

Génie électrique

Devoir Surveillé : N°3

Dans le cas où un(e) étudiant(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

- L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire est rigoureusement interdit.
- Il est rappelé aux candidats que la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des explications entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies.

CAN 2025 au MAROC : Flyline

Exercice préliminaire (noté 4/20)

Un moteur à courant continu à excitation indépendante est alimenté sous une tension de 240 V. La résistance de l'induit est de $0,5 \Omega$, le circuit inducteur absorbe 250 W, et les pertes collectives sont estimées à 625 W.

Lorsque le moteur fonctionne à son point nominal, il consomme un courant de 42 A et tourne à une vitesse de 1200 tr/min.

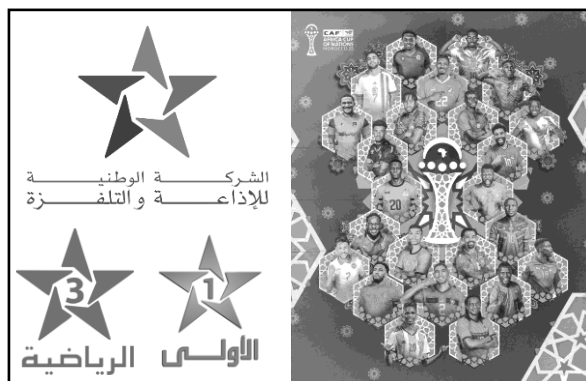
- **Question P1** : Représenter le modèle du moteur à courant continu en régime transitoire puis en régime permanent.
Exprimer et calculer la force contre-électromotrice E au point nominal.
- **Question P2** : Déterminer les expressions et calculer :
 - La puissance absorbée par le moteur.
 - La puissance électromagnétique produite.
 - La puissance utile transmise à la charge.
- **Question P3** : Calculer le couple utile et le rendement du moteur au point nominal.

Présentation du système :

Le Maroc, en tant qu'hôte de la CAN 2025 et co-organisateur de la Coupe du Monde 2030, se prépare à offrir une couverture audiovisuelle exceptionnelle. La Société nationale de radio et de télévision (SNRT), responsable de la diffusion, intègre des technologies avancées pour garantir une retransmission immersive et innovante.

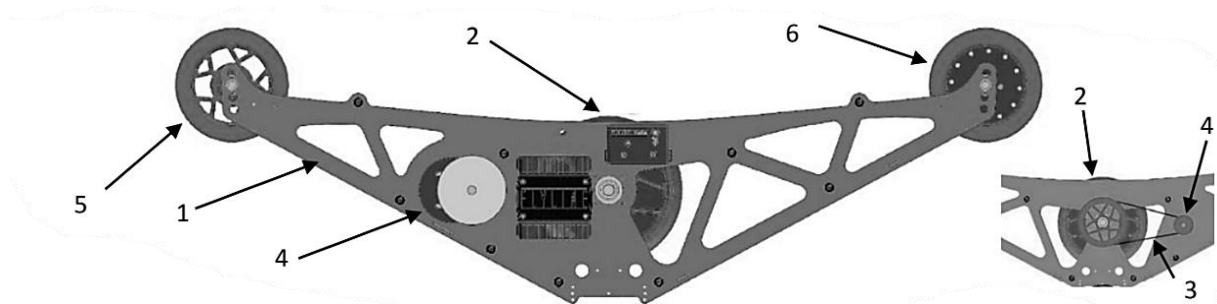
Inspirée par le modèle du Qatar en 2022, où Bein Sports a révolutionné la diffusion sportive, la SNRT prévoit d'exploiter des caméras embarquées et des prises de vue aériennes dynamiques. Un des systèmes clés est le travelling sur câble, une technologie qui permet de filmer sous des angles spectaculaires. Une **slackline** de plusieurs centaines de mètres supportera un châssis robotisé stabilisé, pouvant atteindre 45 km/h et réaliser des prises de vue à 360°.

L'objectif est d'améliorer l'expérience des spectateurs, d'optimiser la qualité des retransmissions et de proposer une diffusion multi-plateforme adaptée aux nouvelles habitudes numériques. Cette approche permettra de capturer chaque moment avec une fluidité et une précision exceptionnelle.



Grâce à ces avancées, le Maroc ambitionne de faire de la CAN 2025 et de la Coupe du Monde 2030 des événements de référence en matière de diffusion sportive, renforçant ainsi son rôle de leader technologique et médiatique en Afrique et dans le monde.

Ce système se compose de deux parties dont le pilotage est indépendant : un chariot mobile (partie 1, à étudier ultérieurement – voir annexe 2) et un stabilisateur de caméra (partie 2, non présenté ici), assurant la stabilité de l'image lors des déplacements pour les prises de vue.



