Concours Commun INP (CCINP), France

Session 2021, filière TSI

Sciences industrielles de l'ingénieur

Durée : 6 heures

Ce que traite le sujet

- Partie I : vérification des performances de l'AGV
- Partie II : étude du réducteur
- Partie III : asservissement de couple

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années : prepahelp.com/annales/ccinp/tsi/2021/si

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

CONCOURS COMMUN INP

ÉPREUVE SPÉCIFIQUE - FILIÈRE TSI

SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Durée : 6 heures

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

RAPPEL DES CONSIGNES

- *Utiliser uniquement un stylo noir ou bleu foncé non effaçable pour la rédaction de votre composition ; d'autres couleurs, excepté le vert, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les schémas et la mise en évidence des résultats.*
- *Ne pas utiliser de correcteur.*
- *Écrire le mot FIN à la fin de votre composition.*

Les calculatrices sont autorisées.

Le sujet est composé de trois parties, toutes indépendantes.

Sujet : page 1 à page 23
Annexes : annexe 1 à annexe 7 (page 24 à page 31)
Document Réponse : DR1 à DR5

Le Document Réponse doit être rendu dans son intégralité avec la copie.

Étude d'un train grande vitesse de 4e génération : l'AGV (Automotrice Grande Vitesse)

Présentation générale

Depuis 1981, circulent en France des trains dits " grandes vitesses " dont les performances et la fiabilité ont fait leurs preuves. Si leur constructeur, la société Alstom, a su à travers trois générations améliorer à la fois : les rendements des chaînes de traction, la vitesse maximale, la capacité voyageur et l'interopérabilité au niveau européen, il manquait au catalogue du constructeur un train capable de gagner des parts de marché à l'international.

L'idée est alors venue d'élaborer un train au design extérieur présenté sur la **figure 1** et satisfaisant notamment aux exigences suivantes :

- un train à un seul niveau par opposition aux TGV " deux niveaux " dits duplex, très prisés par la SNCF, mais qui culturellement ne sont pas acceptés dans tous les pays. Pour ce faire, il s'agissait de rendre les motrices des TGV capacitaires en plaçant les organes de la chaîne de traction sous caisses et ainsi libérer de la place pour davantage de sièges ;
- un train éco-conçu avec une plus grande maîtrise du coût du cycle de vie, plus léger constitué de matériaux composites et recyclables ;
- un train présentant une vitesse d'exploitation maximale toujours plus élevée allant jusqu'à atteindre les 350 $km \cdot h^{-1}$ et venant ainsi concurrencer l'avion sur les trajets moyennes distances ;
- un train " luxueux " garantissant un confort passager optimum ;
- un train " modulaire " de longueur de rame variable permettant à l'exploitant d'adapter facilement son matériel en fonction de la ligne à exploiter et de sa fréquentation.

Ces exigences sont, entre autres, détaillées dans le diagramme figurant à l'**annexe 1**. L'ensemble de celles-ci a de ce fait amené la société Alstom à concevoir pour ce train une motorisation dite répartie avec des bogies intégrants des moteurs synchrones à aimants permanents, disposés le long de la rame comme le montrent les **figures 2**, **3** et **4**, d'où le nom " **A**utomotrice **G**rande **V**itesse ".

Dans ce sujet, on s'attachera donc tout particulièrement à cette spécificité dans le monde de la grande vitesse en étudiant de plus près sa chaîne de traction.



Figure 1 - AGV lors de sa présentation en Italie

Pour cette étude, on se place sur la ligne grande vitesse située en Italie entre Milan et Naples, seule ligne européenne actuellement exploitée par l'AGV. Le train considéré comprend 11 voitures, avec 12 bogies dont 5 sont motorisés comme le montre la **figure 2**.

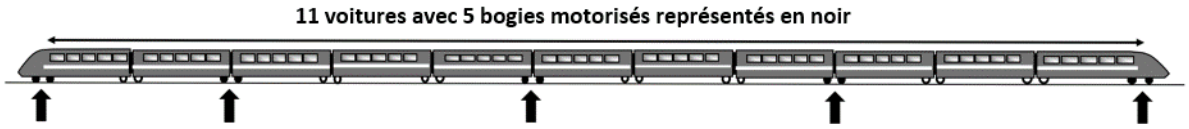


Figure 2 - Illustration d'une rame d'un AGV

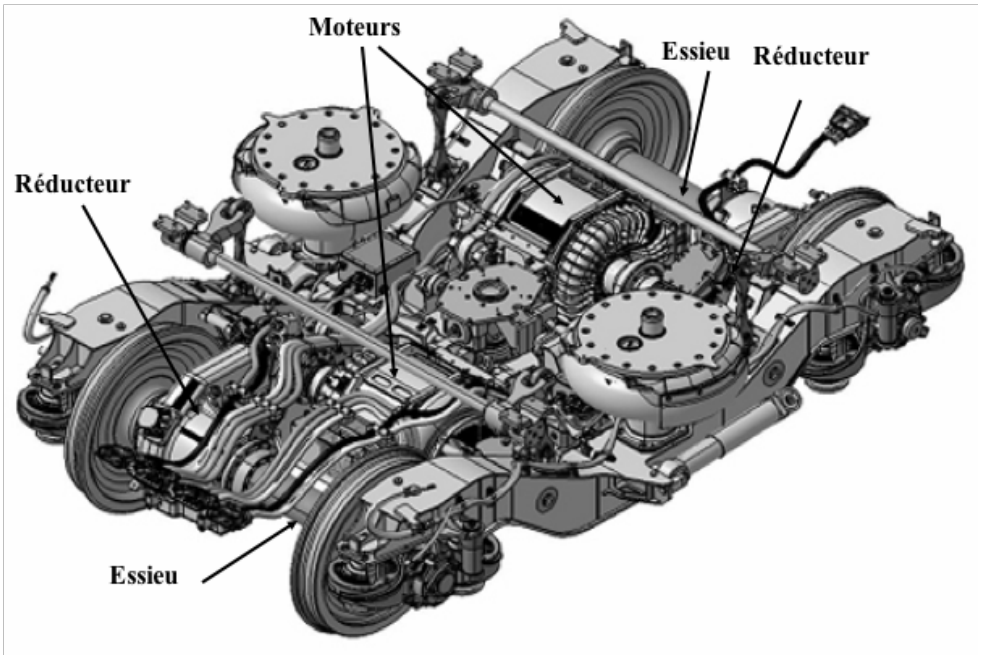


Figure 3 - Modèle d'un bogie moteur d'un AGV

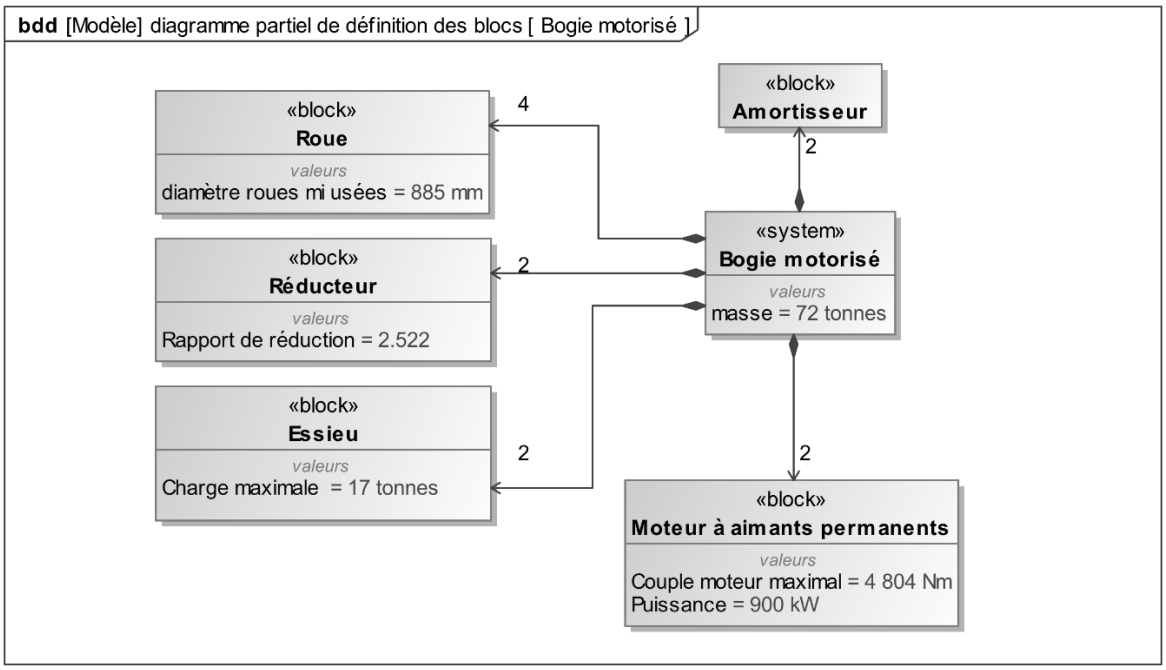


Figure 4 - Diagramme partiel de définition des blocs d'un bogie motorisé

Partie I - Vérification des performances de l'AGV

Objectif global : vérifier la capacité de l'AGV à répondre aux exigences du cahier des charges du point de vue des performances dynamiques attendues (id = " 1.1.2 ").

I.1 - Vérification des performances de l'AGV au démarrage

Objectif : vérifier le bon dimensionnement de la motorisation de l'AGV au démarrage.

Pour cette phase de démarrage, on étudie tout d'abord deux cas. Le premier est considéré comme le démarrage en mode normal : sur le plat. Le second, jugé extrême, consiste en une étude en mode dégradé : en pente maximale, avec deux bogies moteur non fonctionnels. Les deux phases envisagées doivent permettre d'atteindre une vitesse en fin de démarrage de 40 $km \cdot h^{-1}$.

I.1.1 - Validation de la capacité moteur en mode démarrage normal et dégradé

Objectif : déterminer le couple à fournir par chaque moteur au démarrage dans les conditions décrites dans l'exigence référencée id = " 1.1.2.1 ".

Pour cette phase de démarrage, on cherche donc à vérifier si les efforts de traction délivrés par les moteurs installés sur l'AGV sont en capacité de répondre aux éléments suivants du cahier des charges :

- démarrage en mode normal sur le plat avec une accélération constante notée a de 0,51 $m \cdot s^{-2}$;
- démarrage en mode dégradé avec une accélération constante notée a_p de 0,14 $m \cdot s^{-2}$ pour une rampe de 2,1 % avec perte de deux bogies moteur.

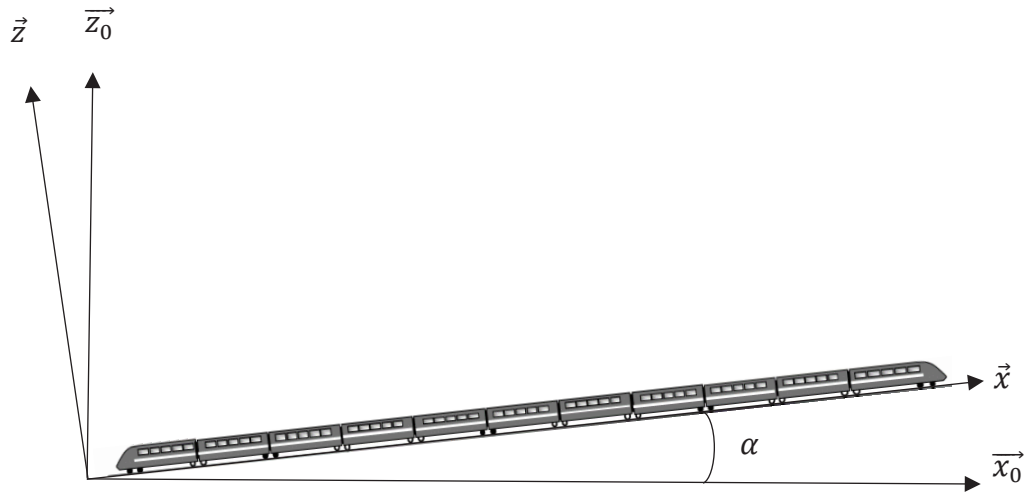


Figure 5 - AGV en translation rectiligne sur une rampe de α %

Hypothèses simplificatrices :

- le modèle est considéré comme plan, dans le plan de symétrie $(\overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{z_0})$;
- l'AGV est un solide indéformable en mouvement de translation rectiligne de direction $\vec{x}$ ou $\overrightarrow{x_0}$ suivant les phases de fonctionnement ;
- le bogie est solidaire de la caisse : les amortisseurs ne sont pas pris en compte ;
- le dévers de la voie est négligé ;

- l'expression de l'effort résistant à l'avancement du train $F_{rav}(t)$ est de la forme :

$$\boldsymbol{F_{rav}(t) = A + Bv(t) + Cv^2(t)}$$

où :

- $\overrightarrow{F_{rav}}$ est de même direction que la résultante des efforts de traction et de sens opposé ;
- A représente l'effort dû à la résistance au roulement des roues sur le rail et celle des paliers des essieux ;
- B représente le coefficient de résistance à la friction due notamment au frottement des boudins sur les faces latérales des rails ;
- C représente le coefficient de résistance à la pénétration dans l'air.

L'étude se fait en fin de démarrage lorsque la vitesse v de 40 km·h^{-1} est atteinte, les données et notations sont présentées dans le **tableau 1**.

	Symbole	**Unité**	**Valeur**
Nombre de bogies total	N_{bt}		12
Nombre de bogies motorisés	N_{bm}		5
Nombre d'essieux par bogie	$N_{es/b}$		2
Masse totale du train	M_t	t	437,1
F_{rav}	A	N	2 540
F_{rav}	B	N·km^{-1}·h	33,5
F_{rav}	C	N·km^{-1}·h^2	0,49
Accélération sur le plat à 40 km·h^{-1}	a	m·s^{-2}	0,51
Accélération en rampe à 40 km·h^{-1}	a_p	m·s^{-2}	0,14
Rampe de la voie	p	%	2,1
Accélération de la pesanteur	g	m·s^{-2}	9,81

Tableau 1 - Notations à adopter et données d'entrée

Q1. Isoler l'AGV, effectuer le Bilan des Actions Mécaniques Extérieures et appliquer le Principe Fondamental de la Dynamique. Écrire les expressions littérales de la totalité des efforts de traction F_t et F_{tp} appliquées aux roues motrices nécessaires au démarrage, respectivement sur le plat et pour une rampe de 2,1 % en fonction des données d'entrée du **tableau 1**. En déduire les valeurs numériques des efforts à produire par essieu moteur (somme des efforts au niveau des roues) notées respectivement F_{je} et F_{jpe} dans les conditions du cahier des charges.

La **figure 6** donne les éléments constituant la chaîne de transmission mécanique d'un bogie moteur et le **tableau 2** leurs caractéristiques respectives et les notations à adopter.

