

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

ÉLECTROTECHNIQUE

SESSION 2015

ÉPREUVE E.4.1

Étude d'un système technique industriel
Pré-étude et modélisation

Durée : 4 heures – Coefficient : 3

Matériel autorisé :

Calculatrice à fonctionnement autonome autorisée conformément à la circulaire
N°99-186 du 16/11/99.

L'usage de tout autre matériel ou document est interdit.

Le sujet comporte 17 pages numérotées de **1/17** à **17/17**.

Les documents réponses (pages 15 et 16) sont à remettre avec la copie.

Il sera tenu compte de la qualité de la rédaction, en particulier pour les réponses
aux questions ne nécessitant pas de calcul.

Le (la) correcteur (trice) attend des phrases construites respectant la syntaxe de la
langue française. Chaque réponse sera clairement précédée du numéro de la
question à laquelle elle se rapporte.

Les notations du texte seront scrupuleusement respectées.

| | | |
|---|------------------------|--------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | SESSION 2015 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation | Repère : 15NC-EQPEN | Page 1/17 |

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Une soufflerie permet de recréer les conditions de vol afin de valider, sur des maquettes à échelle réduite, les résultats de simulation des caractéristiques aérodynamiques de différents avions.



Illustration 1: Maquette de l'airbus A380 dans la chambre d'essai

La soufflerie étudiée produit un flux d'air dont la vitesse est inférieure à celle du son (vitesse dite « subsonique »). La plage de vitesse exploitable, de 0 à $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, correspond aux phases de décollage et d'atterrissage des avions.

L'exploitant de la soufflerie s'engage auprès de ses clients à fournir les conditions d'essais définies par les caractéristiques suivantes :

1. Vitesse du vent réglable entre 0 et Mach 0,36, avec un temps de montée en vitesse de 1 minute.
2. Réglage des conditions d'écoulement (réglage obtenue en faisant varier la pression dans la soufflerie).
3. Les moyens de mesurage : écoulement, déformation ...

| | | |
|---|------------------------|--------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | SESSION 2015 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation | Repère : 15NC-EQPEM | Page 2/17 |

Pour atteindre ces conditions d'essais, la soufflerie est constituée de 4 parties.

1. La chambre ou veine d'essais est la partie où sont testées les maquettes (longueur : 11 m ; largeur 4,5 m et hauteur 3,5 m).
2. Le ventilateur de 16 pales est entraîné par un moteur de 9,5 MW ; la vitesse de l'air dans la veine d'essais est réglée par orientation des pales.
3. Un réservoir de 300 m³ et un groupe de compresseurs, permettent de réguler la pression entre 1 et 3,85 bar à l'intérieur de la soufflerie.
4. Les aéroréfrigérants permettent de réguler la température de l'air à l'intérieur de la soufflerie.

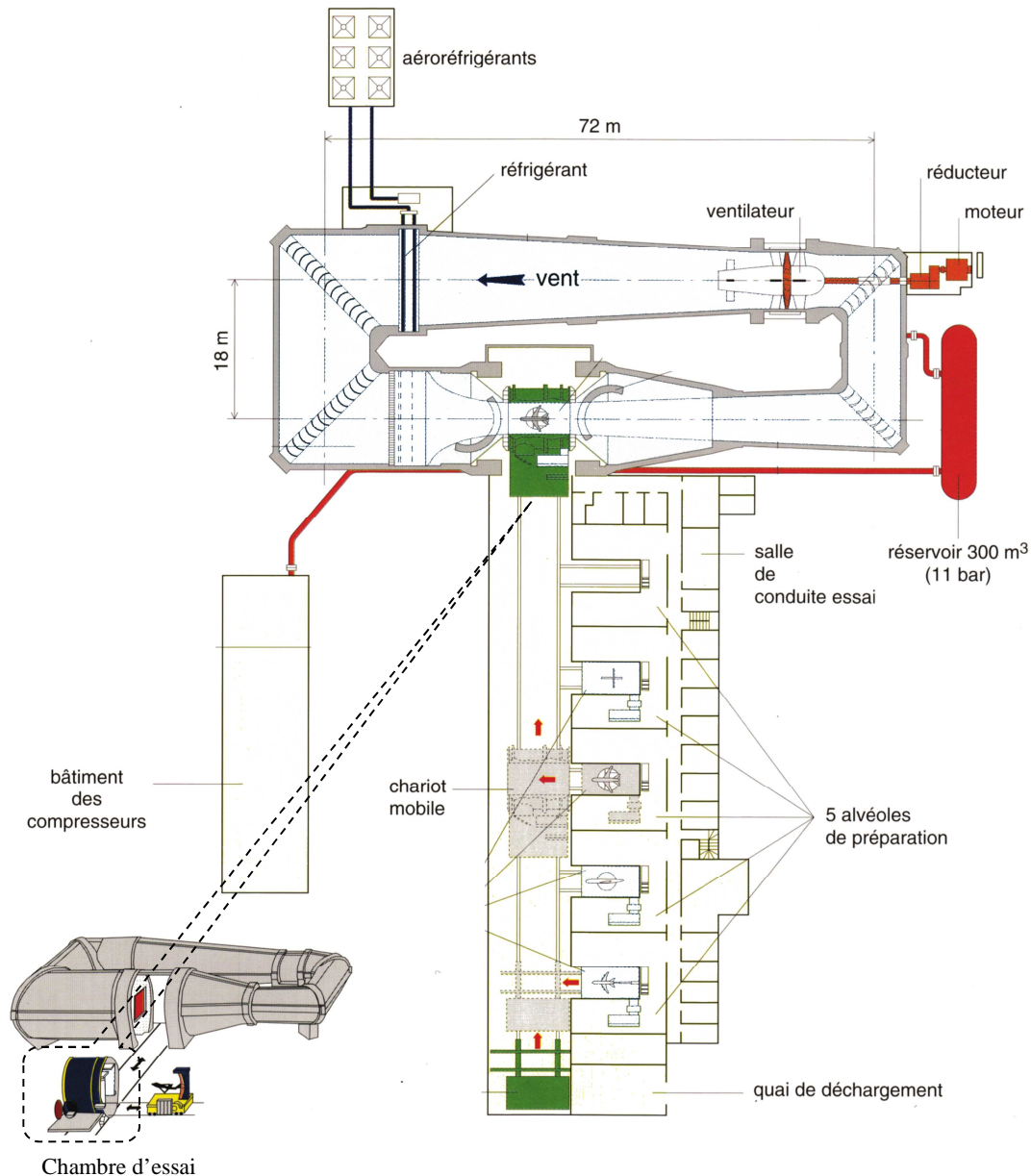


Illustration 2 : Vue générale de la soufflerie

| | | |
|---|------------------------|--------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | SESSION 2015 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation | Repère : 15NC-EQPEM | Page 3/17 |



Illustration 3: Vue de l'intérieur de la soufflerie -- Ventilateur

Enjeu :

Pour maintenir les conditions d'essais proposées à ses clients, l'exploitant doit veiller à maintenir en fonctionnement l'ensemble des composantes de l'installation.

