

SESSION 2013

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

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

Dans le cas où un(e) candidat(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.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A- Présentation

« BOBINEUSE VAS »

Recommandations générales

- Vérifier que le sujet comporte 8 pages de présentation, 27 pages de questionnement, 19 pages de documents réponses (DR).
- L'épreuve se compose de 3 parties indépendantes. A l'intérieur de chaque partie, de nombreuses questions sont également indépendantes. *Le candidat est donc invité à lire rapidement et entièrement l'énoncé avant de commencer à composer afin de bien répartir le temps de composition entre les différentes parties.*
- Les parties A,B,C doivent être rédigées sur des copies séparées en respectant scrupuleusement la numérotation des questions. Une rédaction soignée, une écriture lisible et des résultats encadrés seront appréciées par les correcteurs.
- Si au cours de l'épreuve, vous constatez une erreur d'énoncé, vous êtes invités à le signaler dans la marge de votre copie. De même, si cela conduit à cumuler une ou plusieurs hypothèses, il est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.
- Les calculatrices électroniques et alphanumériques ou à écrans graphiques sont autorisées.



ARJOWIGGINS

Leader mondial de la fabrication de papiers techniques et de création, ArjoWiggins est présent en Europe, Amérique du Nord, Amérique Latine et en Asie.

Sa stratégie est d'innover en permanence pour offrir à ses clients des produits et solutions à forte valeur ajoutée et respectueux de l'environnement.

ArjoWiggins n'est pas un producteur de papiers classique : il intègre dans tous ses supports les dernières avancées technologiques qui permettent à ses clients de disposer de solutions originales répondant à leurs besoins. En particulier, ArjoWiggins est précurseur dans les papiers respectueux de l'environnement et les papiers intégrant des solutions de sécurité.

Fort de 6 300 collaborateurs et 27 sites de production, le groupe a réalisé un chiffre d'affaires de 1,5 milliard d'euros en 2009.

L'usine d'Amélie des Bains-Palalda (ArjoWiggins Health Care), située dans les Pyrénées Orientales (66), exporte plus de 80% de ces produits. La fabrication de papier pour le secteur médical est son activité principale.

Ce papier doit pouvoir supporter une stérilisation tout en étant restant une barrière bactérienne aux micro-organismes. Cela est possible en jouant sur la porosité et le diamètre de pore.

Haute porosité et diamètre de pore élevé = chemin peu tortueux, le papier est donc stérile pendant 3 à 6 mois.

Faible porosité et diamètre de pore faible = chemin très tortueux donc stérilité longue (de 3 à 5 ans).

Ces papiers à forte valeur ajoutée doivent aussi résister à l'eau, être non toxique, avoir une bonne résistance mécanique dans le respect des normes ISO 11607 et EN 868.

Les bobines de papier, d'épaisseurs différentes doivent être découpées en lots de bobines de différents diamètres et largeurs afin de faciliter leurs manutentions et leurs utilisations futures.

Pour répondre à cette demande, l'usine d'Amélie les Bains-Palalda dispose de nombreuses «enrouleur-dérouleur», en particulier la « bobineuse VAS », objet de cette étude.

Fonctionnement global du système enrouleur/dérouleur

Le groupe enrouleur-dérouleur, dénommé VAS, a été conçu dans le but de réaliser de 2 à 12 bobines papier de largeurs différentes à partir d'une bobine papier dite bobine mère disposée au niveau du groupe dérouleur.

Le système global est représenté sur la figure 1 ci-dessous et comprend :

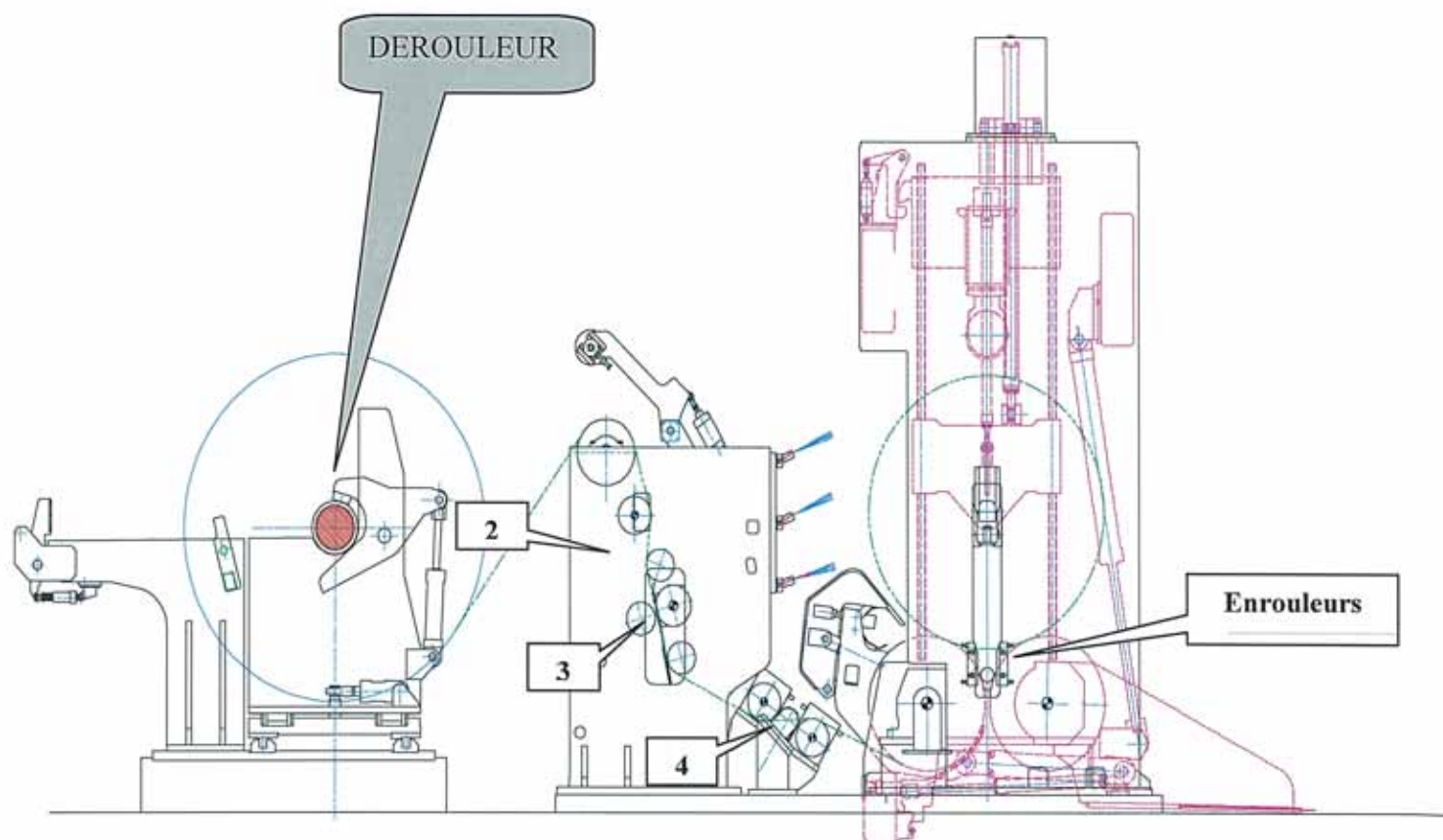


Figure 1 – Schéma global du système de la rebobineuse VAS

- le groupe dérouleur recevant la bobine mère en papier médical, overlay ou hospitalier.
- de rouleaux élargisseurs (2) installés avant le groupe de coupe DIENES, permettant d'étendre la feuille de manière uniforme avant la section réservée aux coupeuses.
- de rouleaux à secteurs (3), situé avant la coupe, conduisant la feuille vers la section équipée de coupeuses.
- de rouleaux à secteurs (4), conduisant la feuille après la coupe vers le groupe DUAL, lui-même constitué de deux rouleaux à inclinaison variable permettant de séparer les uns des autres les formats coupés par les couteaux.

Quand la feuille de papier passe à travers les deux rouleaux, elle s'ouvre de manière régulière puis elle est étendue uniformément.

- les deux rouleaux porteurs en enrouleurs supportent les rouleaux lors de l'enroulement. Le rouleau postérieur est cannelé tandis que le rouleau antérieur est lisse. La cannelure permet à l'air de s'échapper de l'espace situé entre les deux rouleaux porteurs et les rouleaux de papier qui tournent à grande vitesse.

La charge nécessaire pour le fonctionnement de la rebobineuse (enrouleur) est répartie entre les deux rouleaux.

On peut y voir le passage de la feuille de papier entre les différents rouleaux motorisés.

Ci-dessous, vous trouverez, plus détaillé, les différents sous-systèmes de la bobineuse VAS.

Le groupe « dérouleur » (figure 1.1) a été conçu pour recevoir et supporter la bobine mère au niveau des épaules structurelles et permettre le déroulement du papier qui est réenroulé en rouleaux sur la rebobineuse (ou enrouleur).

Le groupe de commande du dérouleur garantit une traction constante de la feuille pendant le rebobinage et l'arrêt avec un temps de freinage programmé (de 30 à 70 secondes).

Le rôle du frein à disque, monté entre le réducteur et le rouleau consiste à stopper la rotation de la bobine en cas de déchirure du papier ou arrêt d'urgence.

Il est motorisé (moteur ABB) avec réducteur de vitesse (FLENDER) et frein à disque.



Figure 1.1 – Groupe dérouleur

Le groupe de coupe DIENES (figure 1.2) est entièrement automatique ; il règle le format des bobines en cours d'enroulement. Douze couteaux permettent d'obtenir de un à onze rouleaux.



Figure 1.2 – Groupe de coupe DIENES

D'autres rouleaux intermédiaires appartenant au groupe DUAL (figure 1.3), motorisés pour la plupart à entraînement direct sans réducteur de vitesse, permettent d'étendre la feuille de manière uniforme avant la coupe, à présenter le papier correctement aux couteaux et contre-couteaux, et conduisent les papiers coupés vers les deux rouleaux porteurs.



Figure 1.3 – Rouleaux intermédiaires (groupe DUAL)

Enfin, la bobineuse comprend deux rouleaux porteurs ou enrouleurs (figure 1.4). Les deux rouleaux porteurs supportent les rouleaux lors de l'enroulement. Le rouleau postérieur est cannelé tandis que le rouleau antérieur est lisse. La cannelure permet à l'air de s'échapper de l'espace situé entre les rouleaux porteurs et les rouleaux de papier qui tournent à grande vitesse.

La charge nécessaire pour le fonctionnement de la rebobineuse est répartie entre les deux rouleaux. Au début de la nouvelle bobine, la différence entre le couple transmis aux deux rouleaux est élevée, de manière à obtenir un enroulement correct. Avec l'augmentation du diamètre et donc de la masse, le rouleau se compacte tout seul et, pour éviter que la bobine devienne trop compacte, la différence de charge entre les rouleaux diminue.

Chacun de ces rouleaux est motorisé (moteur ABB) avec réducteur de vitesse (FLENDER) ainsi qu'un frein de stationnement installé sur le côté lent du réducteur. Ce disque n'est pas utilisé pendant le freinage d'urgence mais uniquement lorsque la machine est arrêtée, pour interdire toute rotation accidentelle des tambours.

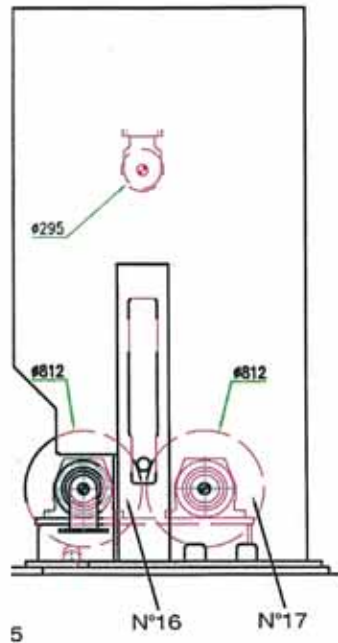


Figure 1.4 – Rouleaux porteurs de la bobineuse

Cycle de fonctionnement

Après installation sur le moteur dérouleur d'un rouleau de matière, une bande de papier est sortie et part vers le reste du processus.

Le rôle premier du dérouleur apparaît ici : l'injection de matière dans le système.

Au cours du cycle de travail, la quantité de matière sur le rouleau diminue, sa masse et son rayon ne sont donc pas constants.

De la même manière, l'enrouleur récupère le produit traité ; au démarrage, le rouleau du porteur est vide, il se remplit au fur et à mesure de l'avancement.

Afin de garantir un enroulement de bonne qualité, la vitesse à l'arrivée sur l'enrouleur doit être constante, l'effort de tension (traction) imposé au papier également.

De même, si l'on veut assurer un bon traitement du produit, le dérouleur doit délivrer le produit à vitesse et tension du papier constante.

Lorsque le dérouleur est vide, la chaîne doit s'arrêter, le temps de mettre un nouveau rouleau.

Hypothèse 1 : le produit textile est considéré comme isotrope.

Hypothèse 2 : le produit textile est parfaitement élastique.

Hypothèse 3 : Les frottements secs et les frottements visqueux dépendant de la vitesse à un degré supérieur à un sont négligeables.

Hypothèse 4 : on suppose que la tension de bande T est constante ainsi que la vitesse de défilement V de la bande de papier pendant tout le cycle.

La relation entre la déformation et la pression dépend d'une caractéristique propre du matériau.

Il s'agit du module de Young E ou module d'élasticité, celui-ci s'exprime en N/mm^2 .

Celle loi peut s'écrire :

$$T_{\max} = A \cdot E \cdot \varepsilon$$

T_{\max} : tenue en traction maximale de la bande de tissu

A : section d'une bande de tissu en mm^2

ε : allongement relatif

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i}$$

L_f : longueur finale (après allongement)

L_i : longueur initiale (avant allongement)

Lors d'un cycle d'enroulement / déroulement, la force de tension (traction) T exercée sur la bande est supposée uniforme sur toute la surface du papier notée S (voir fig. 1.5)

On peut écrire :

$$T = E_p \cdot S$$

E_p : tension exercée sur le papier en N/mm²

S : surface de la tranche de la bande papier en mm²

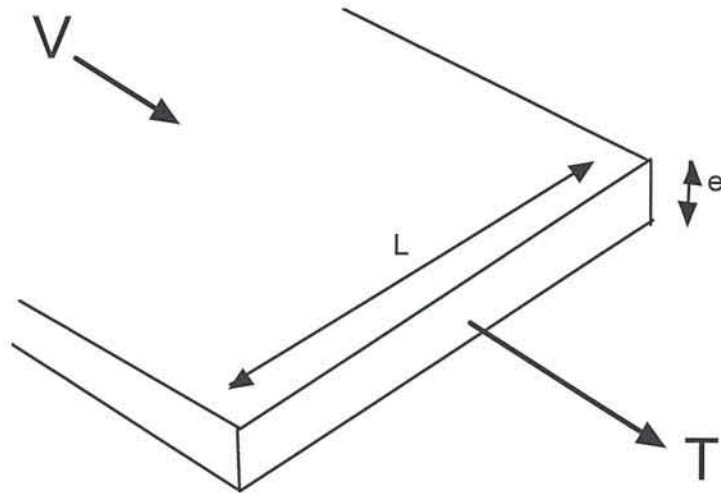


Fig. 1.5 – Bande de papier en coupe (échelle non respectée)

V : vitesse linéaire en m/min

L : longueur de la bande de papier en mm

E : épaisseur de la feuille de papier en μm

B. Questionnement

B1. Puissance mécanique nécessaire à l'enrouleur – dérouleur

B1.1 – Etude de l'enrouleur

Le système enrouleur réel comporte deux rouleaux porteurs (avant / arrière) et de ce fait deux motorisations strictement identiques.

Pour simplifier les calculs, nous supposons par la suite qu'un enrouleur ne comporte qu'un seul rouleau porteur et que celui-ci doit fournir la moitié du couple du système réel.

Pour tenir compte néanmoins de la différence entre le couple du porteur avant et arrière au cours d'un cycle, nous prendrons un coefficient de répartition de charge de 1,3.

Ainsi, le couple du moteur entraînant le rouleau porteur (enrouleur) sera multiplié par un coefficient égal à 0,65. (soit $\frac{1,3}{2}$).

Le schéma de principe d'un enrouleur (à un seul rouleau porteur) est donné à la figure 1.6.

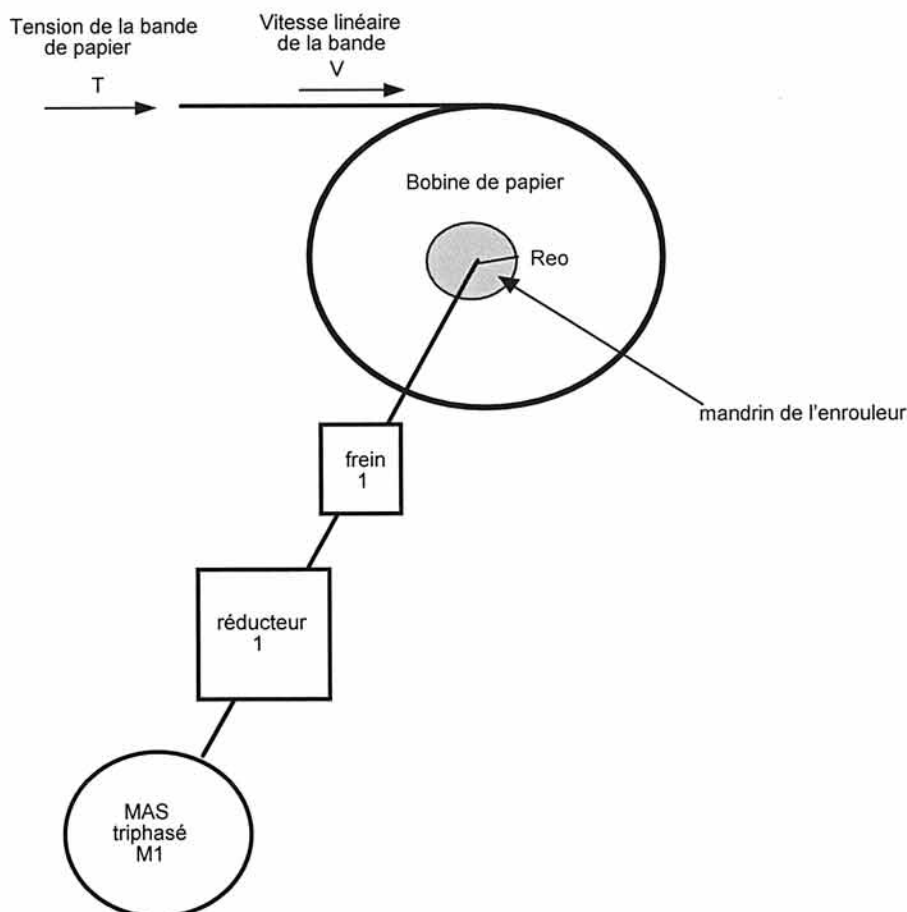


Fig 1.6 – Schéma de principe d'un enrouleur à un seul rouleau porteur

Les principales grandeurs mécaniques qui caractérisent un enrouleur sont :

ENROULEUR

Remarque : le mandrin et la bobine papier seront considérés comme des cylindres pleins pour les calculs de leurs inerties.