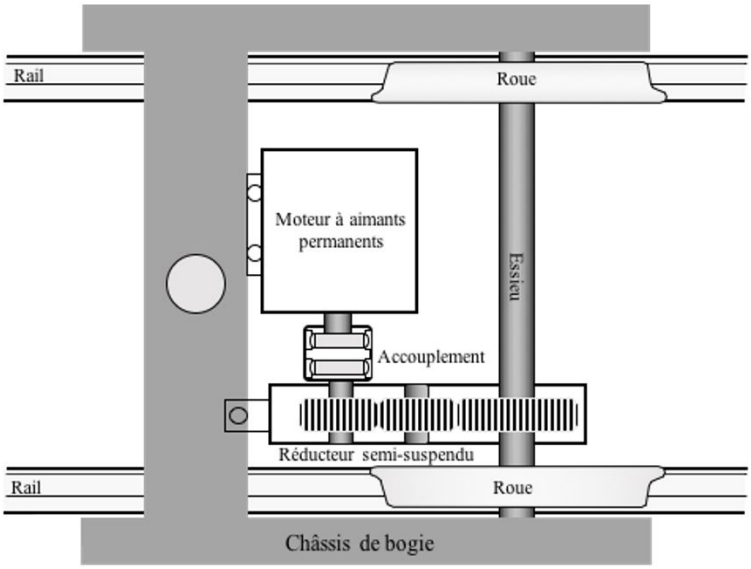


Figure 6 - Éléments constitutifs de la chaîne de transmission d'un essieu motorisé

	Symbole	**Unité**	**Valeur**
Couple moteur	C_m	N.m	
Vitesse moteur	Ω_m	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	
Couple à la roue	C_{roue}	N·m	
Vitesse ensemble essieu roue	Ω_{roue}	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	
Rendement ensemble accouplement et réducteur	η_r		0,97
Rapport réduction réducteur ($\Omega_\text{m}/\Omega_\text{roue}$)	k_g		2,522
Diamètre des roues (mi-usées)	D_{roue}	mm	885

Tableau 2 - Notations et caractéristiques de la transmission dans un bogie moteur

Q2. À l'aide de la **figure 6** et du **tableau 2**, calculer les couples moteurs C_m et C_{mp} à fournir respectivement sur le plat et pour une rampe de 2,1 % au démarrage.

La **figure 7** donne des valeurs maximales résultant d'essais réalisés sur les moteurs de l'AGV. La courbe avec les ■ représente l'évolution du couple moteur C_m en fonction de la vitesse N_m de ce dernier en $\mathrm{tr \cdot min^{-1}}$. La courbe avec les ▲ représente l'évolution de la puissance P_m en sortie du moteur en fonction de la vitesse N_m.

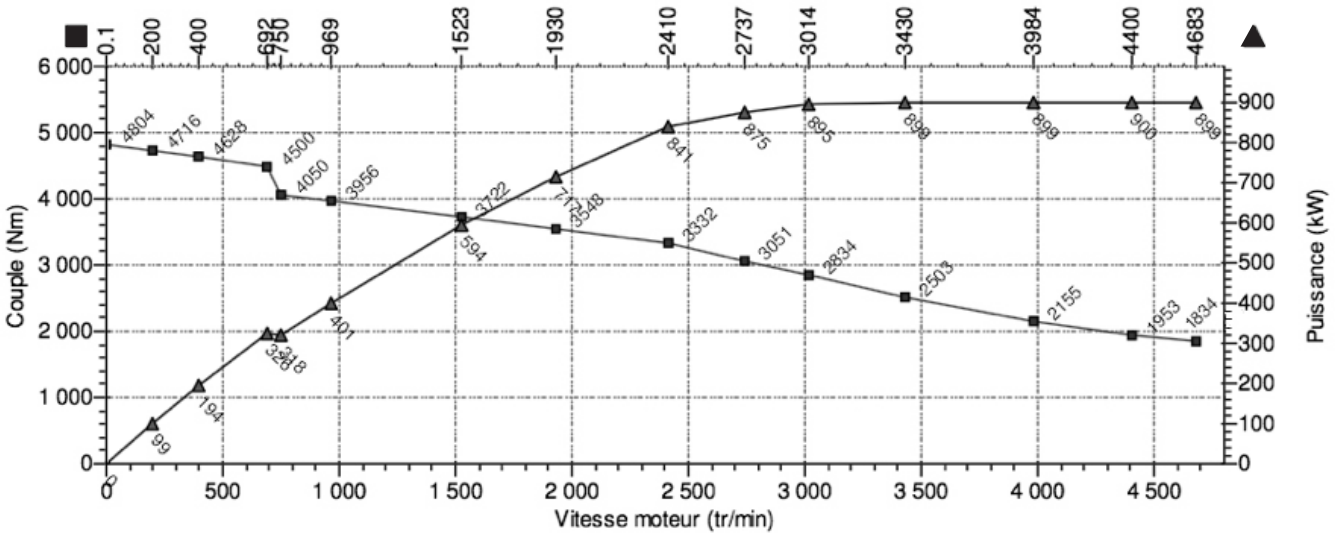


Figure 7 - Caractéristiques mécaniques des moteurs à aimants permanents de l'AGV (document constructeur)

Q3. En exploitant les courbes de la **figure 7**, conclure quant à la capacité des moteurs à fournir les couples nécessaires pour atteindre la vitesse v de 40 $\mathrm{km \cdot h^{-1}}$.

I.1.2 - Vérification de la condition d'adhérence au démarrage

Objectif : vérifier si l'effort à fournir au démarrage en mode normal peut se transmettre sans perte d'adhérence.

On cherche à déterminer la valeur du coefficient de frottement μ au niveau du contact roue-rail lors de la phase de démarrage en mode normal et à la comparer à la valeur maximale autorisée : $\mu_{max} = 0{,}18$.

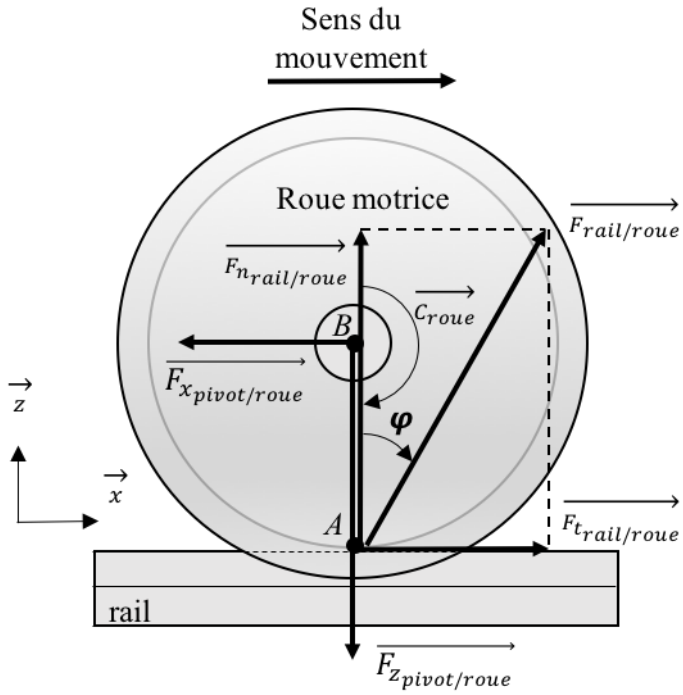


Figure 8 - Actions mécaniques sur la roue motrice isolée

Hypothèses simplificatrices :

- le problème sera considéré comme plan $(A, \vec{x}, \vec{z})$;
- la masse de l'AGV est équirépartie entre tous les essieux ;
- le contact de la roue motrice sur le rail est considéré comme ponctuel en A. L'action mécanique du rail sur la roue est modélisée par l'effort : $\overrightarrow{F_{rail/roue}}$;
- la liaison entre le réducteur et la roue motrice est une liaison pivot d'axe $(B, \vec{y})$. L'action mécanique de la liaison pivot sur la roue est modélisée par l'effort : $\overrightarrow{F_{pivot/roue}}$.

Q4. Par application du Principe Fondamental de la Dynamique au train isolé, écrire en fonction des données d'entrée décrites dans le **tableau 1**, l'expression littérale de l'effort normal du rail sur une roue, noté : $\overrightarrow{F_{n_{rail/roue}}}$ représenté en **figure 8**.

Q5. En vous aidant de vos réponses aux **questions Q1** et **Q4**, déterminer la valeur de μ, coefficient de frottement au niveau du contact roue-rail. Conclure quant à la capacité de l'AGV à respecter l'adhérence limite lors de la phase de démarrage.

I.2 - Vérification des performances de l'AGV à vitesse maximale

Objectif : montrer que la chaîne de traction permet à l'AGV d'assurer sa mission sur le secteur où le train est à sa vitesse maximale sur le plat.

Les exigences de l'exploitation contraignent l'AGV à rouler à la vitesse maximum v_{max} de 300 km·h^{-1} tout en garantissant une accélération résiduelle de 0,08 m·s^{-2}, c'est-à-dire avec une réserve potentielle d'accélération pour le train.

Pour cette étude, on travaille donc sur la chaîne d'énergie d'un des dix moteurs de traction de l'AGV qui comprend, depuis le bus continu jusqu'à la roue, les éléments illustrés en **figure 9** :

- un onduleur dit de " traction " dont le rôle est le contrôle du transfert de l'énergie électrique depuis le bus continu jusqu'au moteur ;
- un moteur dit de " traction " dont le rôle est de fournir le couple et la vitesse au réducteur ;
- un réducteur dont le rôle est d'adapter la vitesse de rotation du moteur à celle des roues tout en assurant le transfert de la puissance mécanique ;
- un essieu comprenant les deux roues qui permettent la transmission de la puissance aux rails.

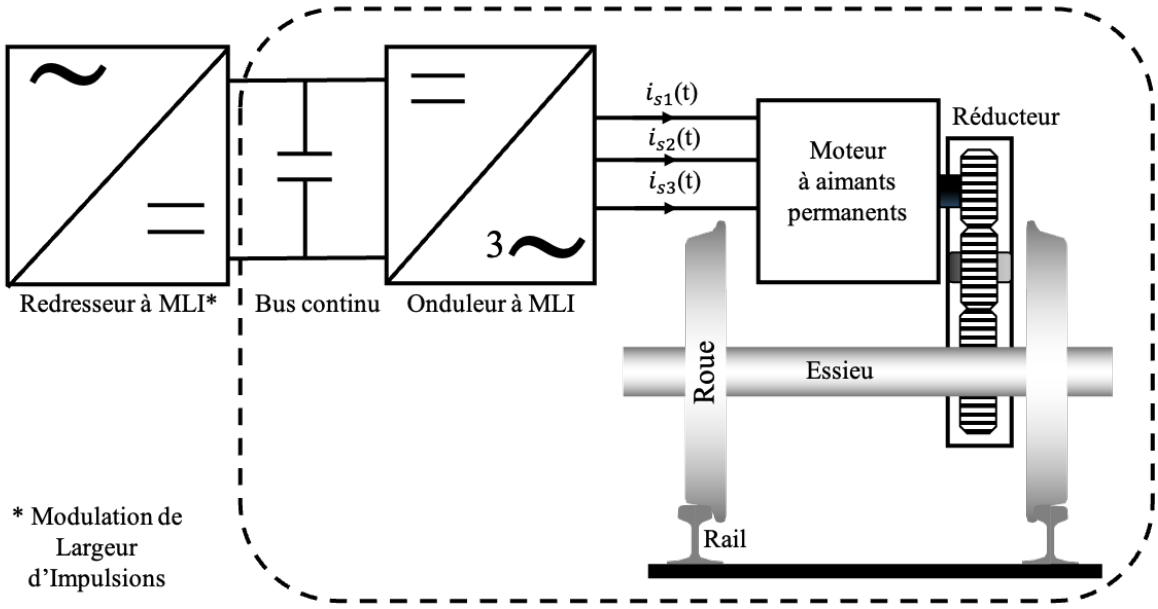


Figure 9 - Domaine d'étude de la chaîne de traction

I.2.1 - Détermination de la puissance moteur pour le point de fonctionnement considéré

Objectif : calculer la puissance nécessaire aux roues (contact roue-rail) pour atteindre la vitesse maximale v_{max} de 300 km·h^{-1} sur le plat avec l'accélération résiduelle de 0,08 m·s^{-2} et vérifier que la motorisation de l'AGV est en capacité de tenir cette contrainte.

Q6. Déterminer la puissance de traction totale P_T à fournir aux roues des essieux motorisés et en déduire la puissance de traction par essieu moteur P_{TEM}.

Q7. En déduire alors le couple moteur C_m nécessaire et conclure quant à la possibilité du moteur à pouvoir fournir le couple et la puissance P_m au regard des courbes données à la **figure 7**.

Pour la suite, on prendra le couple moteur C_m à fournir pour atteindre les 300 km·h^{-1} sur le plat, à savoir C_m = 1 655 N·m.

I.2.2 - Calcul de la valeur efficace du courant dans une phase du moteur

Objectif : évaluer la valeur efficace I_s du courant $i_{s1}(t)$ dans une phase d'un des moteurs de traction au point de fonctionnement considéré et vérifier qu'il est bien inférieur au courant de démarrage.

Le moteur étant triphasé et supposé équilibré, on ne raisonnera que sur une seule phase de ce dernier : la phase 1. Les grandeurs électriques $v_{s1}(t)$, $i_{s1}(t)$, $e_1(t)$ liées à cette phase sont supposées sinusoïdales et on définit :

- I_s est la valeur efficace de l'intensité des courants statoriques ; $\underline{I_{s1}}$ est le complexe associé à $i_{s1}(t)$;
- V_s est la valeur efficace des tensions simples (entre phase et neutre) statoriques ; $\underline{V_{s1}}$ est le complexe associé à $v_{s1}(t)$;
- E_v est la valeur efficace des f.é.m. (forces électromotrices) produites à vide par la variation du flux rotorique $\phi_r(t)$; $\underline{E_{v1}}$ est le complexe associé à $e_{v1}(t)$;
- φ est le déphasage du courant instantané $i_{s1}(t)$ par rapport la tension $v_{s1}(t)$;
- ψ est le déphasage du courant instantané $i_{s1}(t)$ par rapport à la f.é.m. $e_{v1}(t)$ et ceci dans la phase considérée ;
- δ est le déphasage de la f.é.m. $e_{v1}(t)$ par rapport à la tension $v_{s1}(t)$.

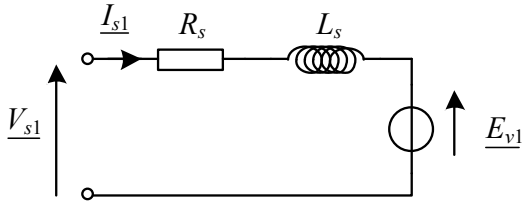
Par ailleurs, on suppose le moteur sans pertes, par conséquent $C_m = C_{em}$ avec C_{em} défini dans le **tableau 3**.

	Symbole	**Unité**
Couple électromagnétique moyen d'interaction entre le champ tournant statorique et le champ tournant rotorique	C_{em}	N·m
Nombre de paires de pôles de la machine	p	
Valeur efficace du flux $\phi_r(t)$ capté par un enroulement du stator et produit par les pôles du rotor	ϕ_r	Wb
Pulsation électrique des grandeurs statoriques	ω_s	rad·s^{-1}
Inductance dite synchrone du moteur	L_S	H

Tableau 3 - Notations

Hypothèses de travail :

- le moteur de traction utilisé (réf : LCS 3550 C) est un moteur synchrone à aimants permanents, de tensions nominales 1 605 V/ 2 780 V et possédant $p = 6$ paires de pôles. Son rendement η sera supposé unitaire ;
- le modèle monophasé de la machine synchrone et les valeurs des éléments du modèle sont donnés sur le schéma de la **figure 10**, où R_s représente la résistance de la phase 1 du moteur et L_s son inductance dite " synchrone " (données constructeur) ;
- la chute de tension $R_s I_s$ sera négligée devant les autres tensions au point de fonctionnement considéré.