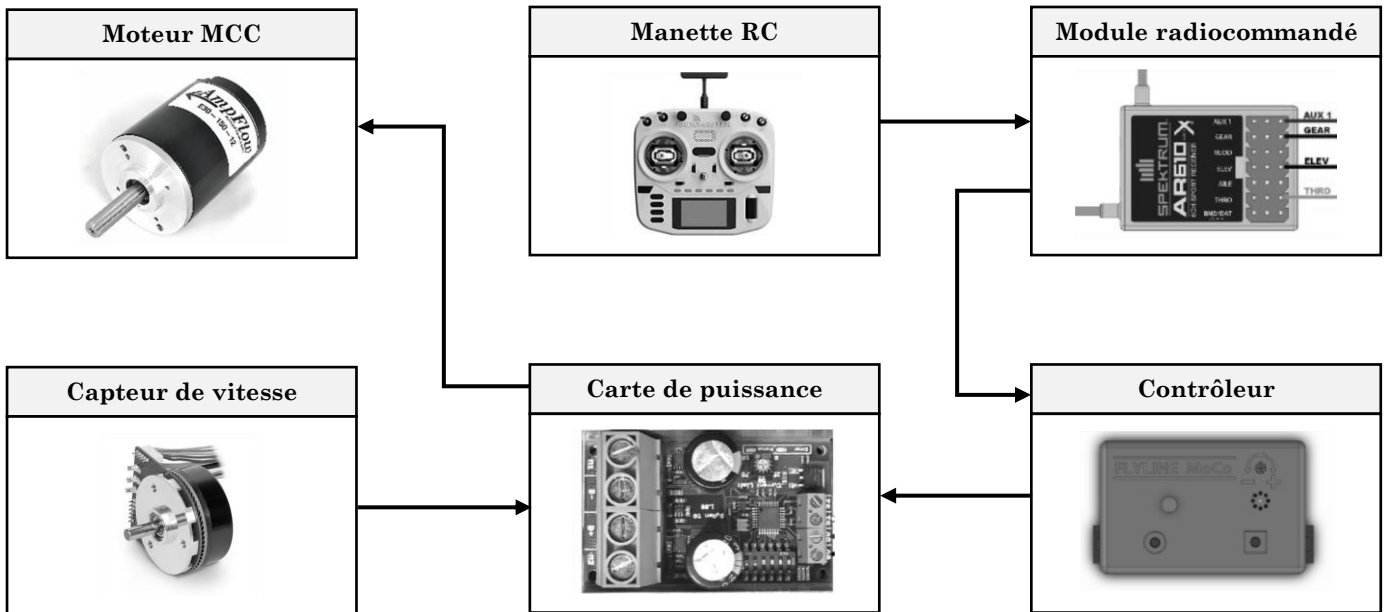
La première partie, contrôlée par une radiocommande, assure le déplacement linéaire sur la slackline et se compose de :

- Un châssis en aluminium supportant les composants (1),
- Une roue motrice (2) entraînée par une courroie (3) et un moteur à courant continu (4) avec encodeur,
- Deux roues libres (5), dont l'une intègre un capteur de rotation (6),
- Une carte microcontrôleur pilotant le moteur selon les commandes d'une radiocommande ou d'un smartphone.
- Une carte de puissance pour le contrôle du moteur,
- Une batterie offrant une autonomie de 7 km, selon le fabricant.



Deuxième partie : Le chariot mobile est contrôlé par une radiocommande. Son signal est reçu par un module radio, qui le transmet au contrôleur. Ce dernier, en tenant compte des données du capteur de rotation, pilote le moteur via la carte de puissance.

Le fonctionnement du chariot mobile est représenté dans le diagramme de contexte suivant :



Partie A : Déplacement radiocommandé du chariot mobile.

Objectif : cette partie consiste à analyser le chariot mobile lors de son déplacement linéaire sur la slackline. L'étude du comportement dynamique du système vise à déterminer les temps d'accélération et de décélération, ainsi qu'à calculer la force motrice F_r nécessaire pour surmonter l'inertie et les forces résistantes durant l'accélération.

Les figures 1 et 2 illustrent les dimensions des terrains, mesurant $L = 100 \text{ m}$ de large et $H = 50 \text{ m}$ de haut. Le Flyline, qui transporte la caméra, se déplace en aller-retour en diagonale sur la slackline entre les points A et B, séparés par une distance D .

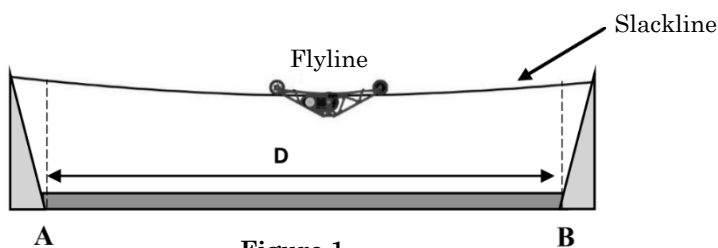


Figure 1

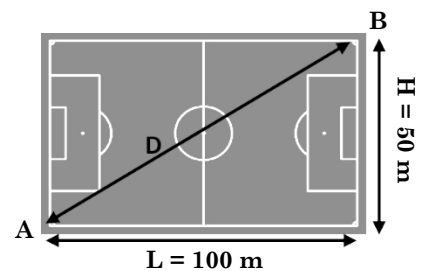


Figure 2

Le chariot mobile de Flyline suit un profil de vitesse trapézoïdal à chaque déplacement. La figure 3 illustre ce profil pour un trajet en direction du centre du terrain.

