

SESSION 2022

**AGREGATION
CONCOURS EXTERNE**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

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

**CONCEPTION PRÉLIMINAIRE D'UN SYSTÈME,
D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE ORGANISATION**

Durée : 6 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

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.

Tournez la page S.V.P.

A

Ce sujet comporte trois parties :

- dossier de présentation et travail demandé pages 2 à 21 ;
- documents annexes pages 22 à 25 ;
- documents réponses pages 26 à 28.

Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.

Le candidat doit répondre aux différentes questions du sujet sur les documents réponses quand cela est demandé, et sur feuilles de copie quand cela n'est pas précisé.

Il lui est rappelé qu'il doit utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Si le sujet (les questions ou les annexes) conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il est demandé au candidat de la (ou les) mentionner explicitement sur la copie.

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	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1415A	103	1268

Téléphérique Urbain

1 Mise en situation

Le téléphérique de Brest est un téléphérique urbain ouvert depuis novembre 2016. Il permet de relier les deux rives de la Penfeld, fleuve côtier qui traverse la ville et qui sépare le centre-ville et le quartier des Capucins.

La rive gauche a vu se développer le centre-ville et l'attractivité économique, tandis que le développement de la rive droite a été freiné par la coupure urbaine que représente la Penfeld. Afin de redynamiser la rive droite, il a été décidé de créer un nouvel éco-quartier, le quartier des Capucins, à la place des anciens ateliers militaires du même nom. Ce plateau, d'une superficie de 16 hectares, comptera à terme des logements, des bureaux, des commerces et des sites culturels et de loisirs.

Le quartier des Capucins se trouve à mi-chemin entre les deux ponts de la ville qui sont très fréquentés aux heures de pointe. Ainsi, le téléphérique urbain a permis de répondre de façon innovante au besoin d'accessibilité et d'attractivité de ce quartier en mutation, qui se trouve maintenant à trois minutes du cœur de ville.

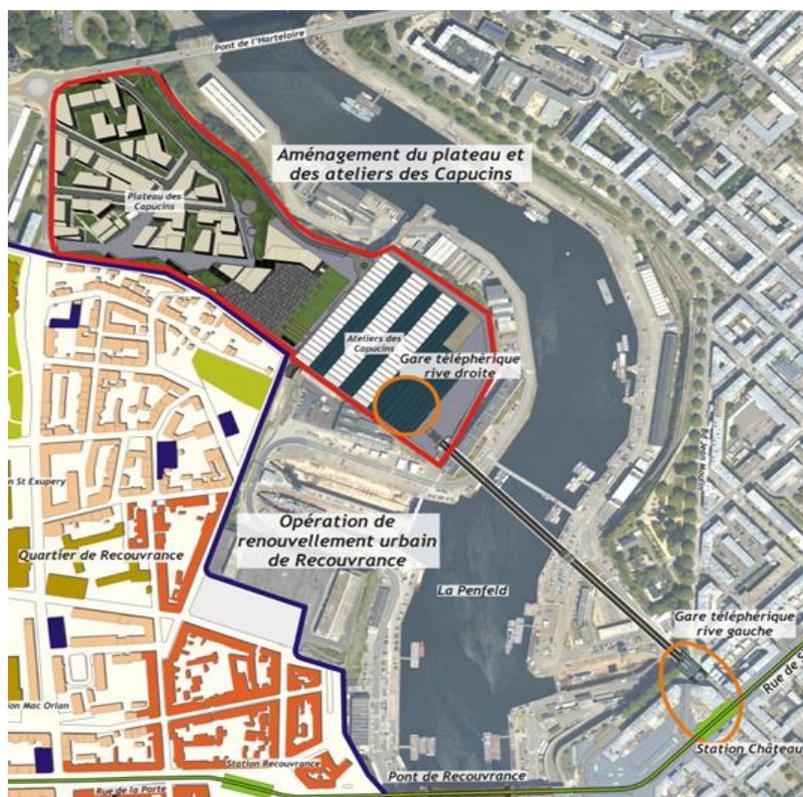


Figure 1 : vue aérienne du téléphérique

Le téléphérique de Brest est composé de deux cabines pouvant transporter jusqu'à 60 personnes, avec une capacité de 1200 passagers par heure. Il adopte un fonctionnement très particulier, le premier du genre. Le constructeur a imaginé un système qui repose sur un croisement des cabines, non pas à l'horizontale comme à l'habitude, mais à la verticale. Ainsi, les deux cabines se croisent l'une au-dessus de l'autre (et non l'une à côté de l'autre), et arrivent sur le même quai. L'envergure du système et des stations, donc l'emprise au sol, sont ainsi réduites et, par conséquent, le coût global du génie civil. C'est un avantage particulièrement intéressant en milieu urbain où l'espace est limité. Cette approche innovante a permis la préservation du bâtiment de la station des Capucins classé aux Monuments Historiques.



Figure 2 : croisement des cabines du téléphérique

La ligne d'un téléphérique est constituée de :

- plusieurs câbles dit porteurs qui supportent le poids d'un véhicule par l'intermédiaire d'un chariot équipé de galets ;
- plusieurs câbles dit tracteurs, fixés à ce chariot, qui sont mus par un moteur situé dans une des gares et permettent le déplacement du véhicule.

Pour le téléphérique de Brest, les câbles porteurs sont au nombre de 2 par voies, soit 4 câbles porteurs pour l'ensemble de l'installation. De plus, deux boucles de câbles tracteurs parfaitement synchronisées et communes aux deux voies permettent le déplacement des véhicules.

L'annexe A1 montre un schéma de principe de l'entraînement des câbles tracteurs. Sur ce schéma, on distingue que deux moteurs électriques synchronisés permettent d'entraîner les deux boucles de câbles tracteurs, avec 5 poulies par boucle. Les poulies ont toutes même diamètre.

Chaque véhicule est équipé d'une cabine, d'une suspente et de deux chariots constitués chacun de 8 galets roulants sur les câbles porteurs. Chaque chariot est fixé à un brin de câble tracteur.

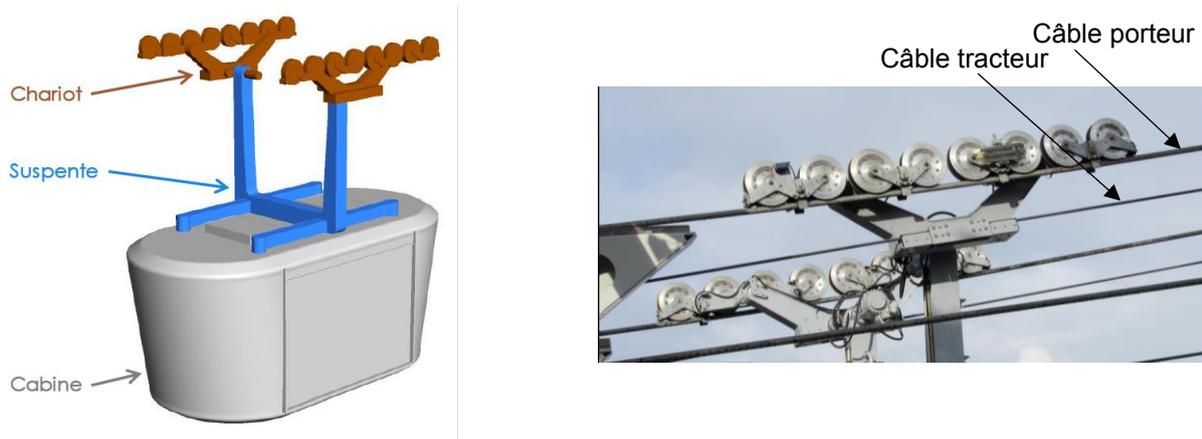


Figure 3 : chariots des véhicules

Seule la géométrie de la suspenste diffère entre les deux véhicules.



Figure 4 : véhicules du téléphérique

Les deux voies distinctes sur lesquelles se déplacent les véhicules ont des longueurs différentes.

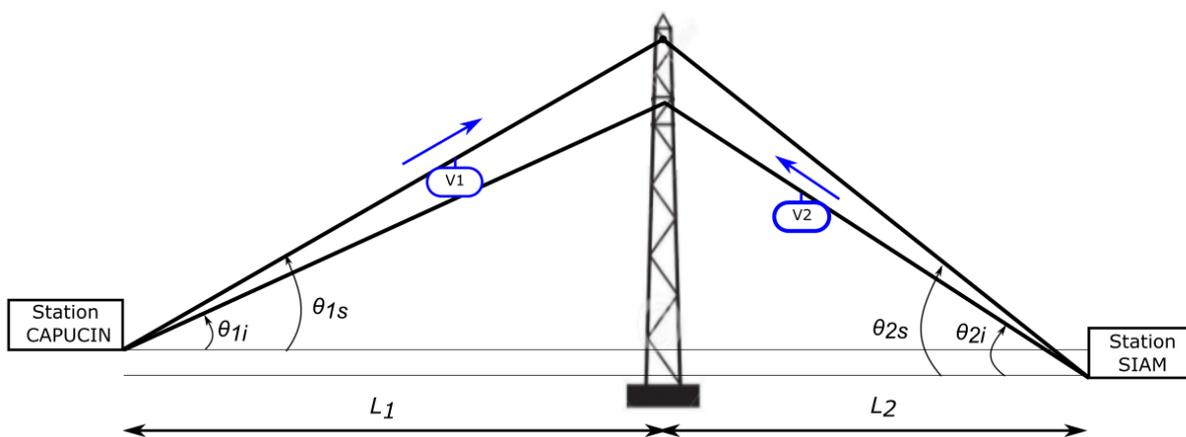


Figure 5 : plan d'implantation simplifié du téléphérique

Les deux cabines étant mues par les mêmes câbles tracteurs, chacune en sens opposé, la cabine basse arrive à son point d'arrêt avant que la cabine haute n'ait atteint le sien. Pour compenser cette différence géométrique, le concepteur a prévu un dispositif de compensation de longueur permettant l'arrivée simultanée des deux cabines à leur point d'arrêt quel que soit le sens du trajet effectué.