Pour des raisons de maintenance l'exploitant souhaite réaliser une pré-étude pour remettre à niveau les éléments suivants :

- alimentation en énergie du moteur du ventilateur ;
- contraintes sur les compresseurs et régulation de pression.

Dans l'épreuve E41, nous réaliserons une pré étude sur les éléments suivants :

Partie 1 : bilan énergétique de la soufflerie.

Partie 2 : pilotage du ventilateur.

Partie 3 : analyse et amélioration de l'alimentation électrique du moteur du ventilateur durant la phase de démarrage.

Partie 4 : régulation de la pression dans la chambre d'essais.

| | | |
|---|------------------------|--------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | SESSION 2015 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation | Repère : 15NC-EQPEM | Page 4/17 |

Partie 1 : bilan énergétique de la soufflerie

On se propose d'étudier la puissance aéroulrique nécessaire pour obtenir les conditions de vent souhaitées dans la chambre d'essais. On validera le rendement énergétique du tunnel et la puissance du moto ventilateur installé.

Pour améliorer l'efficacité énergétique on utilise un tunnel fermé. L'air est canalisé et réinjecté dans le ventilateur selon le schéma suivant :

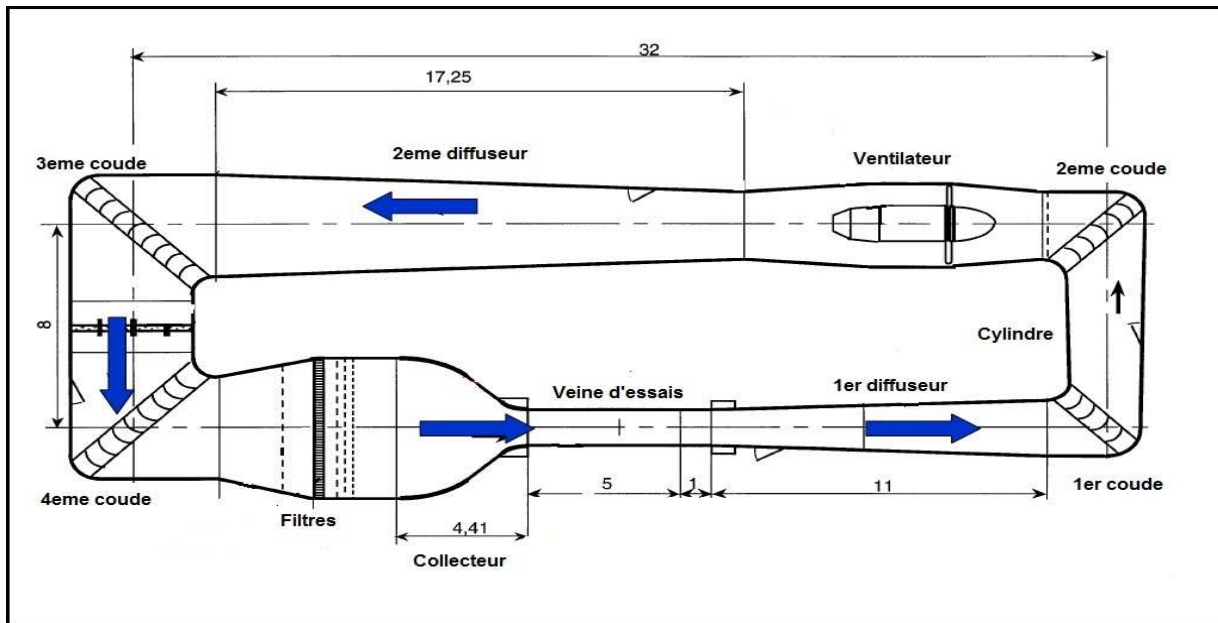


Illustration 4: Profil du tunnel

Des filtres et des éléments de canalisation permettent d'obtenir au niveau des maquettes un écoulement le plus laminaire possible et dépourvu de poussières dangereuses.

Ces éléments et le frottement de l'air sur les parois engendrent des pertes de charge qui devront en régime permanent être compensées par le ventilateur.

Q1.1 Donner, pour un fluide incompressible, la relation liant le débit volumique Q à la vitesse du fluide v , et à la section du conduit S . On donnera les unités légales de chaque grandeur.

Q1.2 On rappelle que la veine d'essais est de section rectangulaire de hauteur 3,5 m et de largeur 4,5 m.

La vitesse du vent maximale que l'on souhaite obtenir est Mach 0,36. On rappelle que :

$$N_{mach} = \frac{V}{V_{son}} \text{ avec } V_{son} = 340 \text{ m.s}^{-1}.$$

Déterminer la valeur du débit maximum Q_{max} dans le ventilateur.

| | | |
|---|------------------------|--------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | SESSION 2015 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation | Repère : 15NC-EQPEM | Page 5/17 |

Q1.3 La puissance aéraulique $P_{\text{aérau}}$ fournie par le ventilateur durant la phase de montée en vitesse est :

$$P_{\text{aérau}} = \frac{\rho_o \cdot V^2}{2} \cdot Q$$

avec ρ_o masse volumique de l'air : $1,293 \text{ kg.m}^{-3}$

Montrer que $P_{\text{aérau}} = 18,7 \text{ MW}$.

Q1.4 Le tunnel étant fermé (voir illustration 4), le ventilateur ne devra fournir **en régime permanent** que les pertes de charge pour maintenir les conditions d'essai à vitesse maximale.