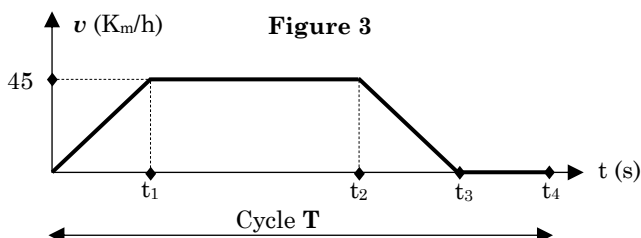


Figure 3

- Une phase d'accélération d'une durée $t_1 = 14\text{s}$,
- Un déplacement à vitesse constante durant $(t_2 - t_1)$ sur une distance de longueur $D/2$.
- Une phase de décélération d'une durée $(t_3 - t_2) = 12,5\text{s}$,
- Un arrêt centre de terrain d'une durée $(t_4 - t_3) = 20\text{s}$.

La chaîne de puissance mécanique comprend une roue réceptrice avec un diamètre extérieur D_e et un diamètre intérieur D_i . Elle est entraînée par une transmission à courroie et un moteur à courant continu (MCC), relié à une roue motrice de diamètre D_m .

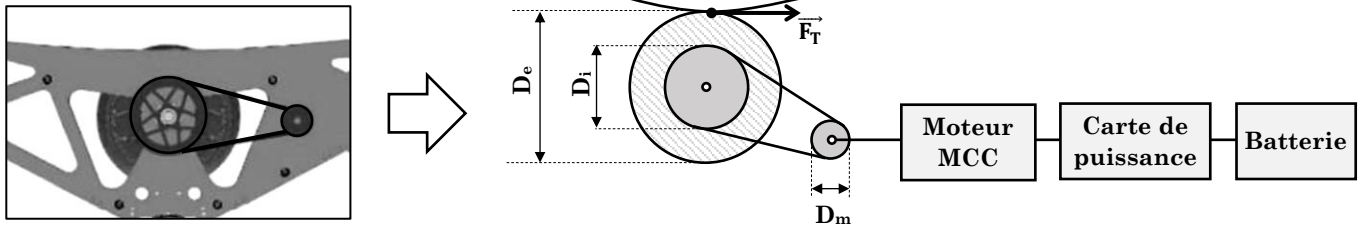


Figure 4

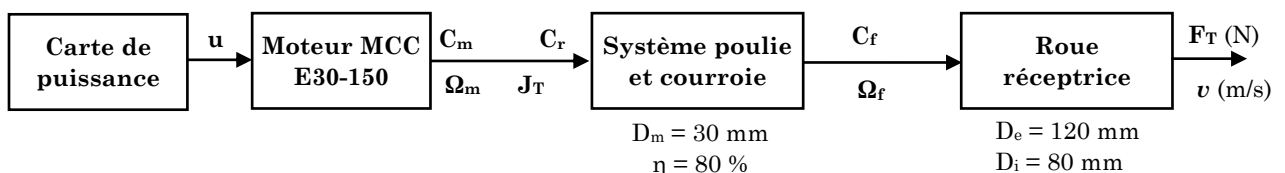
Le déplacement du chariot est assuré par un moteur à courant continu, modèle E30-150. La force de traction correspond à l'effort que le moteur doit fournir pour compenser le couple d'accélération ainsi que les couples dus au frottement et à l'adhérence. Cette force est définie par :

$$F_T = a_c \cdot M + M \cdot g \cdot C_{ad}$$

Avec :

- a_c : l'accélération linéaire en m/s^2 ($a_c = dv/dt$)
 - g : la pesanteur égale **9.81** en N/Kg (ou m/s^2).
 - C_{ad} : le coefficient dynamique d'adhérence, on donne que le Slackline et roue motrice sont en **acier** (voir l'annexe).
 - M : la masse totale des composants de Flyline (chariot + Caméra + Batterie).
- **Question 1** : Déterminer le temps de cycle T de profil de vitesse en procédant aux étapes suivantes :
 - a. Exprimer puis calculer la distance D en fonction de la hauteur H et de la largeur L .
 - b. Déduire la vitesse du chariot en m/s entre l'instant t_1 et t_2 .
 - c. Calculer le temps $t_2 - t_1$ nécessaire au chariot pour parcourir la distance à vitesse constante.
 - d. Déduire le temps de cycle T de profil.
 - **Question 2** : Déterminer l'accélération (a_c), puis identifier la phase du mouvement où une récupération de puissance mécanique pourrait être envisagée.
 - **Question 3** : En s'appuyant sur l'annexe 1, calculer la masse totale M , puis en déduire la force motrice F_T que le chariot doit produire lors de l'accélération pour surmonter l'inertie et la force résistante due aux frottements.

Nous nous intéressons maintenant à la **phase permanente** ($t_2 - t_1$), durant laquelle le chariot se déplace à une vitesse constante de **45 km/h**. Ce déplacement est assuré par la roue réceptrice (voir figure 4), entraînée par un moteur à courant continu. La transmission de puissance s'effectue via un système à courroie. Le synoptique ci-dessous illustre la chaîne de transmission :



On donne : $r = \frac{\Omega_f}{\Omega_m} = \frac{D_m}{D_i}$ et que au régime permanent ($a_c = 0$) la force de traction vaut : $F_T = 35.56 \text{ Nm}$

- **Question 4** : Exprimer la vitesse angulaire Ω_f de l'arbre de la roue réceptrice en fonction de la vitesse v et du diamètre D_e , puis calculer sa valeur numérique. Ensuite, déterminer la vitesse angulaire Ω_m du moteur. Enfin, en déduire la fréquence de rotation Nm en tr/min .
- **Question 5** : Exprimer le couple C_f à l'arbre de la roue réceptrice, puis calculer sa valeur. Ensuite, déterminer le couple résistant C_r sur l'arbre du moteur en fonction de C_f , du rapport de transmission r et du rendement η .