Meo	masse du mandrin de l'enrouleur	= 600 kg
Reo	rayon du mandrin de l'enrouleur	= 0,25 m
Rep	rayon de la bobine « enrouleur » à la fin d'un cycle d'enroulement	= 0,75 m
Re (t)	rayon de la bobine « enrouleur » à l'instant t	
Jeo	Inertie totale ramenée sur l'arbre du mandrin de l'enrouleur en kg·m ²	= 110 kg·m ²
Jp (t)	Inertie du rouleau papier à l'instant t en kg·m ²	
Je (t)	inertie de la bobine « enrouleur » (mandrin+papier) à l'instant t en kg·m ²	
Ωe (t)	vitesse angulaire de la bobine « enrouleur » à l'instant t en rd·s ⁻¹	
Cacce	Couple d'accélération de la bobine enrouleur en N·m	
Cre	couple résistant de la bobine enrouleur en N·m	

Remarque :

Jeo : inertie totale ramenée sur l'arbre du mandrin (inertie moteur+inertie frein+inertie réducteur+inertie bobine enrouleur vide)

MOTEUR n°1 de l'ENROULEUR (+ frein)

Jt ₁	Inertie totale sur l'arbre moteur n°1 en kg. m ²	
Ωm ₁	vitesse angulaire du moteur n°1 en rd·s ⁻¹	
Nm ₁	vitesse de rotation du moteur n°1 en tr·mn ⁻¹	
Cu ₁	couple utile du moteur n°1 en N·m	
C _{acc1}	couple d'accélération ou décélération du moteur n°1 en N·m	
Pu ₁	puissance utile du moteur n°1 en W	
fm ₁	frottement visqueux ramené sur l'arbre moteur n°1	= 0,01 N·m·s/rd
η ₁	Rendement de moteur n° 1	

REDUCTEUR N°1

K _{r1}	rapport de réduction = Ωe/Ωm ₁	= 0,43
η _{r1}	Rendement du réducteur n°1	= 0,9

CARACTERISTIQUES DE LA BANDE PAPIER

L	largeur de la bande de papier	= 2500 mm
e	épaisseur de la bande de papier	= 88 μm
T	tension de la bande de papier en N	
E	module de Young	= 650 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
E_p	module de traction maximale	= 30 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
ρ	masse volumique de la bande de papier	= 660 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
P	puissance mécanique appliquée à la bande de papier	
V	vitesse linéaire maximum de la bande de papier en m/s	
v	vitesse linéaire maximum de la bande de papier en m/min	= 1200 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

Rappel : on suppose que la tension de bande T est constante ainsi que la vitesse de défilement V de la bande de papier pendant tout le cycle.

Q1.1 : Exprimer sous forme littérale la force de tension T en fonction de E_p , de la largeur de la bande L et de son épaisseur e.

Calculer la force de traction maximale exercée sur la bande de papier.

En supposant cet effort constant tout au long du processus, montrer que cela garantit l'absence d'allongement inélastique de la bande de papier.

Q1.2 : Donner la relation littérale entre la puissance P appliquée à la bande de papier, la force de traction T et la vitesse de défilement V.

En l'absence de défaut de la bande papier pendant la phase d'enroulement, que peut-on dire sur la puissance appliquée à la bande de papier ?

Q1.3 : Montrer que la relation temporelle du rayon de la bobine $R_e(t)$ peut s'écrire :

$$R_e(t) = \sqrt{R_{e0}^2 + \frac{e \cdot V \cdot t}{\pi}}$$

En déduire l'expression temporelle de la vitesse angulaire de la bobine $\Omega_e(t)$ en fonction de V, e, t et R_{e0} .

Q1.4 : En considérant la vitesse V (ou v) constante pendant toute la phase d'enroulement, calculer le temps mis pour réaliser une bobine.

Remarque : *on néglige pour cette question les phases transitoires d'accélération et de décélération.*

Tracer l'évolution de $\Omega_e(t)$ en fonction du temps pour le cycle d'enroulement (DR1).

Q1.5 : Exprimer sous forme littérale l'inertie de la bobine papier $J_p(t)$ en fonction de ρ , L , $Re(t)$, Reo . En déduire celle de l'inertie totale de la bobine enrouleur $J_e(t)$ (mandrin+papier) en fonction de ρ , L , e , V , Reo , Jeo et du temps t .

On rappelle que pour un cylindre plein :

$$d(J_p) = 2\pi \cdot \rho \cdot L \cdot R^3 \cdot d(R)$$

Tracer sur le document réponse (DR2), l'évolution de l'inertie de la bobine enrouleur $J_e(t)$ en fonction du temps t .

Q1.6 : Déterminer l'expression littérale du couple d'accélération de la bobine enrouleur C_{acce} en fonction de $e, V, \rho, L, Re(t), Reo$ et Jeo .

On rappelle que :

$$C_{acce}(t) = \frac{d}{dt}(J_e(t) \cdot \Omega_e(t))$$

Q1.7 : Déterminer l'expression littérale de $J_{r1}(t)$ en fonction de $J_e(t)$, η_{r1} et K_{r1} ainsi que celle de $\Omega_{m1}(t)$ en fonction de $\Omega_e(t)$, K_{r1} .

En déduire l'expression littérale de C_{acc1} en fonction de $J_e(t)$, $\Omega_e(t)$, η_{r1} et K_{r1} .

On rappelle que :

$$C_{acc1}(t) = \frac{d}{dt}(J_{r1}(t) \cdot \Omega_{m1}(t))$$

Q1.8 : Ecrire l'équation fondamentale de la dynamique ramenée sur l'arbre moteur pour le système enrouleur.

Q1.9 : En utilisant l'expression littérale du C_{acc1} (question **Q1.7**), déterminer l'expression littérale du couple moteur (Cu_1) en fonction de C_{acc1} , T , $Re(t)$, K_{r1} , η_{r1} , V , et fm_1 ainsi que de la vitesse angulaire moteur (Ω_{m1}) en fonction de V , K_{r1} , $Re(t)$.

En déduire l'expression de Cu_1 en fonction de $Re(t)$, Reo , $e, V, T, \rho, L, K_{r1}, \eta_{r1}, V, Jeo$, et fm_1 .

Tracer alors le couple moteur Cu_1 en fonction du rayon $Re(t)$ (voir DR3).

Rappel : pensez à multiplier le couple du moteur par 0,65 (voir B1.1) car l'enrouleur est constitué de deux rouleaux porteurs strictement identiques.

Q1.10 : Calculer le couple utile du moteur au départ de la phase d'enroulement (la bobine est vide) et à la fin de la phase d'enroulement (la bobine est pleine), notées respectivement Cu_{1min} , Cu_{1max} .

Déterminer les vitesses angulaires de l'arbre moteur pour ces deux points de fonctionnement, notées respectivement Ω_{m1max} , Ω_{m1min} .

Tracer alors le couple moteur Cu_1 en fonction de la vitesse angulaire Ω_{m1} (voir DR4).

Q1.11 : Compléter le document réponse DR5 et indiquer le ou les quadrants de fonctionnement de M1. Les modes de fonctionnement de M1 ont-ils une influence sur les caractéristiques du variateur de vitesse utilisé ?

Q1.12 : Pour les mêmes valeurs du temps utilisées pour le tracé de $Cu_1=f(\Omega_{m1})$, calculer la puissance mécanique P_{m1} en W sur l'arbre moteur en fonction du temps.

Le résultat de la question Q1.2 est-il justifié ?

Q1.13 : Déterminer la plage de variation en fréquence du variateur de vitesse du moteur n°1 (f_{min1} , f_{max1}) pour permettre une variation de vitesse de (Ω_{m1min} , Ω_{m1max}).

On donne :

Le nombre de paires de pôles du moteur « enrouleur » = 2

Q1.14 : Vérifier que le moteur M1 proposé ci-dessous est adapté à la bobine « enrouleur ».

On donne :

Niveau de température : **B**

Variateur ACS600/800 avec commande DTC

Coefficient de déclassement en vitesse = 0,82

Moteur M1 : moteur asynchrone ABB ref. M3BP315 SMB - 132kW - 4 pôles

Caractéristiques électriques et mécaniques :

$N_n=1487$ tr/mn ; rendement=95,4% ; $\cos\varphi_n=0,86$; $I_n=232$ A ; $T_n=847$ N·m ; $T_d/T_n=2,3$; $T_{max}/T_n=2,7$;
moment d'inertie moteur $J=2,6$ kg·m²

B1.2 – Etude du dérouleur

Le schéma de principe d'un dérouleur est donnée fig 1.7.

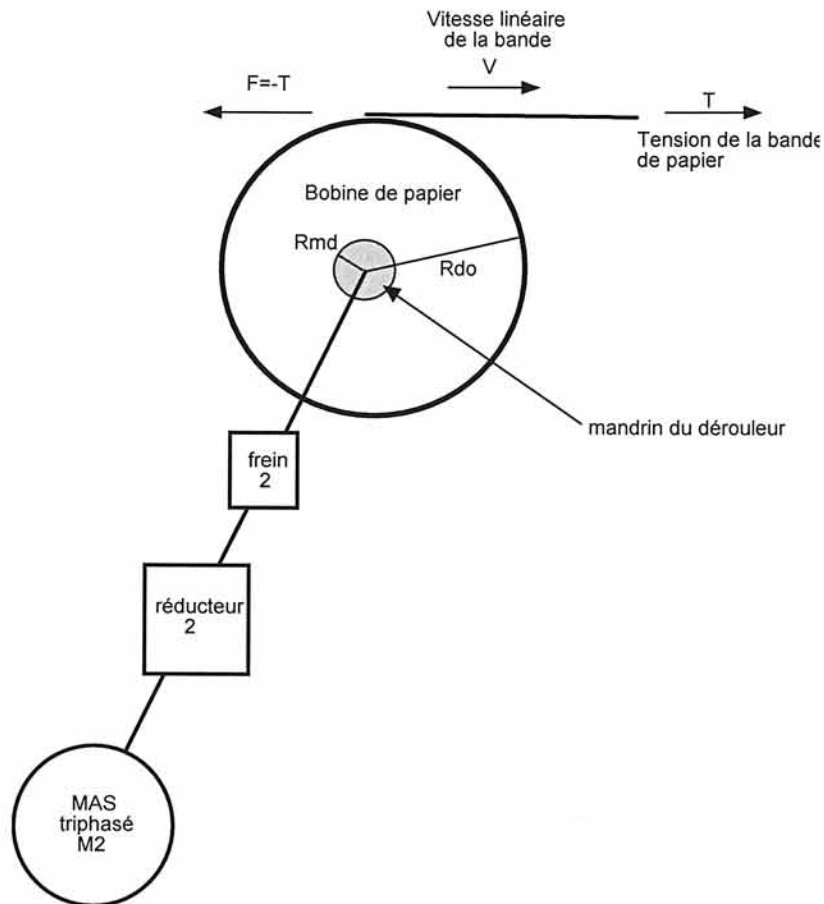


Fig 1.7 – Schéma de principe d'un dérouleur

Pour le dérouleur, on utilisera les grandeurs mécaniques suivantes :

DEROULEUR

M_{md}	masse du mandrin du dérouleur	= 600 kg
R_{md}	rayon du mandrin dérouleur	= 0,25 m
J_{md}	inertie totale ramenée sur l'arbre du mandrin du dérouleur en $kg \cdot m^2$	= 9400 $kg \cdot m^2$
M_{do}	Masse de la bobine dérouleur au début du cycle (mandrin+papier)	= 6000 kg
R_{do}	rayon de la bobine dérouleur chargé de la bande de papier	= 1,25 m
$R_d(t)$	rayon de la bobine dérouleur à un instant t	
$J_d(t)$	inertie de la bobine dérouleur à l'instant t en $kg \cdot m^2$	
$\Omega_d(t)$	vitesse angulaire de la bobine dérouleur en rd/s^2	
C_{rd}	couple résistant de la bobine dérouleur en $N \cdot m$	
C_{accd}	Couple accélérateur de la bobine dérouleur en $N \cdot m$	

Remarque :

J_{md} : inertie totale ramenée sur l'arbre du mandrin (inertie moteur+inertie frein+inertie réducteur+inertie bobine enrouleur vide).

MOTEUR du DEROULEUR (+frein) : M2

J_{t2}	Inertie totale sur l'arbre moteur n°2 en $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	
Ω_{m2}	vitesse angulaire du moteur n° 2 en $\text{rd}\cdot\text{s}^{-1}$	
N_{m2}	vitesse de rotation du moteur n°2 en tr/mn	
C_{u2}	couple utile du moteur n°2 en $\text{N}\cdot\text{m}$	
C_{acc2}	couple d'accélération ou décélération en $\text{N}\cdot\text{m}$	
P_{u2}	puissance utile du moteur n°2 en W	
f_{m2}	frottement visqueux ramené sur l'arbre moteur n°2	$= 0,01 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rd}$
η_2	rendement du moteur n° 2	

REDUCTEUR N°2

K_{r2}	rapport de réduction = Ω_d/Ω_{m2}	$= 0,5$
η_{r2}	Rendement du réducteur n°2	$= 0,95$

Q1.15 : Etablir les relations temporelles du rayon $R_d(t)$ de la bobine dérouleur et de sa vitesse angulaire $\Omega_d(t)$ en fonction de V , e , t et R_{d0} .

Tracer l'évolution de $\Omega_d(t)$ en fonction du temps (voir DR6).

Q1.16 : Etablir l'expression littérale de l'inertie de la bobine « dérouleur » $J_d(t)$ en fonction de ρ , L , e , V , $R_d(t)$, R_{d0} , J_{md} et du temps t .

Tracer sur le DR7, l'évolution de l'inertie de la bobine dérouleur en fonction du temps.

Q1.17 : Déterminer l'expression littérale du couple d'accélération de la bobine enrouleur C_{accd} en fonction de ρ , L , e , V , $R_d(t)$, R_{d0} et J_{md} .

On rappelle que :

$$C_{accd}(t) = \frac{d}{dt}(J_d(t) \cdot \Omega_d(t))$$

Q1.18 : En déduire l'expression littérale du couple d'accélération C_{acc2} en fonction de ρ , L , e , V , $R_d(t)$, R_{d0} , K_{r2} , η_{r2} et J_{md} .

On rappelle que :

$$C_{acc2}(t) = \frac{d}{dt}(J_{r2}(t) \cdot \Omega_{m2}(t))$$

Q1.19 : Ecrire l'équation fondamentale de la dynamique ramenée sur l'arbre moteur $M2$ pour le système dérouleur (ici le moteur est utilisé en « frein »).

Q1.20 : En utilisant l'expression littérale de C_{acc2} (question Q1.18), déterminer l'expression littérale du couple moteur (C_{u2}) en fonction de C_{acc2} , T , $R_d(t)$, K_{r2} , η_{r2} , V , et f_{m2} ainsi que de la vitesse angulaire moteur (Ω_{m2}) en fonction de V , K_{r2} , $R_d(t)$.

Tracer le couple moteur C_{u2} en fonction du rayon $R_d(t)$ (voir DR8).

Tracer le couple moteur C_{u2} en fonction de la vitesse angulaire Ω_{m2} (voir DR9).

Q1.21 : En utilisant les résultats de la question précédente (**Q1.20**), calculer le couple à appliquer à la bobine dérouleur ainsi que la vitesse du moteur au départ (la bobine est pleine) respectivement C_{u2max} , Ω_{m2min} et à la fin de la phase de déroulement respectivement C_{u2min} , Ω_{m2max} (la bobine est vide).

Q1.22 : Compléter le document réponse DR10 et indiquer le ou les quadrants de fonctionnement de $M2$. Les modes de fonctionnement de $M2$ ont-ils une influence sur les caractéristiques du variateur de vitesse utilisé ?

Q1.23 : Pour les mêmes valeurs du temps utilisées pour le tracé de $Cu_2=f(\Omega m_2)$, calculer la puissance mécanique Pm_2 en W sur l'arbre moteur en fonction du temps.
Que constatez-vous ?

Q1.24 : Déterminer la plage de variation en fréquence du variateur de vitesse du moteur n°2 (f_{min2}, f_{max2}) pour permettre une variation de vitesse de $(\Omega m_{2min}, \Omega m_{2max})$.

On donne :

Le nombre de paires de pôles du moteur « dérouleur » = 3

Q1.25 : Vérifier que le moteur M2 proposé est adapté à la bobine « dérouleur ».