Une série de mesures, réalisée lors de l'essai de montée en vitesse, a permis de relever les pertes relatives en différents points du tunnel.

| ÉLÉMENTS | PERTES RELATIVES |
|----------------|------------------|
| Collecteur | 0,0048 |
| Veine | 0,0093 |
| 1er diffuseur | 0,0391 |
| 1er coude | 0,046 |
| Cylindre | 0,0026 |
| 2eme coude | 0,046 |
| Cylindre | 0,002 |
| 2eme diffuseur | 0,016 |
| 3eme coude | 0,0087 |
| 4eme coude | 0,0087 |
| Cylindre | 0,0002 |
| TOTAL | 0,1834 |

Les pertes relatives correspondent aux rapports des pertes mesurées sur la puissance $P_{\text{aérau}}$ développée lors de la montée en vitesse.

Montrer que la puissance aéraulique fournie par le ventilateur en régime permanent est $P_V = 3,43 \text{ MW}$.

Q1.5 Quelle grandeur physique sera modifiée par cette perte d'énergie dans le tunnel. Quelle solution a été mise en œuvre afin de maintenir des conditions de mesure optimale ?

Q1.6 L'illustration 4 permet d'observer que le profil du tunnel n'est pas uniforme. La section est minimum au niveau de la veine d'essais. Justifier, en utilisant une argumentation scientifique, l'intérêt de ce profil.

Partie 2 : pilotage du ventilateur

On désire étudier l'influence de quelques paramètres de pilotage de la soufflerie :

- l'angle de calage des pales du ventilateur ;
- la consigne pression pour régler les caractéristiques de l'écoulement définies par le nombre de Reynolds Re .

Q2.1 On rappelle les conditions en régime établi dans la chambre d'essais :

Section $S = 15,75 \text{ m}^2$.

Vitesse du vent $V_{max} = 122,4 \text{ m.s}^{-1}$.

Débit volumique $Q_{max} = 1928 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Puissance aéraulique $P_V = 3,43 \text{ MW}$.

On donne la relation entre la puissance aéraulique délivrée par le ventilateur, son débit d'air et l'écart de pression entre l'amont et l'aval des pales (identifié aux pertes de charge dans le tunnel).

$$P_V = \Delta p \cdot Q_{max}$$

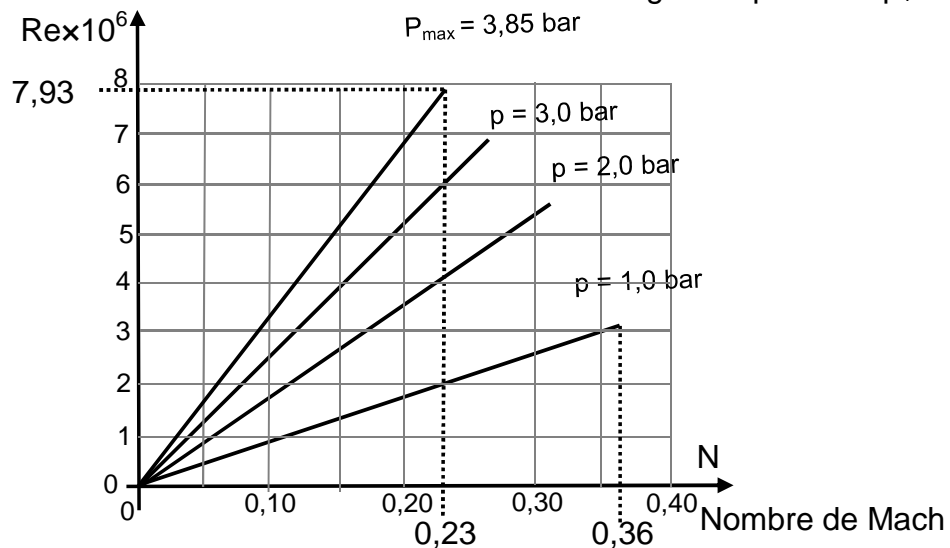
Compléter le document réponse N° 1 (page 15) en donnant le point de fonctionnement correspondant à cet essai réalisé pour une vitesse de rotation du ventilateur de 360 tr.min^{-1} . En déduire l'angle α_{max} de calage des pales.

Q2.2 Un client désire mener un essai spécifique dans des conditions d'écoulement telles que :

$Re = 6 \cdot 10^6$ (nombre de Reynolds)

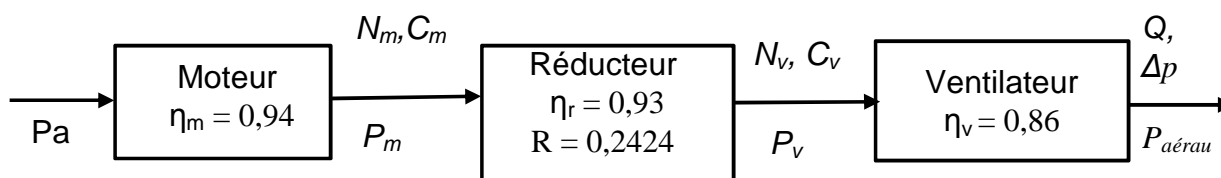
$V_1 = 0,23 \text{ Mach} = 79 \text{ m.s}^{-1}$

a) Déduire des courbes ci-dessous la valeur de la consigne de pression p_1 .



- b) Déterminer pour cet essai le débit volumique Q_1 .
- c) Compléter le document réponse N° 1 en donnant le point de fonctionnement correspondant à cet essai. En déduire l'angle α_1 de calage des pales à programmer.

Q2.3 *Un autre essai a été réalisé avec un angle de calage des pales $\alpha_2 = 20^\circ$ et une pression $p_2 = 1,6$ bar. La vitesse de rotation du ventilateur est de 360 tr.min^{-1} . La chaîne d'énergie du système est indiquée ci-dessous :*



Les vitesses de rotation sont exprimées en tr.min^{-1} , les puissances en W , les moments de couple en $N \cdot m$, le débit Q_v en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, l'écart de pression Δp en Pa .