- **Question 6** : En appliquant le principe fondamental de la dynamique en régime permanent, calculer la valeur du couple moteur C_m et vérifier si le moteur choisi est adapté à ces conditions de fonctionnement (Voir le tableau des caractéristiques du moteur **Partie B**).

Partie B : Motorisation de chariot mobile

Objectif : L'objectif de cette section est d'analyser le bilan énergétique de la machine à courant continu responsable du déplacement de l'ensemble. Cette étude permettra de déterminer la capacité de la batterie nécessaire pour garantir une autonomie de $\Delta t = 155$ minutes (90 minutes de fonctionnement normal, 30 min prolongations, 20 min temps complémentaire et 15 min de tirs au but).

Le chariot mobile est propulsé par une machine à courant continu à aimant permanent, modèle **E30 - 150 - 24V**, dont les caractéristiques sont les suivantes :

Caractéristiques	Valeurs
Tension d'induit nominale U_n	24 V
Couple nominal C_m	1,27 N.m
Courant d'induit nominal I_n	33 A
Couple de démarrage C_d	5,02 N.m
Vitesse de rotation nominale N_n	5600 tr/min
Résistance d'induit R	0,02 Ω
Coefficient de couplage K_c	0,0403 N.m/A
Coefficient de f.e.m K_e	0,0403 V.s/rad
Couple de frottement sec C_{sec}	20,3 10^{-3} N.m
Coefficient de frottement visqueux f	35,2 10^{-6} N.m.s/rad



Le modèle de la machine à courant continu est illustré dans la figure 5. Il se compose d'une force électromotrice E , d'une résistance d'induit R et d'une inductance d'induit L . on vous donne les équations de la MCC :

- Equations de maille de l'induit : $u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + R i(t) + e(t)$
- Equation électromécanique : $e(t) = K_e \cdot \Omega(t)$
- PFD: $J \frac{d\Omega(t)}{dt} = C_m(t) + C_r(t) + f \cdot \Omega(t)$
- Equation électromécanique : $C_m(t) = K_c \cdot i(t)$

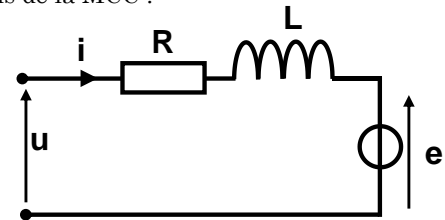


Figure 5

Le couple de pertes C_p dans la machine à courant continu est dû au couple de frottement sec C_{sec} et au couple visqueux C_v , et s'exprime par la relation suivante :

$$C_p = C_{sec} + f \cdot \Omega = \frac{P_c}{\Omega} \quad \text{Avec } P_c \text{ représente la puissance des pertes collectives.}$$

Le contrôleur de vitesse de la machine à courant continu est alimenté par une batterie de capacité **100 Ah**, définie par la relation : $C_b = I_b \cdot \Delta t$.

Avec :

- I_b étant le courant total fourni au moteur et aux cartes de commande du chariot,
- $I_b = I + I_c$, où I est le courant absorbé par le moteur et I_c celui des cartes de commande,
- Δt représentant l'autonomie de la batterie en heures.

1- Etude énergétique

Dans cette partie, nous nous intéressons au régime permanent, où le courant d'induit reste constant à sa valeur nominale $i(t) = I_n$, la vitesse demeure stable à $\Omega(t) = \Omega_n$, et la force contre-électromotrice est égale à $e(t) = E_n$.

- **Question 7** : Établir la relation entre Ω (vitesse angulaire) et N (vitesse en tr/min), puis en déduire la valeur de la vitesse angulaire nominale Ω_n .

○ **Question 8 :** On suppose que $K = K_c = K_e$ et que la vitesse angulaire à vide de la machine est donnée par $\Omega_0 = \frac{U}{K}$.

Répondre aux points suivants :

- Reformuler les équations du moteur en tenant compte de son fonctionnement en régime permanent.
- Représenter le schéma électrique de l'induit en régime permanent et en justifier la structure.
- Déterminer l'expression de la caractéristique $\Omega(I)$ en fonction de Ω_0 , R , I et K , puis le trace.

○ **Question 9 :** Calculer la puissance par effet joule induit et ainsi que la puissance électromagnétique P_{em} , ensuite déduire le couple électromagnétique C_{em} au point nominal.

○ **Question 10 :** Calculer le couple des pertes collectives C_p à la vitesse nominale $N = 5600$ tr/min, puis en déduire la puissance des pertes collectives P_c . Déduire le couple utile C_u .

○ **Question 11 :** Calculer la puissance utile P_u (ou puissance mécanique P_m), la puissance absorbée P_a puis déduire le rendement η de la machine au point nominal.

La machine fonctionne désormais à vide, c'est-à-dire sans entraîner de charge (puissance utile nulle). Cependant, même dans ces conditions, elle absorbe un courant I_0 , ce qui entraîne une puissance absorbée à vide P_0 .

○ **Question 12 :** Que présente la puissance absorbée à vide P_0 ? déduire la valeur de courant à vide I_0 si on néglige les pertes joules induit à vide P_{j0} , sachant que la machine est alimentée sous sa tension nominale $U_n = 24V$.