R_s= 0,082 26 Ω
L_s= 2,858 mH

Figure 10 - Schéma monophasé équivalent du moteur 12 LCS 3550 C

Les stratégies de pilotage du moteur synchrone à partir de la mesure de la position du rotor sont données ci-après :

- Stratégie de pilotage 1 : tant que $V_S < V_{Smax}$, la stratégie de pilotage permet le contrôle du couple C_{em} en asservissant la valeur efficace I_s des courants statoriques tout en maintenant : $\psi = 0$. Dans ce cas, le couple consigne sera atteint avec une valeur efficace I_s minimale.
  L'expression du couple consigne C_{emc} est alors la suivante :
  $$C_{emc} = 3p\phi_r I_{sc} \cos(\psi_c),$$
  où I_{sc} est la valeur efficace consigne du courant statorique et avec $\psi_c = 0$.

- Stratégie de pilotage 2 : dès que $V_S = V_{Smax}$, la stratégie de pilotage permet le contrôle du couple C_{em} en asservissant δ. Cette loi de commande permet alors de travailler à V_{Smax}.
  L'expression du couple consigne C_{emc} est ainsi la suivante :
  $$C_{emc} = 3 \frac{V_{Smax}}{\Omega_m} \frac{\phi_r}{L_s} sin(\delta_c)$$ avec δ_c la consigne.

Par ailleurs, la caractéristique " moteur " du constructeur issue d'essais sur banc est donnée dans la **figure 11**.

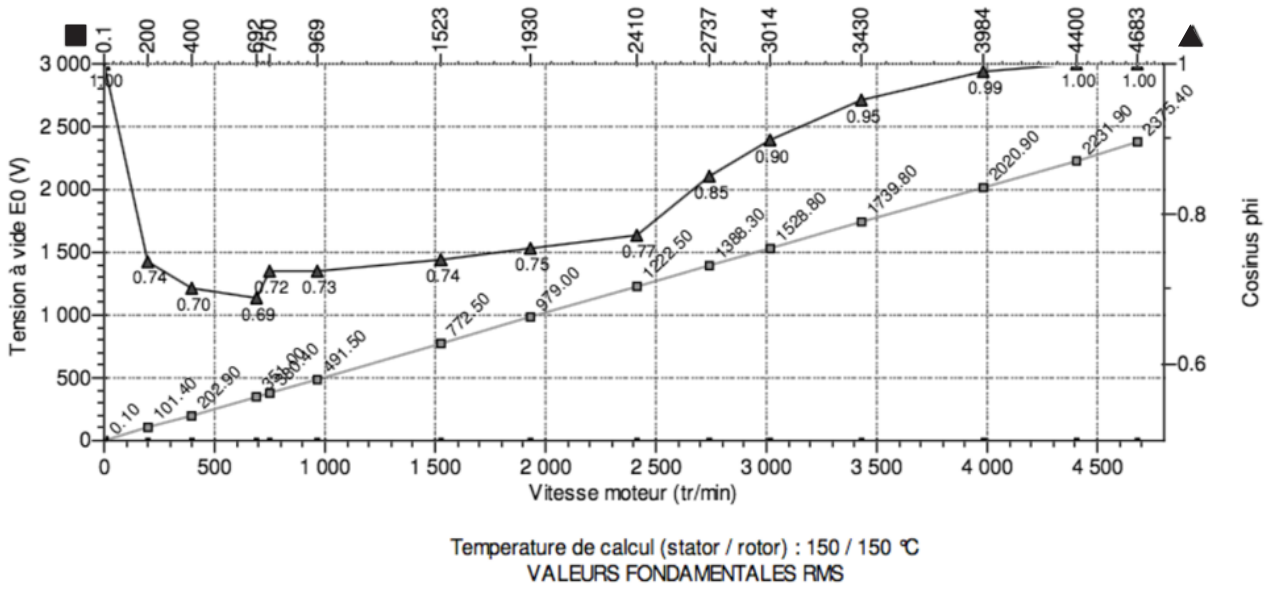


Figure 11 - Évolutions de la f.é.m. $\boldsymbol{E_v}$ (appelée $\boldsymbol{E0}$ sur la figure) et du facteur de puissance $\boldsymbol{cos}\varphi$ (appelé cosinus phi) en fonction de la vitesse du moteur (document constructeur)

La courbe avec les ■ représente l'évolution de la valeur efficace $\boldsymbol{E_v}$ de la f.é.m. induite à vide dans une phase du moteur en fonction de la vitesse N_m.
La courbe avec les ▲ représente l'évolution du facteur de puissance $cos\varphi$ pour une phase du moteur en fonction de la vitesse N_m.

Q8. En exploitant la **figure 11**, donner la valeur efficace $\boldsymbol{E_v}$ de la f.é.m. pour la vitesse du train roulant à v_{max} de 300 km·h^{-1}. Après avoir écrit la relation $e_{v1}(t)=\frac{d\Phi_r(t)}{dt}$ en complexe et y avoir introduit le nombre de paires de pôles p, en déduire la valeur efficace du flux ϕ_r.

Q9. Après analyse des caractéristiques " moteur " du constructeur représentées dans la **figure 12**, donner et justifier le choix de la stratégie de pilotage (1 ou 2) à 300 km·h^{-1}.

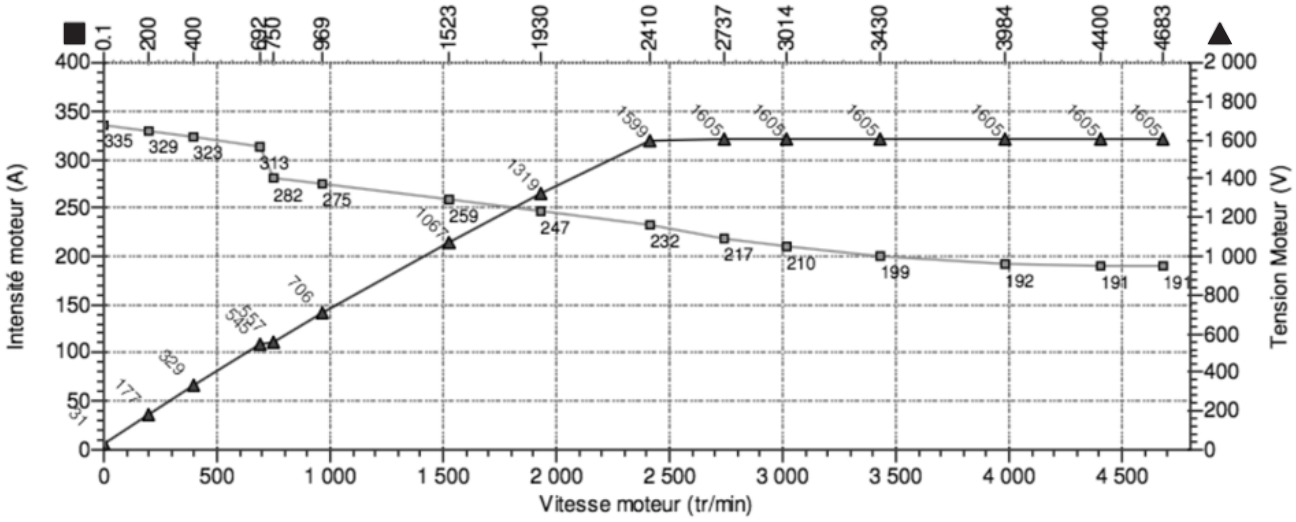


Figure 12 - Évolutions de la tension $\boldsymbol{V_S}$ et du courant $\boldsymbol{I_S}$ dans le moteur

Sur la **figure 12**, la courbe avec les ▲ représente l'évolution de la valeur efficace V_S de la tension aux bornes d'une phase du moteur en fonction de la vitesse N_m. La courbe avec les ■ représente l'évolution de l'intensité I_s dans une phase du moteur en fonction de la vitesse N_m.

Q10. Déduire de la **Q9**, la valeur de δ_c pour obtenir le couple C_{emc} = 1 655 N·m.

Q11. Exprimer littéralement la loi des mailles complexe dans le modèle monophasé proposé sur la **figure 10**. Rappel : on négligera la chute de tension $R_s I_s$.

Q12. En tenant compte des hypothèses de travail et en choisissant $\underline{E_{v1}}$ comme référence des phases, construire le diagramme vectoriel associé à la loi des mailles en prenant une échelle correspondant à 5 cm pour 1 000 V. Placer alors $\underline{V_{s1}}$ en vous aidant de la **Q10**, puis $j \cdot X_S \cdot \underline{I_{s1}}$ et faire apparaître alors les différents angles ψ, δ et φ.

Q13. À partir du diagramme vectoriel précédemment établi, mesurer la chute de tension $L_s \omega_s I_s$. En déduire la valeur efficace I_s du courant dans une phase du stator du moteur. La comparer alors à la valeur efficace maximale admissible par le moteur obtenue au démarrage.

Q14. À partir du diagramme vectoriel, déterminer le facteur de puissance $cos\varphi$ au point de fonctionnement. Est-il conforme à celui donné sur la courbe constructeur de la **figure 11** ?

I.2.3 - Calcul de la valeur efficace du courant dans un transistor IGBT *(Insulated Gate Bipolar Transistor)* de l'onduleur et de sa tenue en tension

Objectif : vérifier que les IGBT de l'onduleur sont bien dimensionnés pour le point de fonctionnement considéré, c'est-à-dire pour le moteur fonctionnant à la vitesse maximale v_{max} de 300 km·h^{-1}.

L'onduleur de traction de conception Alstom est du type " ONIX 233 " ; sa tension continue nominale d'entrée est de 3 600 V avec des IGBT 6,5 kV - 400 A. En traction ferroviaire, en fonction de la vitesse du train, la stratégie de commande des transistors de l'onduleur change.

Les raisons en sont les suivantes :
- limiter le courant crête IGBT de l'onduleur ;
- limiter les pertes par commutation des IGBT (fréquence de commutation trop élevée) ;
- limiter les pertes dues aux harmoniques de courant dans le moteur ;
- éviter certains courants harmoniques du côté de l'entrée de l'onduleur ;
- éviter des battements MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions).

Les différentes stratégies mises en œuvre sont les suivantes comme le montre la **figure 13** :
- MLI asynchrone 650 Hz ;
- MLI synchrone 15 découpes ;
- MLI calculée à 5, 4, 3, 2 ou 1 angles de commutations ;
- la pleine onde (PO), à partir de 240 Hz et jusqu'à 460 Hz .

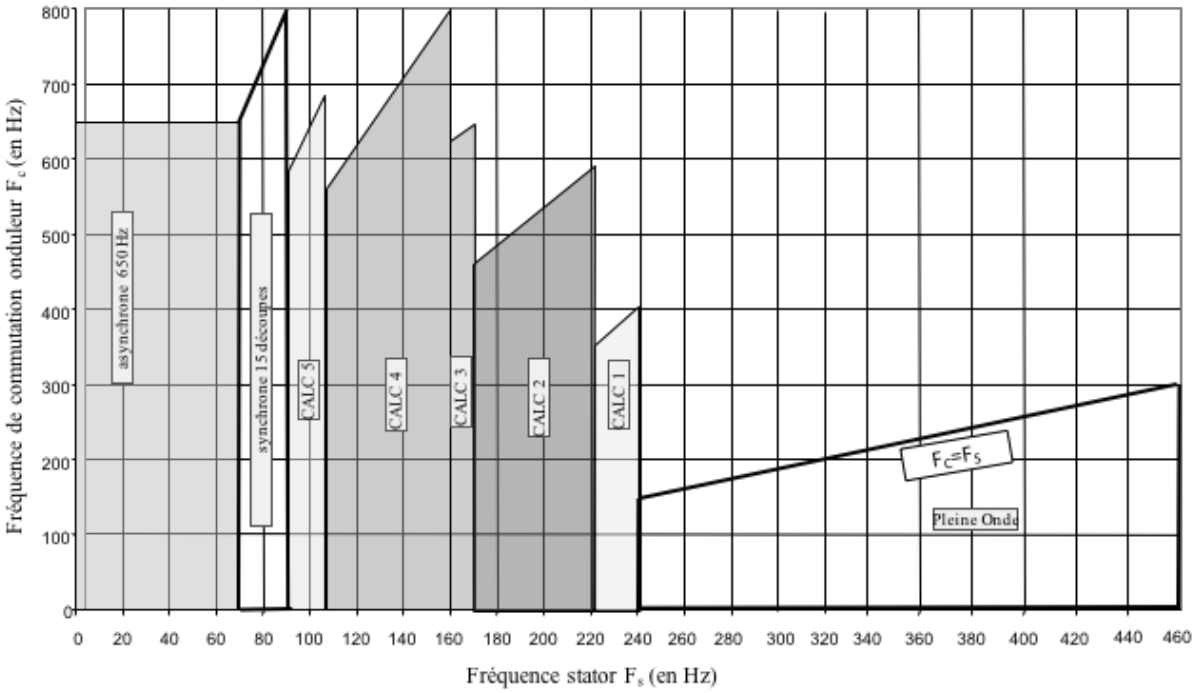


Figure 13 - Stratégies de commande de l'onduleur de traction de l'AGV

Q15. À l'aide de la vitesse du rotor N_m et du nombre de paires de pôles p, donner la fréquence F_s des grandeurs électriques statoriques du moteur. En déduire parmi les stratégies de commande présentées sur la **figure 13**, celle utilisée pour le point de fonctionnement considéré.

La structure de l'onduleur triphasé est présentée **figure 14**. La stratégie de MLI utilisée implique des tensions composées dont la forme d'onde est donnée sur la **figure 15** avec $U_{DC} =$ 3 600 V. On considérera que les transistors ont reçu une commande de niveau logique " 1 " pour la fermeture et un niveau logique " 0 " pour l'ouverture.

Q16. En vous appuyant sur les **figures 14** et **15**, donner pour les 6 phases de fonctionnement sur une période T, la séquence d'ouverture et de fermeture des différents IGBT en complétant le chronogramme sur le **Document Réponse DR1** par des " 0 " et des " 1 ".

Q17. Quelle est la valeur de la tension $v_{CE}\,(t)$ aux bornes d'un IGBT lorsque ce dernier est bloqué ?

Le **DR2** donne l'allure de la tension $v_{s1}(t)$ aux bornes d'un enroulement.

Q18. En prenant un facteur de puissance unitaire et en supposant le courant $i_{s1}(t)$ sinusoïdal de valeur efficace I_S trouvée à la **Q13**, tracer l'allure de ce dernier sur le **DR2** en précisant la valeur de I_{Smax}.

Q19. En vous aidant des résultats des **Q16** et **Q18**, tracer sur ce **DR2** l'allure du courant $i_{CE1}(t)$ dans le transistor T1. Calculer alors la valeur efficace I_{CE} du courant dans le transistor.

Q20. Conclure quant à la capacité de l'IGBT à tenir le point de fonctionnement étudié en termes de tension et de courant.