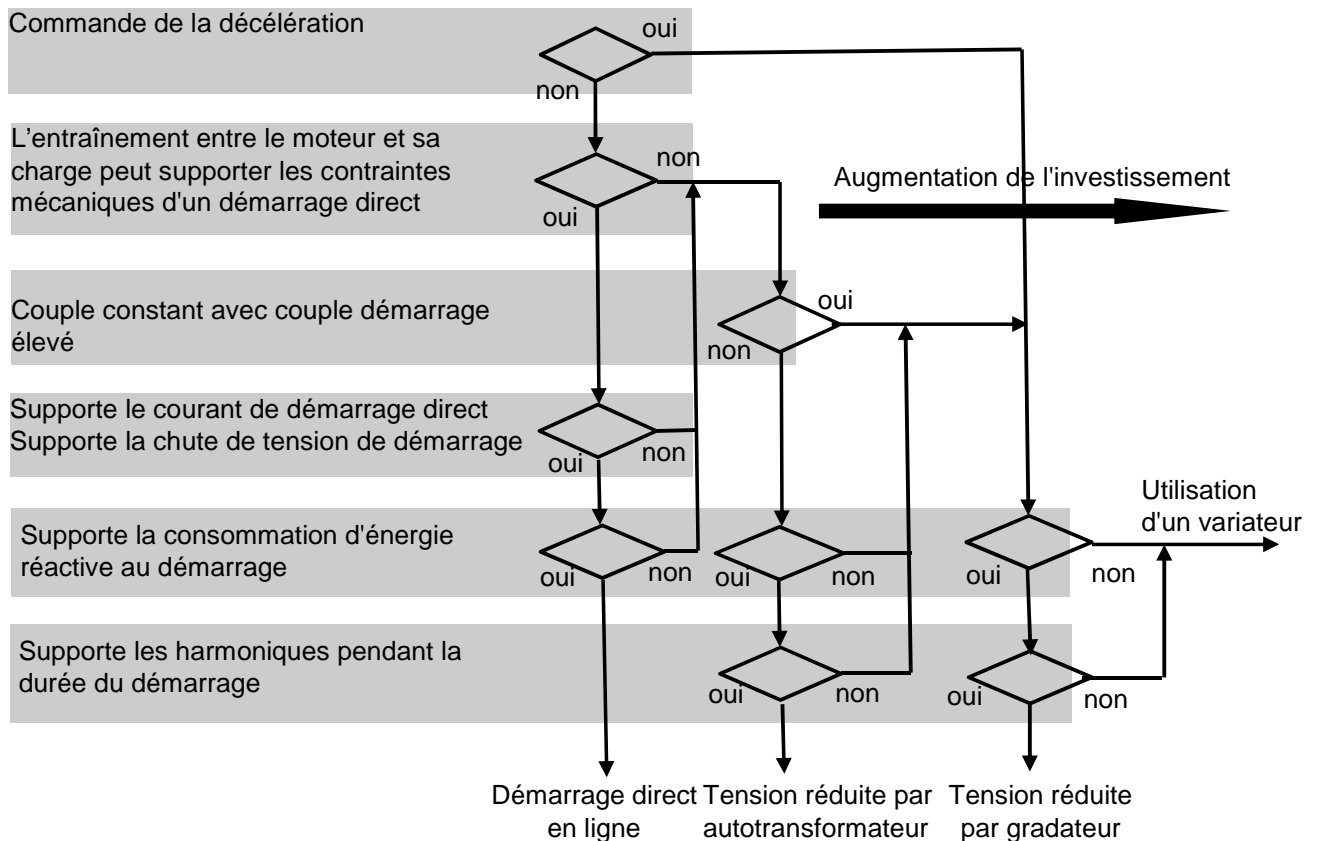
- a) Déterminer la puissance électrique P_a absorbée par le moteur.
- b) Déterminer les paramètres en couple et en vitesse en entrée et en sortie du réducteur.

Partie 3 : analyse et amélioration de l'alimentation électrique du moteur du ventilateur durant la phase de démarrage

Les caractéristiques et les résultats des essais réalisés sur le moteur et le transformateur sont donnés en annexe (page 17). Pour chaque question, il sera nécessaire d'en extraire les informations utiles.

L'ensemble moteur-réducteur associé au transformateur d'alimentation est soumis à d'importantes contraintes lors des phases de démarrage. Les puissances mises en jeu sont importantes. Nous allons les analyser et justifier le choix du mode de démarrage par le constructeur.

Organigramme d'aide au choix du mode de démarrage



Q3.1 Au vu de ce document citer les modes de démarrage possibles d'un moteur asynchrone.

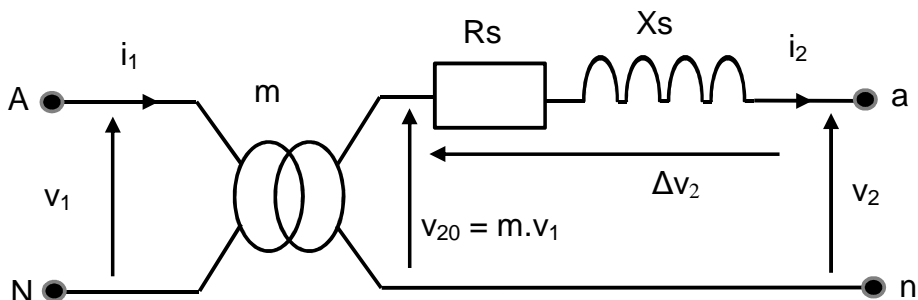
Q3.2 Un mode de démarrage direct en ligne a été choisi. Lister toutes les contraintes que devront respecter les matériels mis en œuvre dans la solution.

Contrainte sur la chute de tension au démarrage.

On se propose d'évaluer la chute de tension au moment du démarrage. Elle est due principalement au transformateur, les longueurs des câbles d'alimentation étant réduites.

Q3.3 Renseigner le document réponse N° 2 (page 16) en précisant le groupe de couplage du transformateur et en complétant le schéma de couplage des bornes des enroulements.

Q3.4 Le schéma électrique équivalent par phase adopté pour le transformateur est le suivant :



Déterminer la valeur du rapport de transformation m à partir de la valeur de M relevée dans les annexes sur la prise 9. On donnera le résultat avec trois chiffres significatifs.

Q3.5 Compléter, sur le document réponse N°2, le schéma de câblage (on fera figurer les appareils de mesure) et les éléments du protocole expérimental permettant de réaliser l'essai en court-circuit (mesures données en annexe page 17 pour la prise 9).

Q3.6 Déduire des résultats de cet essai que $R_S = 21,3 \text{ m}\Omega$ et $X_S = 0,276 \Omega$. Justifier les calculs.