○ **Question 13 :** en se basant des expressions de la machine. Déterminer la fréquence de rotation de la machine à vide, notée N_0 (tr/min)

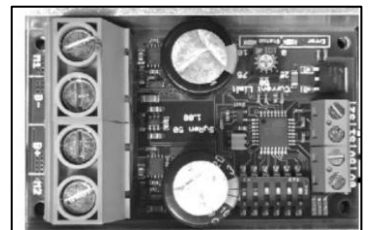
2- Autonomie de la batterie

Sachant que la batterie fournit un courant total I_b , composé du courant absorbé par le moteur I et d'un courant constant I_c alimentant les cartes de commande, avec $I_c = 0,35A$.

○ **Question 14 :** Déterminer le courant total I_b fourni par la batterie, puis en déduire son autonomie Δt . Conclure sur la capacité du chariot à fonctionner durant un match de football d'une durée maximale de **155 minutes**.

Partie C : Déplacement du chariot à vitesse variable

Objectif : Valider le choix du moteur au regard des formes d'ondes issues du variateur de vitesse. Pour cela, une analyse des formes d'ondes du variateur permet de quantifier le facteur de forme, paramètre influant sur l'échauffement du moteur.



Le schéma structurel du variateur de vitesse est représenté figure suivant.

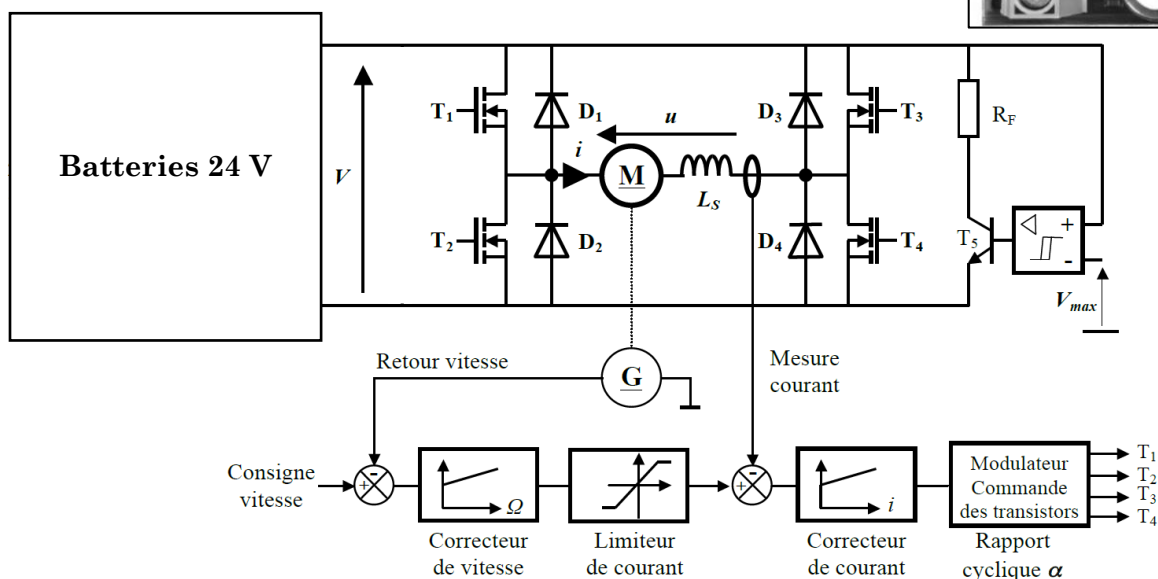


Figure 6 : Schéma structurel du variateur de vitesse

En fonctionnement dans le quadrant 1 du plan vitesse/couple, la commande des transistors suit la séquence décrite dans la figure 7, avec une période de découpage $T = \frac{1}{f} = 1/17000 \text{ s}$ et un rapport cyclique $\alpha \in [0, 1]$.

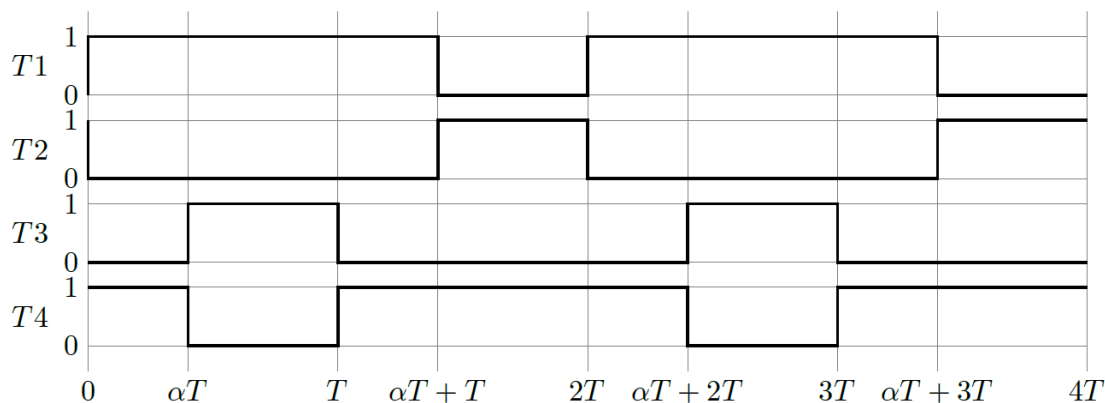
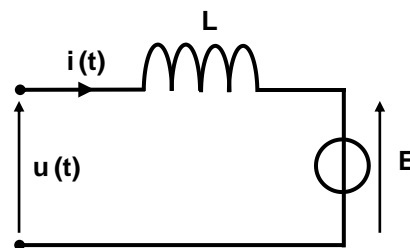


Figure 7 : Commande des transistors

La constante de temps du circuit d'induit du moteur de la figure 5, donnée par le rapport : $\tau = \frac{\text{inductance du moteur} + L_s}{\text{résistance du circuit d'induit}}$ étant largement supérieure à la période de découpage, on peut négliger le terme $R \cdot i(t)$ devant $L \frac{di}{dt}$.