La particularité de ce téléphérique urbain est la géométrie de son trajet. Chaque véhicule aura besoin d'énergie pour monter, et pourra en restituer lors de sa descente. Une solution de stockage d'énergie par supercondensateurs a donc été envisagée.

Ce sujet comporte trois parties afin d'étudier la possibilité de transporter des personnes par le téléphérique tout en optimisant sa consommation énergétique :

- l'analyse du trajet du téléphérique et le dimensionnement des moteurs d'entraînement ;
- la commande des moteurs d'entraînement ;
- la récupération d'énergie par supercondensateurs.

2 Analyse du trajet du téléphérique et dimensionnement des moteurs d'entraînement

2.1 Analyse du trajet du téléphérique

Objectif : déterminer le nombre maximal de personnes pouvant être transportées compte tenu des contraintes du téléphérique

Le téléphérique de Brest permet de transporter 60 personnes par véhicule. L'objectif est de pouvoir atteindre un débit maximal de 1200 personnes par voie et par heure. Seulement, pour le confort des passagers, la vitesse des véhicules ne doit pas dépasser $V_{max} = 7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Entre deux trajets, 2 minutes sont nécessaires pour faire entrer et sortir les passagers en toute sécurité.

La figure 6 montre le plan d'implantation simplifié du téléphérique.

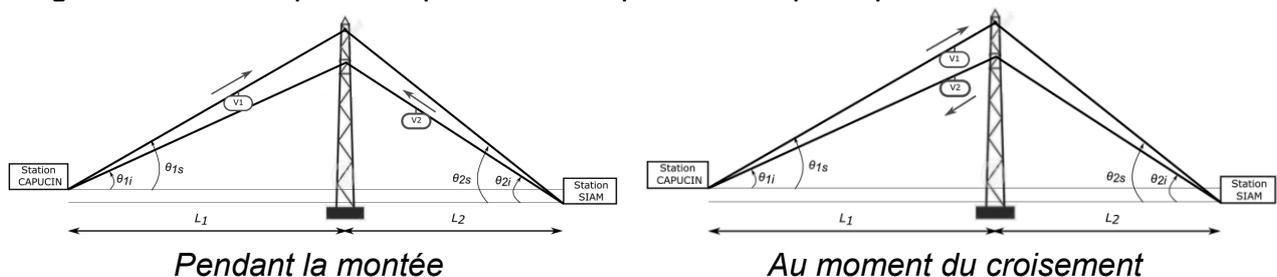


Figure 6 : plan d'implantation simplifié du téléphérique pendant différentes phases

Données complémentaires :

Longueur $L_1 = 174,6$ m	Longueur $L_2 = 236,2$ m
Angle $\theta_{1i} = 6,7^\circ$	Angle $\theta_{2i} = 11,4^\circ$
Angle $\theta_{1s} = 8,8^\circ$	Angle $\theta_{2s} = 14,1^\circ$

Question 1

Calculer les distances à parcourir pour les deux véhicules. Justifier la nécessité du dispositif de compensation de longueur des voies.

Les moteurs du téléphérique sont asservis en vitesse. La consigne simplifiée est décrite sur la figure ci-dessous. On considèrera que la distance totale à parcourir est de $d_{tot} = 417$ m.

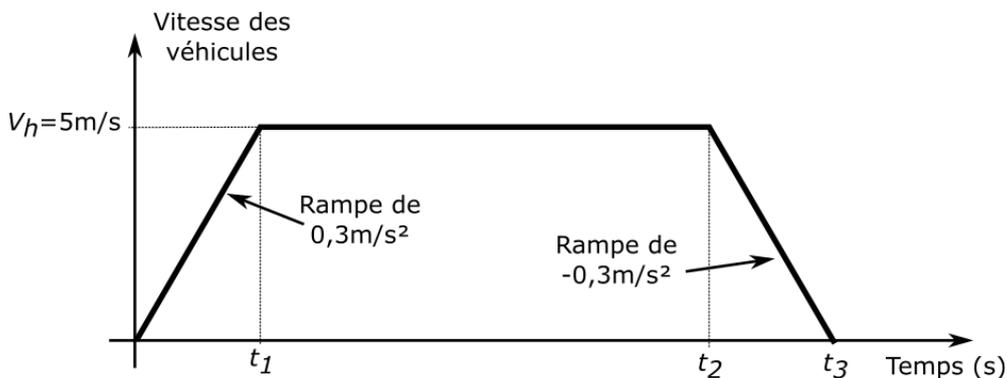


Figure 7 : profil temporel de vitesse des véhicules lors d'un trajet

Question 2

Calculer la durée d'un trajet.

Question 3

En déduire le nombre de personnes pouvant être transportées par voie et par heure.

Tant que les conditions météorologiques le permettent, il est possible d'augmenter la vitesse des véhicules pour augmenter la cadence des trajets. Dans ce cas, la rampe de vitesse est de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Question 4

Calculer la vitesse maximale des véhicules permettant de transporter 1200 personnes par voie et par heure. Indiquer si cette vitesse est confortable pour les passagers. Proposer des solutions.

2.2 Dimensionnement des moteurs d'entraînement

Objectif : vérifier le bon dimensionnement des moteurs d'entraînement

L'annexe A1 représente le schéma de principe de l'entraînement des véhicules du téléphérique. Sur ce schéma, on distingue :

- 2 moteurs électriques synchronisés d'entraînement (MD et MG) ;
- 2 réducteurs (RD et RG) de rapport de transmission $k_{red} = \frac{1}{31,5}$ et de rendement $\eta_{red} = 0,8$;
- 10 poulies de diamètre identique $D_p = 2$ m .

On supposera que les poulies tournent toutes à la même vitesse et entraînent les câbles sans glissement.

Question 5

En considérant le profil temporel de vitesse des véhicules défini à la figure 7, tracer sur le document réponse DR1 le profil temporel de vitesse de rotation Ω_{mot} d'un moteur, et préciser la valeur maximale Ω_{max} .

La figure 8 représente un profil simplifié du couple au niveau des deux poulies motrices qui sont accouplées. Cette courbe est issue de mesures lorsque la cabine du téléphérique est chargée à son maximum.

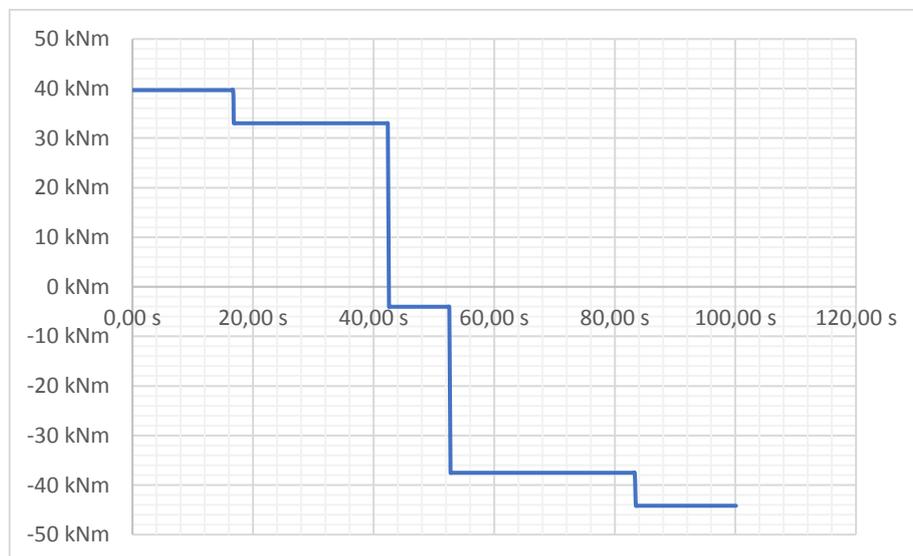


Figure 8 : profil temporel du couple au niveau des poulies motrices

On fait l'hypothèse dans un premier temps que l'entraînement est réalisé à partir d'un moteur de couple utile C_{mot} et de puissance utile P_{mot} .

Question 6

Exprimer le couple moteur C_{mot} en fonction du couple des poulies C_p , et des caractéristiques du réducteur. Tracer sur le document réponse DR1 le profil temporel du couple moteur C_{mot} en précisant les valeurs particulières.