On donne :

Niveau de température : **F**

Variateur ACS600/800 avec commande DTC

Coefficient de déclassement en basse vitesse = 0,9

Coefficient de déclassement en puissance (couple) en haute vitesse de 62%.

Moteur M2 : moteur asynchrone ABB ref. M3BP 355 SMA 160 kW – 6 pôles

Caractéristiques électriques et mécaniques :

$N_n= 993$ tr/mn ; rendement= 95,4% ; $\cos\varphi_n= 0,83$; $I_n=291$ A ; $T_n=1538$ N·m ; $T_d/T_n=2$; $T_{max}/T_n=2,6$;
moment d'inertie moteur $J=7,9$ kg·m²

B2. Etude de la motorisation électrique de l'enrouleur/dérouleur

Le schéma équivalent de la machine asynchrone triphasée à rotor en court-circuit ou à cage d'écurieil, utilisée dans 95% des applications industrielles, traduit pour une phase, les équations électriques et mécaniques en régime permanent.

On l'établit en exploitant l'analogie avec un transformateur, le stator correspondant au primaire et le rotor au secondaire en court-circuit.

Comme pour un transformateur, l'impédance du secondaire (rotor) peut être ramenée au primaire (stator).

On donne figure 2.1, le schéma monophasé équivalent à partir duquel on mènera l'étude.

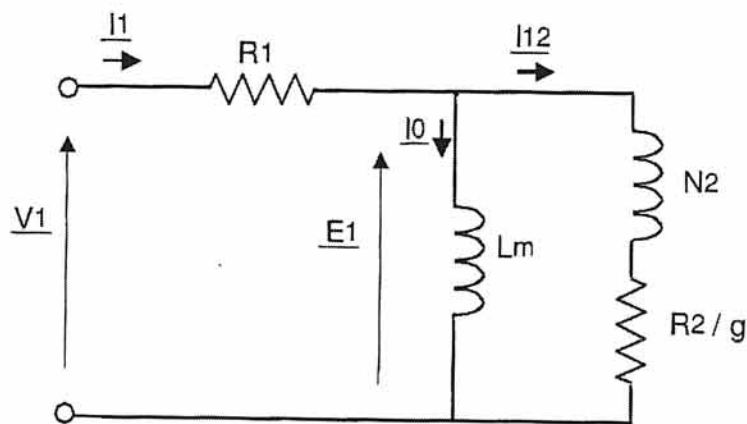


Fig. 2.1 – Schéma équivalent simplifié étoile d'une machine asynchrone, vu du stator

Grandeurs électriques associées au schéma équivalent :

R1 : résistance d'une phase stator ;

R2 : résistance d'une phase du rotor, ramenée au stator ;

g : glissement du rotor par rapport au champ tournant ;

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

avec Ω_s : vitesse angulaire de synchronisme et Ω : vitesse angulaire du rotor ;

R2/g : résistance fictive représentant la totalité de la puissance transmise au rotor (puissance mécanique, pertes mécaniques et pertes Joules rotoriques), pour une phase ;

Lm : inductance magnétisante ;

N2 : inductance de fuites globalisées, ramenée au stator ;

V1 : tension phase-neutre, d'alimentation d'une phase du stator ;

E1 : f.e.m statorique ;

I1 : courant dans une phase du stator ;

I12 : courant dans une phase rotorique ramenée au stator ;

I0 : courant magnétisant ;

La pulsation des tensions et courants est ω_s , imposée par la fréquence f de la tension **V1**.

La référence de phase sera prise sur la tension **V1**.

On considère le circuit magnétique non saturé.

On donne figure 2.2, le diagramme des puissances dans la machine asynchrone en adéquation avec le schéma équivalent précédent.

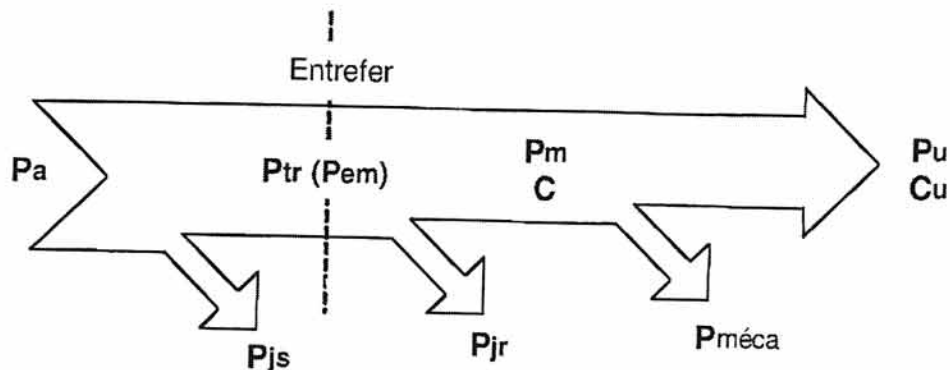


Fig. 2.2 – Diagramme des puissances

- Pa** : puissance absorbée (ou fournie) sur le réseau triphasé d'alimentation ;
- Pjs** : pertes Joules stator ;
- Ptr** : puissance transmise au rotor (ou puissance électromagnétique) ;
- Pjr** : pertes Joules rotor ;
- Pm** : puissance mécanique ;
- C** : couple agissant sur le rotor (couple électromagnétique) ;
- Pméca** : pertes mécaniques ;
- Pu** : puissance utile sur l'arbre de la machine ;
- Cu** : couple utile sur l'arbre ;

Remarque : le schéma équivalent ainsi que le diagramme des puissances ne prennent pas en compte les pertes fer.

On se place en convention récepteur :

- $P_a > 0$: la puissance active est absorbée au réseau (fonctionnement en moteur) .
- $P_a < 0$: la puissance est fournie au réseau (fonctionnement en générateur ou frein).
- $Q_a > 0$: la puissance réactive est absorbée au réseau.

Q2.1 : En négligeant la chute de tension dans R_1 (alors $\underline{V}_1 = \underline{E}_1$), écrire l'expression de \underline{I}_{12} et \underline{I}_0 ainsi que la phase du courant \underline{I}_{12} que l'on notera φ_{12} et celle du courant magnétisant \underline{I}_0 que l'on notera φ_0 .

Q2.2 : En déduire l'expression de \underline{I}_1 ainsi que sa phase que l'on notera φ_1

Q2.3 : Ecrire l'expression de P_u , P_m , P_{tr} , P_{jr} , P_{js} , $P_{méca}$ et P_a à partir du schéma équivalent.

Q2.4 : Ecrire l'expression de la puissance réactive magnétisante (Q_m) et la puissance réactive due au flux de fuites (Q_f).

Q2.5 : En déduire l'expression du facteur de déphasage ($\cos\varphi_1$) en fonction de P_a , Q_m et Q

Les questions suivantes seront traitées en négligeant la chute de tension dans R1 ($E_1=V_1$).

Q2.6 : Ecrire la relation liant **C** à **Ptr**.

En déduire l'expression du couple C en fonction de p, V1, ω_s , (R2/g) et (N2 ω_s). [relation (1)]

Modifier la relation (1) pour faire apparaître la pulsation des courants rotoriques ($\omega_r=g \cdot \omega_s$) et le rapport $\frac{V_1}{\omega_s}$. [relation (2)]

Q2.7 : Autour du point de fonctionnement nominal ($g \rightarrow 0$), l'expression précédente de C peut se simplifier et s'écrit : $C = k \cdot \omega_r$.

Etablir la relation simplifiée liant C et ω_r [relation (3)] en donnant l'expression littérale de k.

En utilisant cette relation simplifiée, calculer la valeur numérique du couple électromagnétique Cn pour le glissement nominal pour le moteur n°1 (enrouleur).

On donne pour un couplage équivalent étoile : $R_2=10,3 \text{ m}\Omega$ et $N_2=185\mu\text{H}$ et $V_1=230 \text{ V}$.

Q2.8 : Quand le glissement varie, le couple passe par un maximum. A partir de la relation (2), déterminer la pulsation rotorique (notée $\omega_{r \text{ max}}$) qui correspond au maximum de couple.

Ecrire alors l'expression du couple max : C_{max} . [relation (4)]

Calculer les valeurs de C_{max} , $\omega_{r \text{ max}}$ et du glissement correspond g_{max} pour le moteur n°1.

Q2.9 : Sur le document réponse **DR11**, pour $|g| < 20\%$, tracer l'allure de la caractéristique C(Ω), la machine fonctionnant en moteur ou en génératrice (graduez l'axe C) pour le moteur n°1.

Noter les valeurs de $C_n, C_{\text{max}}, g_n, g_{\text{max}}$.

B2.1. Motorisation de l'enrouleur (moteur n°1)

Réseau électrique :

Régime de neutre TT

Réseau d'alimentation triphasé $U_n=400\text{V}$ ($V_n=230\text{V}$) – $f_n=50\text{Hz}$

Variateur de vitesse :

Lorsque la machine asynchrone triphasée est en fonctionnement « moteur » : le variateur de vitesse ACS 600/800 utilise une commande qui permet de conserver le flux constant dans la machine à savoir :

- Pour $f < f_n$ alors $V/f = V_n/f_n = \text{constante}$

- Pour $f > f_n$ alors $V = V_n = \text{constante}$

Données numériques :

- Nombre de paires de pôles : 2
- Tension d'alimentation nominale entre phases $U_{1n}=400\text{V}$ – 50Hz
- Couplage **triangle (D)**
- Vitesse nominale $N_n=1487 \text{ tr/mn}$
- Puissance utile nominale = 132 kW

B 2.1.1 - Détermination des éléments du schéma équivalent du moteur asynchrone.

Q2.10 : Compléter le document ressource (DR12) et déterminer les relations qui permettent de passer d'un couplage triangle à un couplage étoile équivalent (théorème de KENNELY).

Nota : Il y a équivalence entre les deux couplages si le moteur absorbe la même puissance en triangle ou en étoile.

Q2.11 : L'impédance de chaque phase du moteur en couplage triangle étant identique (notée Z). En utilisant les résultats de la question **Q2.10**, déterminer l'impédance du schéma équivalent simplifié étoile de la machine asynchrone Z_m , vu du stator.

Q2.12 : Les essais suivants ont été réalisés :

- mesure de la résistance entre U1-V1, U1-W1 et V1-W1 à 21°C

$$R_{U1,V1} = 0,01680 \Omega$$

$$R_{V1,W1} = 0,01678 \Omega$$

$$R_{U1,W1} = 0,01679 \Omega$$

- essai à vide (no load test)

Tension entre phases = 400V couplage triangle

f = 50 Hz

Courant ligne = 72,1 A

Puissance électrique absorbée P=2,19 kW

cos φ = 0,0438

- essai à rotor bloqué, moteur alimenté sous tension réduite (locked-rotor test)

Tension entre phases : 73,9 V couplage triangle

f = 50 Hz

Courant ligne = 232 A

Puissance électrique absorbée P = 9,42 kW

cos φ = 0,3172

A partir des résultats de ces tests pour le moteur ABB ref. M3BP315SMB 4 déterminer l'ensemble des valeurs des éléments du schéma équivalent simplifié étoile (R1, Lm, R2 et N2) du moteur « enrouleur » (voir figure 2.1).

Q2.13 : Montrer que les pertes fer peuvent être négligées en première approximation. Pour cela, calculer la résistance Rf à partir de l'essai à vide du moteur (no load test) .

Nota : Rf est placée sur le schéma équivalent en parallèle avec Lm (inductance magnétisante).

Pour la suite des questions, vous prendrez les valeurs suivantes des éléments du schéma équivalent du moteur asynchrone du moteur « enrouleur » :

$R1 = 8,4\text{m}\Omega$ $R2 = 10,3\text{m}\Omega$ $Lm = 10,2 \text{ mH}$ $N2 = 185 \mu\text{H}$
--

Q2.14 : En utilisant les expressions littérales des questions **Q2.1** à **Q2.3** et les données ci-dessous :

- bobine enrouleur au départ (vide) :
 $Cu_{1min} = 504 \text{ N}\cdot\text{m}$ $\Omega m_{1max} = 187 \text{ rd/s}$
Fréquence d'alimentation au stator = 60 Hz

- bobine enrouleur à la fin du cycle d'enroulement (pleine),
 $Cu_{1max} = 1547 \text{ N}\cdot\text{m}$ $\Omega m_{1min} = 61,9 \text{ rd/s}$
Fréquence d'alimentation au stator = 20,5 Hz

calculer pour les deux points de fonctionnement ci-dessus :

- la puissance utile du moteur n°1 (Pu_1),
- la valeur et la phase de I_{12} ,
- la valeur et la phase de I_0 ,
- la valeur et la phase de I_1 ,
- les valeurs de Pm_1 , Ptr , Pjr , Pjs , $Pméca$ et Pa ,
- les valeurs de Qm et Qf ,
- le facteur de puissance $\cos\varphi_1$ du moteur,
- le rendement du moteur (η_1).

Q2.15 : Courbe couple-vitesse du moteur asynchrone n°1

Sur le document réponse DR11, tracer les courbes correspondantes pour une plage de vitesse allant de la valeur minimale Ωm_{1min} à maximale Ωm_{1max} .

C. Onduleur de tension NPC (Neutral Point Clamped)

Le convertisseur NPC (Neutral Point Clamped) 3 niveaux est apparu au début des années 1980. Il fait partie des convertisseurs d'énergie multi-niveaux, reposant sur l'association de semi-conducteurs de puissance en série.

Le convertisseur NPC est actuellement de plus en plus utilisé par l'industrie pour la réalisation de convertisseurs DC/AC fournissant des puissances importantes (au delà de 100kVA jusqu'à plusieurs MVA).

Partie C1 : Cellule de commutation d'un onduleur NPC

Nous allons étudier tout d'abord la cellule de commutation d'un onduleur NPC constitué de 4 IGBT (Insular Gate Bipolar Transistor) et de deux diodes clampées sur le neutre X1 et X2 (voir figure C-1).

Au niveau de cette étude les semi-conducteurs seront supposés parfaits : les tensions à leurs bornes sont nulles à l'état passant et le courant qui les traverse est nul à l'état bloqué.

Les interrupteurs commutent à une fréquence constante notée f_c . La période de commutation est notée T_c ($T_c = 1/f_c$).

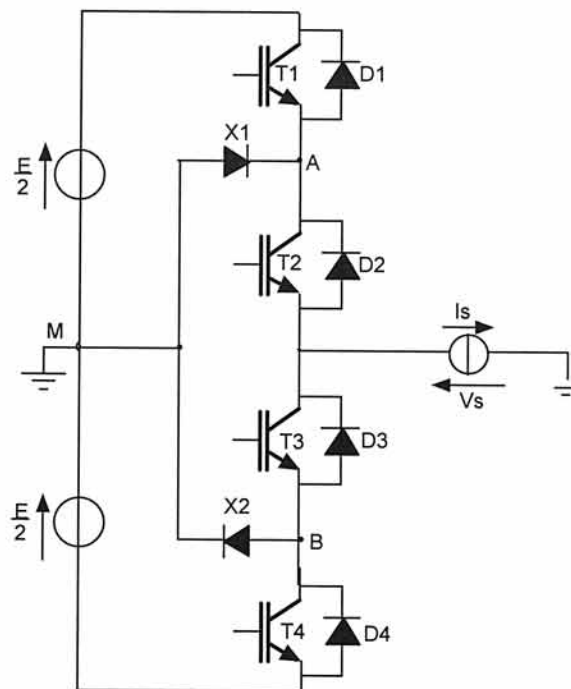


Figure C-1 : Cellule de commutation d'un onduleur NPC

La commande d'une cellule de commutation d'un onduleur NPC est telle que :

- T1 et T3 (respectivement T2 et T4) sont commandées de manière complémentaire
- Durant la moitié de la période de modulation, l'état de 2 interrupteurs sur 4 est toujours figé.

La commande de la cellule de commutation est réalisée selon le principe de la figure C-2.

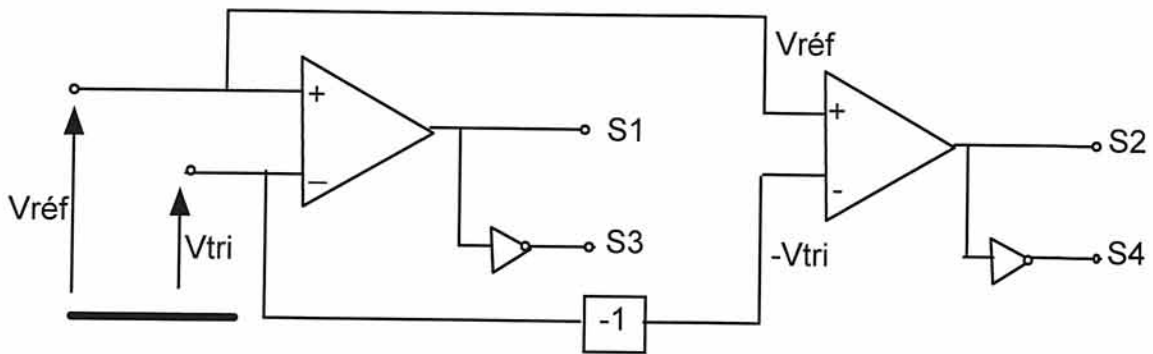


Figure C-2 : Modulateur utilisé pour une cellule de commutation

Le signal S1 (resp. S3) commande l'interrupteur T1 (resp. T3).

Le signal S2 (resp. S4) commande l'interrupteur T2 (resp. T4).

Quand $S_i = 1$ ($i=1,2,3,4$) alors l'interrupteur T_i ($i=1,2,3,4$) est passant.

Quand $S_i = 0$ alors l'interrupteur T_i est bloqué.

V_{tri} est un signal triangulaire symétrique d'amplitude crête \hat{V}_{tri} , il fixe la fréquence de commutation des interrupteurs f_c . $V_{réf}$ est appelé signal modulant, son amplitude est telle que $|V_{réf}| < \hat{V}_{tri}$.