Q3.7 L'expression de la chute de tension simple (en valeur efficace) s'écrit :

$$\Delta V_2 = V_{20} - V_2 = R_S I_2 \cos \varphi + X_S I_2 \sin \varphi,$$

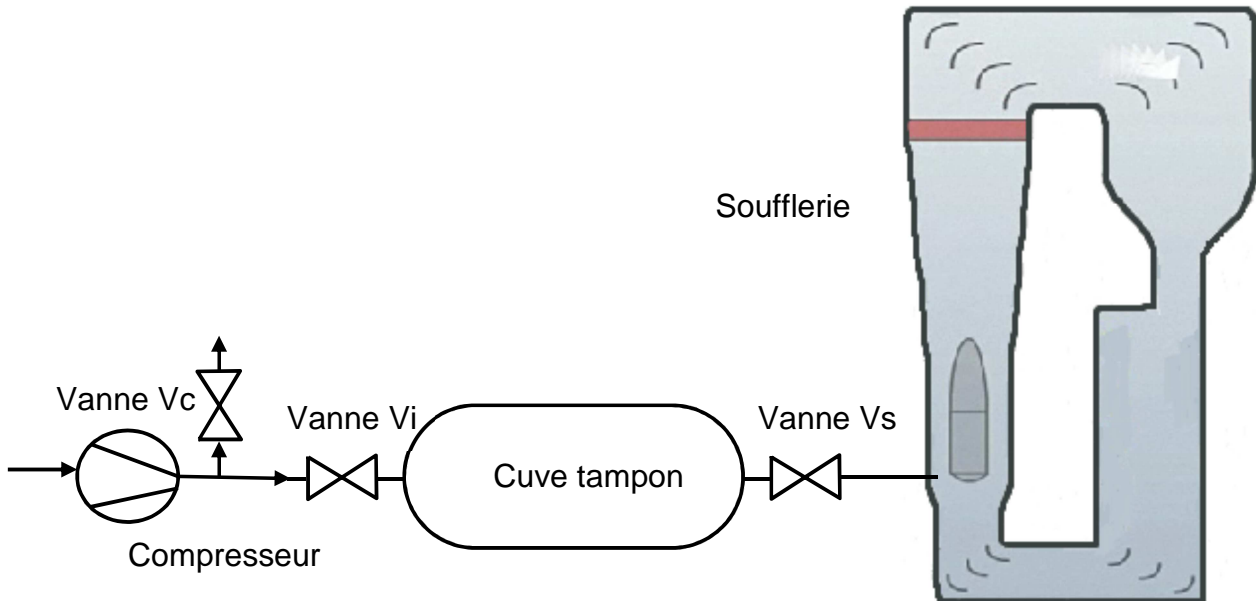
Indiquer la valeur maximale I_{dmax} du courant de ligne au moment du démarrage supportée par le moteur.

Donner en pourcentage la valeur maximale de la chute de tension entre phase ΔU_2 au moment du démarrage pour un $\cos \varphi = 0,5$ et $I_2 = I_{dmax}$.

Q3.8 Le choix du démarrage direct paraît-il cohérent ?

Partie 4 : régulation de la pression dans la chambre d'essai

La soufflerie peut être mise en pression jusqu'à une valeur de 3,6 bar. À cette pression, le bâti réalisé en béton présente d'importantes fuites d'air. Il est donc nécessaire d'assurer une régulation de pression à l'aide du dispositif présenté ci-dessous :



Alimentation de la cuve tampon

Pour le point nominal de fonctionnement du tunnel à $p = 3,6$ bar, nous avons les valeurs de régulation suivantes :

- Le débit massique de fuite sur l'ensemble du tunnel est supposé constant et égal à $3,2 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.
- La pression dans la cuve tampon est $p_{\text{cuve}} = 11$ bar.
- Le débit massique, fourni par le compresseur au niveau de la vanne Vi lorsqu'il est à 100% de sa puissance, est $Q_i = 6 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.
- La puissance électrique consommée par le compresseur (100 % de sa puissance) est $P_a = 1 \text{ MW}$.

On suppose le débit de sortie au niveau de la vanne Vs constant : $Q_s = 3,2 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

La variation de pression Δp dans la cuve tampon obéit à la relation suivante :

$$\frac{(\Delta p)}{(\Delta t)} = K(Q_i - Q_s) \quad \text{avec} \quad K = \frac{R \cdot T}{M \cdot V} \quad \text{où } T \text{ est en kelvin et } M \text{ en } \text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ constante des gaz parfaits

$T = 20^\circ\text{C}$ température supposée constante (rappel $0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$)

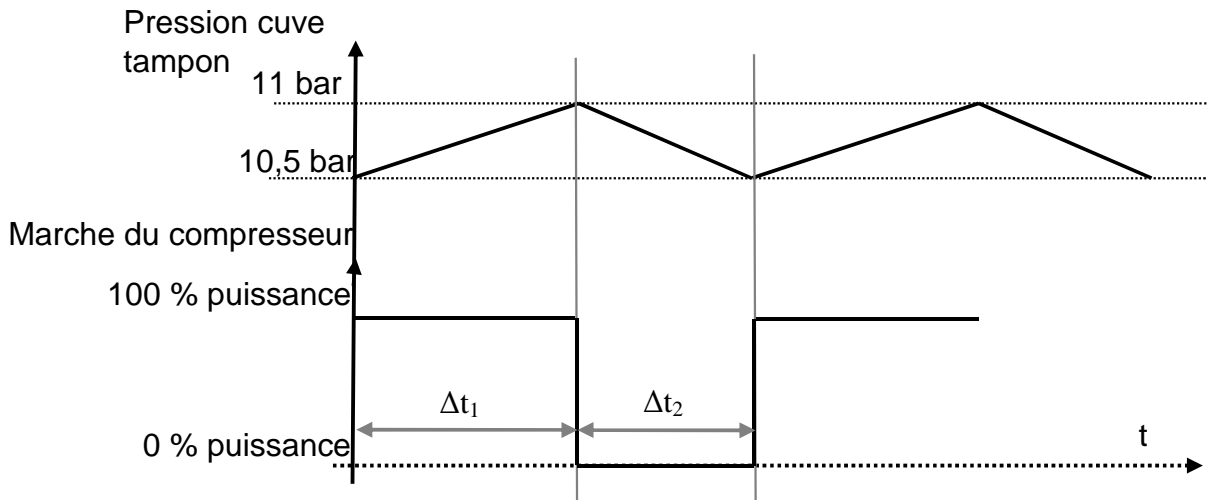
$M = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