Le schéma équivalent alors de la machine est représenté ci-après, où E désigne la force contre électromotrice du moteur, supposée constante et L correspond à la somme de l'inductance du moteur et de l'inductance de lissage L_s .



Hypothèses :

- ☉ Le courant qui traverse la machine ne s'annule jamais : $0 < I_m < i(t) < I_M$
- ☉ La source d'entre est une batterie et est une source de tension réversible en courant.
- ☉ Les interrupteurs qui constituent le hacheur sont tous parfaits.
- ☉ L'ondulation de courant est donnée par : $\Delta i = \frac{I_M - I_m}{2}$

○ **Question 15 :** Dans le document réponse, représente le schéma du hacheur à 4 quadrants pour chacun des quatre intervalles de temps suivants : $t \in [0, \alpha T]$, $t \in [\alpha T, T]$, $t \in [T, T + \alpha T]$ et $t \in [T + \alpha T, 2T]$.

- a) Tracer l'évolution du courant $i(t)$ dans le schéma concerné pour chaque intervalle, en supposant que $i(t) > 0$.
- b) Identifier les interrupteurs conducteurs (ceux qui sont en conduction) à chaque phase du cycle.
- c) Déterminer l'expression de $u(t)$ en fonction de V , ainsi que les courants i_{D1} et i_{T1} en fonction de $i(t)$.
- d) Représenter les allures de $u(t)$, puis calculer sa valeur moyenne $\langle u(t) \rangle$.

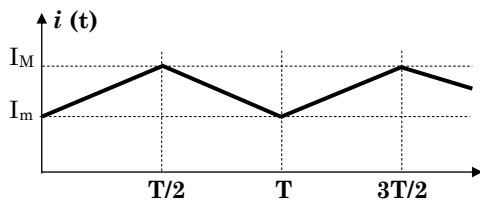
○ **Question 16 :** Exprimer Δi_{max} , la valeur maximale de l'ondulation du courant. Pour cela, exprimer successivement :

- a) $i(t)$ pour $t \in [0, \alpha T]$ en fonction V , E , L , t et I_m , puis représenter l'allure de $i(t)$ dans le document réponse.
- b) Δi en fonction V , E , L , α et T .
- c) E en fonction V et α sachant que $i(t)$ est périodique : $\langle v_L(t) \rangle = 0$
- d) Δi en fonction V , L , α et f .
- e) Δi_{max} en fonction V , L , α et f .

Le calcul précédent montre que cette ondulation est maximale pour $\alpha = 0,5$. Le constructeur du variateur recommande la mise en série d'une inductance de **0,18 mH** (série E24), ce qui conduit à une ondulation de courant Δi_{max} de **1 A**. Le constructeur moteur E30 – 150 – 24V recommande d'avoir un facteur de forme F inférieur à **1,02** pour éviter de déclasser le moteur.

Nous nous intéressons au point où l'ondulation est maximale Δi_{\max} et cherchons à calculer la perte joule du moteur dans ses conditions et sera comparée à la perte joule nominale P_{jn} du moteur. De plus, nous déterminerons le facteur de forme **F**.

La figure suivante représente l'allure de courant $i(t)$ pour $\alpha = 0,5$.



On donne :

✓ $I_M - I_m = 2 \Delta i_{\max}$

✓ $I_M = I + \Delta i_{\max}$

✓ $I_m = I - \Delta i_{\max}$ avec I est le courant moyen de $i(t)$: $I = \frac{I_M + I_m}{2}$

On définit la valeur efficace d'un signal $s(t)$ par $S_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s(t)^2 dt}$ et le facteur de forme par $F = \frac{S_{\text{eff}}}{\langle s(t) \rangle}$

○ **Question 17** : Déterminer l'expression du courant $i(t)$ en fonction Δi_{\max} , I_m et T sur l'intervalle $[0, T/2]$.

○ **Question 18** : démontrer que la valeur efficace du courant $i(t)$ pour $\alpha = 0,5$, est donnée par l'expression suivante :

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{I^2 + \frac{\Delta i_{\max}^2}{3}}$$

○ **Question 19** : Déterminer la valeur efficace I_{eff} du courant $i(t)$, puis calculer les pertes joules en considérant une valeur moyenne du courant $I = 33 \text{ A}$ et une résistance d'induit $R = 0,02 \Omega$. Comparer cette valeur aux pertes joules nominales obtenues dans la **question 9**.

○ **Question 20** : Calculer le facteur de forme **F**, et conclure quant à la nécessité éventuelle de déclassement du moteur.