Il permet de contrôler le rapport cyclique α_1 de la commande des interrupteurs.

Formes d'ondes d'une cellule de commutation d'un onduleur NPC

Q3.1 : Compléter le document réponse **DR13** en traçant l'allure des signaux de commande S1 et S3, l'allure du courant dans l'interrupteur T1 (I_{T1}), celle du courant dans la diode anti-parallèle D1 (I_{D1}) et celle du courant dans la diode clampée X1 (I_{X1}).

Q3.2 : Compléter le document réponse **DR14** en traçant l'allure des signaux de commande S2 et S4, l'allure du courant dans l'interrupteur T2 (I_{T2}), celle du courant dans la diode anti-parallèle D2 (I_{D2}) et celle du courant dans la diode clampée X2 (I_{X2}).

Q3.3 : Compléter le document réponse **DR15** en traçant l'allure de la tension de sortie V_s .

A partir des différentes configurations possibles de S1, S2, S3 et S4 et des tracés des signaux précédents (questions **Q3.1** et **Q3.2**), compléter le tableau 1 récapitulatif des séquences de fonctionnement (voir tableau du document réponse **DR15**).

Q3.4 : En utilisant les résultats du tableau 1 de la question **Q3.3**, indiquer sur le document réponse **DR16** avec un stabilo, le chemin emprunté par le courant pour les différentes configurations de V_s et I_s .

Calcul des pertes en conduction des interrupteurs d'une cellule de commutation

Q3.5 : Vérifier graphiquement que $S4(x) = S1(x + \pi)$ avec $x = \omega.t$. Quelles sont les propriétés des courants moyens et efficaces (en conduction et en commutation) des interrupteurs T1 et T4 (dits interrupteurs externes) ?

De même, vérifier graphiquement que $S2(x) = S3(x + \pi)$. Quelles sont les propriétés des courants moyens et efficaces (en conduction et en commutation) des interrupteurs T2 et T3 (dits interrupteurs internes) ?

Enfin, en observant les formes d'ondes de D1 et D2, Quelles sont les valeurs des courants moyens et efficaces (en conduction et en commutation) des diodes D1 et D2.

Quelle conclusion peut-on apporter pour les courants moyens et efficaces de l'ensemble des diodes anti-parallèles des interrupteurs « IGBT » ?

Q3.6 : Montrer que la fonction de modulation de l'interrupteur T1 peut se mettre sous la forme

$$f^{T1}(x) = m \cdot \sin(x) \text{ pour } x \in [0, \pi]$$

Que représente m ?

Que peut-on dire de la fonction de modulation de T3 ?

Q3.7 : Montrer que la fonction de modulation de l'interrupteur T2 peut se mettre sous la forme

$$f^{T2}(x) = 1 + m \cdot \sin(x) \text{ pour } x \in [\pi, 2\pi]$$

Que peut-on dire de la fonction de modulation de T4 ?

Q3.8 : En utilisant l'ensemble des questions **Q3.5** à **Q3.7**, montrer qu'il suffit de déterminer les courants moyens et efficaces en conduction des interrupteurs T1, T2 et D1 pour connaître l'ensemble des courants moyens et efficaces en conduction des interrupteurs IGBT.

Q3.9 : Montrer que les courants moyen et efficace en conduction de la diode clampée X2 sont identiques à ceux de la diode clampée X1.

Q3.10 : En utilisant les fonctions de modulation définies aux questions **Q3.6** et **Q3.7** et en posant $I_s(t) = \hat{I}_s \cdot \sin(x - \varphi)$, calculer les valeurs littérales des courants efficace et moyen en conduction des interrupteurs T1, T2, D1 et X1.

En utilisant le principe énoncé à la question **Q3.8**, en déduire les valeurs littérales des courants efficace et moyen en conduction de l'ensemble des interrupteurs T_i, D_i ($i=1,2,3,4$), ainsi que des diodes clampées X1, X2.

Nota : on notera un courant efficace (en conduction) dans un interrupteur T_i : $I_{T_i \text{ eff}}$
on notera un courant moyen (en conduction) dans un interrupteur T_i : \bar{I}_{T_i}

on notera un courant efficace (en conduction) dans un interrupteur D_i : I_{Di_eff}
on notera un courant moyen (en conduction) dans un interrupteur D_i : \bar{I}_{Di}

on notera un courant efficace (en conduction) dans une diode clampée : I_{Xi_eff}
on notera un courant moyen(en conduction) dans une diode clampée : \bar{I}_{Xi}

Q3.11 : Exprimer les valeurs littérales des pertes en conduction dans les interrupteurs T_i, D_i ($i=1,2,3,4$), ainsi que dans les diodes clampées $X1, X2$.

On notera que les pertes en conduction d'un interrupteur T_i s'exprime ainsi :

$$P_{COND_Ti} = V_{CE0} \cdot \bar{I}_{Ti} + R_T \cdot I_{Ti_eff}^2$$

V_{CE0} = tension du seuil de l'interrupteur

R_T = résistance série

Ces deux valeurs proviennent de la caractéristique de l'interrupteur $V_{CE}=f(I_c)$ à 125°C.

Une formule équivalente est appliquée pour la diode anti-parallèle :

$$P_{COND_Di} = V_{D0} \cdot \bar{I}_{Di} + R_D \cdot I_{Di_eff}^2$$

Q3.12 : Calculer les pertes en conduction dans les interrupteurs T_i, D_i ($i=1,2,3,4$), ainsi que dans les diodes clampées $X1, X2$ pour un onduleur NPC.

Transistor :

$$R_T = 3,85 \text{ m}\Omega$$

$$V_{CE0} = 1,05 \text{ V}$$

Diode :

$$V_{D0} = 0,85 \text{ V}$$

$$R_D = 1,16 \text{ m}\Omega$$

En déduire les pertes totales en conduction d'une cellule de commutation $P_{cond}^{cellule_NPC}$ d'un onduleur NPC.

On donne :

$$m = 0,8$$

$$I_{Sn} = 232 \text{ A (courant nominal efficace)}$$

$$\cos \varphi_n = 0,86 \text{ (facteur de déphasage nominal)}$$

Remarque : les diodes anti-parallèles D_i et les diodes clampées $X1, X2$ sont strictement identiques.

Calcul des pertes en commutation des interrupteurs d'une cellule de commutation

Q3.13 : En utilisant le tableau 1 du document réponse DR15, déterminer les intervalles de commutation des différents interrupteurs T_i , D_i ($i=1,2,3,4$), ainsi que des diodes clampées X1,X2.

Comme pour les pertes en conduction, il suffit de déterminer les courants moyens et efficaces en commutation des interrupteurs T1, T2 ,D1 et X1 pour connaître l'ensemble des courants moyen et efficace en commutation des interrupteurs IGBT et des diodes clampées.

Les pertes par commutation pour un interrupteur T_i s'exprime ainsi :

$$P_{com}^{T_i} \approx f_c \cdot (a_{sw} \cdot \Delta_{com} + b_{sw} \cdot \bar{I}_{T_i}^{com} + c_{sw} \cdot I_{eff_T_i}^{com\ 2}) \cdot \frac{V_{com}}{V_{def}}$$

avec

$P_{com}^{T_i}$ = pertes par commutation d'un interrupteur T_i

f_c = fréquence de commutation de l'interrupteur

V_{com} = valeur de la tension commutée par l'interrupteur

V_{def} = valeur de la tension de définition pour l'interrupteur (défini par le fabricant)

$\bar{I}_{T_i}^{com}$ = courant moyen commuté dans l'interrupteur T_i

$I_{eff_T_i}^{com}$ = courant efficace commuté dans l'interrupteur T_i

a_{sw}, b_{sw}, c_{sw} proviennent des caractéristiques fournies par le constructeur

$\Delta_{com} = \frac{t_2 - t_1}{T_{mod}}$ avec $[t_1, t_2]$ = intervalle de commutation de l'interrupteur

et T_{mod} = période de modulation de l'interrupteur.

Les pertes par commutation pour une diode anti-parallèle D_i s'expriment de la même façon que pour un interrupteur T_i .

Les pertes à l'amorçage des diodes anti-parallèles sont négligées.

On peut donc écrire pour une diode :

$$P_{com}^{D_i} \approx f_c \cdot (a_{rec} \cdot \Delta_{com} + b_{rec} \cdot \bar{I}_{D_i}^{com} + c_{rec} \cdot I_{eff_D_i}^{com\ 2}) \cdot \frac{V_{com}}{V_{def}}$$

avec

$\bar{I}_{D_i}^{com}$ = courant moyen commuté dans la diode D_i

$I_{eff_D_i}^{com}$ = courant efficace commuté dans la diode D_i

Les coefficients $a_{rec}, b_{rec}, c_{rec}$ sont déterminés à l'aide de la caractéristique de l'énergie de recouvrement consommée par la diode à 125°C et pour V_{def} .

Q3.14 : Montrer que les pertes par commutation s'expriment ainsi en valeurs littérales :

$$\underline{P_{com}^{T1} = \frac{fc}{2\pi} \cdot \left(\frac{a_{sw}}{2} \hat{I}_s^2 \cdot (\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2}) + b_{sw} \hat{I}_s \cdot (1 + \cos \varphi) + c_{sw} \cdot (\pi - \varphi) \right) \cdot \frac{V_{com}}{V_{def}}}$$

$$\underline{P_{com}^{D1} = \frac{fc}{2\pi} \cdot \left(\frac{a_{rec}}{2} \hat{I}_s^2 \cdot (\varphi - \frac{\sin(2\varphi)}{2}) + b_{rec} \hat{I}_s \cdot (1 - \cos \varphi) + c_{rec} \cdot \varphi \right) \cdot \frac{V_{com}}{V_{def}}}$$

$$\underline{P_{com}^{T2} = \frac{fc}{2\pi} \cdot \left(\frac{a_{sw}}{2} \hat{I}_s^2 \cdot (\varphi - \frac{\sin(2\varphi)}{2}) + b_{sw} \hat{I}_s \cdot (1 - \cos \varphi) + c_{sw} \cdot \varphi \right) \cdot \frac{V_{com}}{V_{def}}}$$

$$\underline{P_{com}^{D2} \approx 0}$$

$$\underline{P_{com}^{X1} = \frac{fc}{2\pi} \cdot \left(\frac{a_{rec}}{2} \hat{I}_s^2 \cdot (\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2}) + b_{rec} \hat{I}_s \cdot (1 + \cos \varphi) + c_{rec} \cdot (\pi - \varphi) \right) \cdot \frac{V_{com}}{V_{def}}}$$

avec :

\hat{I}_s : courant crête de sortie
 φ : déphasage entre V_s et I_s

Q3.15 : Calculer les pertes en commutation des interrupteurs T_i , D_i ($i=1,2,3,4$), ainsi que des diodes clampées X1,X2.

Remarque : les diodes anti-parallèles D_i et les diodes clampées X1,X2 sont strictement identiques.

Données :

$$E = 800V$$

$$f_c = 1 \text{ kHz}$$

$$m = 0,8$$

$$I_{sn} = 232 \text{ A (courant nominal efficace de l'onduleur)}$$

$$\cos \varphi_n = 0,86 \text{ (facteur de déphasage au point nominal de fonctionnement de l'onduleur)}$$

$$V_{def} = 300V$$

$$\begin{array}{l} a_{sw} = 7,3 \cdot 10^{-8} \\ b_{sw} = 2,9 \cdot 10^{-5} \\ c_{sw} = 2,6 \cdot 10^{-3} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} a_{rec} = -2,6 \cdot 10^{-8} \\ b_{rec} = 25,2 \cdot 10^{-6} \\ c_{rec} = 18,9 \cdot 10^{-4} \end{array}$$

Calculer les pertes totales en commutation d'une cellule de commutation $P_{com}^{cellule_NPC}$ d'un onduleur NPC.

En déduire les pertes totales $P_{tot}^{cellule_NPC}$ d'une cellule de commutation d'un onduleur NPC .

Q3.16 : Modèle thermique

Le document constructeur du module **BSM300 GB60 DLC** précise les résistances thermiques jonction-boîtier pour le transistor et la diode ainsi que la résistance thermique de contact semelle-dissipateur.

On donne :

○ Transistor

$R_{thJC} = 0,10$ K/W (résistance thermique « junction to case »)

$R_{thCH} = 0,01$ K/W (résistance thermique « case to heatsink »)

○ Diode

$R_{thJC} = 0,21$ K/W (résistance thermique « junction to case »)

$R_{thCH} = 0,01$ K/W (résistance thermique « case to heatsink »)

Le module BSM 300 GB60 DLC comprend deux transistors avec respectivement leurs diodes anti-parallèles.

⊙ En supposant qu'à l'intérieur du module, les puces diode et transistor sont thermiquement découplées et que les caractéristiques thermiques des diodes clampées sont identiques à celles des diodes anti-parallèles, proposer un modèle thermique nodal permettant de calculer approximativement en fonction des puissances dissipées et pour une température de refroidisseur donnée, la température de jonction des diodes et du transistor.

⊙ Pour une température du dissipateur de θ_h de 50°C, calculer les températures de jonction du transistor (θ_{JT}), de la diode anti-parallèle (θ_{JD}) et de la diode clampée (θ_{JX}) lors du fonctionnement de l'onduleur à son point nominal.

Partie C2 : Cellule de commutation d'un onduleur 2 niveaux

Q3.17 : Calcul des pertes en conduction et en commutation d'un onduleur MLI 2 niveaux.

La figure C3 représente le schéma d'une cellule de commutation d'un onduleur MLI 2 niveaux ainsi que la commande des deux interrupteurs IGBT.

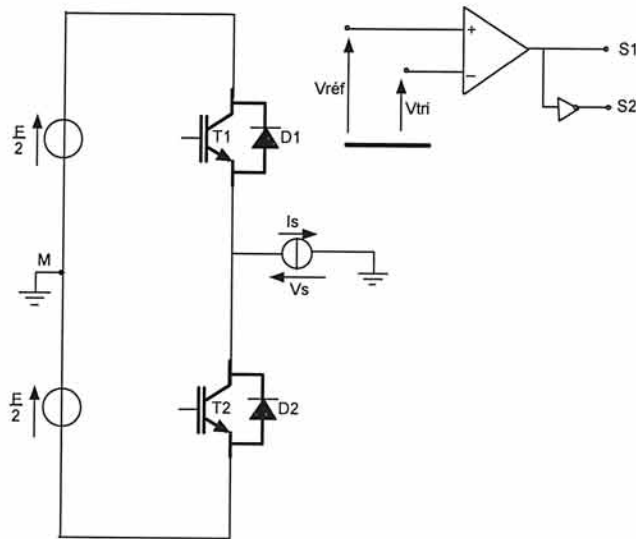


Figure C3- Cellule de commutation d'un onduleur MLI 2 niveaux

Le signaux S1 (respectivement S2) sont les signaux de commande des interrupteurs T1 (respectivement T2).

Les valeurs littérales des pertes par conduction et commutation de chaque interrupteur IGBT sont définies par les relations suivantes :

⊙ Pertes en conduction de T1

$$P_{cond}^{T1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{V_{T0} \cdot \hat{I}_s}{2} \cdot \left(2 + m \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \cos \varphi \right) + \frac{r_T}{2} \hat{I}_s^2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \frac{4}{3} \cdot m \cdot \cos \varphi \right) \right)$$

⊙ Pertes en commutation de T1

$$P_{com}^{T1} = f_c \cdot \left(\frac{a_{sw}}{4} \hat{I}_s^2 + \frac{b_{sw}}{\pi} \hat{I}_s + \frac{c_{sw}}{2} \right) \cdot \frac{V_{com}}{V_{def}}$$

⊙ Pertes en conduction dans la diode D1

$$P_{cond}^{D1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{V_{D0} \cdot \hat{I}_s}{2} \cdot (2 - m \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \cos \varphi) + \frac{r_D}{2} \hat{I}_s^2 \cdot (\frac{\pi}{2} - \frac{4}{3} \cdot m \cdot \cos \varphi) \right)$$

⊙ Pertes en commutation dans la diode D1

$$P_{com}^{D1} = f_c \cdot \left(\frac{a_{rec}}{4} \hat{I}_s^2 + \frac{b_{rec}}{\pi} \hat{I}_s + \frac{c_{rec}}{2} \right) \cdot \frac{V_{com}}{V_{def}}$$

Transistor :

$$r_T = 3,58 \text{ m}\Omega$$

$$V_{CE0} = 1,33 \text{ V}$$

Diode :

$$V_{D0} = 1,07 \text{ V}$$

$$r_D = 2,1 \text{ m}\Omega$$

Le module BSM300 GB120 DLC comprend deux transistors avec leurs diodes anti-parallèles.

Le point de fonctionnement nominal de l'onduleur est le suivant :

$$E = 800 \text{ V}$$

$$f_c = 1 \text{ kHz}$$

$$m = 0,8$$

$$I_{sn} = 232 \text{ A (courant nominal efficace de l'onduleur)}$$

$$\cos \varphi_n = 0,86 \text{ (facteur de déphasage au point nominal de fonctionnement de l'onduleur)}$$

$$V_{def} = 300 \text{ V}$$

Les coefficients pour le module ref. BSM300 GB120 DLC sont les suivants :

$$a_{sw} = 1,9 \cdot 10^{-7}$$

$$b_{sw} = 1,2 \cdot 10^{-4}$$

$$c_{sw} = 14,7 \cdot 10^{-3}$$

$$a_{rec} = -7,6 \cdot 10^{-8}$$

$$b_{rec} = 77 \cdot 10^{-6}$$

$$c_{rec} = 45,6 \cdot 10^{-4}$$

Calculer les pertes en conduction $P_{cond}^{cellule2N}$ et en commutation $P_{com}^{cellule2N}$ des interrupteurs $T_i, D_i (i=1,2)$.