Question 7

Tracer sur le document réponse DR1 le profil temporel de la puissance moteur P_{mot} en précisant les valeurs particulières.

Lorsque le couple développé par une machine n'est pas constant sur son cycle de fonctionnement, il est nécessaire de connaître le couple thermique équivalent pour dimensionner un moteur. Ce couple, noté C_{th} , est équivalent à un couple constant qui provoquerait le même échauffement. Il est défini par :

$$C_{th} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T C_{mot}^2(t) dt}$$

Question 8

Calculer le couple thermique équivalent sur le cycle de fonctionnement du téléphérique.

Les moteurs d'entraînement actuellement utilisés sont deux moteurs asynchrones. Leurs caractéristiques techniques sont fournies dans le tableau ci-dessous.

Tension entre phases	460 V
Courant nominal absorbé par une phase	435 A
Puissance nominale	293 kW
Facteur de puissance	0,88
Vitesse nominale pour $f = 50$ Hz	1480 tr · min ⁻¹

Question 9

À partir des caractéristiques techniques des moteurs asynchrones, calculer le couple nominal C_{nom} des moteurs. Conclure sur la possibilité d'utiliser ces moteurs pour l'entraînement des véhicules du téléphérique.

3 Commande des machines asynchrones

Les deux moteurs de l'installation sont pilotés en configuration « maître-esclave ».

Un asservissement de vitesse est ainsi mis en place, avec une boucle d'asservissement interne de couple. Le variateur maître contrôle un des moteurs pour imposer une vitesse à l'arbre d'entraînement. Cette consigne de vitesse se traduit en une consigne de couple. Chaque moteur devra alors réaliser la moitié de ce couple. Le variateur maître communique donc la consigne de couple au variateur esclave.

Pour réaliser les asservissements de vitesse et de couple, des capteurs permettent de connaître à chaque instant ces grandeurs. Il s'agit de codeurs incrémentaux pour :

- la mesure de la vitesse ;
- la mesure de la position angulaire permettant l'estimation du couple.

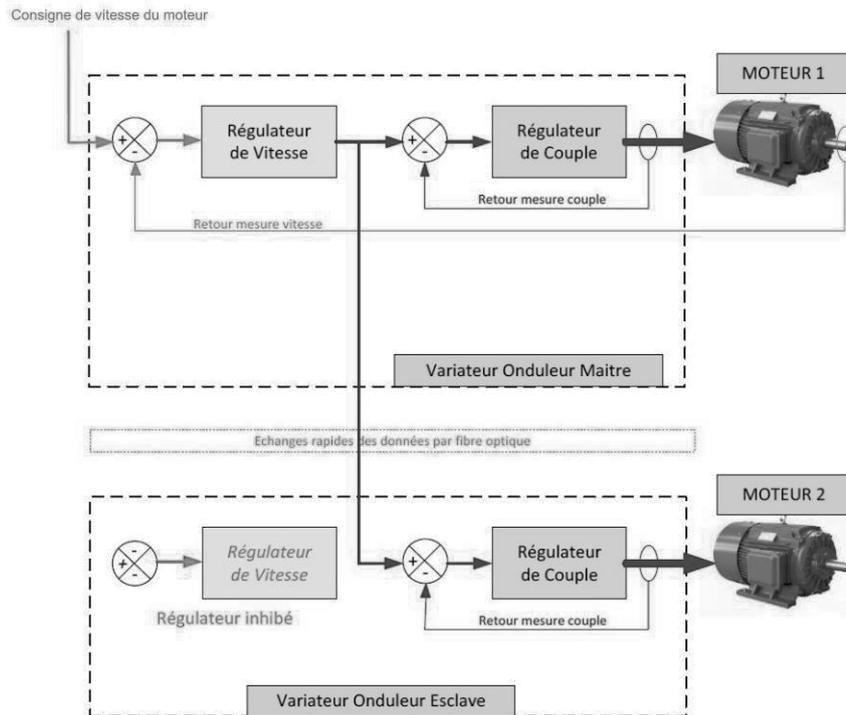


Figure 9 : synoptique de l'asservissement des moteurs

3.1 Mesure de vitesse par codeur incrémental

Objectif : vérifier la mesure de vitesse et de position du codeur incrémental

Il est nécessaire de connaître à tout instant la position des véhicules du téléphérique afin de générer la consigne de vitesse.

La zone de ralentissement est déterminée à partir des informations issues du codeur incrémental accouplé aux poulies motrices de diamètre $D_p = 2$ m . La distance de ralentissement est de 41,7 m avant la station.

Le codeur utilisé est un codeur incrémental dont la référence est GI35.0.22.C2.21 (voir annexe A2). Il délivre deux signaux logiques A et B décalés d'un quart de période. Il doit pouvoir détecter un déplacement de 1 cm.

On considérera que la distance totale à parcourir est $d_{tot} = 417$ m .

Question 10

À partir de l'annexe A2, déterminer le nombre d'impulsions par tour du codeur et en déduire sa résolution. Vérifier que l'exigence sur le déplacement est respectée.

L'information distance issue du codeur est codée sur 2 octets pour pouvoir être traitée. Ce mot binaire est noté D_{tel} . Au démarrage du téléphérique, sa valeur décimale est nulle.

Question 11

Calculer la distance maximale pouvant être codée et vérifier la possibilité de coder la distance totale à parcourir d_{tot} .

Question 12

Déterminer le mot binaire D_{tel} correspondant au moment où le téléphérique commence à ralentir. Indiquer sa valeur en hexadécimal.

Le codeur incrémental permet également de mesurer la vitesse de rotation des moteurs.

Question 13

Exprimer la fréquence f_{codeur} du codeur en fonction de la vitesse de rotation Ω_{mot} des moteurs. En déduire la valeur de la fréquence correspondant à la vitesse de $\Omega_{mot} = 157,5 \text{ rd} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.2 Contrôle vectoriel des machines asynchrones

Objectif : étudier la commande en couple des machines asynchrones

Les moteurs asynchrones sont commandés par un contrôle vectoriel. Pour mettre en place ce contrôle vectoriel, il est nécessaire de modéliser convenablement la machine.

Pour cela, les hypothèses suivantes sont à considérer :

- machine non saturée, à répartition sinusoïdale de flux ;
- tensions et courants parfaitement sinusoïdaux ;
- rotor à pôles lisses, entrefer constant.

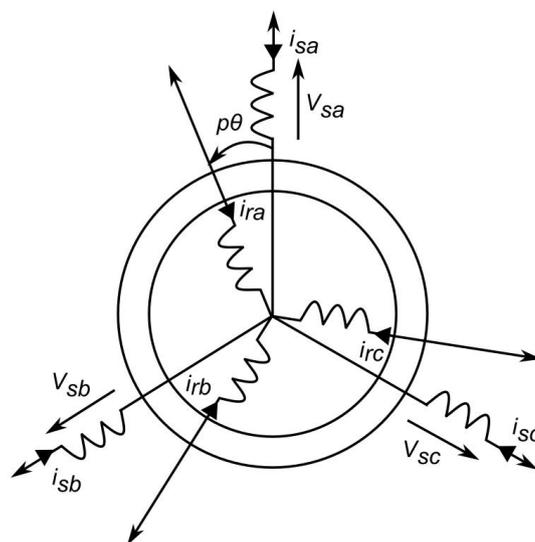


Figure 10 : modèle d'une machine asynchrone

Notations

ψ_{si}	Flux total à travers le bobinage statorique i (i=a, b ou c)
ψ_{ri}	Flux total à travers le bobinage rotorique i (i=a, b ou c)
v_{si}	Tension aux bornes d'une phase du stator
i_{si} (et i_{ri})	Courant dans une phase statorique (et rotorique)
R_s (et R_r)	Résistance d'une phase statorique (et rotorique)
L_s (et L_r)	Inductance propre d'un enroulement statorique (et rotorique)
M_s (et M_r)	Mutuelle inductance avec les deux autres enroulements statoriques (et rotoriques)
M_0	Mutuelle inductance entre le stator et le rotor
p	Nombre de paires de pôles
θ	Position mécanique du rotor

Élaboration des équations

Les équations aux flux dans la machine sont les suivantes :

$$\begin{pmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{pmatrix} = (L_{ss}) \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} + (M_{sr}(\theta)) \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{pmatrix} = (L_{rr}) \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix} + (M_{rs}(\theta)) \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix}$$

$$\text{avec } (L_{ss}) = \begin{pmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{pmatrix}; \quad (L_{rr}) = \begin{pmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{pmatrix}; \quad (M_{rs}(\theta)) = (M_{sr}(\theta))^T = (M_{sr}(-\theta))$$

$$\text{et } (M_{sr}(\theta)) = M_0 \begin{pmatrix} \cos(p\theta) & \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(p\theta) & \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(p\theta) \end{pmatrix}$$

Les lois des mailles s'expriment par :

$$\begin{pmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{pmatrix} = R_s \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = R_r \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{pmatrix}$$

La transformation de Concordia permet de passer d'un repère triphasé (abc) à un repère

diphasé ($\alpha\beta$). La matrice de passage est définie par : $T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix}$.