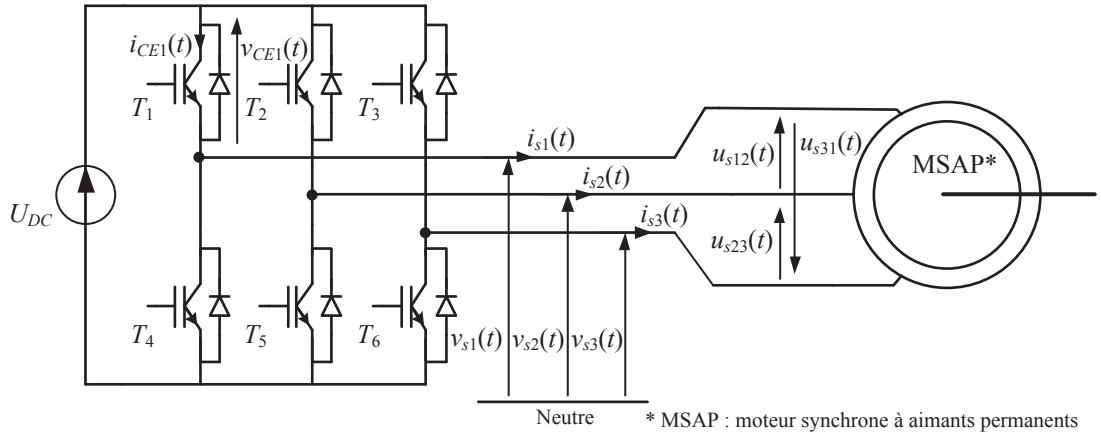


Figure 14 - Structure de l'onduleur triphasé

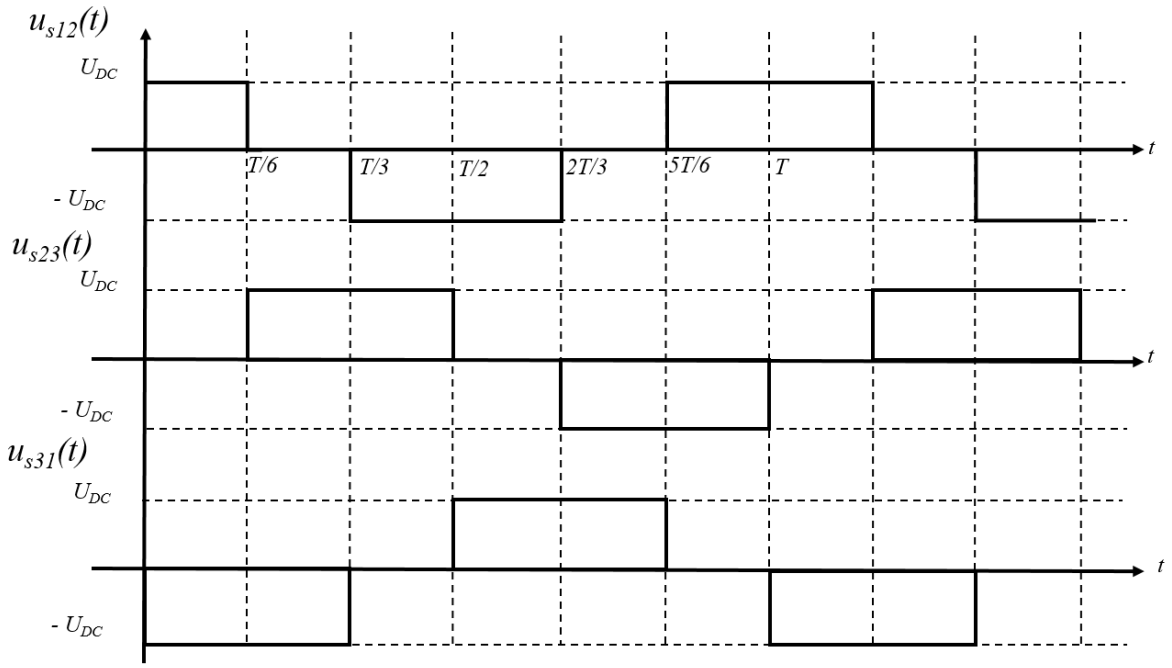


Figure 15 - Tensions composées produites par l'onduleur

Partie II - Étude du réducteur

Objectif global : valider le choix du réducteur assurant la transmission de puissance du moteur à l'essieu au regard des éléments du cahier des charges.

II.1 - Modélisation de l'architecture du réducteur

Objectif : appréhender et justifier la modélisation proposée de l'architecture du réducteur et valider les choix effectués d'un point de vue cinématique.

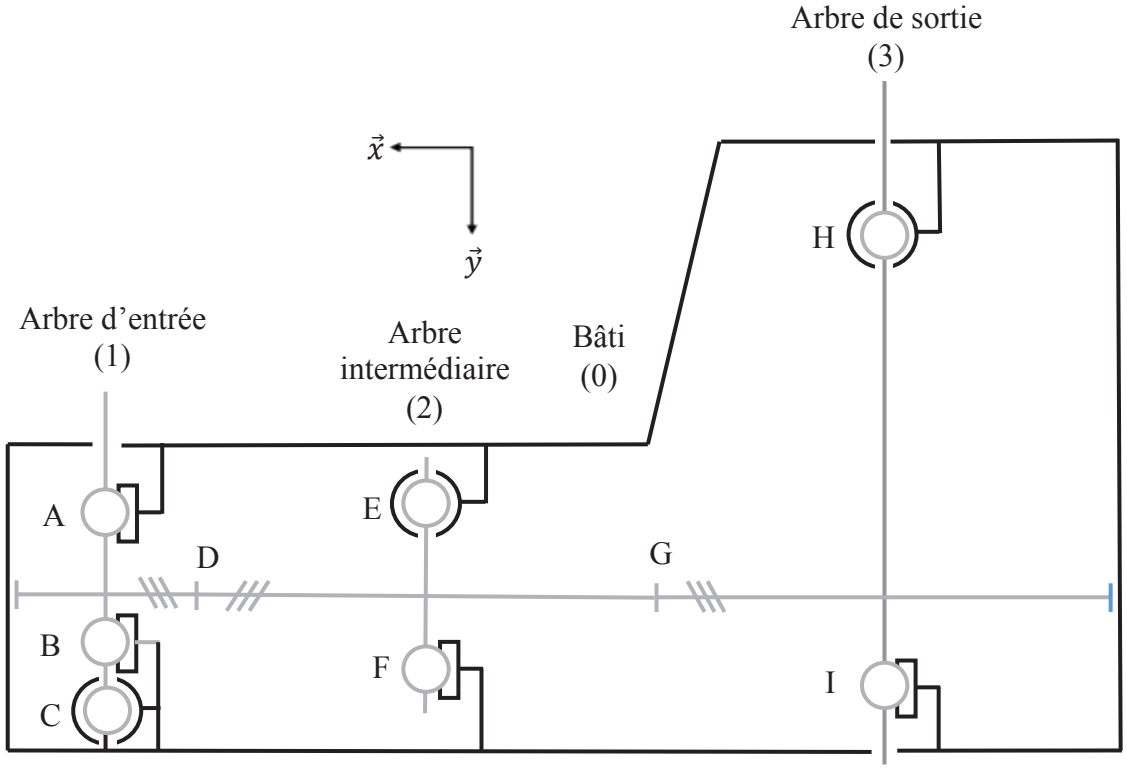


Figure 16 - Modèle cinématique de l'architecture du réducteur

	Notation	Arbre d'entrée (1)	Arbre intermédiaire (2)	Arbre de sortie (3)
Nombre de dents	Z	$Z_1 = 23$	$Z_2 = 57$	$Z_3 = 58$
Angle de pression en degrés (°)	α	20		
Angle d'hélice en degrés (°)	β	15		
Module en millimètres (mm)	m	7		
Coefficient de largeur de denture	k	$k_1 = 11$	$k_2 = 11,5$	$k_3 = 11$
Limite élastique en Mégapascal (MPa)	σ_e	835		

Tableau 4 - Caractéristiques des engrenages

Une étude préalable du dessin d'ensemble du réducteur présenté en **annexe 2** a permis l'obtention de son modèle cinématique d'architecture détaillé en **figure 16**. Toutes les liaisons seront considérées comme parfaites et on assimilera les contacts entre les roues dentées du réducteur en D et en G à des liaisons sphère plan parfaites.

Q21. Réaliser le graphe des liaisons du modèle cinématique de l'architecture du réducteur sans détailler les éléments caractéristiques des liaisons en D et en G. Déterminer le degré d'hyperstatisme h de la boucle bâti (0) – arbre d'entrée (1) en détaillant les étapes de calcul. Justifier le recours à une solution technologique hyperstatique dans notre cas d'application.

Q22. Donner l'expression du rapport de réduction du réducteur $k_g = \frac{N_{mot}}{N_{essieu}}$, rapport des vitesses de rotation de l'arbre moteur et de l'essieu exprimées en $tr \cdot min^{-1}$, en fonction du nombre de dents des arbres du réducteur, puis calculer sa valeur. Calculer alors la vitesse du train théorique $V_{\max th}$ correspondant au régime moteur maximal $N_{mot\,max}$ sur la **figure 7** dans le cas de roues mi-usées tel qu'indiqué dans le **tableau 2** et la comparer à la vitesse d'exploitation à atteindre v_{max} de 300 $km \cdot h^{-1}$ sur le parcours, puis conclure.

II.2 - Dimensionnement de l'arbre d'entrée (1)

Objectif : valider le bon dimensionnement des dents du pignon de l'arbre d'entrée au regard du couple maximal à transmettre.

Pour cette étude, on se placera à couple moteur maximal à savoir $C_{mot\,max} = 4\,800$ N·m, pour un déplacement du train à vitesse constante en marche avant, ce qui correspond à un sens de rotation direct de l'arbre d'entrée du réducteur. Compte tenu des jeux radiaux entre la bague extérieure du roulement en C et son logement, la liaison sphérique sera désormais modélisée par une liaison sphère plan de normale $\vec{y}$, les dentures sont toutes hélicoïdales.

Notation : pour la suite de l'étude, le torseur des actions mécaniques transmissibles d'un solide (I) vers un solide (J) en K sera écrit systématiquement selon le formalisme suivant :

$$\{\tau_{I\to J}\} = \begin{Bmatrix} X_{K\,IJ} & L_{K\,IJ} \\ Y_{K\,IJ} & M_{K\,IJ} \\ Z_{K\,IJ} & N_{K\,IJ} \end{Bmatrix}_{(K\,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} .$$

De même, l'effort transmissible d'un solide (I) vers un solide (J) en K sera noté $\overrightarrow{F_{K_{I\to J}}}$.

Q23. Isoler l'arbre d'entrée (1) et effectuer le Bilan des Actions Mécaniques Extérieures appliquées à celui-ci. Pour les liaisons considérées, écrire leurs torseurs des actions mécaniques transmissibles en leurs points d'application respectifs. Les composantes de l'action de l'arbre intermédiaire (2) sur l'arbre d'entrée (1) ne seront pas développées.

Q24. Préciser l'équation du Principe Fondamental de la Dynamique à écrire pour déterminer l'expression de la composante tangentielle de l'effort appliqué par l'arbre intermédiaire sur l'arbre d'entrée en D noté $\overrightarrow{F_{T_{D_{2\to1}}}}$ en fonction du couple moteur C_{moteur} et des paramètres du système présentés dans le **tableau 4**. Déterminer cette expression et faire l'application numérique pour le couple moteur maximal.

On souhaite désormais vérifier la bonne tenue des dents du pignon de l'arbre d'entrée (1) sous sollicitation maximale. Pour ce faire, on propose d'adopter le modèle présenté en **figure 17**. La dent est assimilée à une poutre de section rectangulaire encastrée à une extrémité. Le cas de chargement sera semblable à celui d'une denture droite : seule la **composante tangentielle** $\overrightarrow{F_{T_{D_{2\to1}}}}$ de l'effort résultant de l'action mécanique de l'arbre intermédiaire (2) sera prise en compte en D.

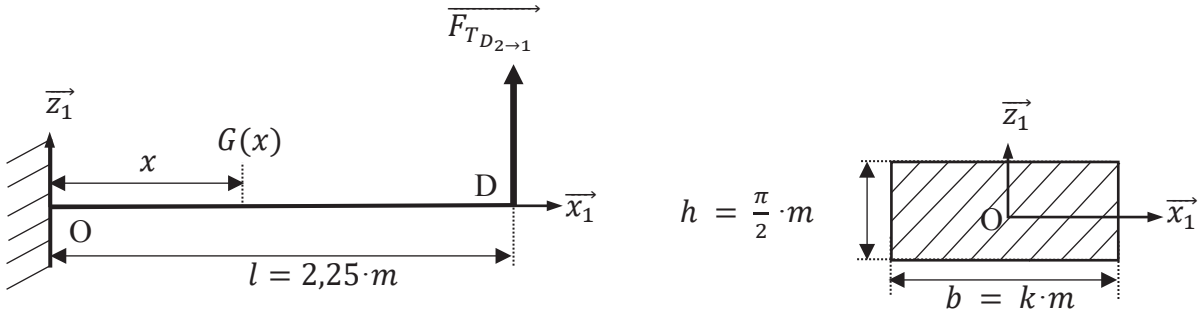


Figure 17 - Modèle poutre d'une dent du pignon de l'arbre d'entrée

Q25. Écrire la forme du torseur de cohésion de la poutre $\{\tau_{cohésion}\}$ en $G(x)$ dans la base $(\overrightarrow{x_1}, \overrightarrow{y_1}, \overrightarrow{z_1})$ en détaillant l'expression de ses composantes en fonction du paramétrage proposé en **figure 17**. En déduire le type de sollicitation auquel la poutre est soumise.

Pour la suite de l'étude, on considérera que l'expression de la contrainte en un point $G(x)$ d'une section droite de la poutre notée σ_x est de la forme :

$$\sigma_x = -\frac{Mf_y \times z}{I_{Gy}}$$

avec :

- Mf_y : moment fléchissant autour de l'axe $(G, \overrightarrow{y_1})$;
- z : hauteur du point considéré dans la section droite ;
- I_{Gy} : moment quadratique de la poutre autour de l'axe $(O, \overrightarrow{y_1})$ en mm^4. Pour rappel $I_{Gy} = \frac{bh^3}{12}$ dans le cas d'une section rectangulaire.

Q26. Pour quel point de la poutre la contrainte est-elle maximale ? Donner l'expression de cette contrainte maximale en fonction de k, m et $\left\| \overrightarrow{F_{T_{D_{2\to1}}}} \right\|$, puis faire l'application numérique pour $\left\| \overrightarrow{F_{T_{D_{2\to1}}}} \right\| = 59\,600$ N, en considérant les valeurs caractéristiques des engrenages présentées dans le **tableau 4** et conclure.

II.3 - Détermination de la durée de vie des roulements de l'arbre de sortie (3)

Objectif : valider le bon dimensionnement des roulements de l'arbre de sortie du réducteur au regard de la fréquence des opérations de maintenance prévue par le constructeur et associée à l'exigence id = " 1.3 ".

Q27. Au moyen du dessin d'ensemble du réducteur présenté en **annexe 2** et de la **figure 16** pour le roulement à rouleaux cylindriques de l'arbre de sortie (3) du réducteur en I :
- calculer les valeurs maximale et minimale du jeu entre l'essieu et la bague intérieure ;
- en déduire la nature du montage (serré ou glissant) entre l'essieu et la bague intérieure du roulement.

Pour la suite de l'étude, on considérera que les bagues intérieures et extérieures des roulements en I et H sont montées serrées, respectivement sur l'essieu et sur le bâti.