En déduire les pertes totales d'une cellule de commutation $P_{tot}^{cellule2N}$ d'un onduleur 2 niveaux.

Q3.18 : Modèle thermique

Le document constructeur du module *BSM300 GB120 DLC* précise les résistances thermiques jonction-boîtier pour le transistor et la diode ainsi que la résistance thermique de contact semelle-dissipateur.

On donne :

- Transistor
 - $R_{thJC} = 0,05 \text{ K/W}$ (résistance thermique « junction to case »)
 - $R_{thCH} = 0,03 \text{ K/W}$ (résistance thermique « case to heatsink »)

- Diode
 - $R_{thJC} = 0,125 \text{ K/W}$ (résistance thermique « junction to case »)
 - $R_{thCH} = 0,06 \text{ K/W}$ (résistance thermique « case to heatsink »)

Le module BSM300 GB120 DLC comprend deux transistors avec leurs diodes anti-parallèles.

☉ En supposant qu'à l'intérieur du module, les puces diode et transistor sont thermiquement découplées, proposer un modèle thermique nodal permettant de calculer approximativement en fonction des puissances dissipées et pour une température de refroidisseur donnée, la température de jonction des diodes et du transistor.

☉ Pour une température du dissipateur de θ_h de 50°C , calculer les températures de jonction du transistor (θ_{JT}), de la diode anti-parallèle (θ_{JD}) lors du fonctionnement de l'onduleur à son point nominal.

Q3.19 : Comparaison des deux types d'onduleurs : NPC 3 niveaux et MLI 2 niveaux.

Compléter le tableau DR17 avec les résultats des questions précédentes. Conclure

Partie C3 : Onduleur NPC triphasé « 3 niveaux »

L'onduleur NPC à 3 niveaux est représenté sur la figure C4. Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C1 et C2), formant un point milieu noté (O), qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux.

La tension totale du bus continu vaut E ; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension $E/2$ à leurs bornes : c'est l'hypothèse que l'on retiendra pour la suite.

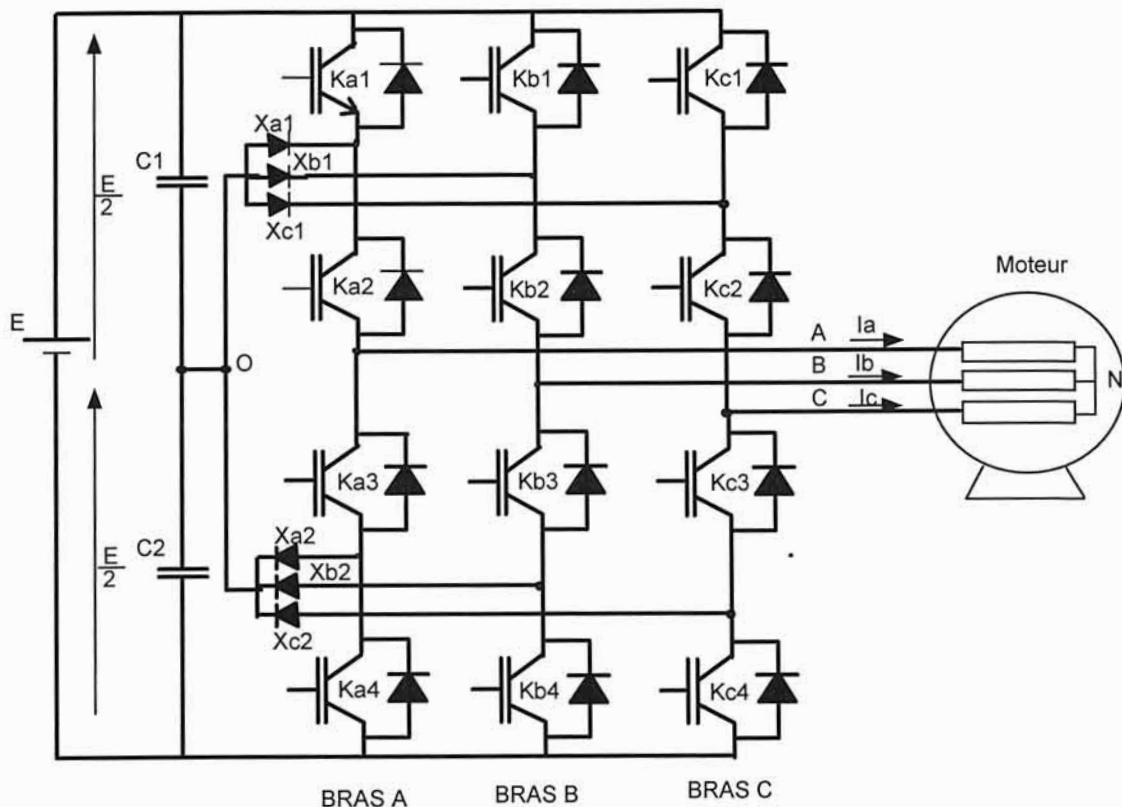


Figure C4 – Onduleur NPC triphasé à 3 niveaux

Chacun des trois bras (A,B,C) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (Ka1,Ka2,Ka3,Ka4 pour le bras A) ainsi que 2 diodes clampées (Xa1 et Xa2) connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnel en courant et bidirectionnels en tension : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en anti-parallèle (type IGBT).

Ainsi, pour le bras A les configurations utiles sont les suivantes :

- Ka1,Ka2 commandés
- Ka2, Ka3 commandés
- Ka3,Ka4 commandés

Q3.20 : Pour chaque configuration utile du bras A, compléter le tableau 1 document réponse **DR18**.

Par la suite, on symbolisera les différents états d'un bras k , correspondant à la tension V_{kO} ($k=A,B,C$), par la notation 1, 0 et -1 correspondant respectivement à $\frac{E}{2}, 0, -\frac{E}{2}$.

En déduire le nombre de possibilités (états) pour l'onduleur complet.

Q3.21 : Pour une charge équilibrée avec des enroulements couplés en étoile où N est le point neutre de la charge, on donne :

$$\begin{pmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{pmatrix}$$

- Déterminer l'expression littérale de la tension de mode commun V_{NO} en fonction de V_{AO} , V_{BO} , V_{CO} .

- Compléter alors le tableau 2 du document réponse **DR18**.

Q3.22 : A partir du tableau 2 de la question **Q3.21**, construire le diagramme vectoriel (voir document réponse **DR 19**) où chaque état est décrit selon la notation « état bras A, état bras B, état bras C » et les tensions moteur générées peuvent être lues par projection sur les axes V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} .

Par exemple, $V_{AN}=0$, $V_{BN}=0$ et $V_{CN}=0$ sera représenté par l'état (0,0,0) lui-même équivalent au vecteur \vec{V}_0 .

Q3.23 : Déterminer le nombre d'états redondants. En déduire le nombre d'états non redondants noté N.

Par la suite, on associe un vecteur \vec{V}_i ($i=0, \dots, N$) à chaque état non redondant.

Dessiner sur la représentation vectorielle (**DR19**), l'ensemble de ces vecteurs.

Q3.24 : Etant données des consignes de tension pour V_{AN} , V_{BN} et V_{CN} , il en résulte dans le diagramme vectoriel (**DR22**) un vecteur référence noté $\vec{V}_{réf}$ défini par :

$$\vec{V}_{réf} = \frac{2}{3} (V_{AN} + aV_{BN} + a^2V_{CN}) = V_{réf} e^{i\theta}$$

avec

$$a = e^{i\theta}$$

Pour alimenter une machine électrique par un système de tensions triphasées sinusoïdales, on crée donc un vecteur $\vec{V}_{réf}$ d'amplitude $V_{réf}$ constante égale à l'amplitude souhaitée des tensions simples, et

tournant autour du centre de la figure à la vitesse $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ constante égale à la pulsation électrique souhaitée.

On doit construire $\vec{V}_{réf}$ à l'aide d'une combinaison des vecteurs avoisinants (\vec{V}_k) appliquées individuellement pendant une durée T_k de sorte que $\vec{V}_{réf}$ se retrouve au barycentre de ces vecteurs pondérés par la durée :

$$T_{dec} \cdot \vec{V}_{réf} = \sum_k T_k \cdot \vec{V}_k$$

$$T_{dec} = \sum_k T_k = \frac{1}{F_{dec}}$$

avec F_{dec} = fréquence de découpage

- Pour le vecteur $\vec{V}_{réf}$ dessiné sur le diagramme vectoriel (voir DR19), entourez en rouge les trois vecteurs à utiliser pour former $\vec{V}_{réf}$.

- Déterminer les trois coefficients de pondération (durées positives) à appliquer pour cette combinaison vectorielle en fonction de T_{dec} .

- En déduire leurs valeurs numériques sachant que $F_{dec} = 1$ kHz.

Q3.25 : Cette méthode basée sur l'exploitation directe du diagramme vectoriel est appelée **modulation vectorielle**. La séquence des différents états est déterminée par un algorithme, puis les ordres de commande adéquats sont appliqués aux interrupteurs.

Cette méthode offre un contrôle total sur le choix et la répartition des états mais nécessite un processeur de commande performant donc coûteux pour effectuer les calculs nécessaires.

- A partir des questions précédentes, déterminer les vecteurs ou états qui permettent d'obtenir une tension de mode commun égale à 0.

- Dessiner en vert sur le document réponse DR19, la figure géométrique de l'ensemble de ces vecteurs.

- Quel est l'avantage de réduire la tension de mode commun pour un onduleur ?

Nom : <i>(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'épouse)</i>	<input type="text"/>																							
Prénom :	<input type="text"/>																							
N° d'inscription :	<input type="text"/>								Né(e) le :	<input type="text"/>		/	<input type="text"/>		/	<input type="text"/>								

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

Concours	<input type="text"/>			Section/Option	<input type="text"/>				Epreuve	<input type="text"/>				Matière	<input type="text"/>			
-----------------	----------------------	--	--	-----------------------	----------------------	--	--	--	----------------	----------------------	--	--	--	----------------	----------------------	--	--	--

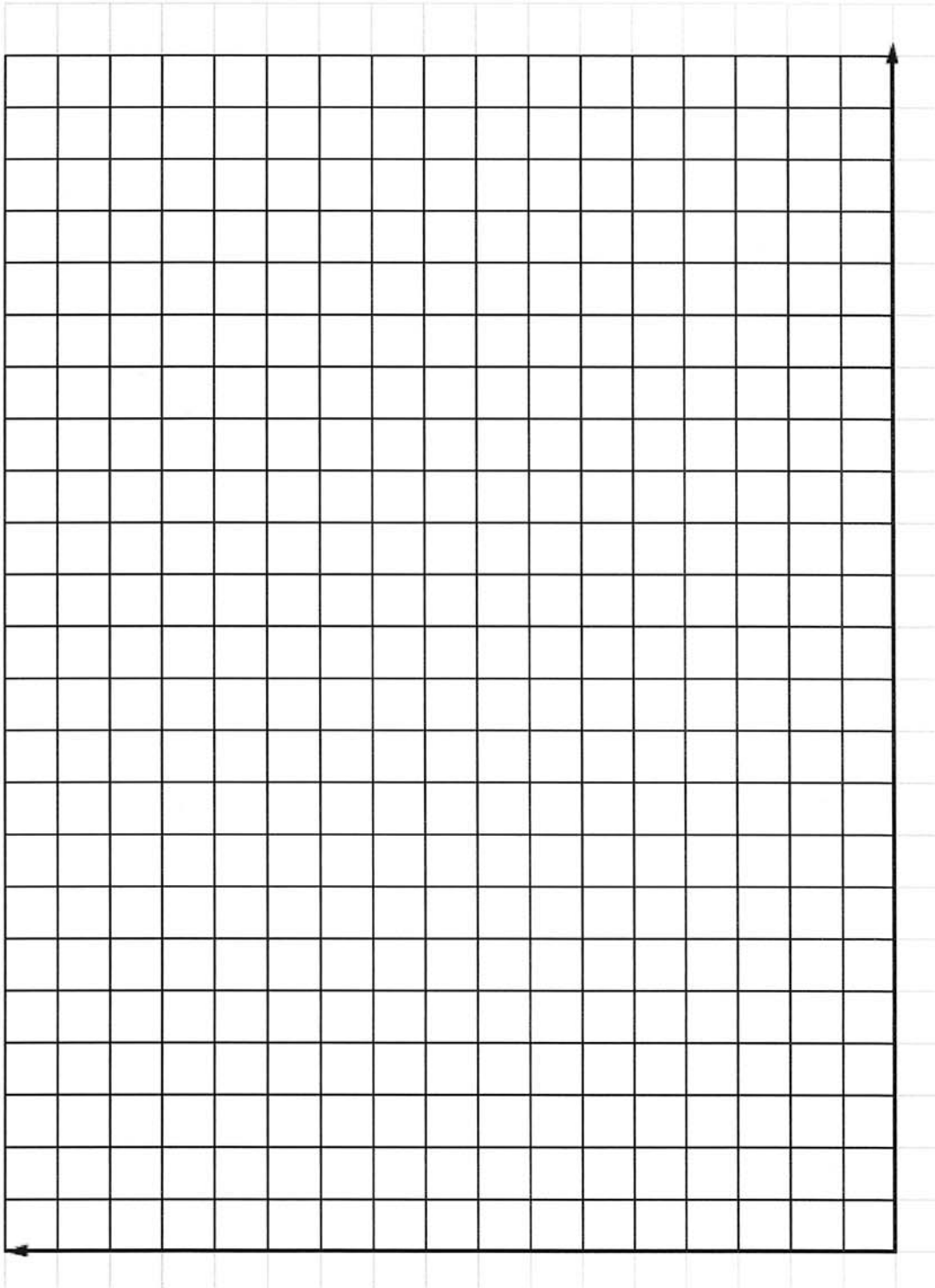
EAE SIE 3

Q 1.4 / 1.5 / 1.9

C. Documents réponses

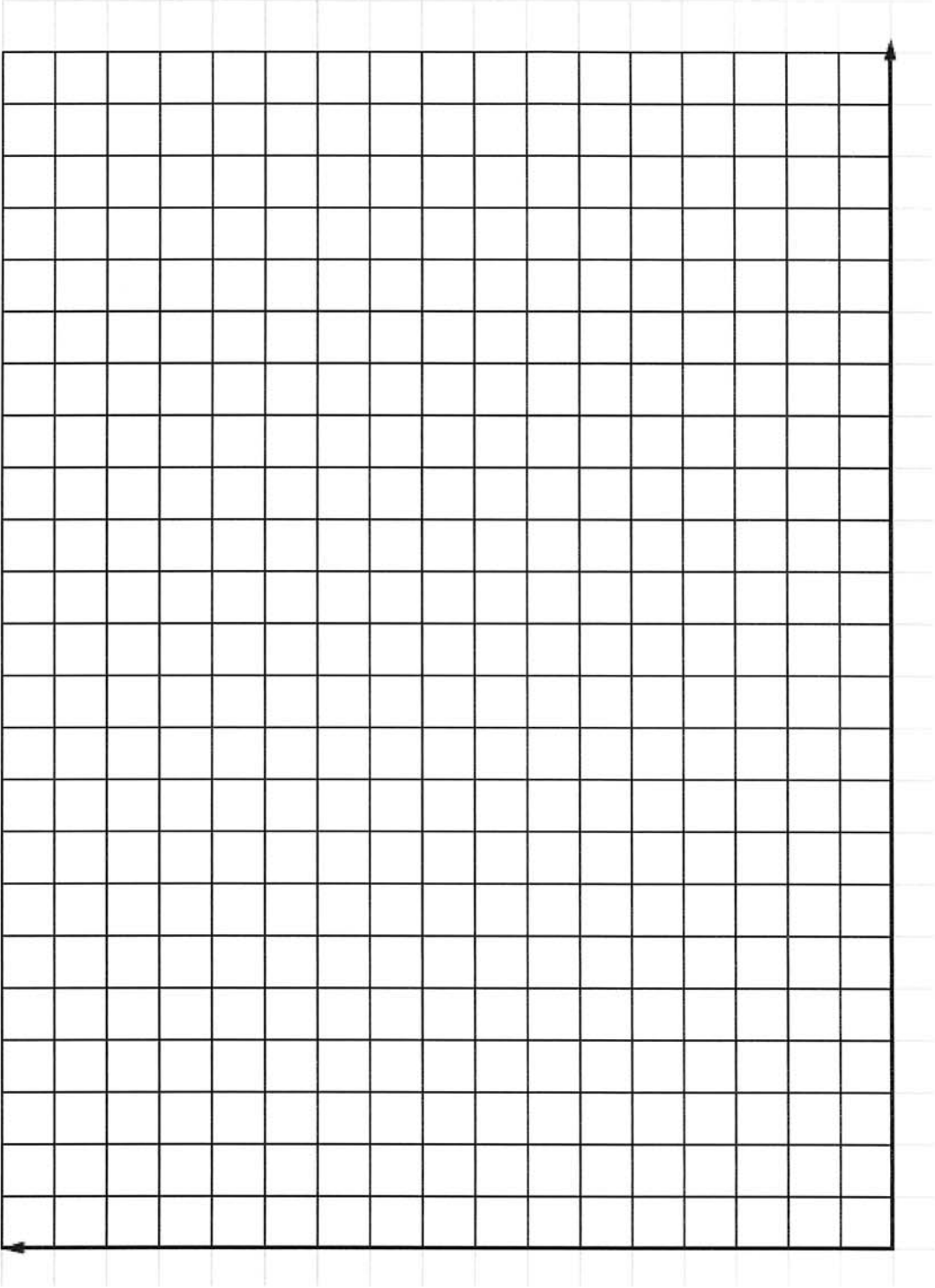
DR1. Caractéristique mécanique de la bobine « enrouleur »

