

## PARTIE A : Etude de la distribution de l'usine Chamtor

Suite à l'installation d'une entreprise de transformation de la betterave en bio-éthanol à côté de l'entreprise Chamtor, EDF a été obligé de modifier le maillage de son réseau afin de pouvoir fournir l'énergie nécessaire à cette nouvelle usine alimentée comme Chamtor par le poste de Bazancourt. En conséquence la puissance de court circuit du réseau amont a été augmentée à 200MVA. Nous allons vérifier que l'installation actuelle assure toujours ces différentes fonctions. Cette installation datant par ailleurs de la création de l'usine, le directeur technique envisage son remplacement par des cellules plus modernes. Le schéma actuel de la distribution de l'usine Chamtor est fourni **DR1**.

### Analyse système

**QA1** : En vous appuyant sur la description du procédé industriel mis en œuvre dans l'usine Chamtor, proposer l'actigramme de niveau A-0 de l'usine. Vous veillerez particulièrement à identifier les flux de matière entrante et sortante.

### Analyse du schéma de distribution

**QA2** : La norme en vigueur en France UTE C 18-510 définit cinq niveaux de tension alternative, HTA, HTB, BTA, BTB et TBT. Rappelez les valeurs de ces différentes plages de tension.

**QA3** : Quelle est la structure de raccordement du poste de livraison de l'usine ? Quels sont les avantages et les inconvénients de ce type de structure ?

**QA4** : Quel(s) autre(s) type(s) de raccordement(s) aurait-on pu faire ? (proposer un ou des schéma(s) de principe(s)). Quels sont les avantages et les inconvénients de cette autre structure par rapport à la solution existante ? Comment se fait le comptage de l'énergie ?

**QA5** : Quel est le mode d'alimentation du tableau HTA à l'intérieur du site ? Quel est le rôle de l'interrupteur C3 du poste 3 ? Les deux transformateurs T3.1 et T3.2 peuvent-ils fonctionner en parallèle ?

**QA6** : Le document ressource **DR2** correspond à la fiche de consignation avant intervention sur le transformateur T3.1. En vous appuyant sur ce document et sur le document ressource **DR3** de la gamme **FluoKit** et **DR1**, représenter l'état des clés lorsque l'usine est normalement alimentée (document réponse 1)

**QA7** : Compléter la fiche de consignation usine (document réponse 1)

### Etablissement du courant de court-circuit aux bornes de l'alimentation du distributeur :

#### Etude préliminaire :

Nous allons établir ici quelques résultats qui nous seront utiles dans la suite. Le réseau amont d'un court circuit peut se mettre sous la forme du schéma équivalent suivant :

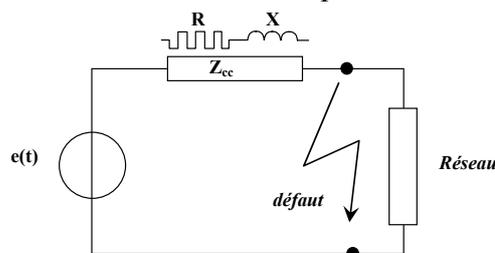


Figure 1

dans lequel  $e(t) = E\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha)$  est une source de tension alternative d'amplitude constante  $E$  et  $Z_{cc}$  l'impédance du court-circuit, égale aux impédances des câbles, des lignes et des transformateurs parcourus par le courant de défaut.  $\alpha$  est appelé angle de déclenchement et définit la phase de la tension à l'instant d'apparition du court-circuit. Enfin on appelle  $\varphi$  le déphasage entre la tension et le courant de défaut en régime établi.

**QA8 :** Exprimer la relation entre  $\varphi$ ,  $R$  et  $X$

**QA9 :** Montrer que l'expression du courant de défaut peut se mettre sous la forme :

$$I_{cc}(t) = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{cc}} \left[ \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{X}\omega t} \right]$$

Cette expression peut se décomposer suivant une composante périodique  $I_a(t)$  et une composante apériodique  $I_c(t)$ . Exprimer  $I_a(t)$  et  $I_c(t)$ . Donner l'allure de cette courbe  $I_{cc}(t)$ .

Une table des transformées usuelles de Laplace est fournie en DR2

**QA10 :** A quelle condition sur  $\varphi$  et  $\alpha$  la composante  $I_c(t)$  est-elle nulle ? Comment s'appelle ce régime de défaut ?