$V = 300 \text{ m}^3$, volume de la cuve tampon

Q4.1 Calculer la constante K en unité du système international.

| | | |
|---|------------------------|--------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | SESSION 2015 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation | Repère : 15NC-EQPEM | Page 11/17 |

Le mode de fonctionnement du compresseur obéit à la séquence suivante (mode « marche/arrêt »)



Q4.2 Détermination de la fréquence de la séquence « Démarrage/Arrêt » du compresseur

- Calculer la durée Δt_2 durant laquelle la pression p_{cuve} passe de 11 bar à 10,5 bar du fait du débit de fuite, lorsque le compresseur est arrêté (0 % de sa puissance).
- Calculer la durée Δt_1 nécessaire pour que la pression repasse de 10,5 à 11 bar lorsque le compresseur est à 100 % de sa puissance, le débit de fuite étant supposé constant.
- Vérifier que cette séquence se reproduit 30 fois par heure

Q4.3 En exploitant les résultats de la question Q4.2, calculer en kW la puissance moyenne fournie par le réseau électrique au compresseur. En déduire la valeur de l'énergie électrique consommée E_a en kW.h pour un essai d'une durée de 6h.

Q4.4 Afin de diminuer le nombre de démarrage du compresseur, on adopte une régulation en mode « pleine charge/marche à vide ». Au lieu de couper l'alimentation du compresseur, il reste en fonctionnement mais marche à vide. Pour cela on ferme la vanne V_i et on ouvre la vanne V_c pour renvoyer le débit à la pression atmosphérique. Le compresseur ne consomme alors que 30 % de sa puissance.

Reprendre la question précédente et montrer que le surplus de consommation sera de 840 kW.h.

Q4.5 En observant la relation donnant l'expression de la constante K , proposer une solution qui permettra de diviser par deux le nombre de démarrage du compresseur en mode « marche/arrêt ».

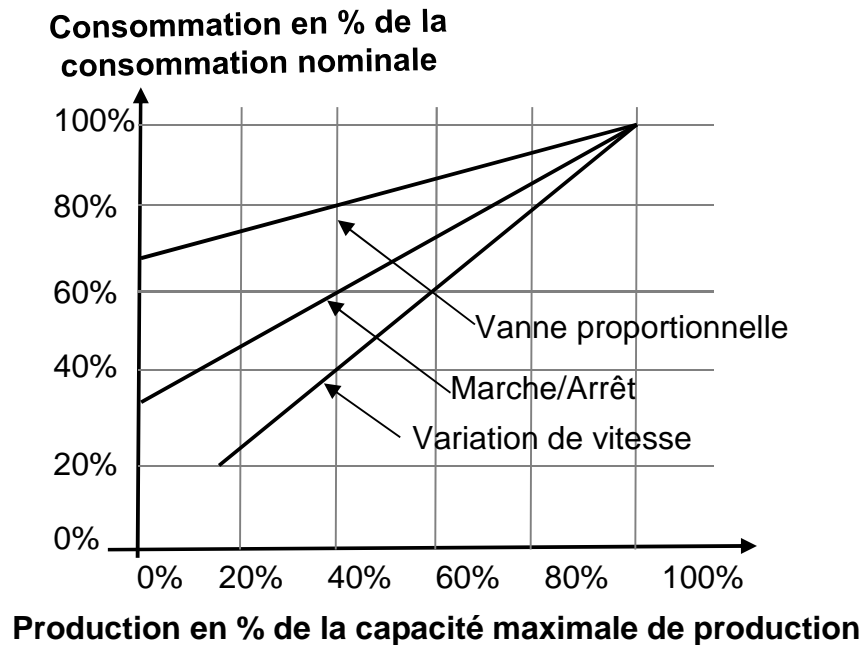
| | | |
|---|------------------------|--------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | SESSION 2015 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation | Repère : 15NC-EQPEM | Page 12/17 |

Étude de la régulation dans la cuve tampon

Q4.6 Les essais effectués amènent à une variation de pression dans la veine allant de 1 bar (la pression atmosphérique) à 4 bar. Ainsi le débit Q_S correspondant aux fuites d'air varie.

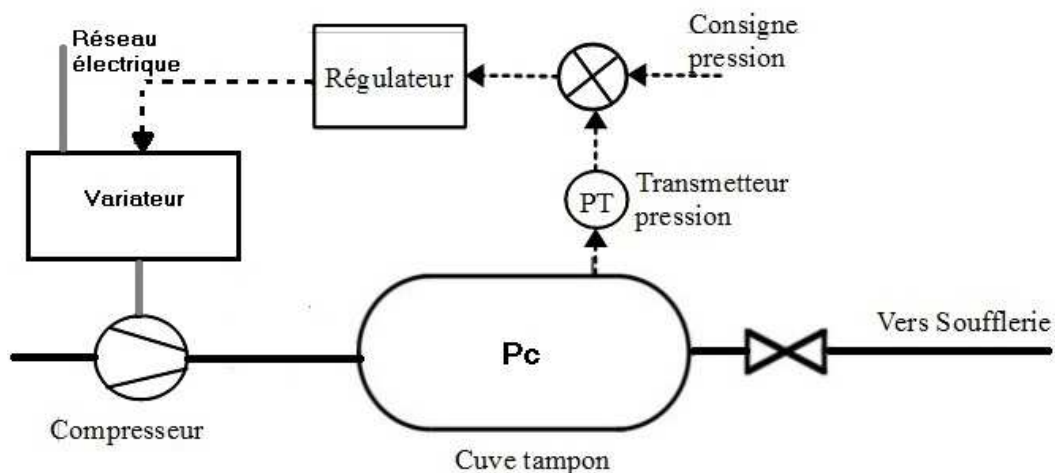
Le compresseur marche alors en mode charge partielle. Pour ce faire, deux autres types de régulation sont utilisés :

- le compresseur est entraîné à vitesse variable,
- le débit est régulé par une vanne proportionnelle. Le constructeur donne les caractéristiques suivantes :

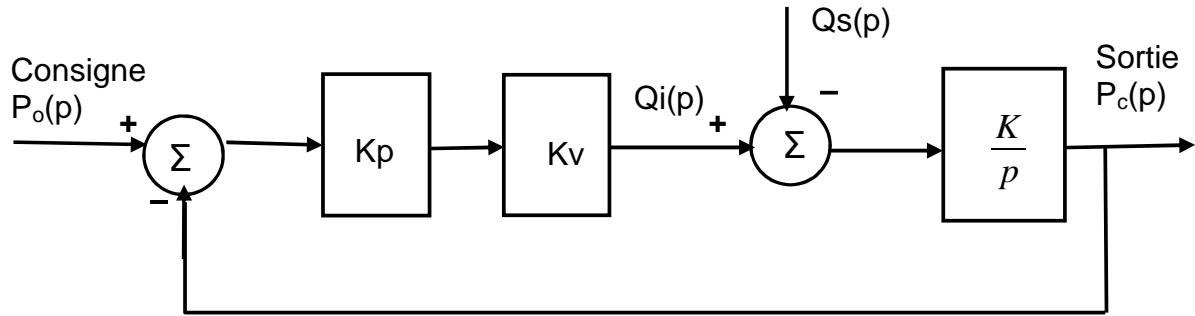


Justifier le meilleur choix d'un point de vue énergétique.