Note importante :

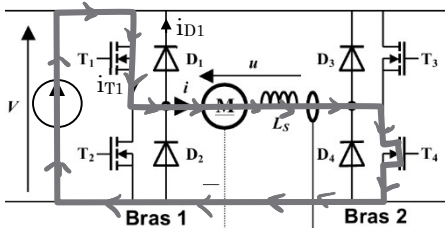
- ✓ **Déclasser un moteur** signifie **réduire ses performances nominales** en modifiant un paramètre qui affecte son fonctionnement (tension, courant, fréquence, inductance, etc.).
- ✓ Cela peut entraîner **une perte de puissance, une diminution du rendement ou une surchauffe**.

*** *Fin d'épreuve* ***

Document réponse : DR1

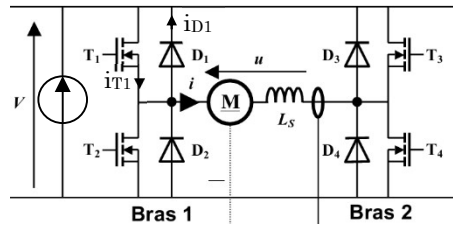
Nom et Prénom :

❖ Intervalle : $t \in [0, \alpha T] \Rightarrow i(t) > 0$



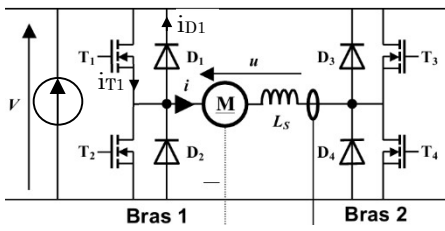
- Interrupteurs en conduction : **T_2 et T_4**
- Tension $u(t)$: **$u(t) = V$**
- Courant $i_{T1}(t)$: **$i_{T1} = i(t)$**
- Courant $i_{D1}(t)$: **$i_{D1} = 0$**

❖ Intervalle : $t \in [\alpha T, T]$



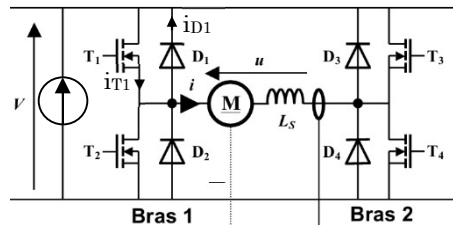
- Interrupteurs en conduction :
- Tension $u(t)$:
- Courant $i_{T1}(t)$:
- Courant $i_{D1}(t)$:

❖ Intervalle : $t \in [T, T + \alpha T]$



- Interrupteurs en conduction :
- Tension $u(t)$:
- Courant $i_{T1}(t)$:
- Courant $i_{D1}(t)$:

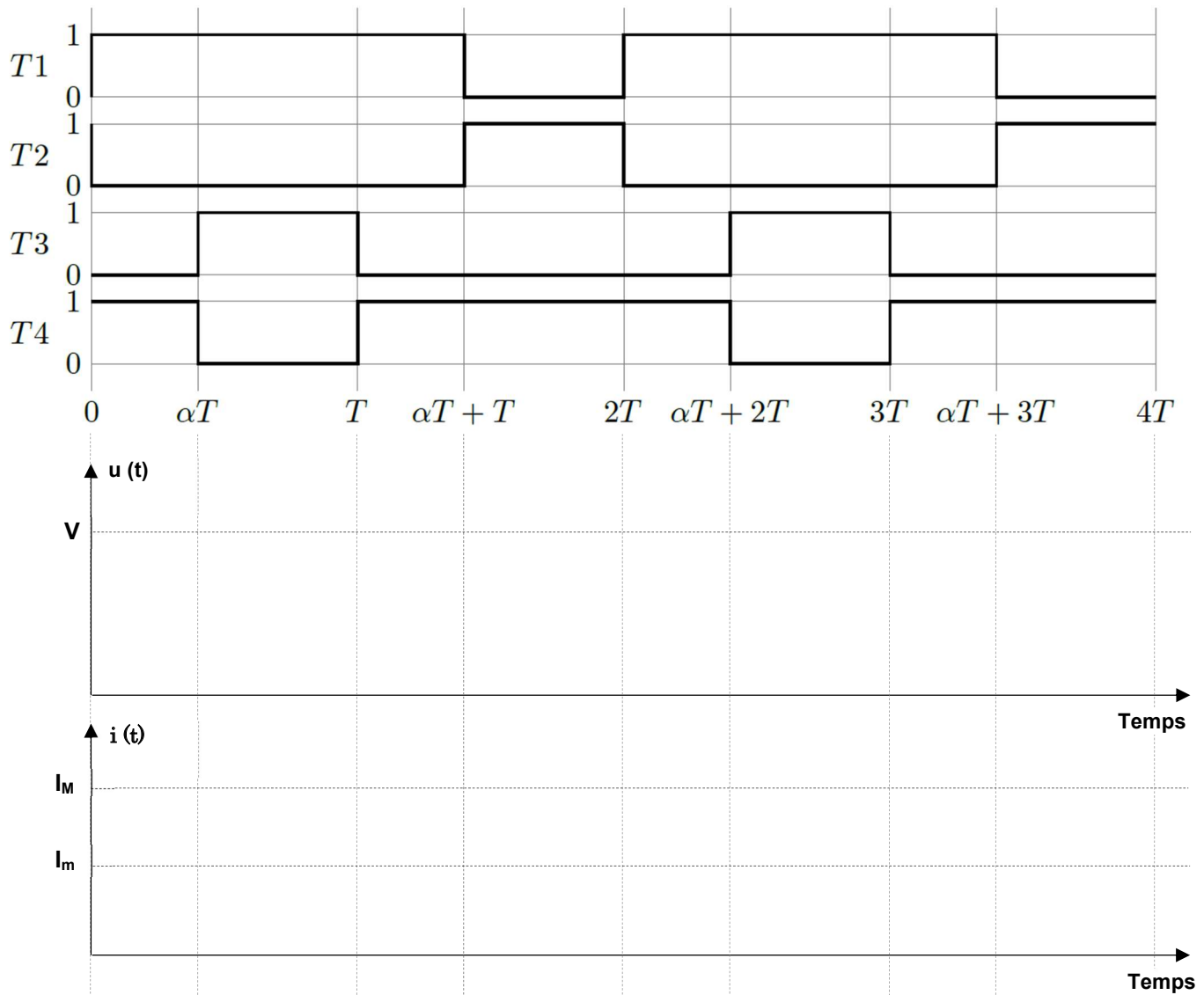
❖ Intervalle : $t \in [T + \alpha T, 2T]$