On a alors $\begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} = T_{32} \begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{pmatrix}$ et $\begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{pmatrix} = T_{32}^T \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix}$.

Question 14

Montrer que $(L_{ss})T_{32} = L_1T_{32}$ et $(L_{rr})T_{32} = L_2T_{32}$ avec L_1 et L_2 les inductances cycliques à exprimer en fonction de L_s , L_r , M_s et M_r .

La transformation de Park consiste à passer d'un repère triphasé (abc) à un repère diphasé (dq). La matrice de passage est définie par :

$$T_{32}P(\zeta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \zeta & -\sin \zeta \\ \sin \zeta & \cos \zeta \end{pmatrix}.$$

On a alors $\begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} = T_{32}P(\zeta) \begin{pmatrix} x_d \\ x_q \end{pmatrix}$ et $\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \end{pmatrix} = P(\zeta)^T T_{32}^T \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} = P(-\zeta) \begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{pmatrix}$.

De plus, on rappelle que $P(\zeta_1)P(\zeta_2) = P(\zeta_1 + \zeta_2)$, et que $\frac{d}{dt}(P(\zeta)) = P\left(\zeta + \frac{\pi}{2}\right)$.

Question 15

Montrer que $(M_{sr}(\theta)) = MT_{32}P(p\theta)T_{32}^T$. Exprimer M l'amplitude de la mutuelle cyclique.

La transformation de Park est donc la combinaison d'une transformation de Concordia suivi d'une rotation. Les angles de rotation sont définis par la figure 11.

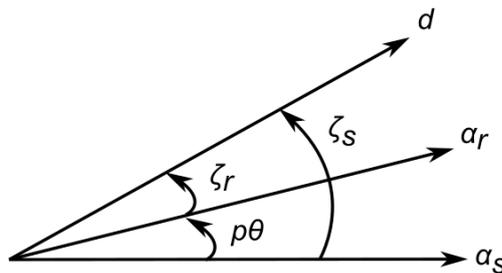


Figure 11 : définition des angles de rotation

D'après la figure 11, on a $\zeta_s = p\theta + \zeta_r$.

On posera $\frac{d\zeta_s}{dt} = \omega_s$, $\frac{d\zeta_r}{dt} = \omega_r$ et $\frac{d\theta}{dt} = \Omega$. On a alors la relation suivante $\omega_s = p\Omega + \omega_r$.

Question 16

Donner l'expression du flux ψ_{sd} en fonction de L_1 , M , i_{sd} et i_{rd} . Faire de même pour les flux ψ_{sq} , ψ_{rd} et ψ_{rq} .

Question 17

Donner l'expression de la tension v_{sd} en fonction de R_s , ω_s , i_{sd} , ψ_{sd} et ψ_{sq} . Faire de même pour les tensions v_{sq} , v_{rd} et v_{rq} .

La transformation de Park conserve la puissance instantanée. Ainsi, on aura :

$$p_s = v_{sa}i_{sa} + v_{sb}i_{sb} + v_{sc}i_{sc} = v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}.$$

Question 18

Exprimer la puissance p_s en vous aidant de la question 17. Montrer que cette puissance peut se décomposer en trois termes que l'on identifiera :

- p_{joule} , puissance des pertes joules ;
- p_{em} , puissance électromagnétique stockée dans le champ ;
- p_E , puissance électrique transformée en puissance mécanique.

Le couple électromagnétique est défini par $C_E = \frac{p_E}{\Omega_s} = p \frac{p_E}{\omega_s}$.

Question 19

À partir de l'expression de p_E et des équations établies aux questions 16 et 17, montrer que le couple électromagnétique s'exprime par $C_E = p \frac{M}{L_2} (\psi_{rd}i_{sq} - \psi_{rq}i_{sd})$.

Conception de la commande

On constate que le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant. La commande envisagée ici est une commande à flux rotorique orienté. L'objectif est d'avoir un flux rotorique avec uniquement une composante sur l'axe d. Cela impose d'annuler la composante sur l'axe q, soit $\psi_{rq} = 0$. C'est le rôle de la commande à concevoir.

Le couple s'exprime alors par : $C_E = p \frac{M}{L_2} \psi_{rd}i_{sq}$.

La stratégie consiste à contrôler de façon indépendante le terme de flux et le terme de courant pour imposer un couple.

Les questions précédentes ont permis d'obtenir les équations rotoriques suivantes, qui vont permettre d'estimer certaines grandeurs utiles à l'asservissement en couple :

$$\begin{cases} \psi_{rd} = L_2 i_{rd} + M i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_2 i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_r \psi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \omega_r \psi_{rd} \end{cases}$$

Question 20

Monter que le flux rotorique ψ_{rd} peut être estimé à partir du courant i_{sd} . Donner son expression en fonction de i_{sd} et des constantes du modèle de la machine. Pour cela, on utilisera la notation de Laplace « s » pour l'opérateur dérivé.

Pour estimer le flux rotorique ψ_{rd} , il faut pouvoir mesurer le courant i_{sd} . Pour cela, il faut connaître la position angulaire ζ_s afin de faire la transformation de Park.

Question 21

Donner l'expression de la pulsation ω_r en fonction du courant i_{sq} et du flux ψ_{rd} . En déduire l'expression de position angulaire ζ_r , puis de ζ_s . Pour cela, on utilisera la notation de Laplace « s » pour l'opérateur dérivé.

Question 22

Compléter le document réponse DR2 représentant la commande en couple du moteur asynchrone, avec l'estimation de ψ_{rd} , C_E et ζ_s .

4 Récupération d'énergie par supercondensateurs

La particularité de ce téléphérique urbain est la géométrie de son trajet. En effet, pendant la première partie du trajet, les deux véhicules, chacun initialement dans une station, vont être en phase de montée. Puis, dans la seconde partie du trajet, ils seront en phase de descente.

Ainsi, les deux véhicules auront simultanément besoin d'énergie pour monter, et pourront en restituer lors de leur descente. Une solution de stockage d'énergie par supercondensateurs a donc été envisagée.

Le synoptique de l'installation électrique est présenté à la figure 12.

Cependant, comme les deux voies sur lesquelles se déplacent les véhicules ont des longueurs différentes, le véhicule de la voie basse va atteindre le sommet du pylône avant l'autre véhicule. Ainsi, pendant un temps assez court, un véhicule monte tandis que l'autre descend, et globalement, il est aussi possible de récupérer un peu d'énergie pendant cette courte phase.

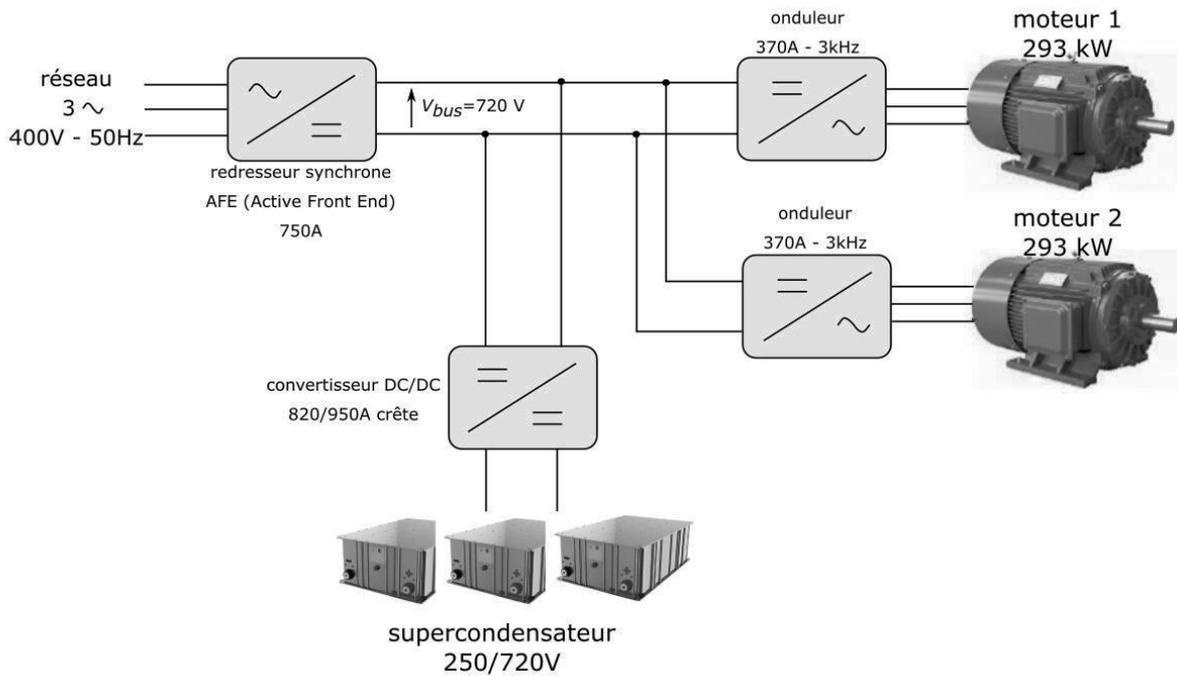


Figure 12 : synoptique de l'installation électrique

La figure 13 montre la provenance de l'énergie électrique lors d'un trajet.