Q28. En vous aidant de l'**annexe 3** et de la **figure 16**, compléter la représentation simplifiée en demi-vue de la liaison entre l'essieu et le corps du réducteur donnée en **DR3**, en y faisant figurer les informations suivantes :
- le type de roulement représenté par son symbole simplifié ;
- la position des arrêts axiaux représentés par des rectangles verticaux indépendamment de la solution technologique utilisée ;
- une croix pour une bague ajustée serrée par rapport à son logement.

Valider ce montage en termes de transmission d'efforts axiaux, en représentant par des flèches le cheminement de ceux auxquels est soumis l'essieu et qui sont repris par le corps du réducteur.

Une étude complémentaire a permis de déterminer, entre autres, les efforts subis par les paliers en H et I. Les résultats de celle-ci sont présentés dans le **tableau 5**.

Référence du roulement	Capacités	Composantes des efforts		
FC 12241 en H	C_0 = 1 560 kN C = 640 kN	X_H = - 1 680 N	Y_H = - 6 603 N	Z_H = 4 688 N
NU 1944 en I	C_0 = 540 kN C = 360 kN	X_I = 10 080 N	Y_I = 0 N	Z_I = 17 806 N

Tableau 5 - Capacités et composantes des efforts sur les roulements

Q29. En vous aidant de la démarche décrite dans la documentation technique présentée en **annexe 4**, déterminer la durée de vie des paliers en I puis en H, exprimée en millions de kilomètres, dans l'hypothèse de roues mi-usées tel qu'indiqué dans le **tableau 2**. Le cahier des charges impose une inspection des roulements tous les 4,5 millions de kilomètres. Comparer les valeurs obtenues avec les exigences du cahier des charges et conclure.

Partie III - Asservissement de couple

Objectif global : aborder la stratégie d'asservissement de couple des moteurs de l'AGV, hors démarrage, à l'aide d'un modèle analogique élémentaire ainsi que le choix et la mise en œuvre du capteur angulaire associé.

III.1 - Stratégie de l'asservissement

Objectif : valider les performances de l'asservissement en couple des moteurs de l'AGV.

Afin d'assurer la variation ou le maintien de la vitesse de l'AGV, le moteur d'un essieu délivre un couple imposé par la grandeur de consigne C_{emc} d'une boucle d'asservissement. Pour des raisons propres à la traction ferroviaire, le temps de réponse de l'asservissement de couple devra être inférieur à la dizaine de millisecondes. L'asservissement pour la maîtrise du couple ne peut donc plus se faire comme habituellement sur les valeurs instantanées de grandeurs sinusoïdales statoriques. Une solution consiste, par application de la transformation de Park, à travailler avec un modèle dynamique diphasé de la machine synchrone dans un repère tournant, d'axes *d* et *q*, lié au rotor comme le montre la **figure 18**.
Pour un même état magnétique de la machine, les grandeurs statoriques sinusoïdales ($i_{s1}(t)$, $i_{s2}(t)$, $i_{s3}(t)$) deviennent des grandeurs continues ($i_d(t)$, $i_q(t)$) après transformation de Park. Cette dernière réclame la connaissance de l'angle électrique $\theta_e(t)$. Les équations caractéristiques de la machine synchrone dans ce nouveau repère, nommé repère de Park sont :

$$v_d(t) = R_s i_d(t) + L_d \frac{di_d(t)}{dt} - \omega_s L_d i_q(t)$$
$$v_q(t) = R_s i_q(t) + L_d \frac{di_q(t)}{dt} + \omega_s L_d i_d(t) + \omega_s \phi_r$$
$$c_{em}(t) = \sqrt{3} p \phi_r i_q(t) = K_C i_q(t)$$

avec $L_d = L_s$, l'inductance synchrone de la machine.

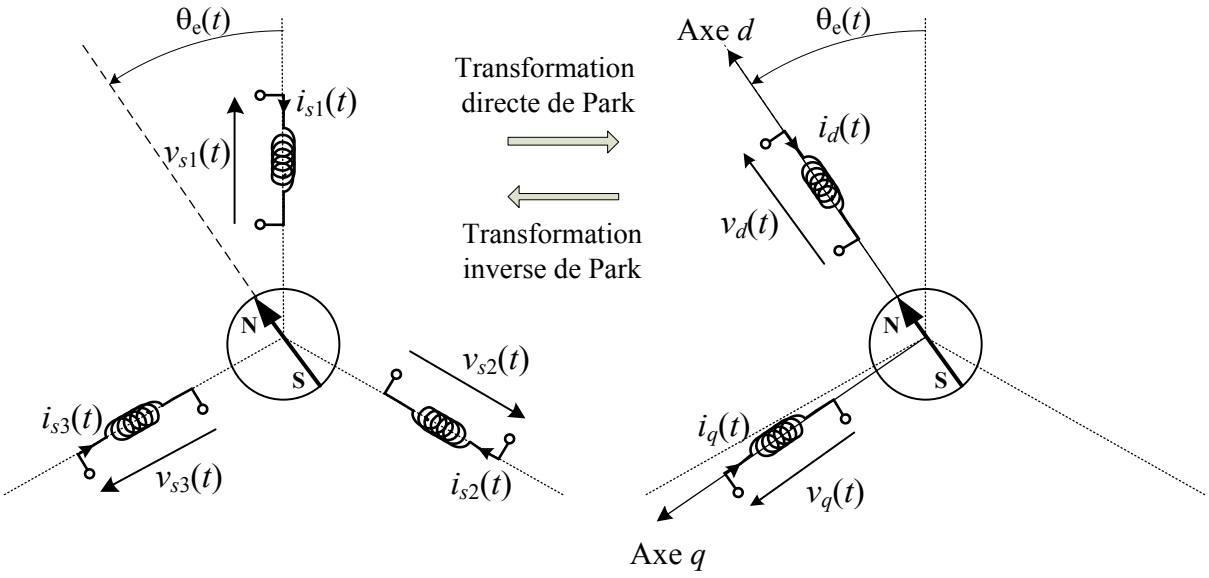


Figure 18 - Représentations des modèles triphasé et diphasé de la machine synchrone

Q30. En s'appuyant sur l'expression du couple pour la stratégie de pilotage 1 donnée page 10, rappeler quels sont les paramètres du courant à imposer afin d'obtenir un couple constant.

Q31. Toujours pour un couple constant, quel est alors l'intérêt d'asservir les courants $i_d(t)$ et $i_q(t)$ dans le domaine de Park ?

Le **DR4** illustre partiellement l'asservissement de couple pour lequel $i_{dc}(t)$ est fixé à 0. Les tensions de commande de l'onduleur $v_{1com}(t)$, $v_{2com}(t)$ et $v_{3com}(t)$ imposent respectivement les valeurs instantanées des trois tensions $v_{s1}(t)$, $v_{s2}(t)$ et $v_{s3}(t)$.

Q32. À partir des mesures de $i_{dm}(t)$, i_{qm}(t) et des consignes $C_{emc}(t)$ et $i_{dc}(t)$, avec $i_{dc}(t) = 0$, ajouter sur le **DR4** deux comparateurs et deux correcteurs pour obtenir l'asservissement de couple voulu.

Le schéma bloc associé à l'asservissement du courant i_q se résume, après optimisation, à celui proposé à la **figure 19** avec :

- K_{ond}, un gain modélisant l'onduleur ;
- $C(p) = K\left(1+\frac{1}{\tau_i p}\right)$, la fonction de transfert du correcteur avec K et τ_i ses deux constantes caractéristiques.

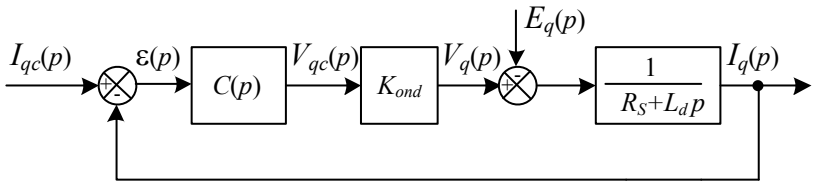


Figure 19 - Asservissement de courant

Pour la suite du sujet, l'entrée secondaire, $e_q(t) = \omega_s \phi_r$, sera supposée nulle.

Q33. Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte de l'asservissement de courant en fonction de $C(p)$, K_{ond}, R_s et $L_d p$. Pour deux correcteurs (A et B), de constantes caractéristiques différentes, les diagrammes de Bode relatifs à la fonction de transfert en boucle ouverte sont proposés sur le **DR5**. Tracer sur ce document, les marges de phase et préciser leurs valeurs. Quel correcteur doit-on retenir pour obtenir l'asservissement " le plus stable " ?

Le correcteur étant défini, une simulation a permis d'obtenir la réponse à l'échelon unitaire pour l'asservissement de courant. Le résultat est donné à l'**annexe 5**.

Q34. Quantifier alors la rapidité, la précision en régime permanent ainsi que la stabilité de l'asservissement de couple en explicitant clairement les critères utilisés. Interpréter vos résultats.

III.2 - Étude du capteur angulaire

Objectif : valider le choix du capteur angulaire

Le capteur angulaire de chaque essieu moteur de l'AGV est un "Brushless resolver" monté sur l'arbre du moteur. Comme illustré à l'**annexe 6** et à la **figure 1** de l'**annexe 7**, il est constitué d'un stator comportant l'enroulement primaire d'un transformateur tournant (bornes R_1, R_2) et deux enroulements de sortie en quadrature (bornes S_1, S_3 et bornes S_2, S_4). L'enroulement primaire est alimenté par une source de tension sinusoïdale : $E_{R1-R2} = E\sin(\omega t)$, avec $\omega = 2\pi f$ et $f = 10$ kHz. Le secondaire du transformateur tournant assure l'alimentation du circuit d'excitation rotorique.
Les tensions délivrées par les enroulements de sortie sont fonction de la position angulaire $\theta(t)$ du rotor :

- bornes S_1, S_3 : $E_{S1-S3} = S\sin(\omega t)\cos(\theta(t))$;
- bornes S_2, S_4 : $E_{S2-S4} = S\sin(\omega t)\sin(\theta(t)), S = cte$.

Pour une vitesse de rotation constante, ces tensions sont représentées à la **figure 4** de l'**annexe 7**. Un convertisseur nommé "SmartCoder", associé au "Brushless resolver", permet d'obtenir la position angulaire sous la forme d'un mot de 12 bits.

Q35. Après avoir parcouru les caractéristiques générales "FEATURES" du "Brushless resolver" de l'**annexe 7**, donner trois arguments justifiant l'adéquation de ce type de capteur avec notre application.

Le schéma de principe du "SmartCoder", proposé à la **figure 20**, met en œuvre :

- des ensembles, mémoire morte (ROM) et convertisseur numérique / analogique (CNA), générant les grandeurs analogiques $\sin(\alpha(t))$ et $\cos(\alpha(t))$, à partir de la valeur de $\alpha(t)$ codée en binaire naturel sur 12 bits ;
- des multiplieurs analogiques ;
- un comparateur (soustracteur) ;
- des filtres analogiques linéaires ;
- un ensemble oscillateur compteur.

Le compteur travaille en binaire naturel et sa sortie est un mot de 12 bits noté $\alpha(t)$. Plus la grandeur d'entrée $x_4(t)$ est positive et plus $\alpha(t)$ est incrémentée rapidement. De la même façon, plus la grandeur $x_4(t)$ est négative et plus $\alpha(t)$ est décrémentée rapidement. Pour une grandeur $x_4(t)$ nulle, $\alpha(t)$ n'évolue pas dans le temps.

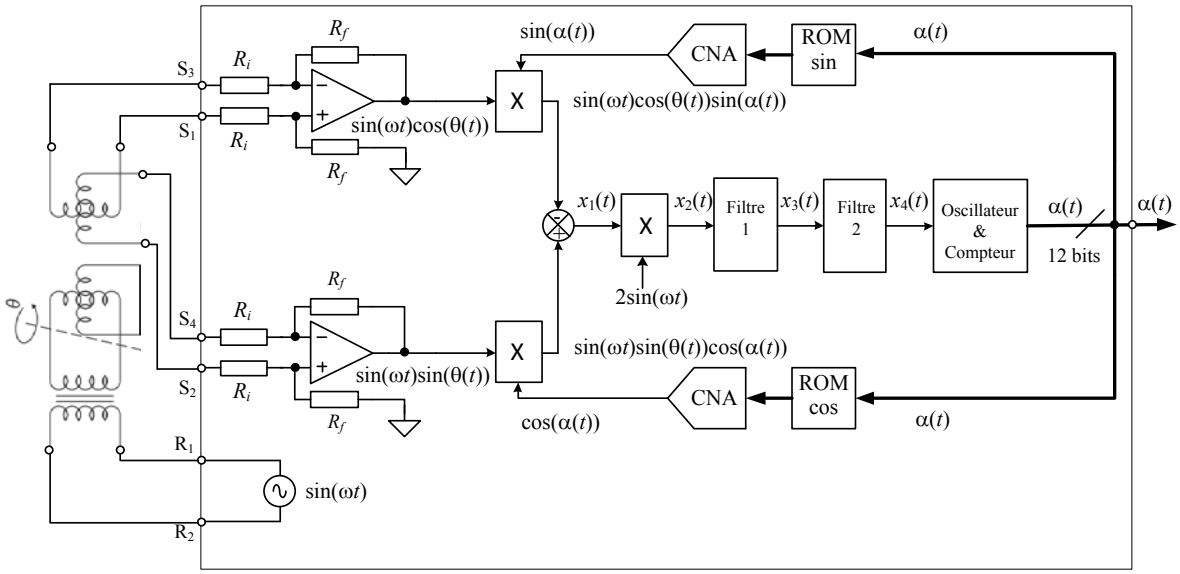


Figure 20 - "SmartCoder"

Q36. Quel est le rôle de l'étage d'entrée constitué d'un ALI et des résistances R_i et R_f ?

Le filtre 1 est un filtre passe-bas du premier ordre (gain statique unitaire, bande passante à – 3dB de 20 Hz)

Q37. Tracer sur votre copie, les diagrammes asymptotiques de Bode relatifs au filtre 1.

On vérifie aisément que $x_2(t) = 2x_1(t)\sin(\omega t)$ avec $x_1(t) = \sin(\omega t)\sin(\theta(t) - \alpha(t))$.

Q38. Estimer alors la grandeur $x_3(t)$, sortie du filtre 1, lorsque le terme $(\theta(t) - \alpha(t))$ est supposé quasi constant et de faible valeur, tel que $\sin(\theta(t) - \alpha(t)) \approx \theta(t) - \alpha(t)$.

Q39. Montrer que l'ensemble de la **figure 20**, peut être modélisé par la boucle d'asservissement analogique représentée à la **figure 21**. Dans l'hypothèse où le moteur tourne à vitesse constante et sachant que le filtre 2 est un correcteur de type PI et que l'ensemble oscillateur et compteur s'apparente à un intégrateur, quelle est la valeur de l'erreur, $\theta(t) - \alpha(t)$ en régime permanent ?