Q1.4 - Vitesse angulaire de la bobine enrouleur en fonction du temps



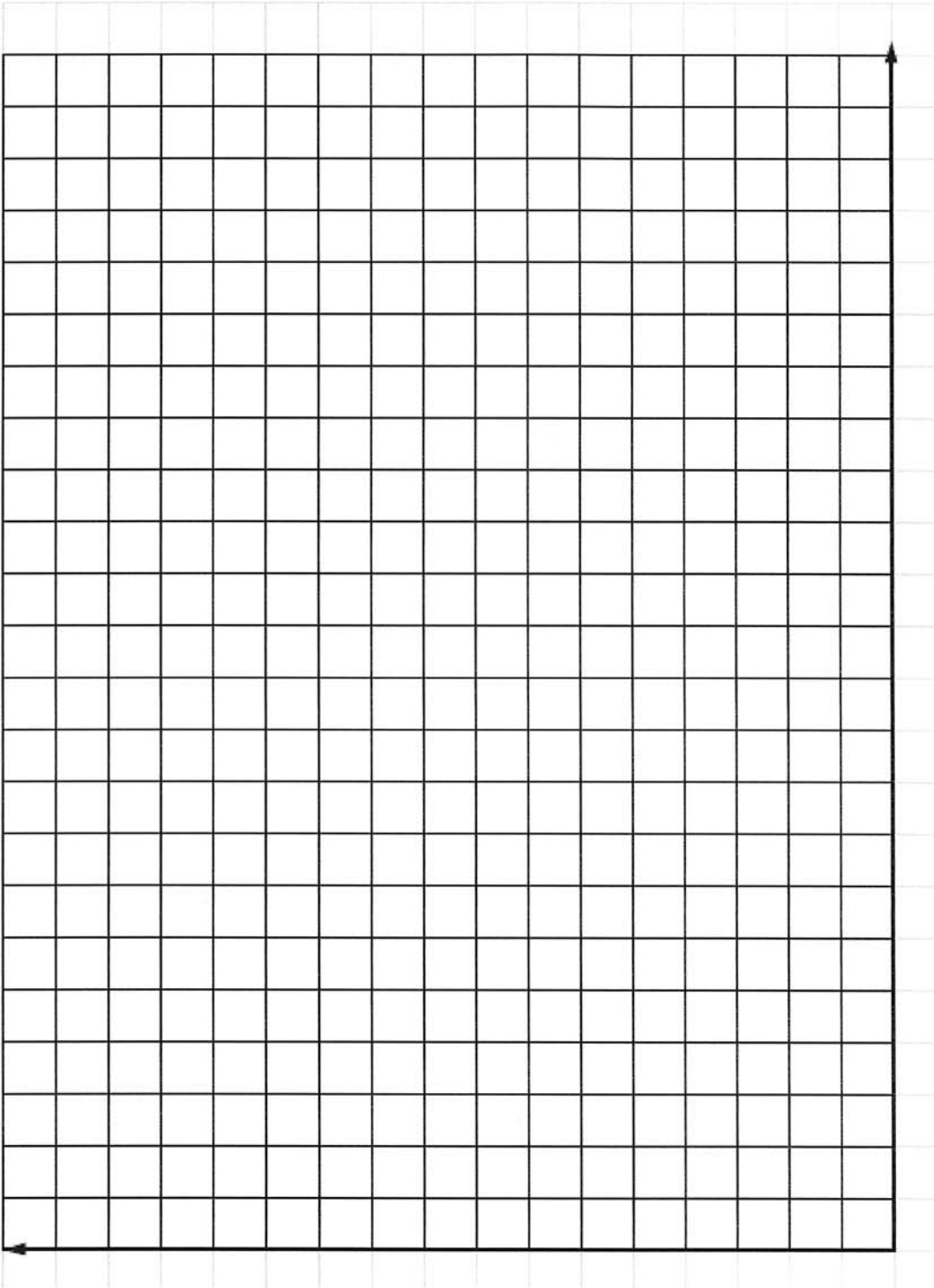
DR2. Caractéristique mécanique de la bobine « enrouleur »

Q1.5 - Inertie de la bobine enrouleur $J_e(t)$ en fonction du temps t .



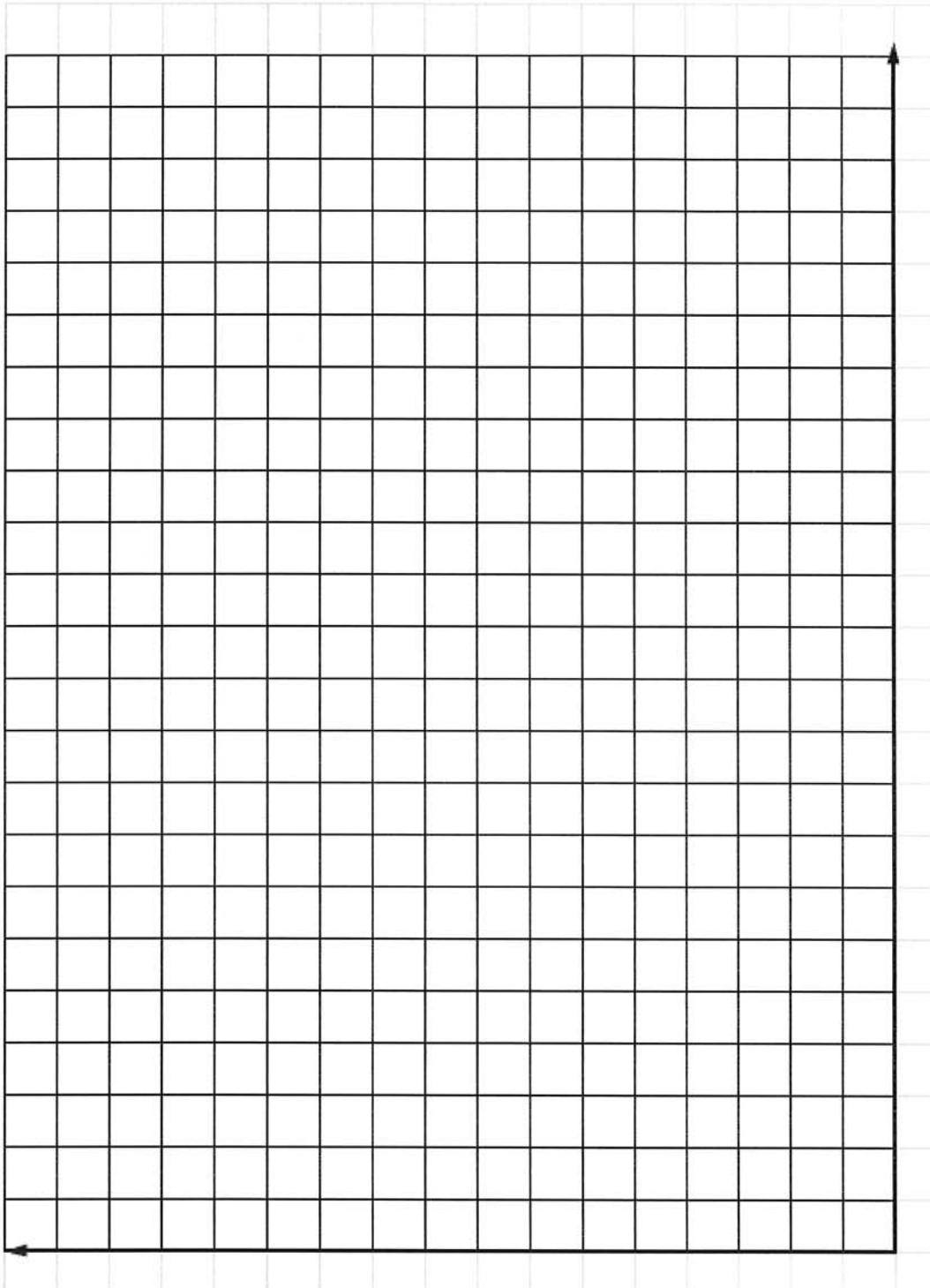
DR3. Caractéristique mécanique du moteur de la bobine « enrouleur »

Q1.9 - Couple moteur $Cu1$ en fonction du rayon $Re(t)$



DR4. Caractéristique mécanique du moteur de la bobine « enrouleur »

Q1.10 - Couple moteur C_{u1} en fonction de la vitesse angulaire Ω_{m1}



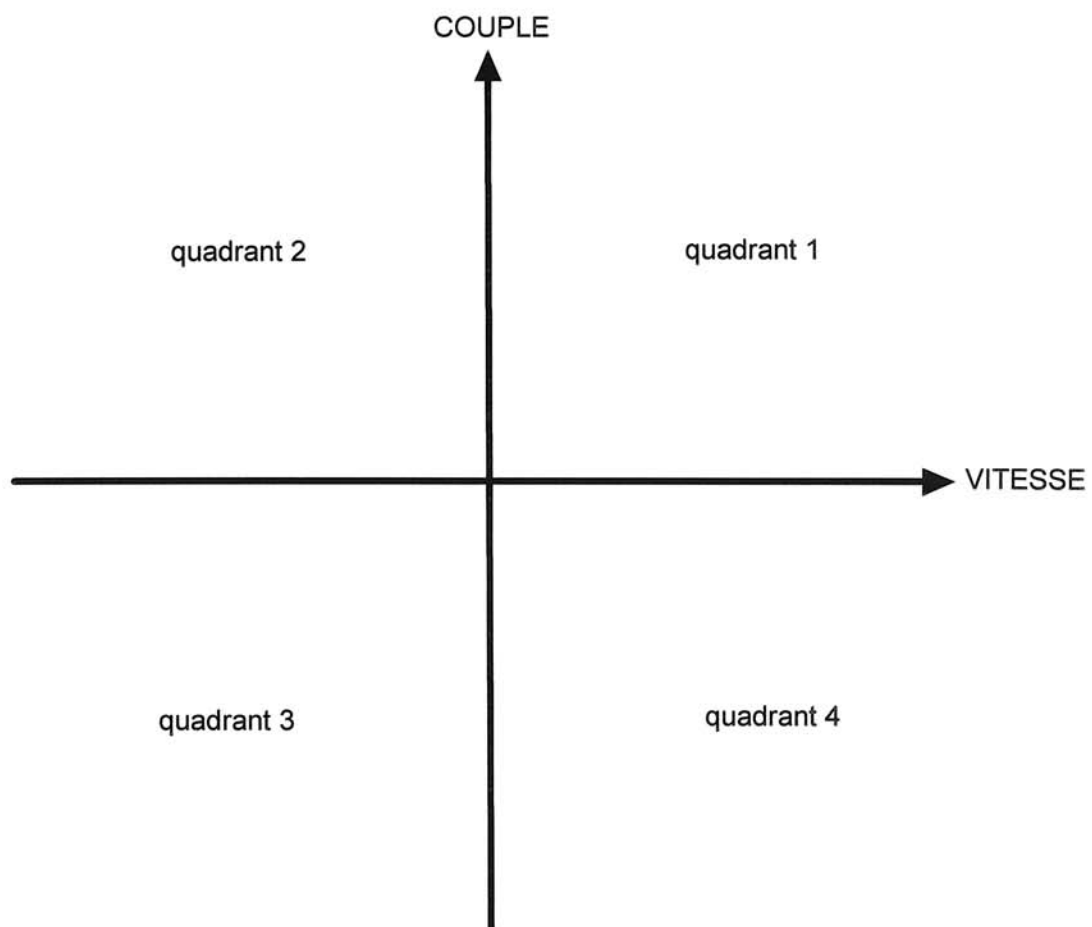
DR5. Caractéristique mécanique du moteur de la bobine « enrouleur »

Q1.11 – Plan couple-vitesse d'un moteur

On se place en convention récepteur (P_a : puissance absorbée)

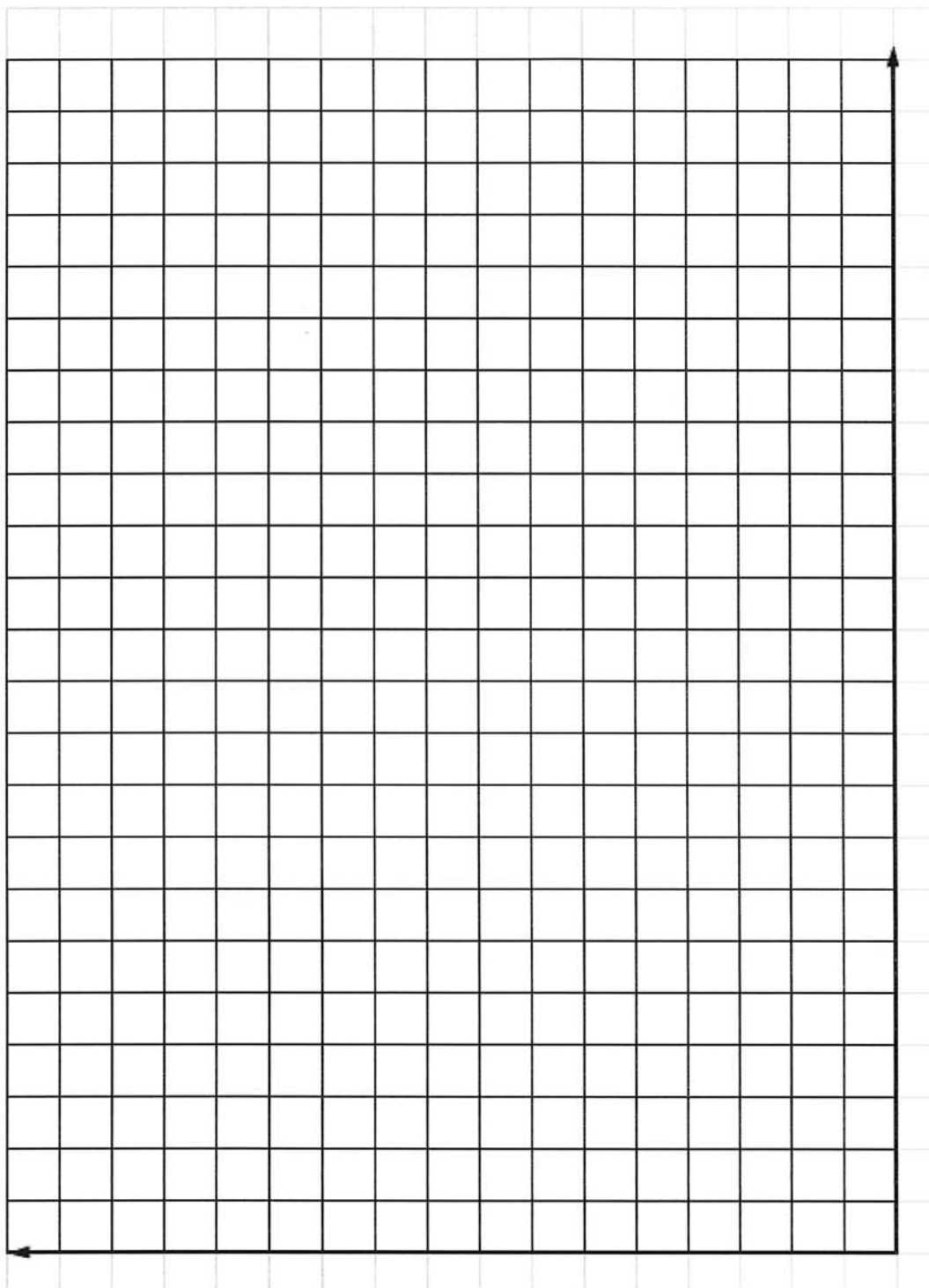
$P_a > 0$: fonctionnement en moteur

$P_a < 0$: fonctionnement en génératrice



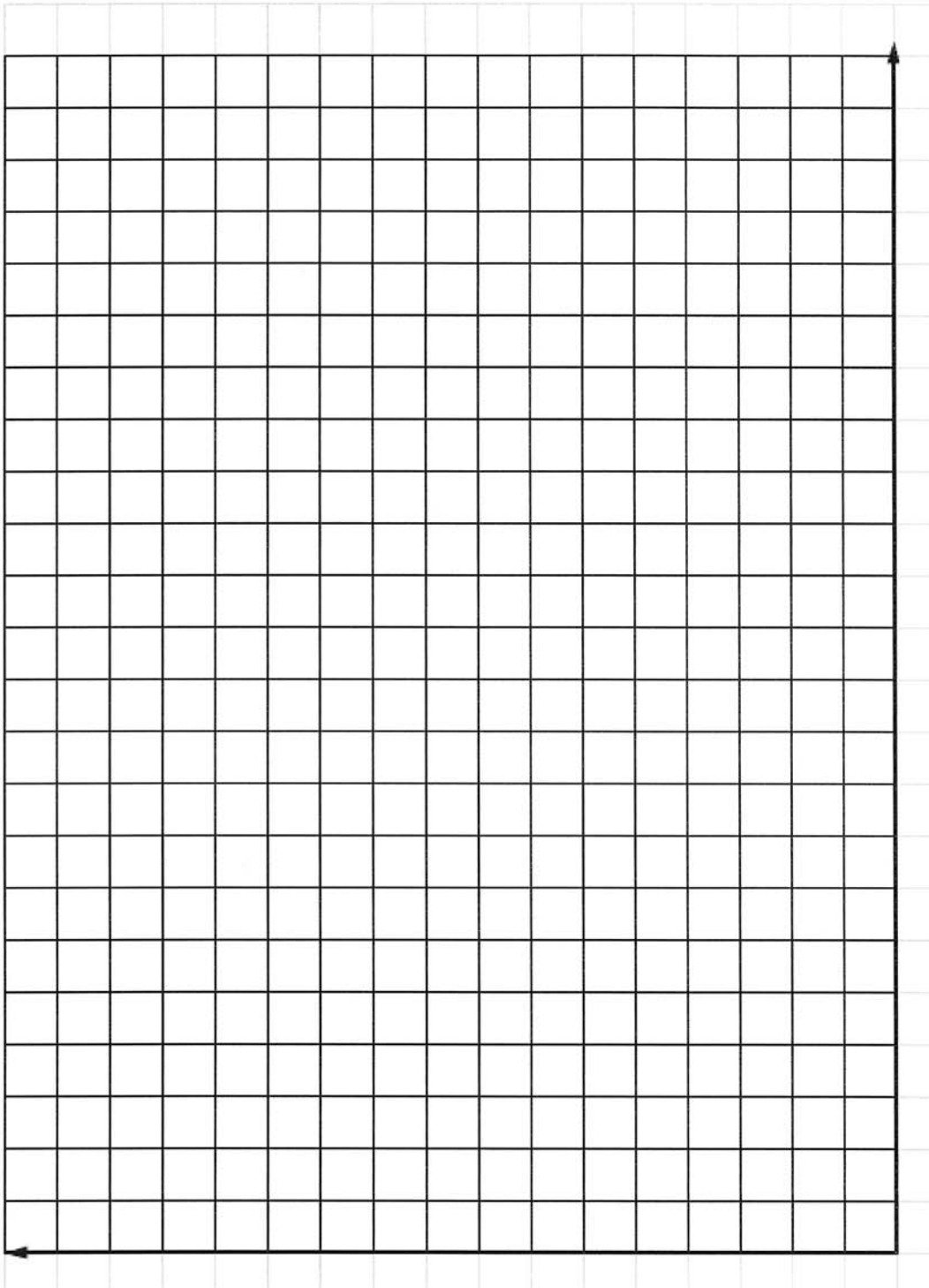
DR6. Caractéristique mécanique de la bobine « dérouleur »