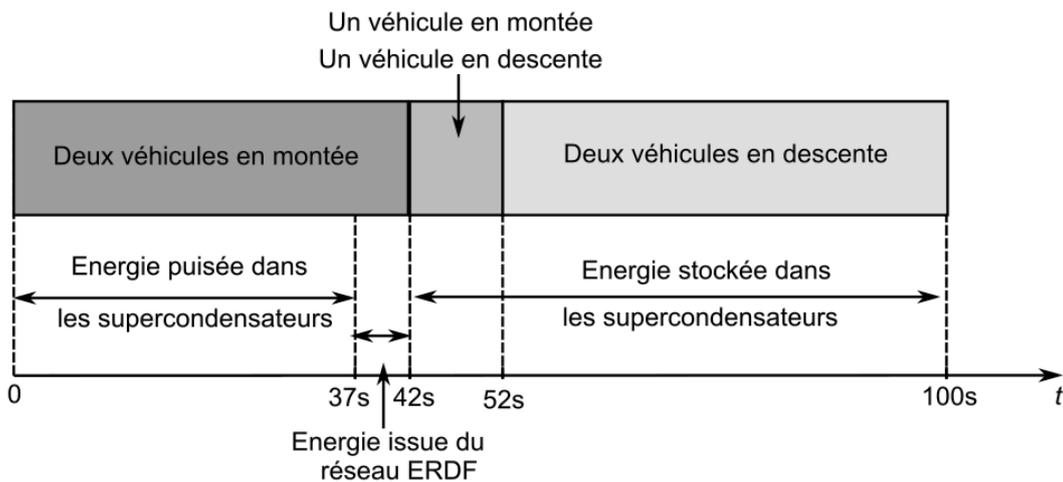


Figure 13 : provenance de l'énergie électrique sur un trajet

Question 23

Expliquer l'intérêt du stockage par supercondensateur pour cette application, par rapport à d'autres dispositifs de stockage.

4.1 Dimensionnement des supercondensateurs

Objectif : déterminer la capacité des supercondensateurs et vérifier le bon fonctionnement d'un point de vue thermique

Le profil de puissance transitant sur le bus continu est donné à la figure 14 :

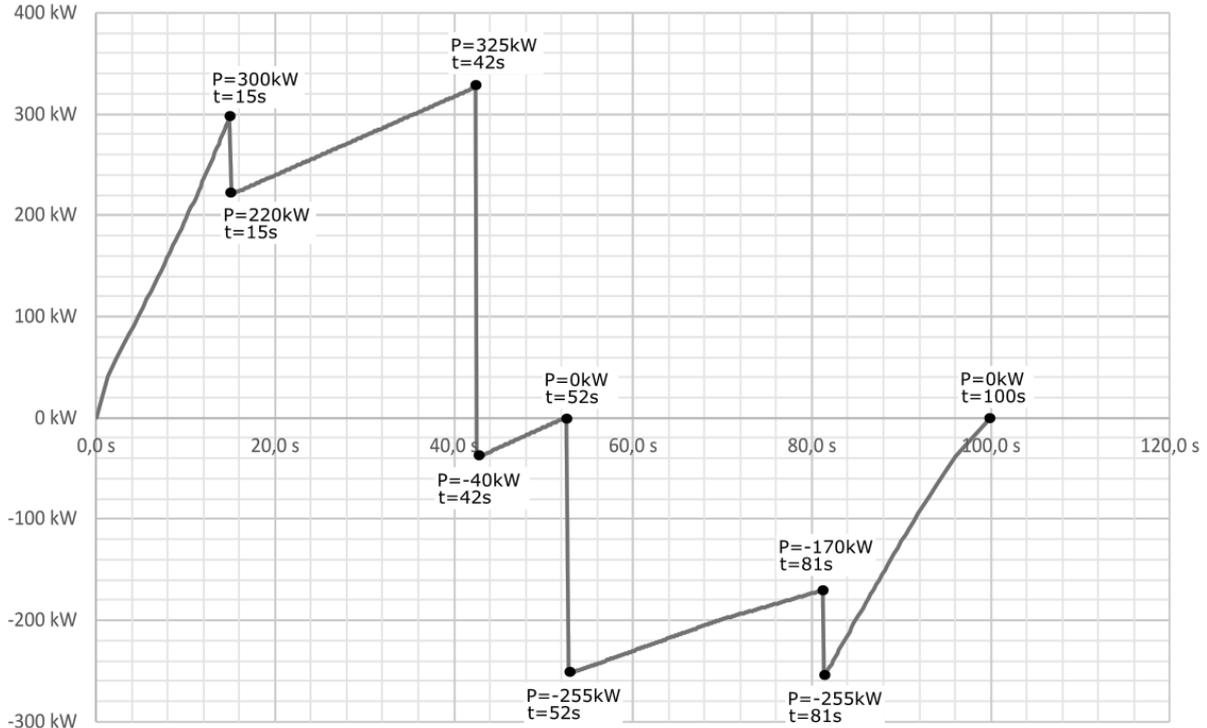


Figure 14 : profil temporel de puissance sur le bus continu lors d'un trajet

Question 24

À partir du profil temporel de la figure 14, calculer une valeur approchée des énergies absorbée puis récupérée par le téléphérique, noté respectivement E_{abs} et E_{rec} . Évaluer en pourcentage la part que représente l'énergie récupérée par rapport à l'énergie absorbée.

L'énergie absorbée étant plus élevée que l'énergie récupérée, on supposera qu'à chaque trajet, le téléphérique utilisera de l'énergie provenant :

- des supercondensateurs, et égale à la valeur E_{rec} déterminée à la question précédente ;
- du réseau ERDF, et égale à la différence $E_{abs} - E_{rec}$.

Il est impossible d'utiliser la totalité de l'énergie stockée dans un supercondensateur. En effet, cela reviendrait à une variation de tension de 0 V à sa valeur maximale. Ici, la tension minimale sera limitée à 250 V pour une tension maximale de 720 V.

Question 25

Exprimer l'énergie stockée dans un supercondensateur en fonction de la tension à ses bornes.

Question 26

En tenant compte des limites de la variation de tension, indiquer, en pourcentage, l'énergie utilisable par rapport à l'énergie maximale pouvant être stockée dans le supercondensateur. En déduire la valeur de l'énergie E_{sto} qu'il faudrait stockée dans le supercondensateur pour pouvoir utiliser l'énergie E_{rec} à chaque trajet.

En tenant compte des pertes dans les convertisseurs statiques, nous supposons que l'énergie stockée dans le supercondensateur est de $E_{sto} = 9\text{MJ}$.

Question 27

Calculer la valeur de la capacité C des supercondensateurs.

Les supercondensateurs utilisés sont les modules M65V385F avec les caractéristiques suivantes (voir annexe A3) :

- capacité de 385 F ;
- résistance série de 1,9 m Ω ;
- tension nominale de 65 V.

Question 28

Déterminer le nombre de modules à connecter (en série et/ou en parallèle) pour le fonctionnement du téléphérique.

La figure 15 présente un modèle équivalent de l'assemblage des supercondensateurs déterminé précédemment.

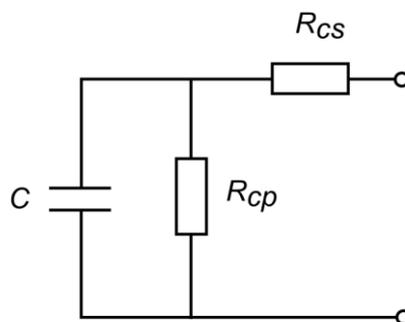


Figure 15 : modèle équivalent d'un supercondensateur

Question 29

En vous référent à l'annexe A3, expliquer pourquoi la résistance représentant l'autodécharge R_{cp} peut être négligée sans impact sur le dimensionnement énergétique réalisé.

Par la suite, on supposera que l'assemblage est constitué de 11 modules en série.

Question 30

Déterminer la valeur de la résistance R_{cs} et du condensateur C de l'assemblage.

Afin de simplifier l'étude qui suit, le courant dans les supercondensateurs est considéré comme étant continu par morceau. La valeur du courant dans chaque phase est telle que le courant produit la même quantité de chaleur dans la résistance R_{CS} de l'assemblage que le courant réel, qui lui n'est pas constant. Le profil du courant est donné à la figure 16.