Q4.7 La régulation de pression est réalisée au niveau de la cuve tampon. Elle est effectuée grâce à des variateurs de vitesse selon le synoptique suivant :



Une modélisation simplifiée de la boucle donne le schéma fonctionnel suivant :



p est la variable de Laplace

$P_c(p)$ est la valeur réelle de la pression dans la cuve, $P_o(p)$ la consigne en pression.

a) Lorsque $Q_s(p) = 0 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, démontrer la relation

$$T_{BF}(p) = \frac{P_c(p)}{P_o(p)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{(K \cdot K_p \cdot K_v)}\right)}$$

$T_{BF}(p)$ transmittance en boucle fermée

On donne $K = 280 \text{ uSI}$, $K_v = 2 \cdot 10^{-3} \text{ uSI}$, $K_p = 10^{-3} \text{ uSI}$.

b) Quelle est la valeur du gain statique de $T_{BF}(p)$? Donner l'expression de la constante de temps. Calculer sa valeur.

On rappelle que la transmittance d'un système du premier ordre se met sous la forme :

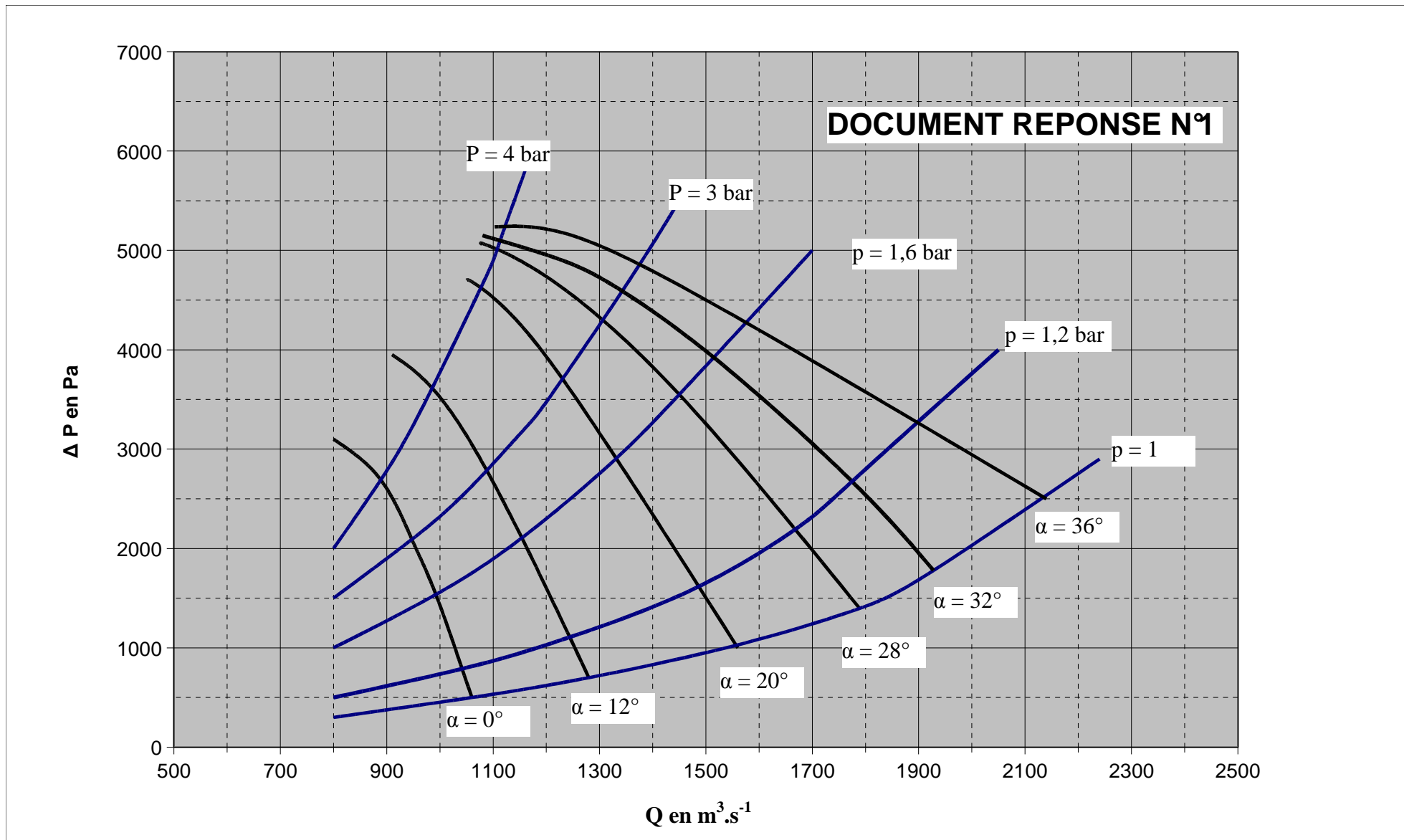
$$T(p) = \frac{K}{1 + T \cdot p}$$

Avec K gain statique du système et T constante de temps du système

c) La consigne passe à un instant t_0 de 5 à 11 bar. Esquisser sur la copie l'évolution de $p_o(t)$ et $p_c(t)$ en précisant la valeur finale de $p_c(t)$. Calculer le temps nécessaire pour une montée en pression à 95% de la variation de $p_c(t)$.