- Interrupteurs en conduction :
- Tension $u(t)$:
- Courant $i_{T1}(t)$:
- Courant $i_{D1}(t)$:

Document réponse : DR2

Nom et Prénom :



Bras 1								
Bras 2								

Conduction des interrupteurs de puissance

ANNEXE

Caractéristiques techniques de flyline

Large trees and scaffolding and light poles or other firmly fixed objects can be used to anchor to provided the objects can withstand 300-1,500lb of pulling tension at the rope connection point (depending on cable length). The longer the cable length the higher the tension on the cable must be. At a length of 150m it should be tensioned up to 1500lb. Of course it is REQUIRED that a qualified rigger calculate the cable and attachment loads and rig as required.

Specifications

- Size: 100 x 85 x 25 cm (Including Ronin-M gimbal)
- Weight: 7kg (with battery and gyro – without camera)
- Max. camera weight: 8kg
- Max. speed: 60kph (40mph)
- Max. cable slope: 20% grade (12 degrees)
- Operating voltage: 12-25vdc
- Max amps: 50A
- Regenerative braking: Yes
- Motion Control with auto end stop braking: Optional
- Gyro stabilized: Optional



Cable Setup

To operate the FlyLine you must first run a length of cable between two anchor points. As previously mentioned, be sure the anchor points are sufficient strength to support the tensioned cable. To tension the cable between two fixed points like trees or similar you can use a 4 ton manually operated winch as shown to the right.



Coefficient dynamique d'adhérence

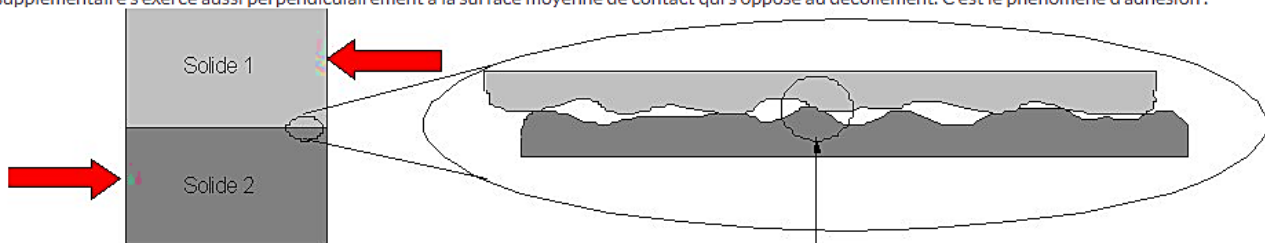
De quoi s'agit-il?

La tribologie (en grec tribein = frotter) est la science du frottement. Regardons d'abord quelques termes d'usage courant.

L'adhérence

Le frottement (on parle également de friction) est le phénomène qui fait que des forces tendent à s'opposer au glissement d'un solide posé à plat sur un autre. On parlera aussi de frottement statique, puisqu'il n'y a pas eu de déplacement des surfaces en présence.

Lors du contact initial, des effets de la rugosité des faces en présence créent l'adhérence qui rend compte de la résistance qui empêche le déplacement relatif. Au niveau microscopique, des forces de liaison chimique sont créées entre les atomes des deux surfaces des solides en regard. En plus du poids, une force supplémentaire s'exerce aussi perpendiculairement à la surface moyenne de contact qui s'oppose au décollement. C'est le phénomène d'adhésion.



Explication de l'adhérence par rugosité, et pénétration des solides l'un dans l'autre. Le cercle ci-dessus signalé par une flèche noire entoure une rugosité de surface (défauts microscopiques sur la surface des solides).

Considérons un livre sur une surface inclinée. Il est possible de caractériser son adhérence.

Si l'angle α est assez petit, la capacité d'adhérence entre le livre et le support est suffisante pour éviter que le livre ne glisse. Par contre, si α devient trop grand, la composante tangentielle au contact de la gravité devient trop importante, et la force d'adhérence n'est plus suffisante pour empêcher le mouvement. Le livre se met alors à bouger.

La valeur limite de l'angle α au delà duquel le livre se met à glisser caractérise le coefficient d'adhérence égal à $\tan \alpha$.

Nature des matériaux en contact	Coefficient d'adhérence
pneu/bitume	1
acier/acier	0,3
acier/glace	0,05