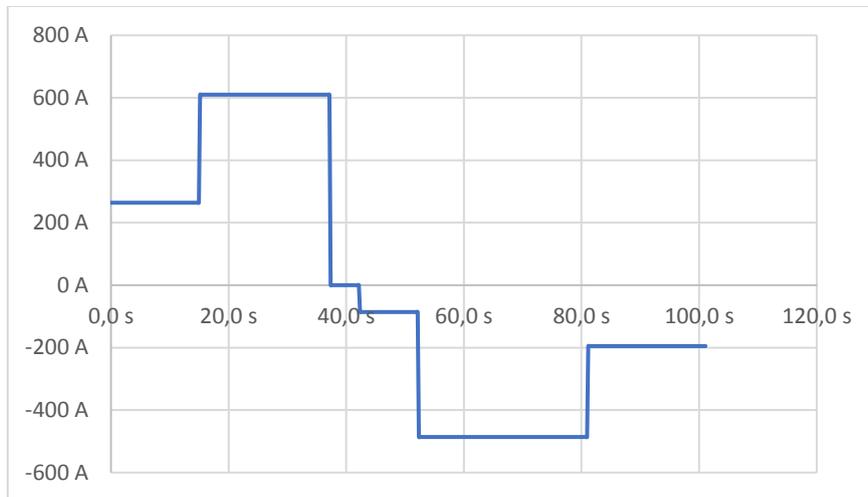


Figure 16 : profil temporel simplifié du courant dans les supercondensateurs

Les valeurs du courant et les temps des différentes phases sont les suivants :

	Courant (A)	Durée (s)		Courant (A)	Durée (s)
Phase 1	$I_1 = 264 \text{ A}$	$\Delta t_1 = 15 \text{ s}$	Phase 4	$I_4 = -86 \text{ A}$	$\Delta t_4 = 10 \text{ s}$
Phase 2	$I_2 = 610 \text{ A}$	$\Delta t_2 = 22 \text{ s}$	Phase 5	$I_5 = -486 \text{ A}$	$\Delta t_5 = 29 \text{ s}$
Phase 3	$I_3 = 0 \text{ A}$	$\Delta t_3 = 5 \text{ s}$	Phase 6	$I_6 = -195 \text{ A}$	$\Delta t_6 = 19 \text{ s}$

Question 31

Exprimer puis calculer la puissance moyenne dissipée dans la résistance R_{CS} des supercondensateurs. En déduire l'énergie dissipée lors d'un trajet. Comparer cette valeur par rapport à l'énergie stockée dans les supercondensateurs $E_{sto} = 9000 \text{ kJ}$.

Cette énergie est dissipée par convection et le modèle thermique d'un module, donné en annexe A3, est adopté. La température extérieure est fixée à $T_{cool} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Par la suite, on considèrera que le pack de supercondensateurs est constitué de 11 modules en série.

Question 32

Donner le modèle thermique d'un pack de supercondensateurs.

Question 33

Calculer la température intérieure T_{int} pour deux vitesses de l'air, $v_{air} = 0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ et $v_{air} = 20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Indiquer si la température intérieure est compatible avec les spécificités des supercondensateurs décrits en annexe A3. Conclure.

4.2 Principe de charge des supercondensateurs

Objectif : *Etudier les convertisseurs statiques utiles à la charge des supercondensateurs*

La figure 12 illustre le synoptique de l'installation avec les différents convertisseurs statiques. Dans cette partie, nous allons nous intéresser :

- au redresseur de type AFE, entre le réseau et le bus continu ;
- au convertisseur DC-DC, entre le bus continu et les supercondensateurs.

Redresseur de type AFE

Ce convertisseur se situe entre le réseau triphasé 400V-50Hz et le bus continu de tension $V_{bus} = 720 \text{ V}$. C'est un redresseur de type AFE (Active Front End), qui a pour avantage de réduire les harmoniques de courant au niveau du réseau et de pouvoir renvoyer l'énergie excédentaire sur ce même réseau. Il inclut les composants suivants (voir figure 17) :

- filtre de lissage (LFM) ;
- inductance de lissage (LFC) ;
- redresseur synchrone (AIC).

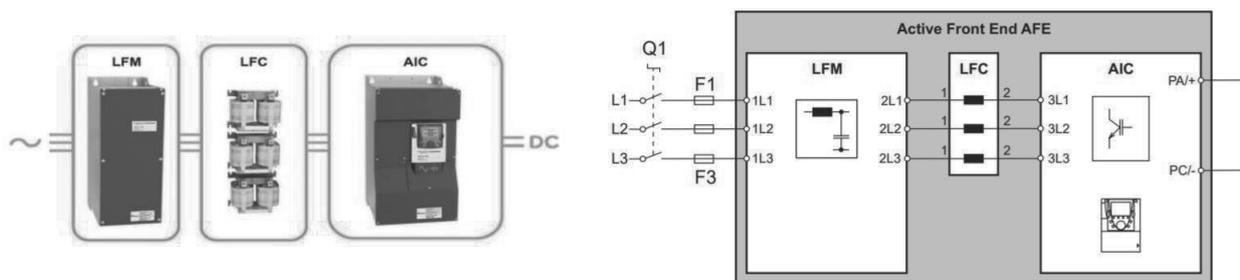


Figure 17 : constitution du redresseur AFE

Question 34

Expliquer l'intérêt d'un redresseur synchrone (avec transistors IGBT) par rapport à un redresseur à diodes.

Question 35

Indiquer l'utilité de placer en amont du redresseur les composants LFM et LFC.

Convertisseur DC-DC

Ce convertisseur se situe entre le bus continu de tension $V_{bus} = 720 \text{ V}$ et les supercondensateurs, dont la tension varie 250 V et 720 V. C'est un hacheur réversible en courant, permettant la charge et la décharge des supercondensateurs (figure 18).

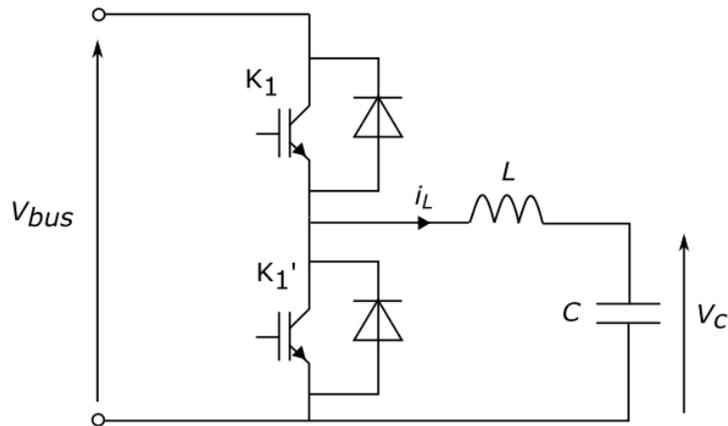


Figure 18 : hacheur réversible en courant

Les commandes des interrupteurs K_1 et K_1' sont complémentaires, avec K_1 commandé de 0 à αT_d . On note $f_d = \frac{1}{T_d}$ la fréquence de découpage, égale à 10 kHz.

Question 36

Déterminer la relation qui lie les tensions V_{bus} et V_C .

Question 37

En déduire la plage de variation du rapport cyclique α .

Question 38

Exprimer l'ondulation de courant dans l'inductance L , notée Δi_L , en fonction de V_{bus} , α , L et f_d .

Question 39

Dans la plage de variation de α déterminée à la question 37, déterminer la valeur de α qui maximise l'ondulation de courant. En déduire l'expression de l'ondulation maximale de courant.

L'ondulation du courant dans les supercondensateurs doit être limitée à 13 %. Dans le cas le plus défavorable, le courant moyen pendant la charge est de 610 A.

Question 40

Calculer la valeur de l'inductance L permettant de limiter l'ondulation de courant.

Les puissances transisant dans les semiconducteurs sont élevées. Afin de réduire ces puissances, la solution envisagée est un hacheur entrelacé, illustré à la figure 19. Cette solution permet aussi de réduire l'ondulation de courant Δi_L .

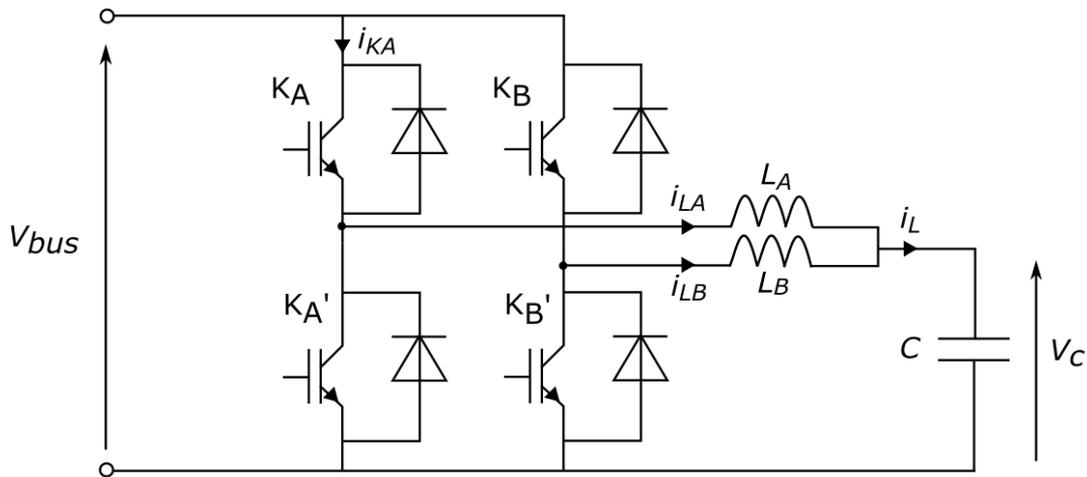


Figure 19 : hacheur entrelacé réversible en courant

Chaque bras de pont découpe à $f_d = 10 \text{ kHz}$, avec des commandes de même rapport cyclique mais décalées de $\frac{T_d}{2}$. Les inductances de lissage sont identiques $L_A = L_B = 200 \mu\text{H}$.