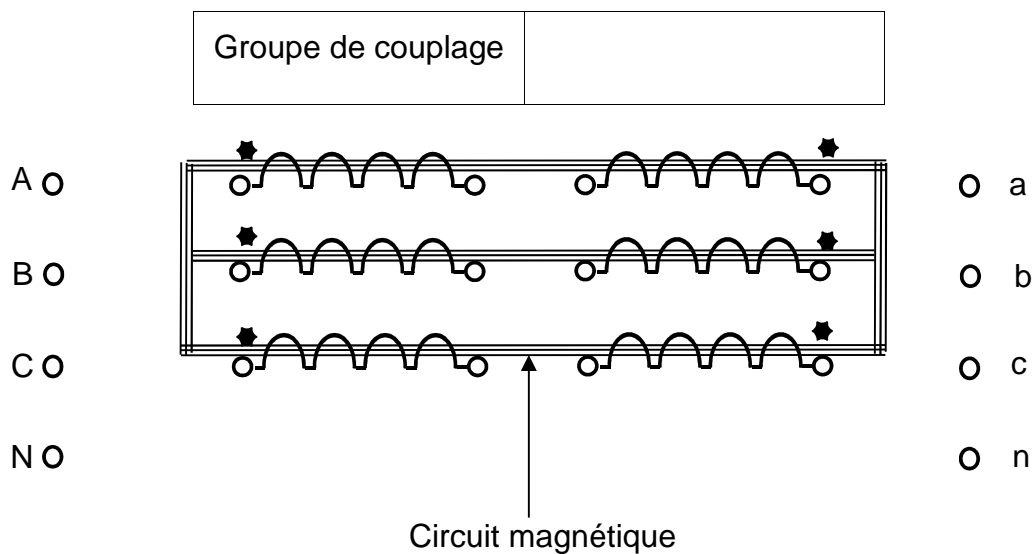
| | | |
|---|------------------------|--------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | SESSION 2015 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation | Repère : 15NC-EQPEM | Page 14/17 |

Caractéristiques mécaniques du ventilateur en fonction de l'angle α de calage des pales
 Courbes de pertes de charge en fonction de la pression p dans le tunnel.
 Vitesse de rotation 360 tr.min⁻¹

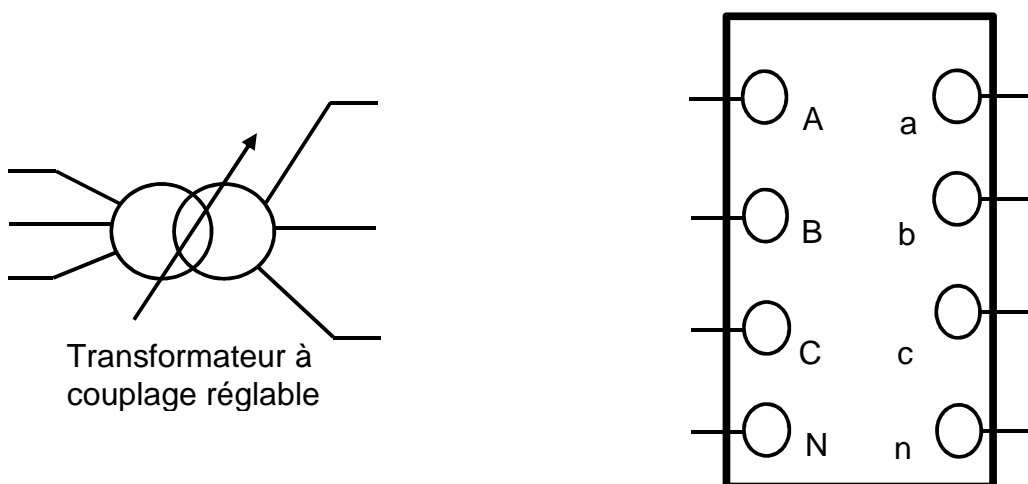


DOCUMENT REPONSE N°2

Question Q3.3



Question Q3.5



| | |
|---|-------------|
| | À compléter |
| L'opérateur va agir sur | |
| Grandeur à contrôler | |
| Valeur de cette grandeur au point de mesure | |
| Grandeurs à mesurer | |

ANNEXES

FICHE TECHNIQUE MACHINE ASYNCHRONE

| | | | |
|----------------------|------------|------------------------------------|-------------------------|
| Puissance nominale | 9500 kW | Échauffement | 80°C |
| Tension nominale | 5500 V | Température ambiante max | 40°C |
| Courant nominal (In) | 1110 A | Mode de refroidissement | auto |
| Facteur de puissance | 0,93 | Couple de démarrage/couple nominal | 0,5 |
| Fréquence nominale | 50 Hz | Courant de démarrage/In | 4,5 |
| Vitesse nominale | 1500 tr/mn | Temps de mise en vitesse | 15 s |
| Survitesse | 1800 tr/mn | MD ² moteur | 3500 kg.m ² |
| Nombre de phases | 3 | MD ² entraîné | 10000 kg.m ² |
| Couplage | ETOILE | | |

ALHSTHOM – SAVOISIENNE

PROCÈS VERBAL des ESSAIS du TRANSFORMATEUR N°H2783 0

3 PHASES TYPE EXTÉRIEUR

Groupe YNyn0

Puissance 12 000 kVA

| | Tensions à vide entre phases | Intensité | Pertes fer | Pertes cuivre | Tension de court circuit |
|------------|------------------------------|-----------|------------|---------------|--------------------------|
| Primaire | 63 000 V | 110 A | 15,16 kW | 87,53 kW | |
| Secondaire | 5900 V | 1175 A | | | |

ESSAIS de MARCHE à VIDE

| Prises | Rapport de transformation (U_1 / U_{20}) | Puissance mesurée |
|--------|--|-------------------|
| 1 | M =11,93 | 15,17 kW |
| 2 | M =11,76 | |
| 3 | M =11,60 | |
| 4 | M =11,44 | |
| 5 | M =11,27 | |
| 6 | M =10,13 | |
| 7 | M =10,96 | |
| 8 | M =10,80 | |
| 9 | M =10,64 | |

ESSAIS de COURT CIRCUIT

| Prises | Tension entre phases primaire | Courant de ligne secondaire | Puissance mesurée au primaire |
|--------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 | 7006 V | 1170 A | 84,85 kW |
| 9 | 5963 V | 1170 A | 87,53 kW |

| | | |
|---|------------------------|--------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | SESSION 2015 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation | Repère : 15NC-EQPEM | Page 17/17 |