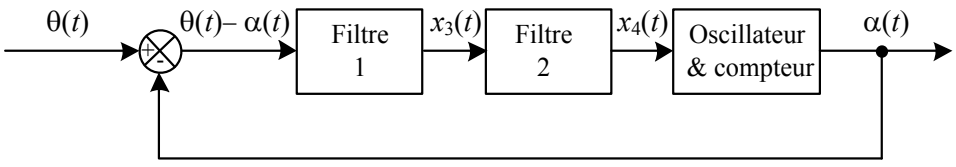
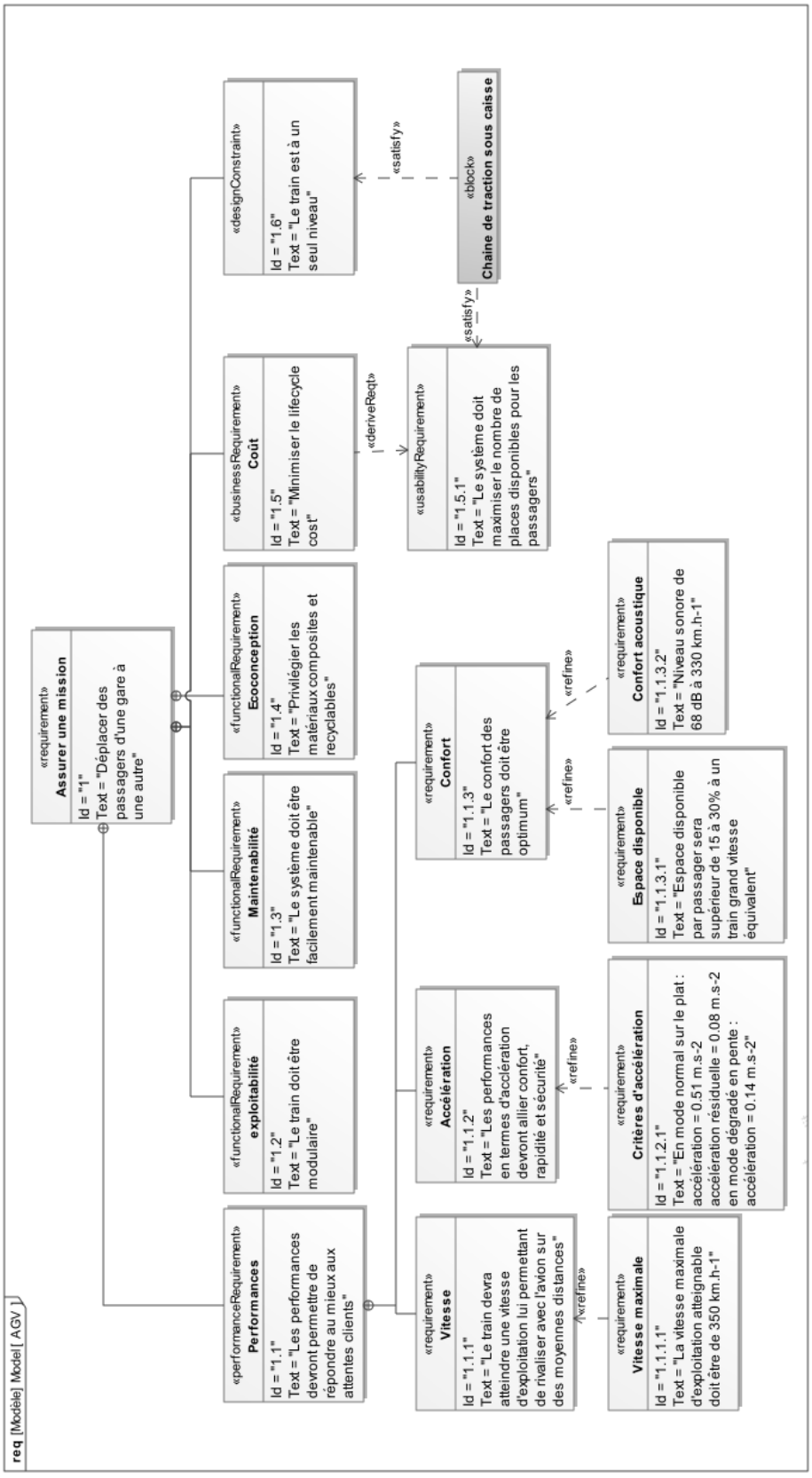


Figure 21 - Modèle analogique – "Brushless resolver" et "SmartCoder"

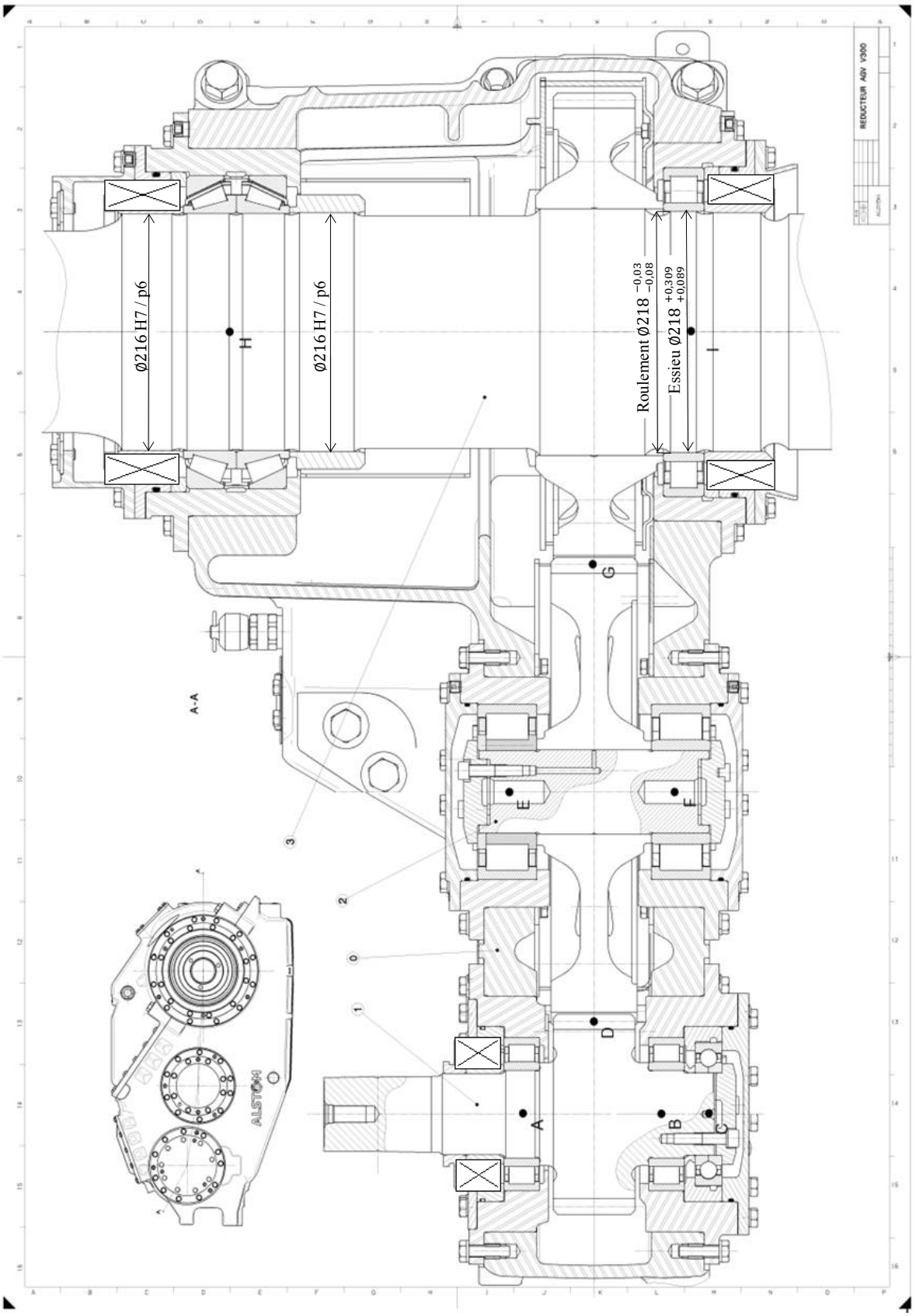
Les enroulements de sortie du capteur utilisé par l'AGV génèrent des tensions avec des termes en $\cos(6\theta(t))$ et $\sin(6\theta(t))$ au lieu de $\cos(\theta(t))$ et $\sin(\theta(t))$ comme précédemment.

Q40. Pourquoi l'ensemble "Brushless resolver" et "SmartCoder" est-il bien adapté pour notre application ?

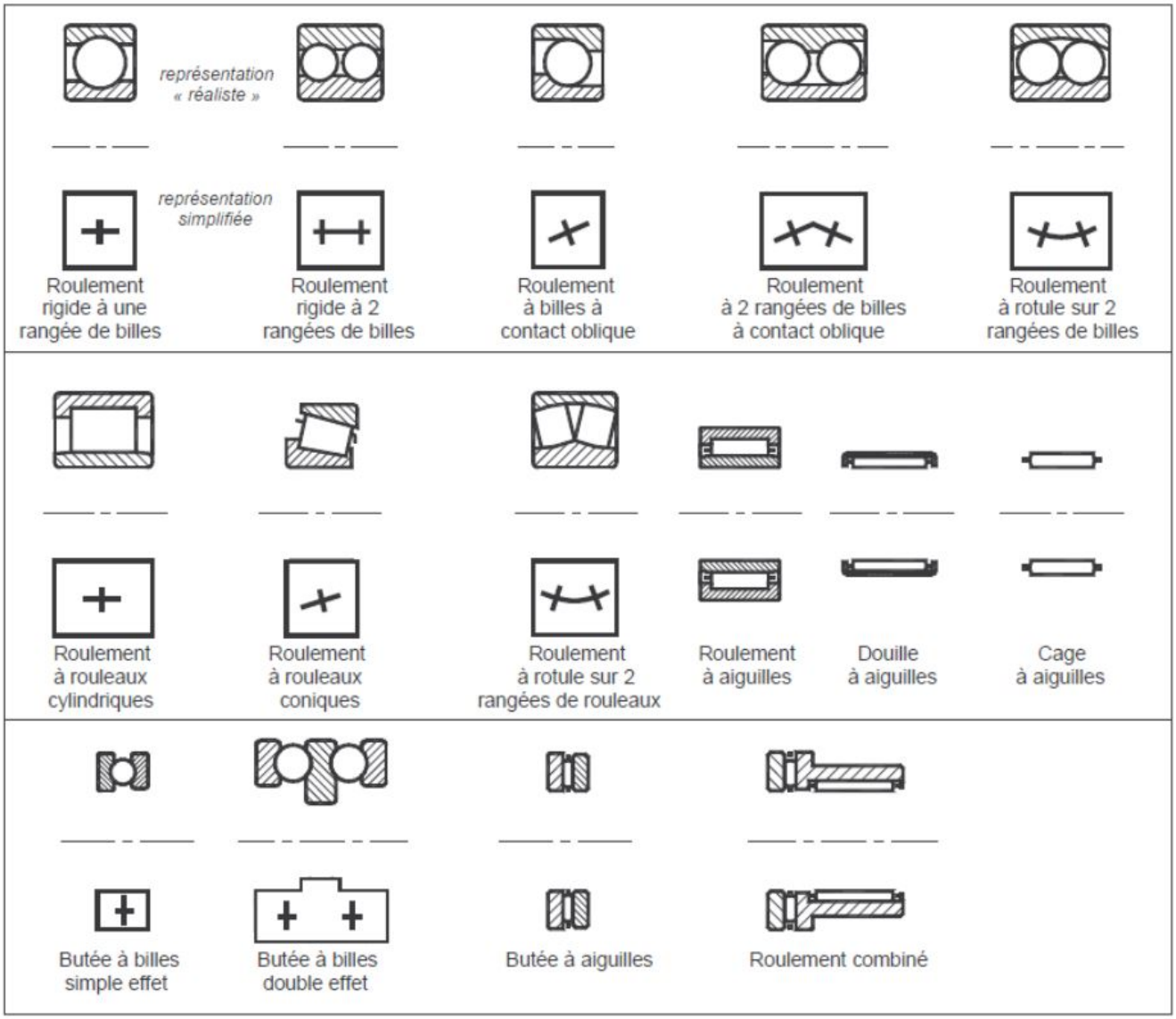
ANNEXES
ANNEXE 1
Diagramme des exigences de l'AGV



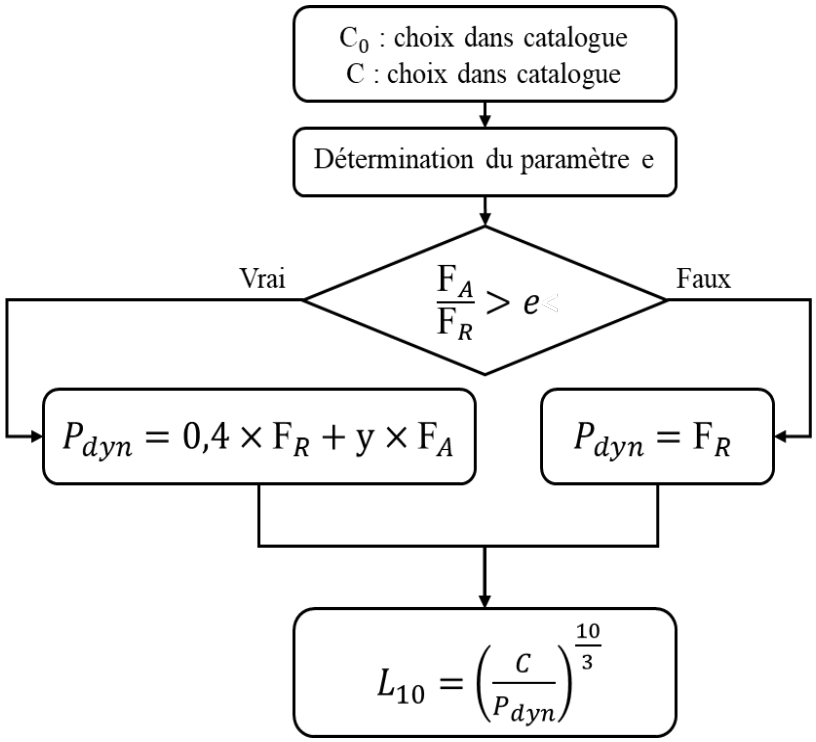
ANNEXE 2
Dessin d'ensemble du réducteur de l'AGV



ANNEXE 3
Représentation normalisée simplifiée des roulements



ANNEXE 4
Documentation technique SNR



Choix d'une référence de roulement en fonction :
- de la capacité statique C_0 en N,
- de la capacité dynamique C en N.

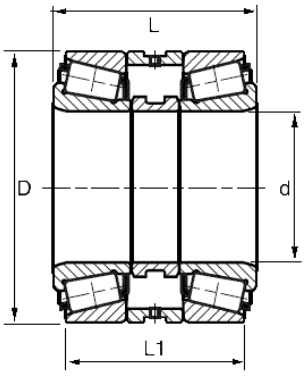
e : caractéristique du roulement

F_A : effort axial encaissé par le roulement en N
F_R : effort radial encaissé par le roulement en N.

Détermination de la charge dynamique équivalente P_{dyn} en N.