Q1.15 - Vitesse angulaire de la bobine dérouleur en fonction du temps



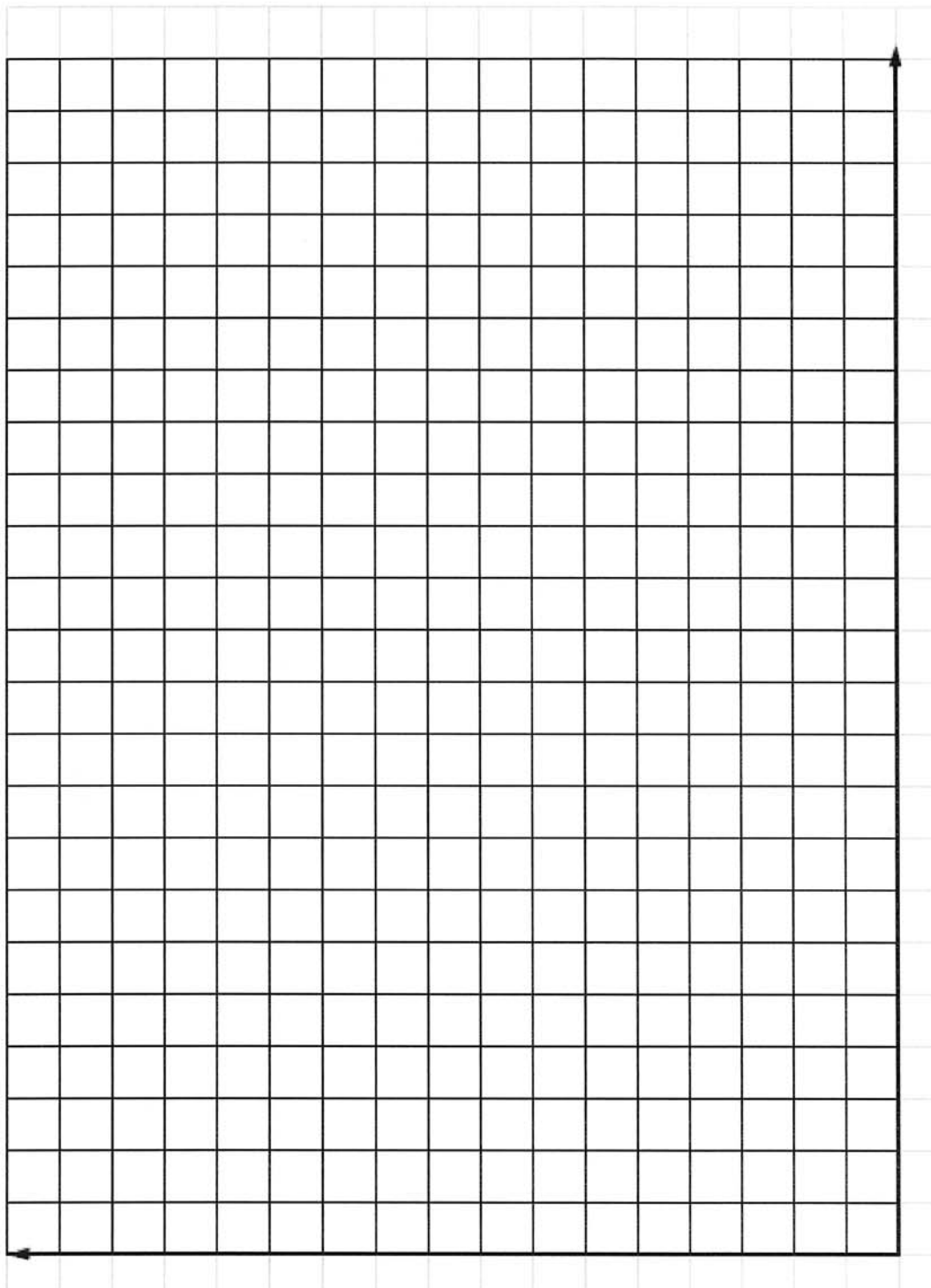
DR7. Caractéristique mécanique de la bobine « dérouleur »

Q1.16– Inertie de la bobine dérouleur en fonction du temps



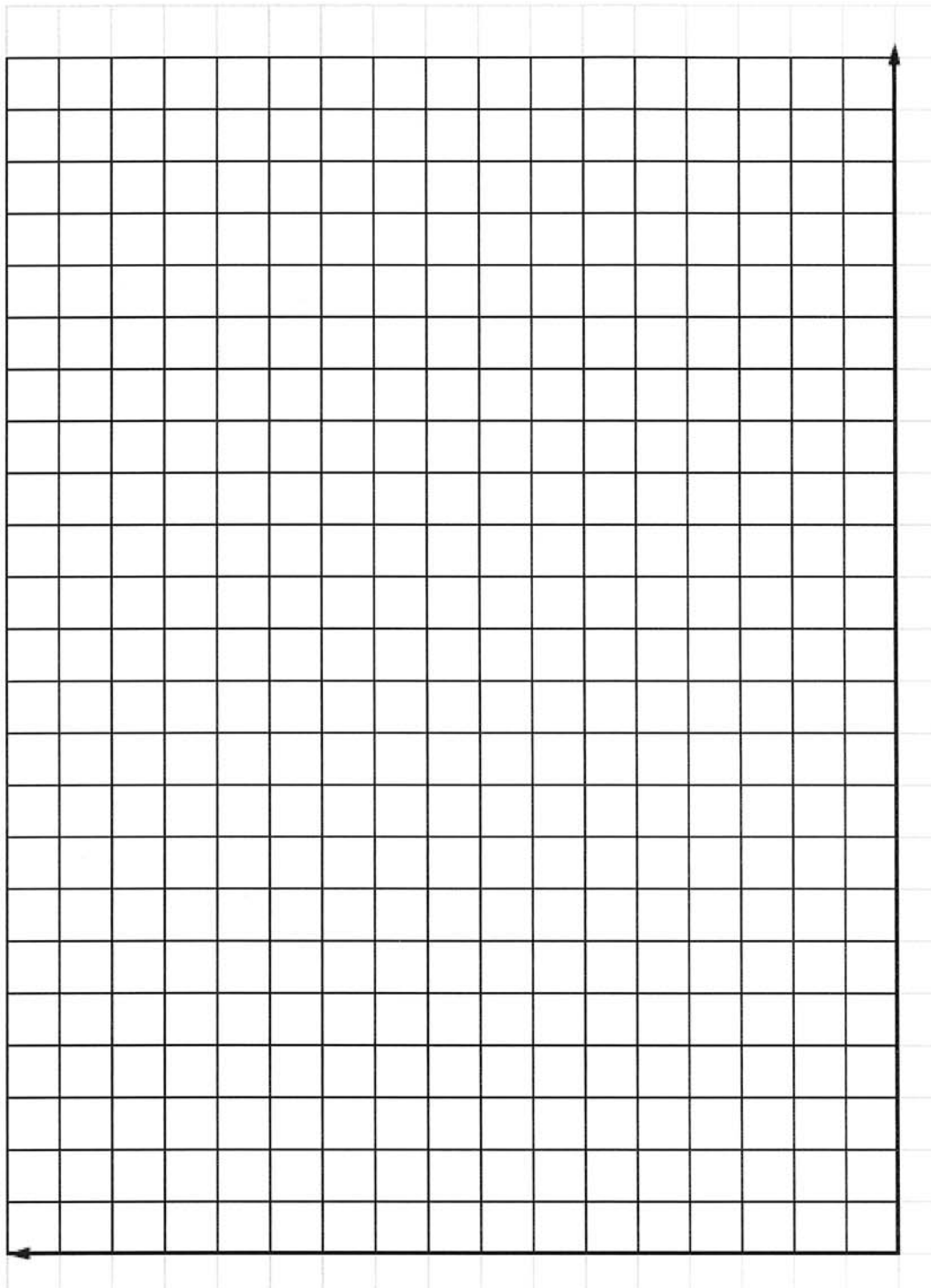
DR8. Caractéristique mécanique du moteur de la bobine « dérouleur »

Q1.20 - Couple moteur Cu_2 en fonction du rayon $R_d(t)$



DR9. Caractéristique mécanique du moteur de la bobine « dérouleur »

Q1.20 - Couple moteur Cu_2 en fonction de la vitesse angulaire Ω_{m2}



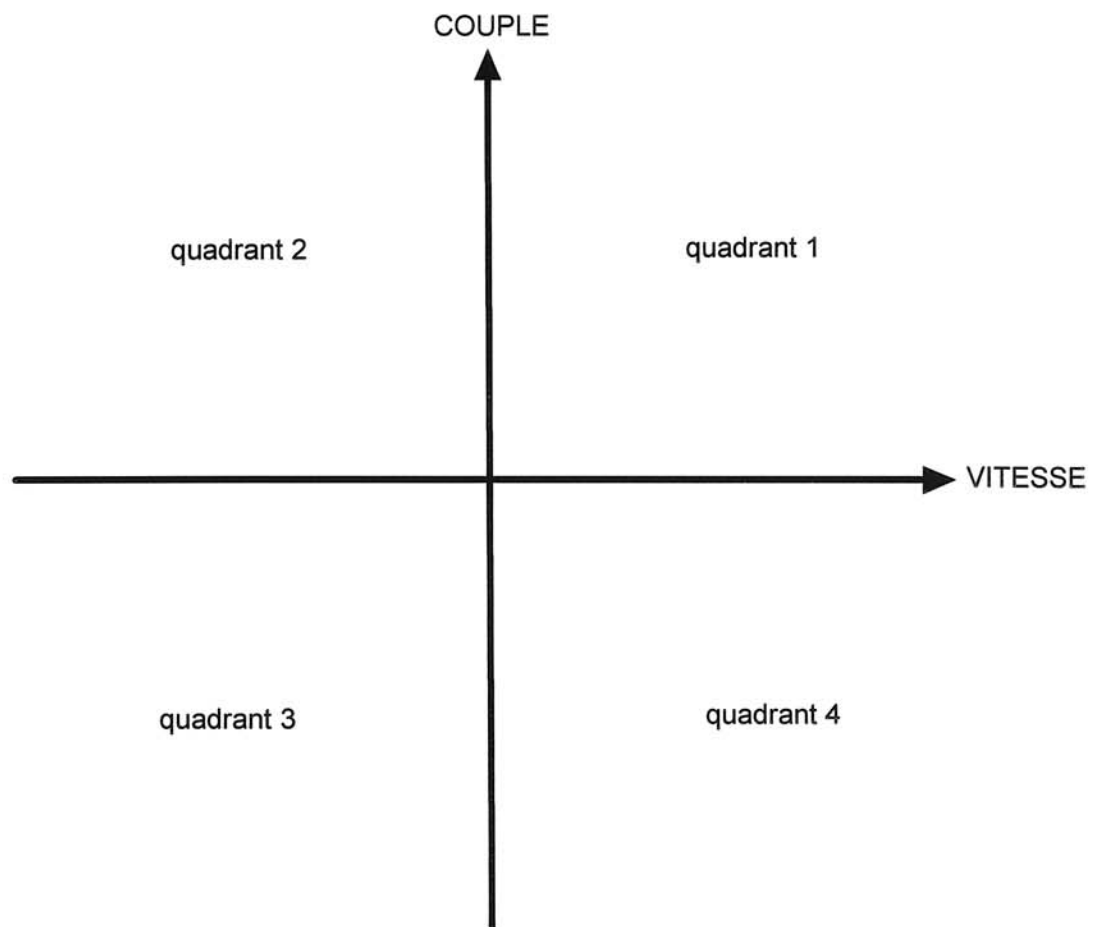
DR10. Caractéristique mécanique du moteur de la bobine « dérouleur »

Q1.22 – Plan couple-vitesse d'un moteur

On se place en convention récepteur (P_a : puissance absorbée)

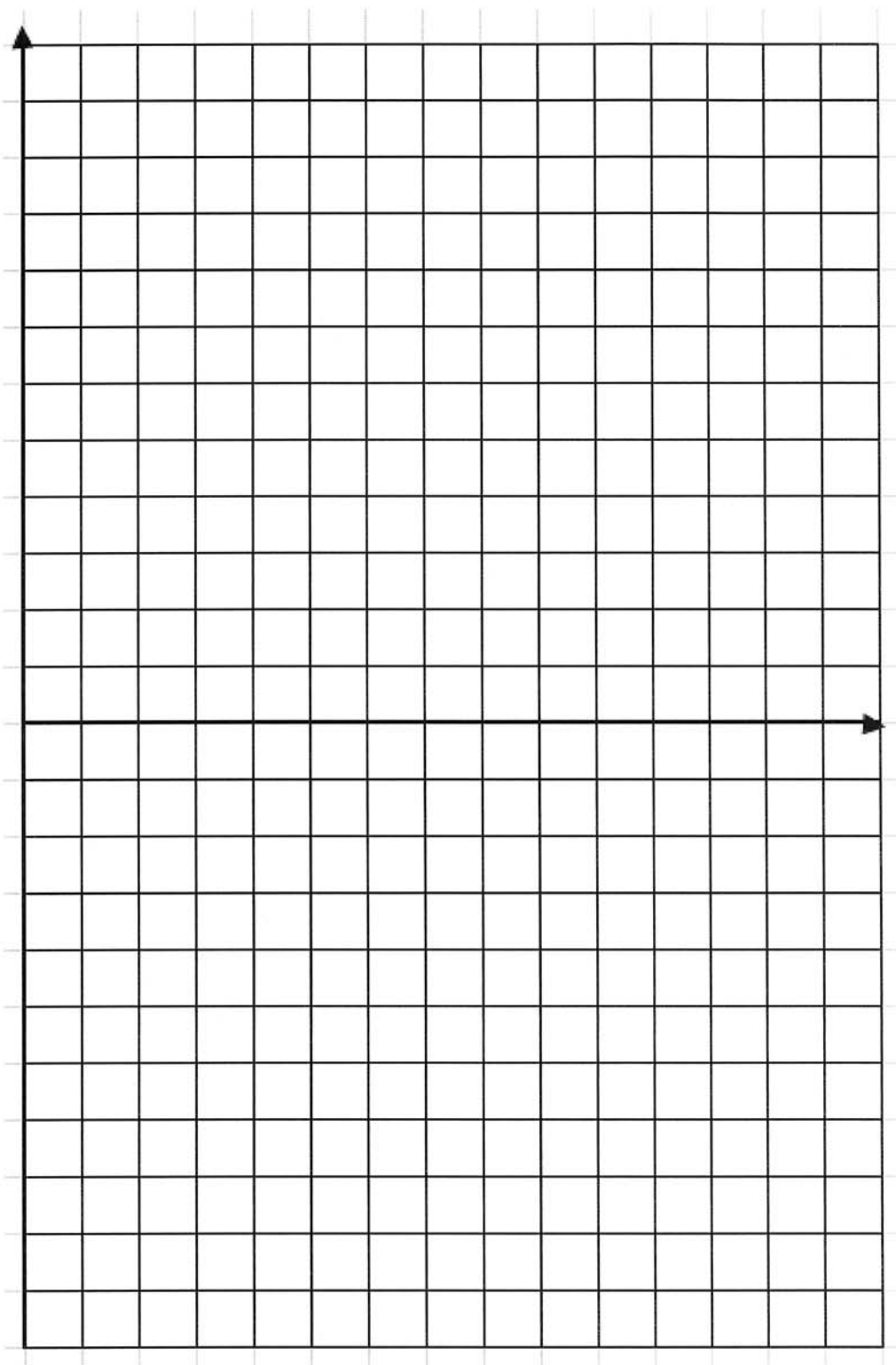
$P_a > 0$: fonctionnement en moteur

$P_a < 0$: fonctionnement en génératrice



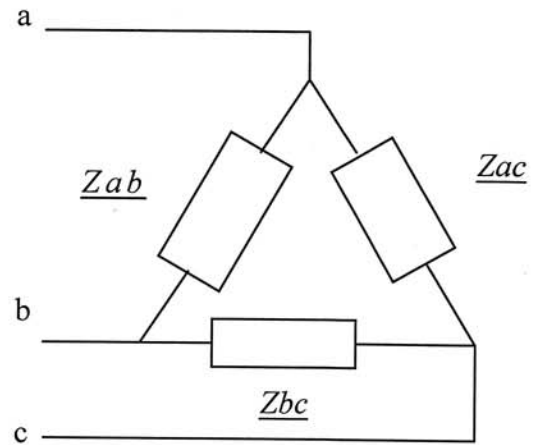
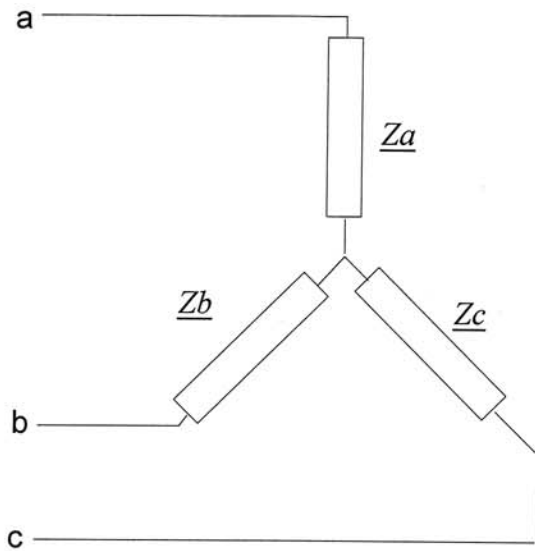
DR11. Caractéristique couple,vitesse du moteur n°1 (en fonctionnement moteur et générateur)