Question 41

Tracer sur le document réponse DR3 l'allure des courants i_{LA} , i_{LB} et i_L .

Question 42

Exprimer le courant efficace et le courant moyen dans l'interrupteur K_A en fonction du rapport cyclique α et des courants I_{min} et I_{max} définis sur le DR3.

Question 43

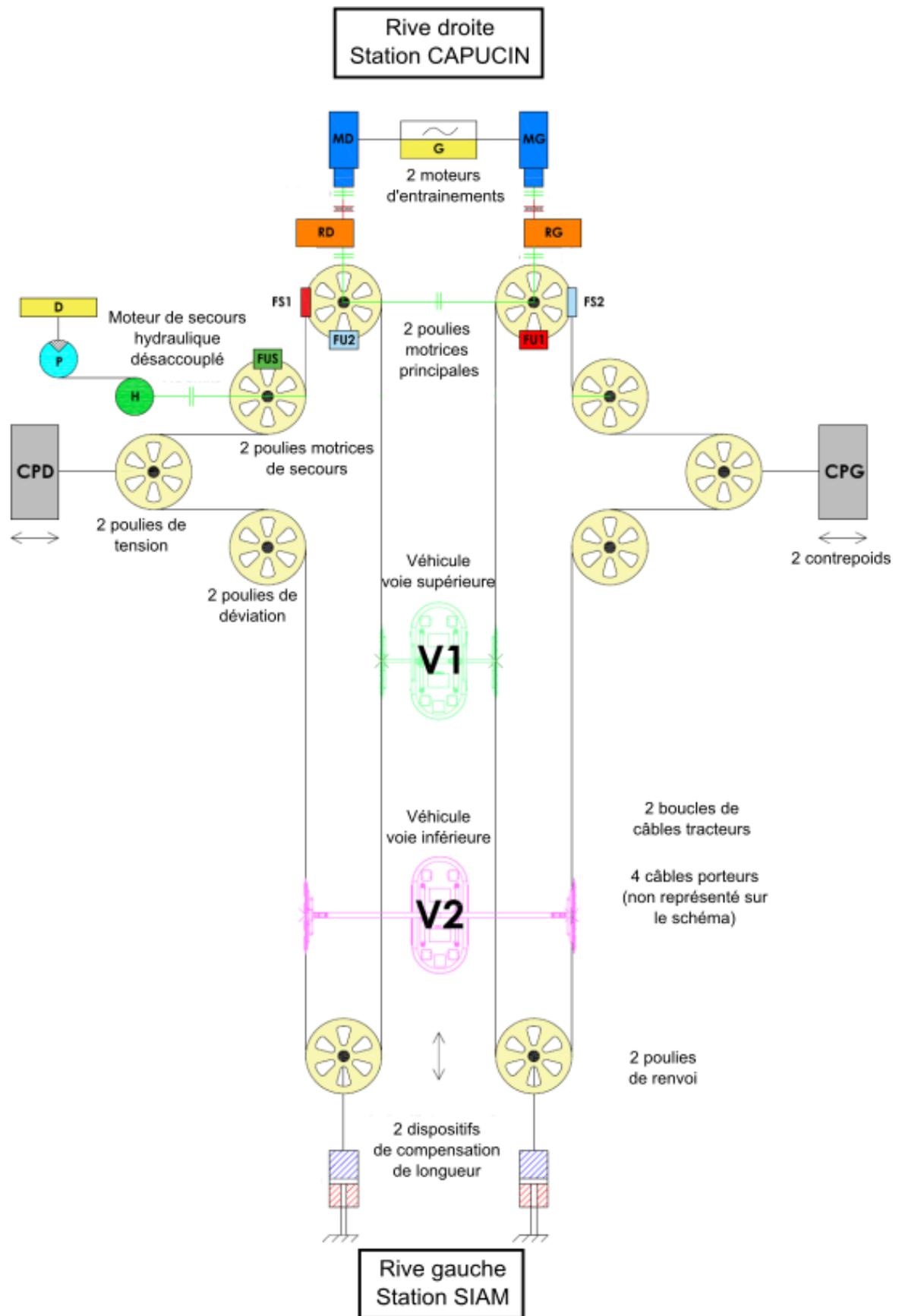
Conclure sur l'avantage de cette solution pour le dimensionnement des semi-conducteurs, et pour l'ondulation de courant.

DOCUMENTS ANNEXES



Document annexe A1

Schéma de principe de l'entraînement



Document annexe A2

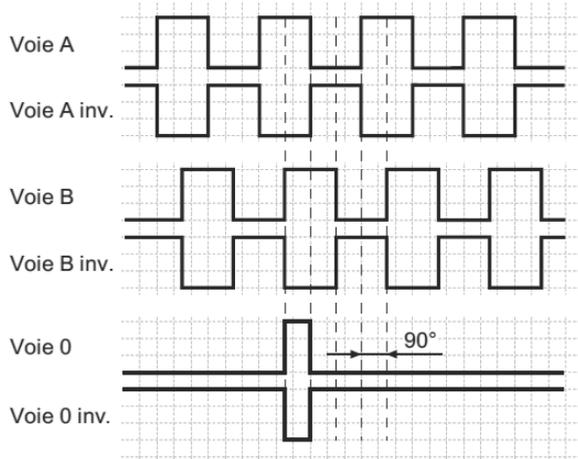
Codeur incrémental GI35.0.22.C2.21



GI355 avec bride standard

Signaux de sortie

Pour une rotation en sens horaire et vue sur l'axe.



Références de commande

Bride standard

GI355.

Code résolution (voir ci-dessous)

Raccordement

- C2 Embase axiale mâle, 12 points
- C3 Embase radiale mâle, 12 points
- 31 Câble 1 m, axial
- 41 Câble 1 m, radial

Alimentation / Sortie

- 22 5 VDC / Emetteur de ligne RS422
- 70 4.75...30 VDC / Totem pôle
- 72 10...30 VDC / Emetteur de ligne RS422 (5 VDC)

Bride / Axe

- 0 Bride standard / \varnothing 10 mm, IP 54
- A Bride standard / \varnothing 10 mm, IP 65

Code résolution (Nombre d'impulsions/tour)

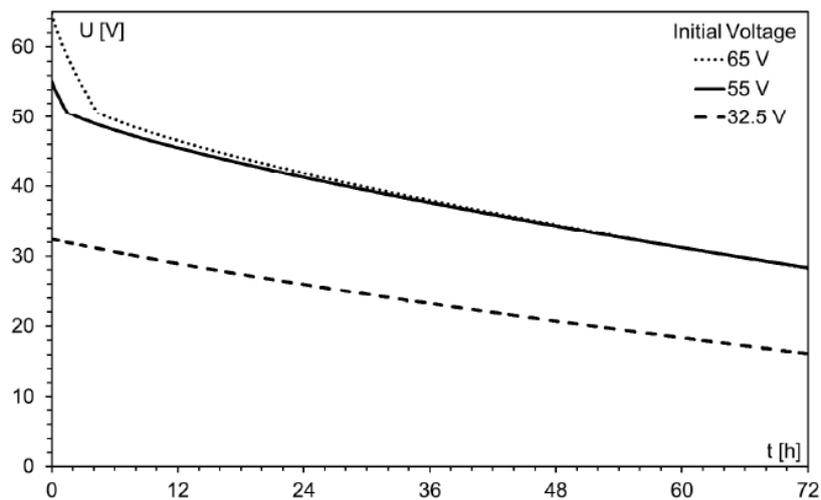
49 (5)	06 (200)	17 (600)	29 (2048)
36 (10)	08 (240)	19 (720)	30 (2500)
50 (25)	09 (250)	21 (900)	47 (3000)
39 (50)	10 (256)	22 (1000)	31 (3600)
40 (60)	11 (300)	23 (1024)	34 (4096)
41 (100)	13 (360)	61 (1200)	35 (5000)
01 (120)	14 (400)	24 (1250)	48 (6000)
57 (128)	15 (500)	26 (1500)	
05 (180)	16 (512)	28 (2000)	

Document annexe A3 Les supercondensateurs M65V385F

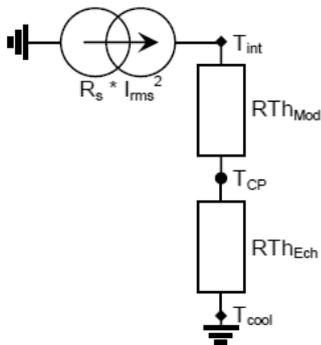
- Spécificités d'un module

Mechanical features	
Width (mm)	412.0
Length (mm)	630.0 max
Height (mm)	218.4
Volume (l)	57
Weight (kg)	53
Electrical features	
Nominal capacitance C (25°C, 125 A)	385 F
Nominal voltage	65 V
Nominal DC series resistance R_s^{DC} (25°C, 125 A)	1.9 mΩ
Time constant (25°C, 125 A)	< 0.8 s
Typical rms current ⁽¹⁾	325 A
Typical peak current	600 – 1000 A
Specific energy (2.7 Vpc, 25°C)	4.3 Wh/kg
Ragone power at 10 seconds, DOD 50%	1 kW/kg
Thermal features	
Internal operating temperature range*	-35 to +70 °C
Storage temperature range	-35 to +70 °C
Safe maximum module temperature during cycling	70°C