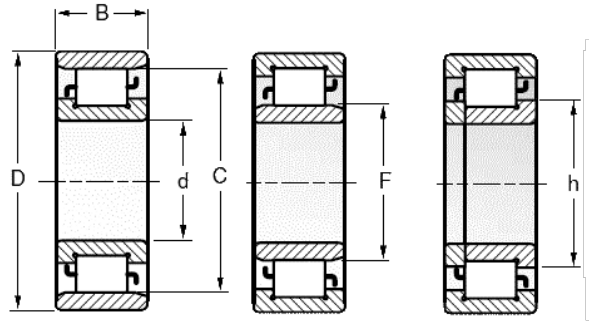
Détermination de la durée de vie du roulement en millions de tours

Ensembles de roulements à rouleaux coniques
Sets of tapered roller bearings



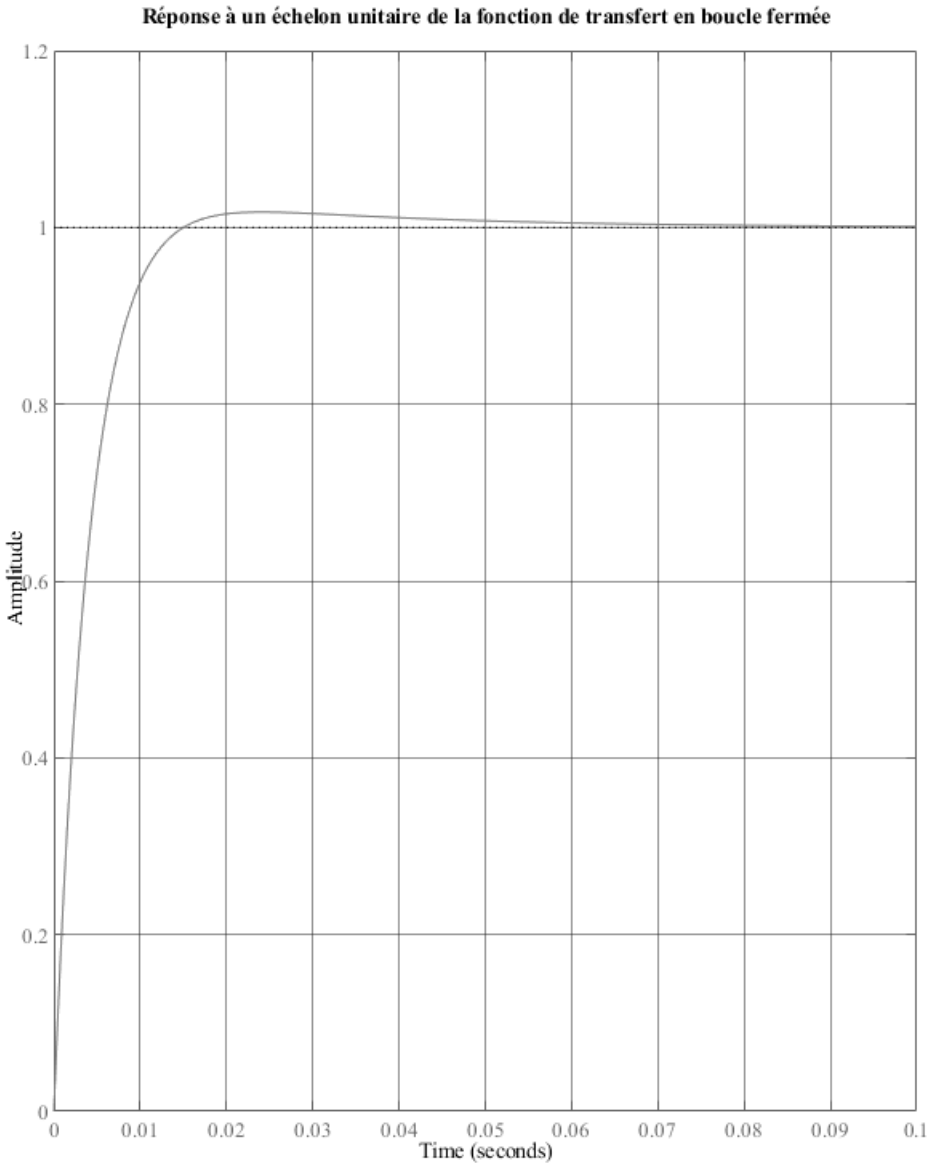
Symbole / Name	Capacité dynamique / Dynamic load	Fa/Fr > e	
		e	y
FC 12241	640000	0,49	1,23
FC 12211	209000	0,37	1,64
ENS HM-813846 N 810 S2	250000	0,5	2
ENS HM-813846 N 810 S3	250000	0,5	2

Roulements à rouleaux cylindriques
Cylindrical roller bearings

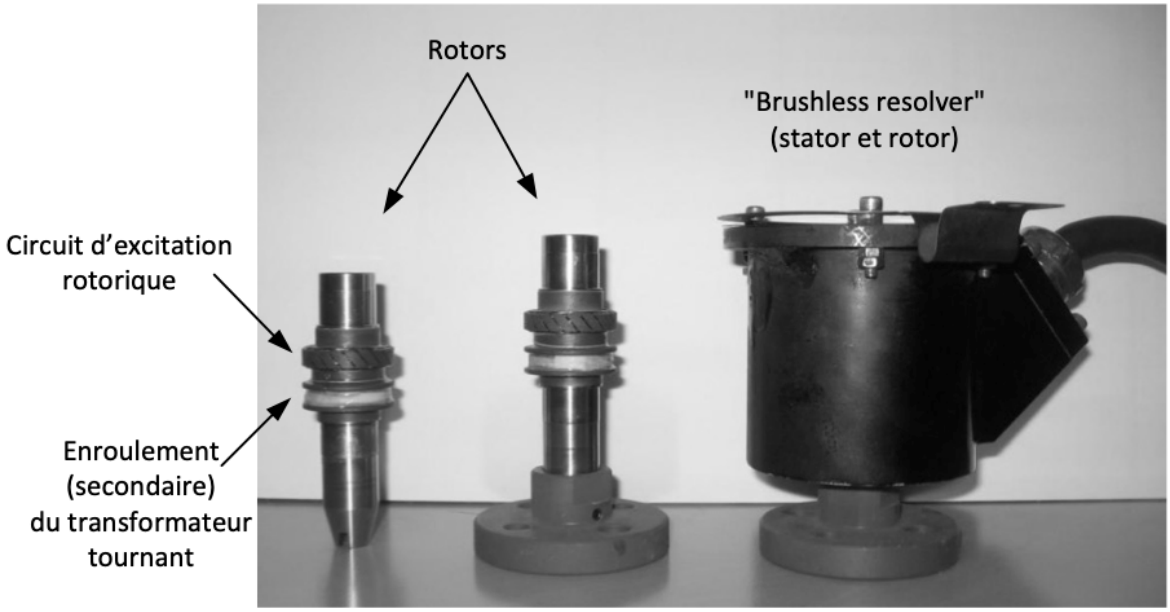


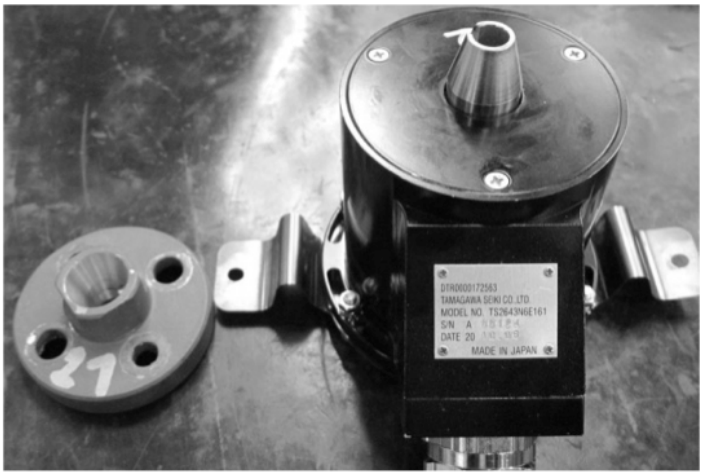
Symbole / Name	Capacité dynamique / Dynamic load
NU 324E S01	530000
NU 324E S02	530000
NU 1944 S03	360000
N 9907 S06	620000
NU 2852 S03	320000

ANNEXE 5
Réponse à l'échelon unitaire de l'asservissement de courant



ANNEXE 6
"Brushless resolver" de l'AGV





ANNEXE 7 (1/2)
"Brushless resolver" Extrait document constructeur TAMAGAWA SEIKI

スマートシン
Smartsyn

Brushless resolver is highly reliable rotary measurement sensor.

Features 特 長



Wide Temperature Range
広い使用温度範囲

[Temperature Range -55~+155℃ (※)]
- High Temperature Resistance
  Can be used in high temperature environment such as welding robots and injection molding machines.
- Low Temperature Resistance
  Available in aircrafts and space environments.

※Built-in type only

Vibration & Shock Resistance
耐振動・耐衝撃

Superior environment resistance
- Vibration:
  196m/s²{20G} at 10 ~ 500Hz, for 2 hours to each of three axes.
- Shock:
  981m/s² {100G} for 6ms, 3 times to each of 6 axes, 18 times in total

High Reliability
高い信頼性能

Does not use electrical parts, optical parts. Maintenance-free for its brush-less feature.

System configuration

Output signals (analog signals) from **Smartsyn** are converted to digital angle data by using **SmartCoder** (Resolver / Digital Converter).
※**SmartCoder** can't support **Smartsyn** other than 10kHz excitation frequency.

システム構成

ブラシレスレゾルバは、回転角度を電気信号を変換する角度センサです。
Smartsyn からの信号(アナログ信号)は、**SmartCoder** (レゾルバ/デジタル変換器) を使い、デジタルの角度データに変換されて出力します。
※励磁周波数 10kHz 以外の **Smartsyn** については、**SmartCoder** は非対応となります。



High Speed Rotation



Allowable rotational speed for built-in type is 6,000~40,000 rpm

Long - distance Transmission



Resistant to noise and long distance transmission is possible.

Small & Light Weight



- Smartsyn：
  Built-in type can minimize the built-in dimension.
  [Size ϕ15mm~]
- Smartcoder：
  Approximately 50% size down compared to conventional model.
  Built-in excitation amplifier.

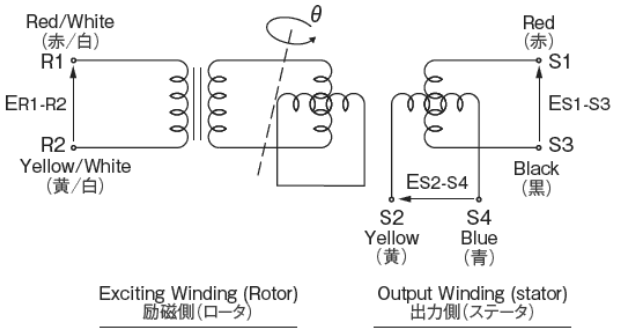
Fail Check Functions



Smartcoder built-in function
- Abnormality detect function
  (Signal, Disconnection, Conversion, High temperature)
- Built-in self-test function

Smartsyn

Fig.1 Wiring Diagram
図1　配線図

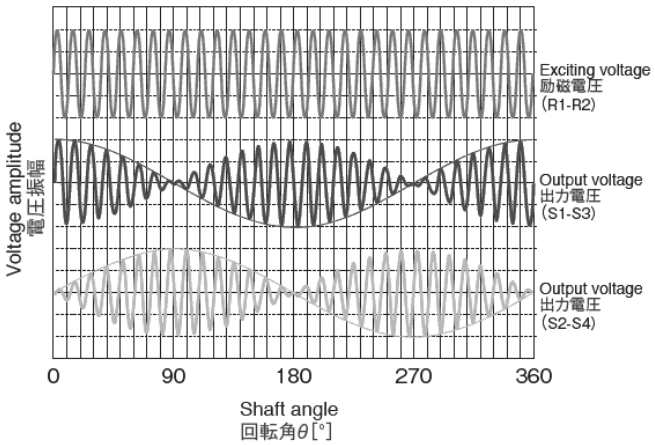


③Output signal (1X-BRX) 出力信号 (1X−BRX)

$E_{S1\text{-}S3} = K\ E_{R1\text{-}R2} \cdot \cos\theta$

$E_{S2\text{-}S4} = K\ E_{R1\text{-}R2} \cdot \sin\theta$

Fig.4 1X output voltage change
図4　1X−BRXの出力電圧の変化



FIN

IMPRIMERIE NATIONALE – 21 1178 – D'après documents fournis

CONCOURS COMMUN INP

Numéro d'inscription

Numéro de table

Né(e) le

Nom :

Prénom :

Emplacement QR Code

Filière : TSI

Session : 2021

Épreuve de : Sciences Industrielles

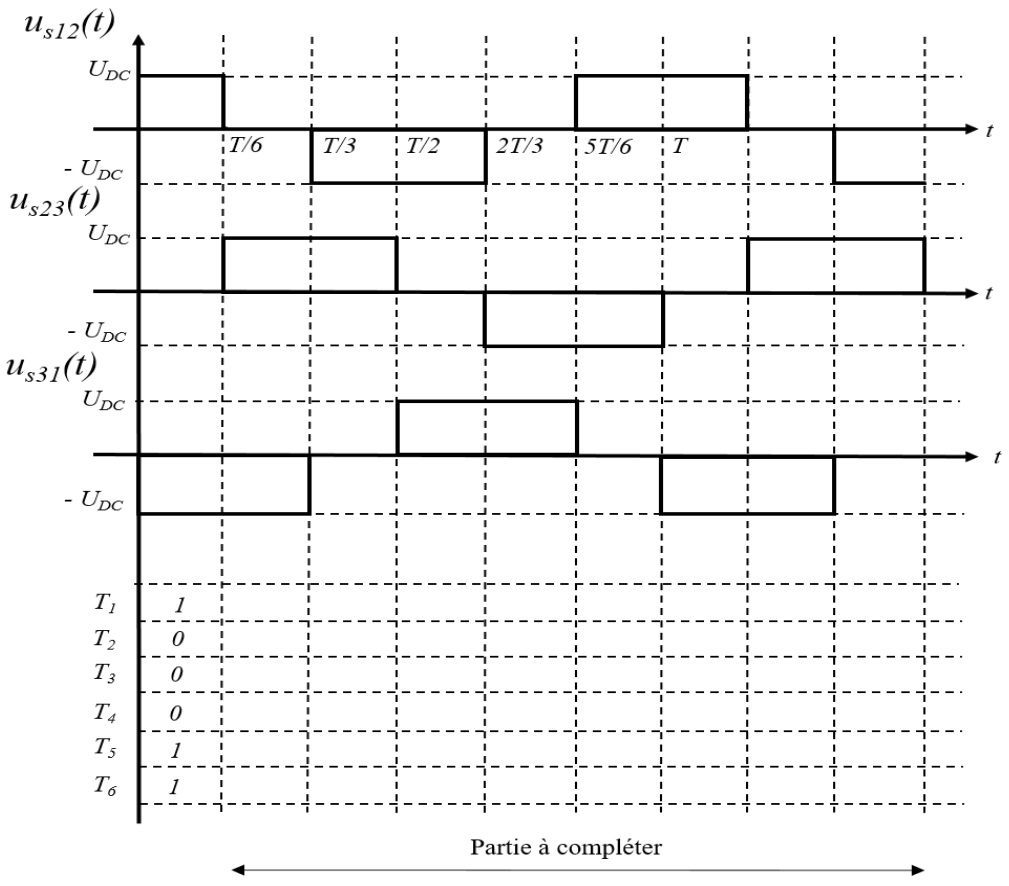
Consignes

- *Remplir soigneusement l'en-tête de chaque feuille avant de commencer à composer*
- *Rédiger avec un stylo non effaçable bleu ou noir*
- *Ne rien écrire dans les marges (gauche et droite)*
- *Numéroter chaque page (cadre en bas à droite)*
- *Placer les feuilles A3 ouvertes, dans le même sens et dans l'ordre*