Q2.9 - Couple C en fonction de Ω (moteur ou générateur)



DR12 : Théorème de KENNELY

Q2.10 : Passage triangle-étoile



$Z_a =$

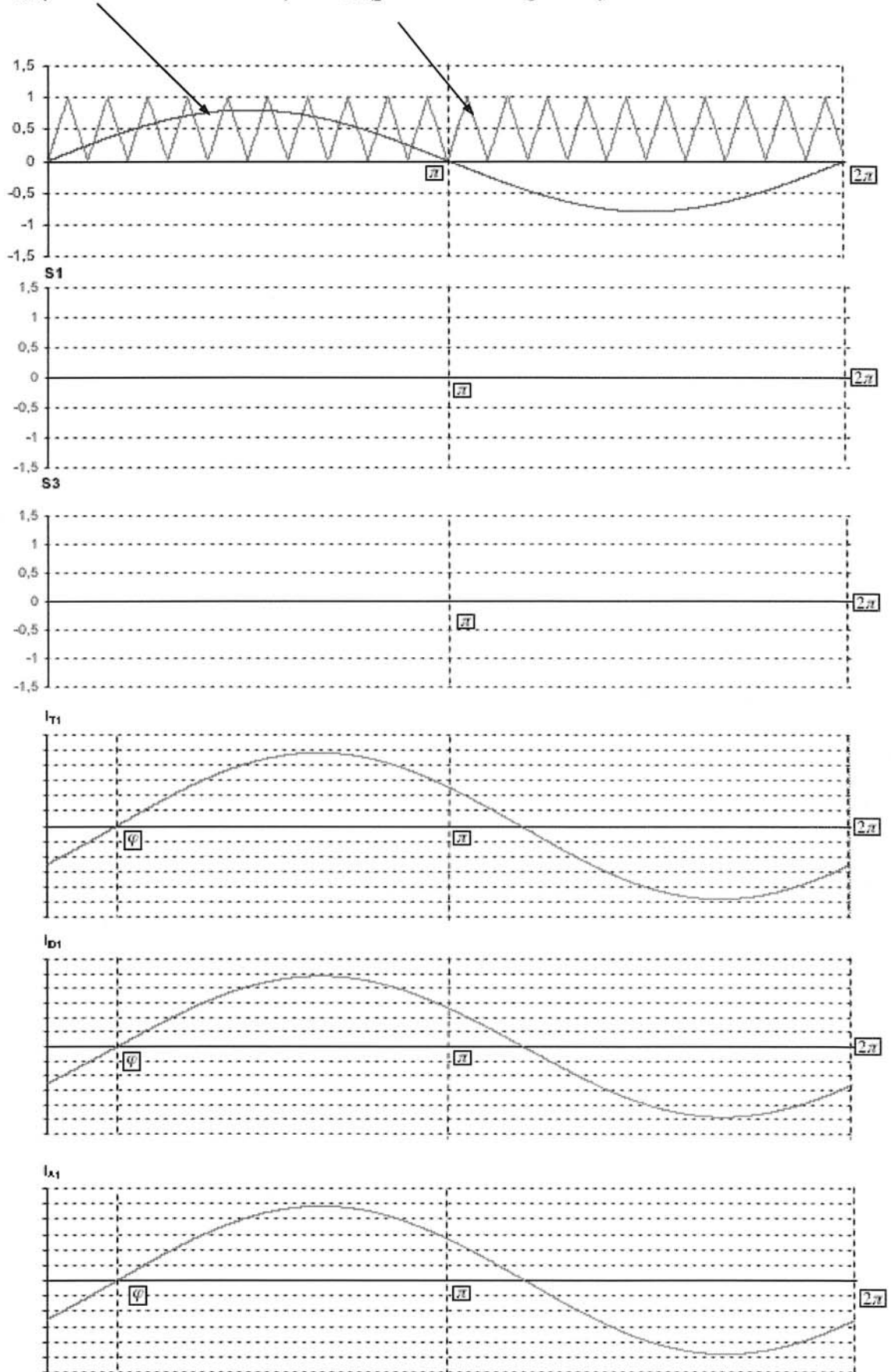
$Z_b =$

$Z_c =$

DR13. Formes d'ondes d'une cellule de commutation d'un onduleur NPC 3 niveaux

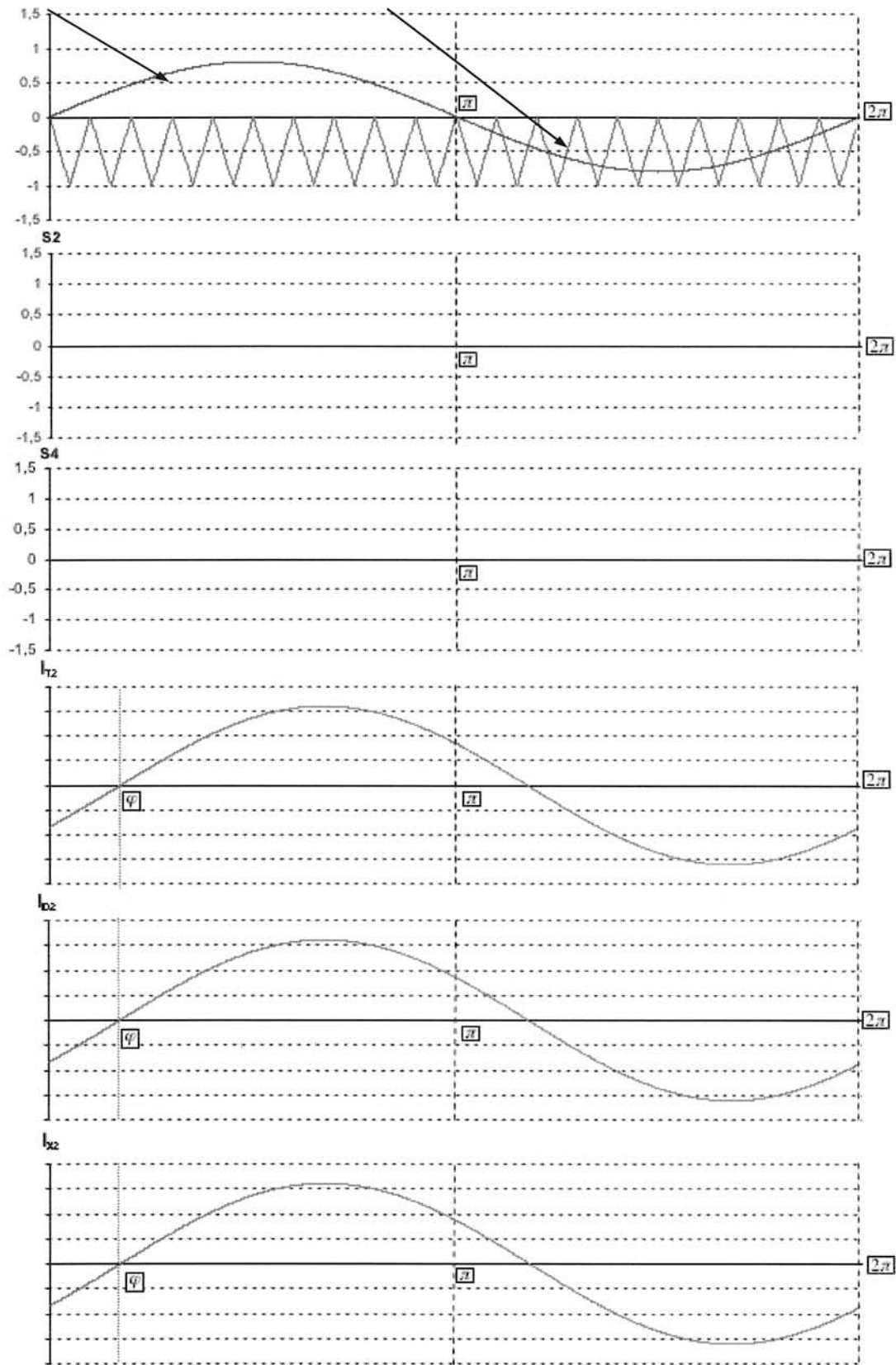
Q3.1

V_{ref} (modulante sinusoïdale) et V_{tri} (porteuse triangulaire)



DR14. Formes d'ondes d'une cellule de commutation d'un onduleur NPC 3 niveaux
Q3.2

V_{ref} (modulante sinusoïdale) et $-V_{tri}$ (porteuse triangulaire)



DR15. Phases de fonctionnement d'une cellule de commutation d'un onduleur NPC 3 niveaux
Q3.3 : Tension de sortie V_s

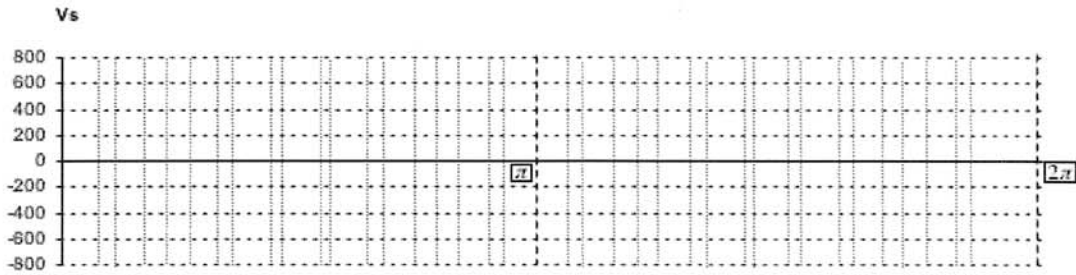
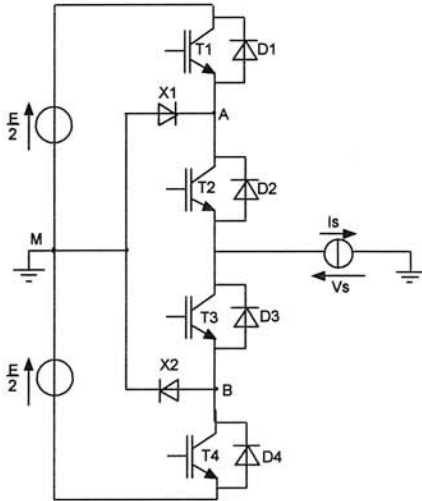


Tableau 1
« Récapitulatif des séquences de fonctionnement »
(question Q3.4)

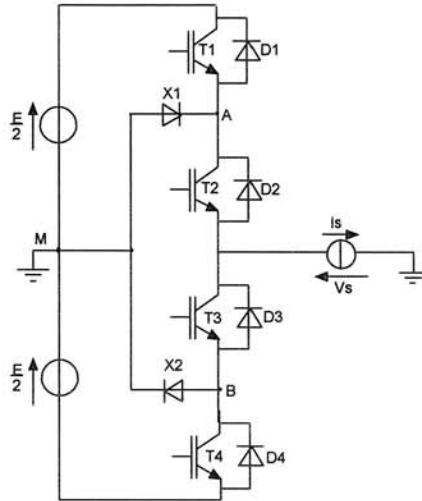
Sens du courant	S1	S2	S3	S4	V_s	Le courant circule à travers...	Durant l'intervalle (ou les intervalles) ...
$I_s > 0$	0	0	1	1			
$I_s > 0$	0	1	1	0			
$I_s > 0$	1	0	0	1			
$I_s > 0$	1	1	0	0			
$I_s < 0$	0	0	1	1			
$I_s < 0$	0	1	1	0			
$I_s < 0$	1	0	0	1			
$I_s < 0$	1	1	0	0			

DR16. Phases de fonctionnement d'une cellule de commutation d'un onduleur NPC 3 niveaux
Q3.4 – Sélection des interrupteurs passants pour les différentes configurations de V_s et I_s .

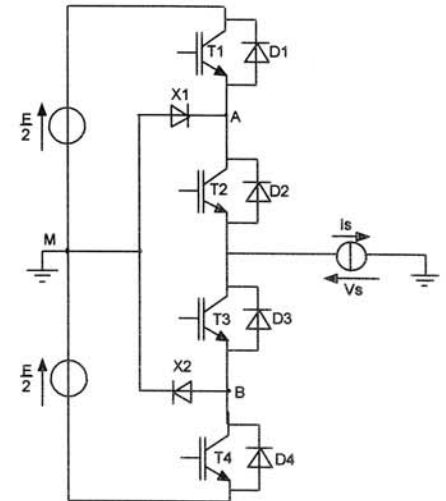
$V_s = E/2$
 $I_s > 0$



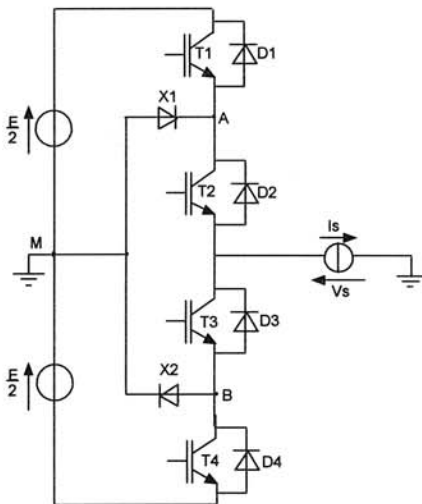
$V_s = 0$
 $I_s > 0$



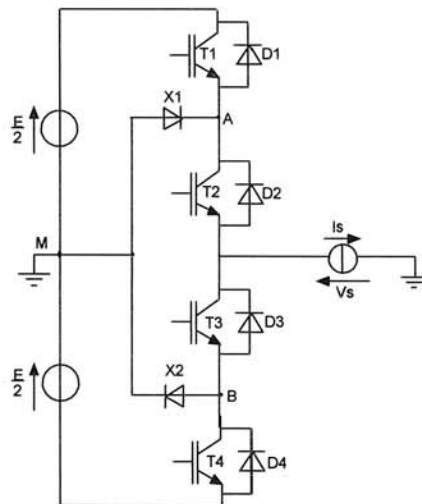
$V_s = -E/2$
 $I_s > 0$



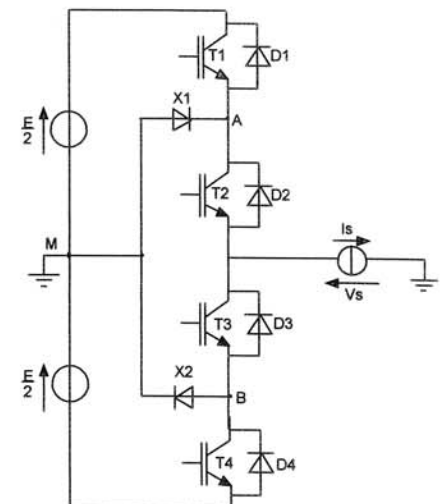
$V_s = E/2$
 $I_s < 0$



$V_s = 0$
 $I_s < 0$



$V_s = -E/2$
 $I_s < 0$



DR17. Tableau récapitulatif du fonctionnement et des pertes d'un onduleur NPC 3 niveaux et d'un onduleur 2 niveaux
Q3.19 –

	ONDULEUR MLI 2 niveaux	ONDULEUR NPC 3 niveaux
Fréquence de découpage		
Fréquence de découpage moyenne d'un interrupteur		
Tension commutée par l'interrupteur (Vcom)		
Pertes totales par conduction d'une cellule de commutation		
Pertes totales par commutation d'une cellule de commutation		
Pertes totales d'une cellule de commutation		
Rendement au point de fonctionnement nominal		
Nombre d'interrupteurs IGBT d'une cellule de commutation		
Température transistor (°C)		
Température diode (°C)		
Température dissipateur (°C)		

DR18. Onduleur NPC triphasé 3 niveaux
Q3.20 – Q3.21

Tableau 1 : Tension V_{AO} en fonction de E

Ka1, Ka2 commandés	Tension V_{AO}
Ka2, Ka3 commandés	
Ka3, Ka4 commandés	

Tableau 2 : Etats possibles de l'onduleur NPC triphasé 3 niveaux

Etat des bras			V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	V_{NO}
A	B	C				
1	1	1				
1	1	0				
1	1	-1				
1	0	1				
1	0	0				
1	0	-1				
1	-1	1				
1	-1	0				
1	-1	-1				

Etat des bras			V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	V_{NO}
A	B	C				
0	1	1				
0	1	0				
0	1	-1				
0	0	1				
0	0	0				
0	0	-1				
0	-1	1				
0	-1	0				
0	-1	-1				

Etat des bras			V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	V_{NO}
A	B	C				
-1	1	1				
-1	1	0				
-1	1	-1				
-1	0	1				
-1	0	0				
-1	0	-1				
-1	-1	1				
-1	-1	0				
-1	-1	-1				

DR19. Onduleur NPC triphasé 3 niveaux
Q3.22 – Q3.24 – Q3.25