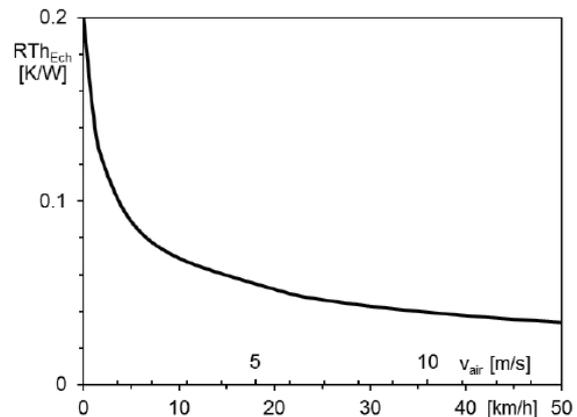
- Courbes d'auto-décharge d'un module, à 20°C, pour différentes tensions initiales



- Modèle thermique d'un module



Thermal characteristics	Typical value
Thermal resistance R_{ThMod}	0.083 K/W

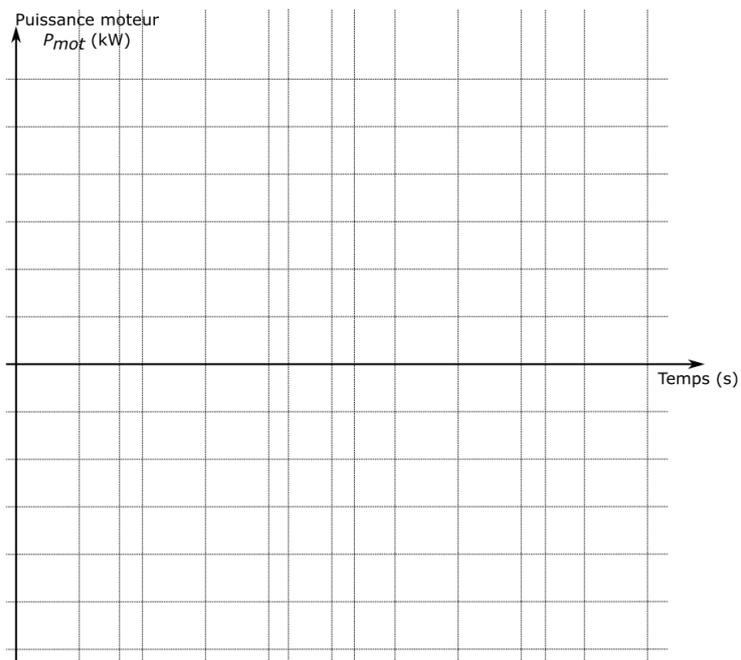
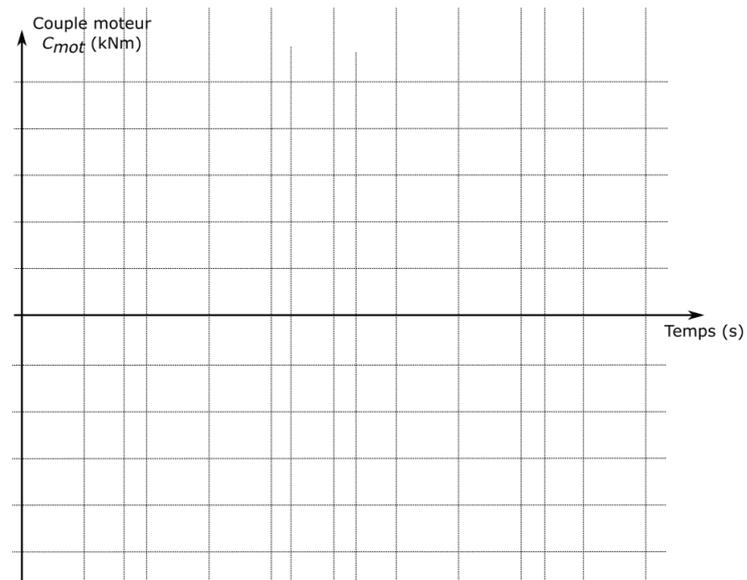
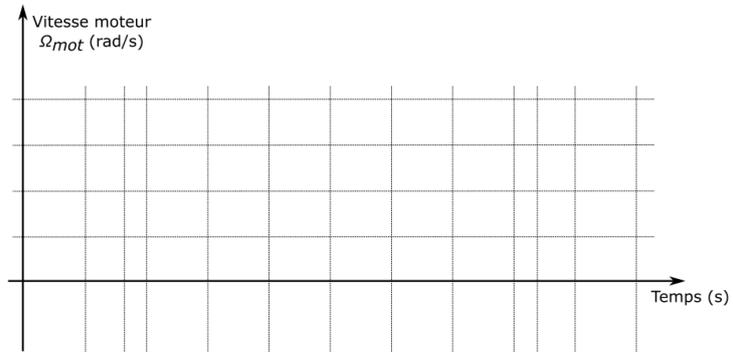


Résistance thermique de convection en fonction de la vitesse de l'air

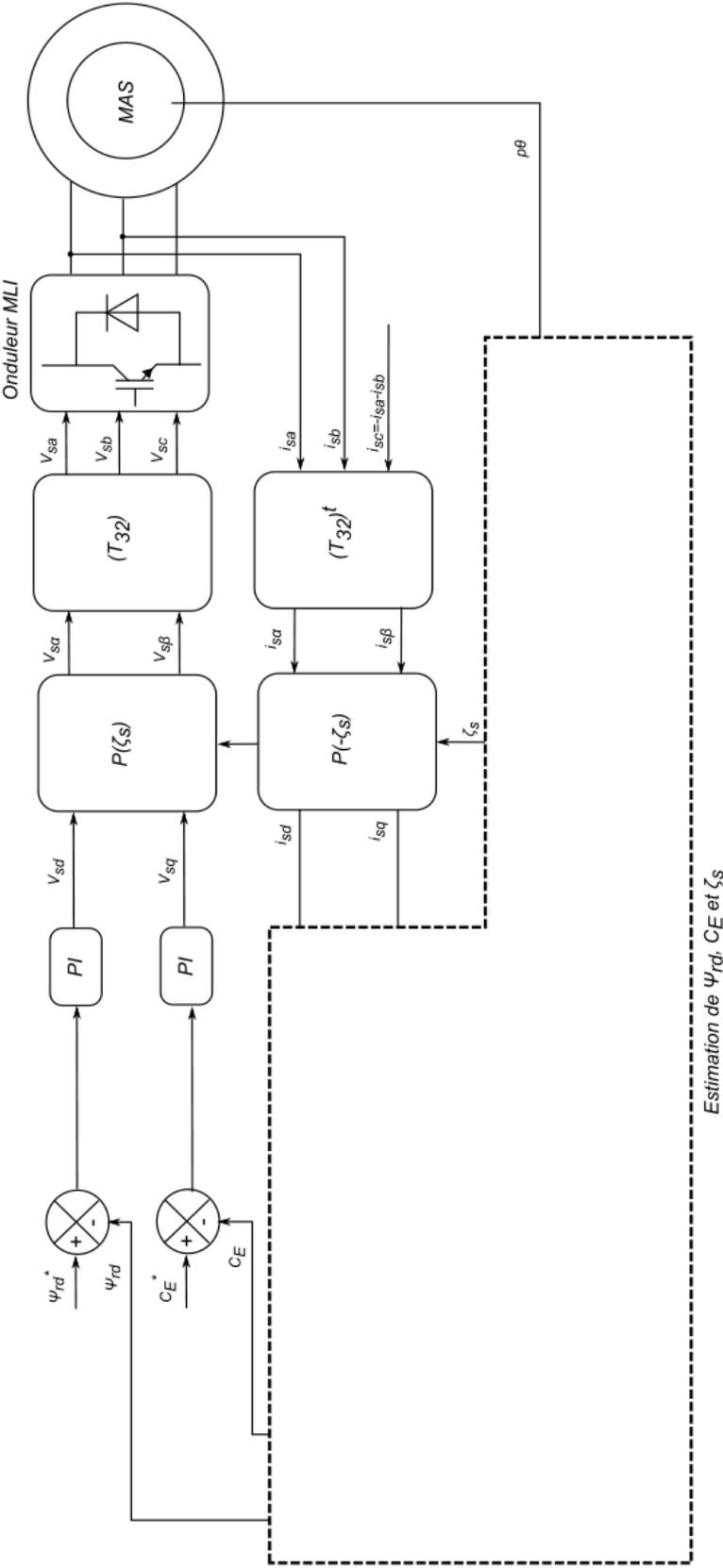
NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Document réponse DR1

Tracé des profils temporels de Ω_{mot} , C_{mot} et P_{mot} – Questions 5, 6 et 7



Document réponse DR2
Commande en couple du moteur asynchrone – Question 22



Document réponse DR3
Forme d'onde hacheur entrelacé – Question 41