DOCUMENT RÉPONSE

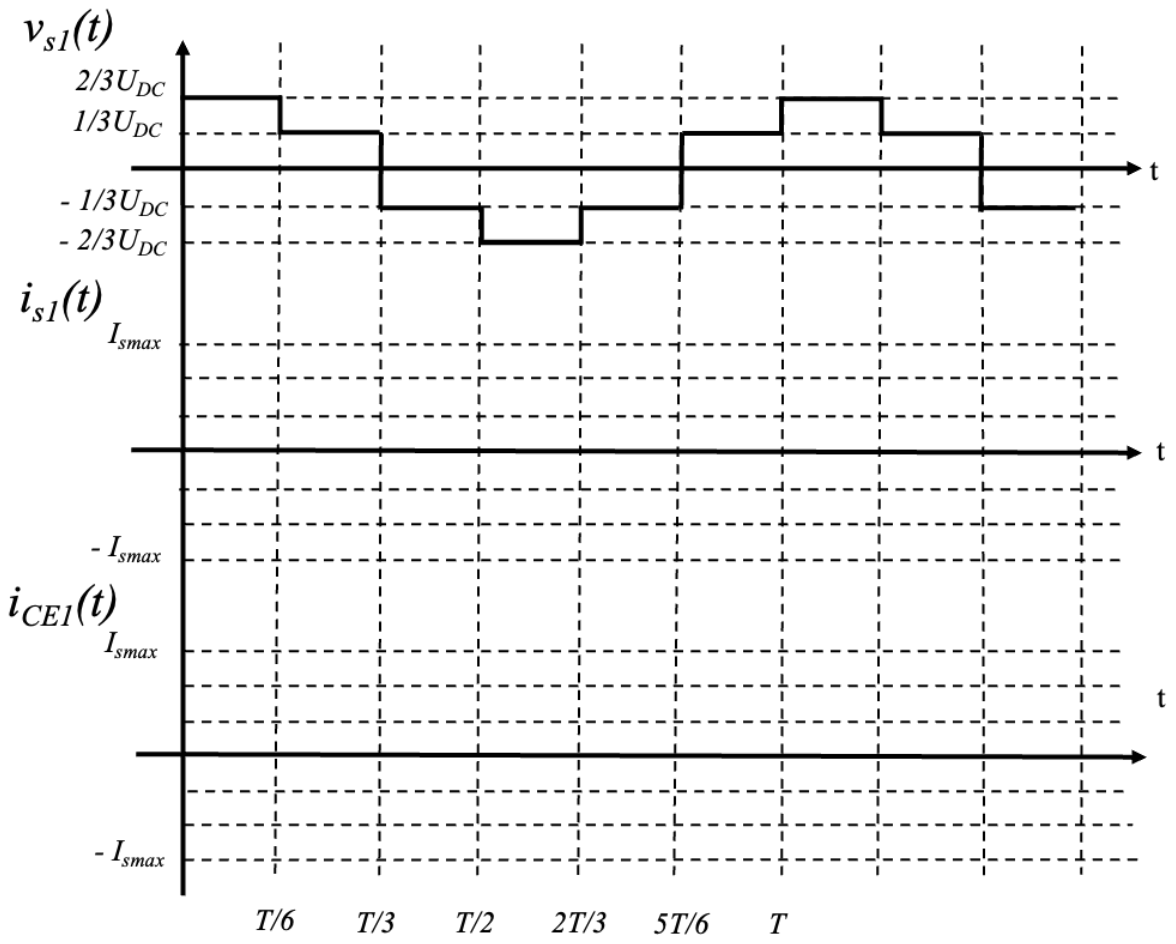
Ce Document Réponse doit être rendu dans son intégralité avec la copie.

DR1 - Q16

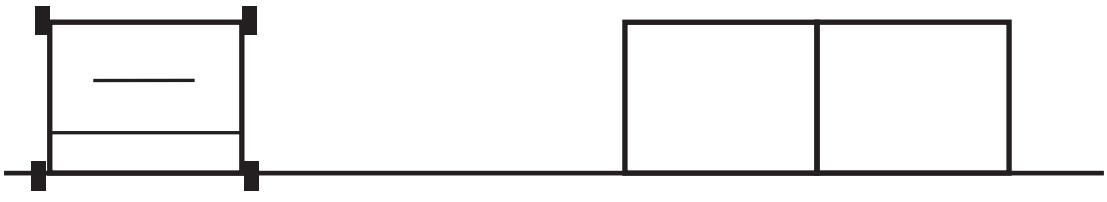


NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

DR2 - Q18



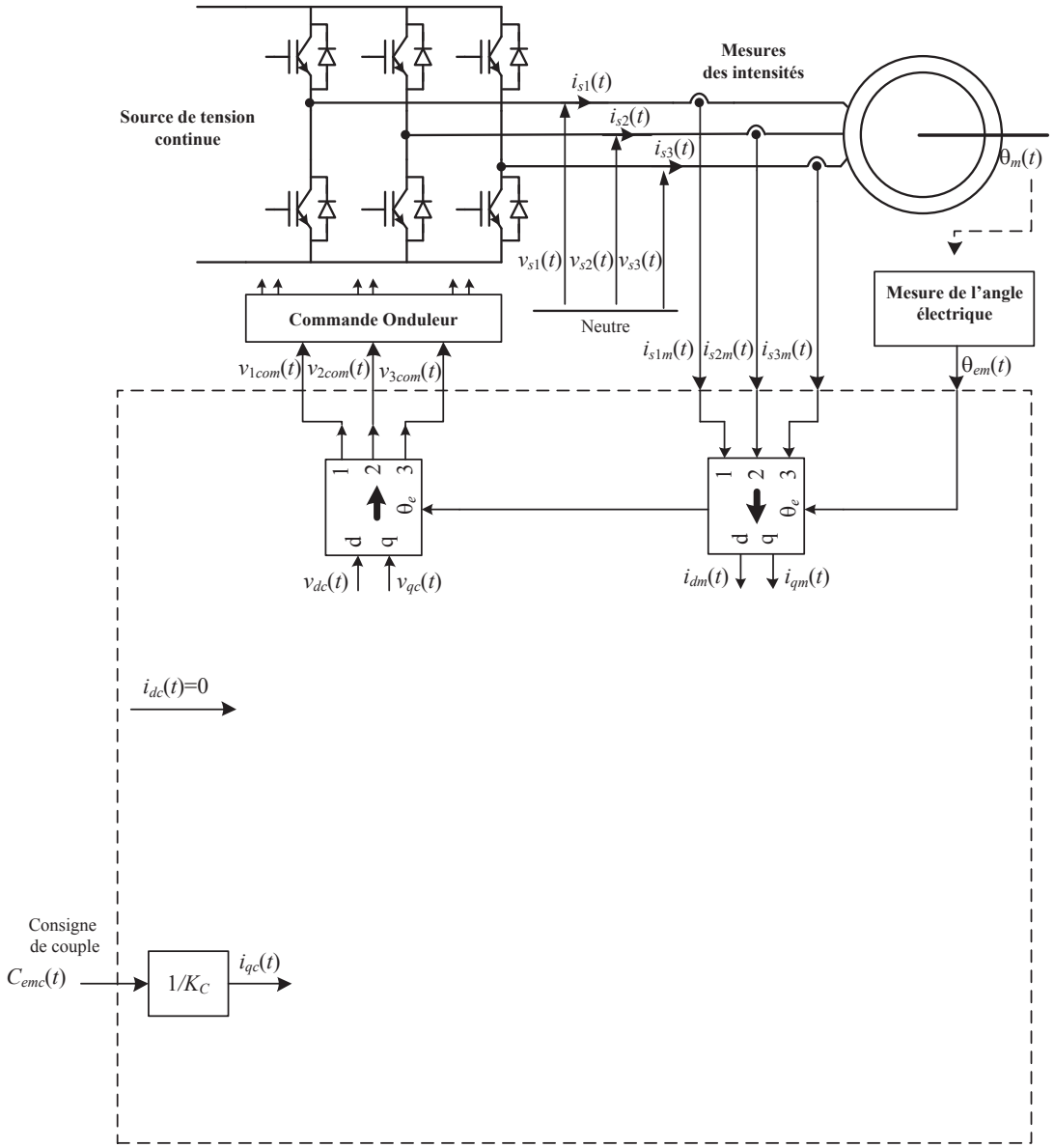
DR3 - Q28



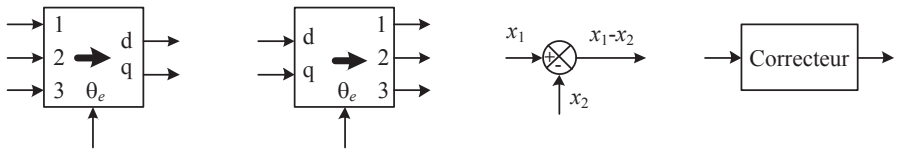
Roulement en I

Roulements en H

DR4 - Q32



Blocs élémentaires



Transformation directe de Park

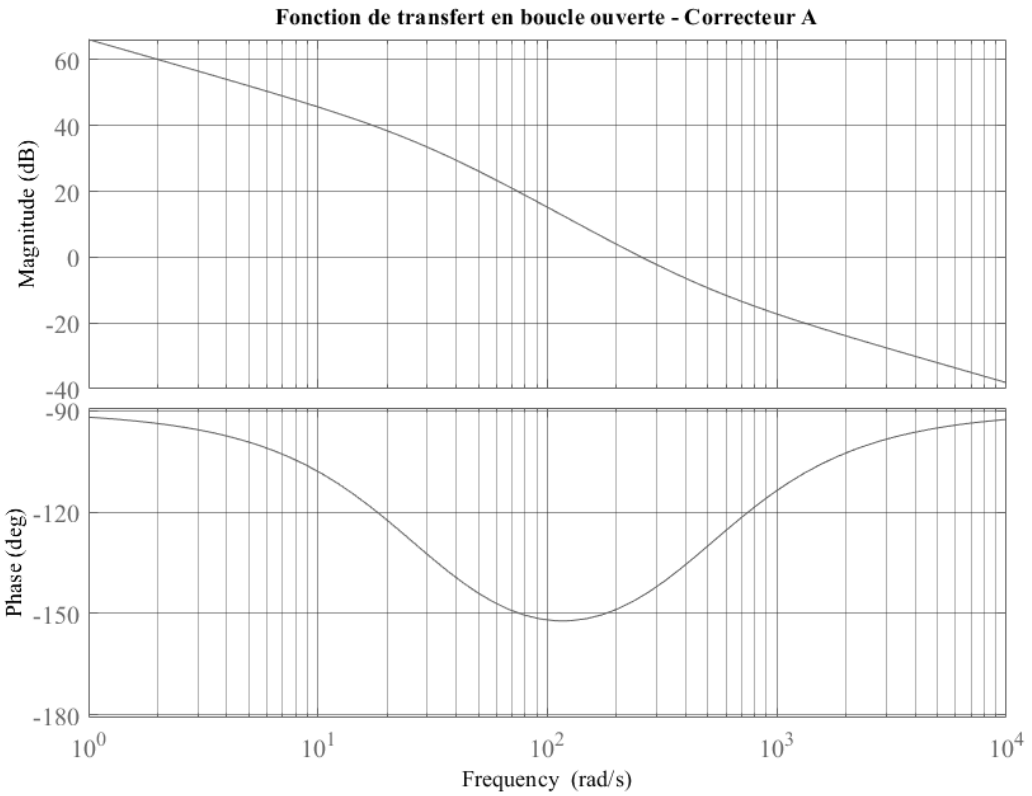
Transformation inverse de Park

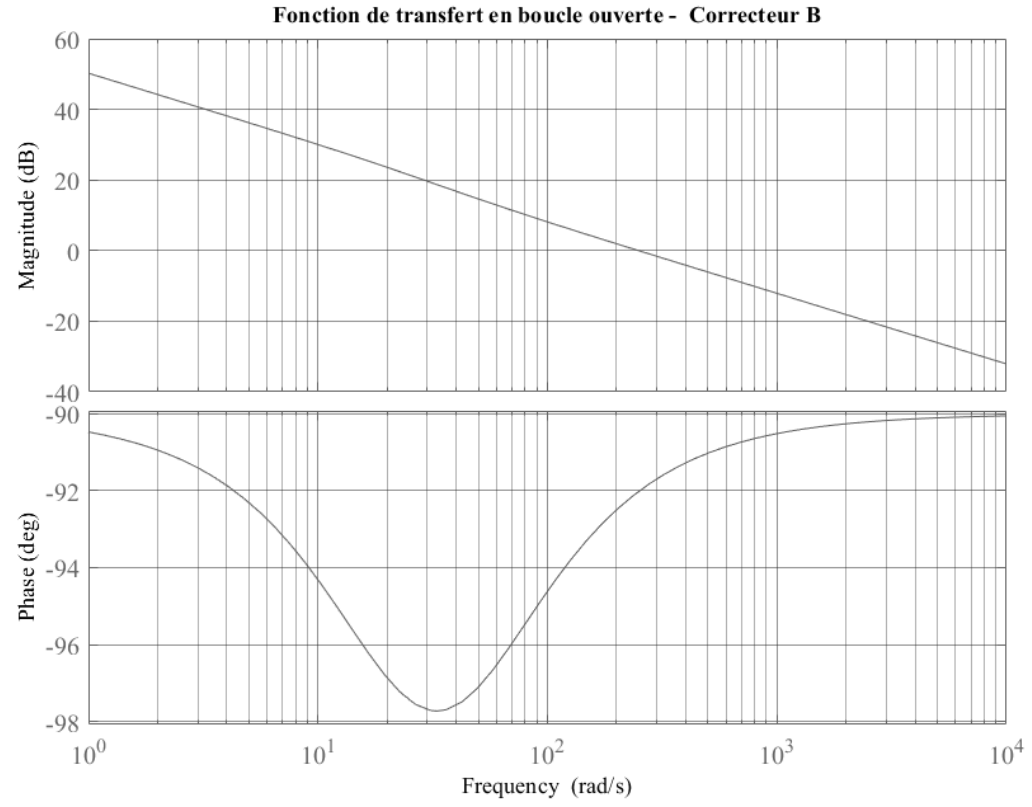
Comparateur (soustracteur)

Correcteur (P, PI, PID ….)

Les blocs de transformation s'appliquent sur des tensions ou des courants

DR5 - Q33


Fonction de transfert en boucle ouverte - Correcteur A
Magnitude (dB)
60
40
20
0
-20
-40
Phase (deg)
-90
-120
-150
-180
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4
Frequency (rad/s)


Fonction de transfert en boucle ouverte - Correcteur B
Magnitude (dB)
60
40
20
0
-20
-40
Phase (deg)
-90
-92
-94
-96
-98
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4
Frequency (rad/s)

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de TSI chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Dynamique des systèmes de solides : principe fondamental, stratégie d'isolement, équilibrage
- Cinétique : torseurs cinétique et dynamique, énergie cinétique, inertie équivalente
- Modélisation des liaisons, graphe des liaisons et schéma cinématique
- Transmetteurs de puissance et trains d'engrenages
- Filtrage linéaire

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière :
écrire sur WhatsApp

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/ccinp/tsi