 10000 rpm
 - 24 Axial play at axial load < 20 N 0 mm
 - > 20 N max. 0.14 mm preloaded
 - 25 Radial play preloaded
 - 26 Max. axial load (dynamic) 20 N
 - 27 Max. force for press fits (static) 170 N
 - (static, shaft supported) 5000 N
 - 28 Max. radial loading, 5 mm from flange 140 N
- Other specifications**
- 29 Number of pole pairs 2
 - 30 Number of phases 3
 - 31 Weight of motor 1000 g
 - Protection IP54

Values listed in the table are nominal.

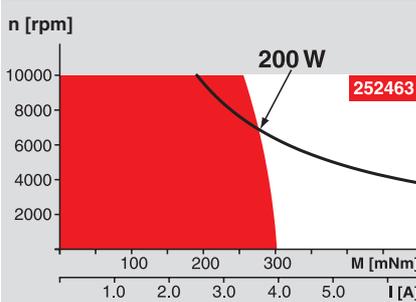
Connection Motor (Cable AWG 18)

- Cable 1 Motor winding 1
- Cable 2 Motor winding 2
- Cable 3 Motor winding 3

Option

- Temperature monitoring, PTC resistance
- R 20°C < 0.3 kΩ
- R 130°C = 7.0 ... 35 kΩ

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).

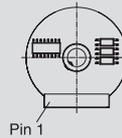
— **Assigned power rating**

Integrated encoder RCM15

Overview on page 17 - 21

Connection Encoder (Cable AWG 26)

- | | | |
|--------------|----------|------------------------|
| white | (Pin 1) | V _{CC} 1 |
| brown | (Pin 2) | GND 1 |
| yellow | (Pin 3) | Channel A |
| green | (Pin 4) | Channel A |
| pink | (Pin 5) | Channel I (Index) |
| grey | (Pin 6) | Channel I (Index) |
| red | (Pin 7) | Channel B |
| blue | (Pin 8) | Channel B |
| black | (Pin 9) | Commutation signal S 2 |
| violet | (Pin 10) | Commutation signal S 1 |
| grey/pink | (Pin 11) | Commutation signal S 3 |
| blue/red | (Pin 12) | GND 2 |
| white/green | (Pin 13) | V _{CC} 2 |
| brown/green | | PTC (Optional) |
| white/yellow | | PTC (Optional) |



- Counts per turn 2048
- Number of channels 3
- Max. operating frequency (kHz) 200
- Supply voltage 5 V ± 5 %
- Output signal RS 422
- Phase shift Φ (nominal) 90°e
- Logic state width s min. 45°e
- Index pulse width (nominal) 360°e
- Operating temperature range -10 ... +100°C
- Moment of inertia ≤ 3.11 gcm²

Recommended Electronics:

- DEC 50/5 Page 271
- DEC 70/10 271
- DES 50/5 272
- DES 70/10 272
- EPOS 70/10 279
- MIP 50 281
- MIP 100 281
- Notes** 17