**QA11 :** A quelle condition sur  $\varphi$  et  $\alpha$  la composante apériodique de  $I_c$  est-elle maximale ? Quelle est dans ces conditions la valeur crête  $\hat{I}$  de  $I_{cc}$  ?

**QA12 :** On pose  $\hat{I} = KI_a$ . Exprimer  $K$  en fonction de  $R$  et de  $X$ .

### Détermination des courants de court circuit

L'usine est alimentée par le poste EDF de Bazancourt. Cette liaison de 2221 mètres est réalisée par trois câbles triphasés en aluminium enterrés dans un même fourreau et arrive au Poste Chamtor (document ressource1). Chaque conducteur présente une section de  $240 \text{ mm}^2$ . Le poste Chamtor se situant à l'entrée de l'usine alimente à son tour un poste de répartition HT situé dans l'usine. Cette alimentation que nous appellerons « **ligne usine** » est réalisée à l'aide d'un câble de longueur 300 mètres. De ce poste de répartition partent différents départs qui alimentent tous les ateliers de l'usine. La liaison entre le poste de répartition et le poste N°3 mesure 20 mètres et est réalisée en câble unipolaire posé en nappe. Dans la suite de l'étude nous négligerons les impédances des jeux de barres et des pôles de l'appareillage.

**QA13 :** Rechercher les caractéristiques de l'installation afin de compléter le **document réponse 2**. En vous référant à la documentation FluoKit **DR3**, indiquer la désignation des cellules utilisées.

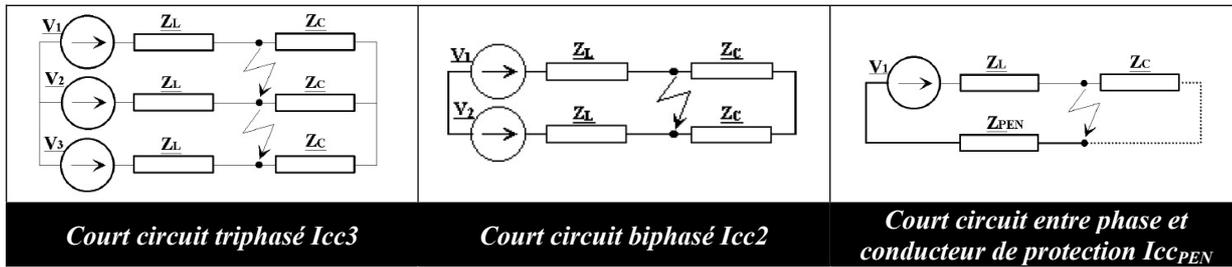
**QA14 :** Déterminer les impédances des différents tronçons de l'installation jusqu'au poste 3. Utiliser pour cela le **document réponse 3**.

Afin de tenir compte de l'influence de la température du matériau pendant le court circuit, la norme UTE C 13-205 retient pour la résistivité  $\rho$  :

- 1,25 fois la résistivité des conducteurs à  $20^\circ\text{C}$  pour le calcul des courants de court circuit maximaux, soit  $0,0225 \Omega\text{mm}^2 / m$  pour le cuivre et  $0,036 \Omega\text{mm}^2 / m$  pour l'aluminium.
- 1,5 fois la résistivité des conducteurs à  $20^\circ\text{C}$  pour le calcul des courants de court circuit minimaux, soit  $0,027 \Omega\text{mm}^2 / m$  pour le cuivre et  $0,043 \Omega\text{mm}^2 / m$  pour l'aluminium.

Pour la réactance des câbles en HTA et HTB, on pourra retenir la valeur  $X=0,1 \Omega / km$  par phase.

**QA15** : Il peut exister différents types de court-circuit.

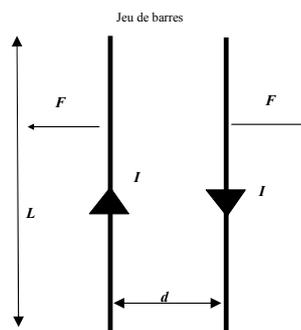


Déterminer les expressions  $I_{cc3}$ ,  $I_{cc2}$ ,  $I_{ccPEN}$  en régime permanent en fonction des  $v_i$  et de  $Z_L$ . Dans quel cas a-t-on la plus grande valeur de courant ?

**QA16** : Calculer le courant de court-circuit maximum  $I_{CCA}$  en régime permanent à la sortie de la cellule S du poste Chamtor. Déterminer la valeur crête de  $\hat{I}_{cca}$  de  $I_{ccA}$ . Les cellules Fluokit peuvent-elle supporter cette nouvelle contrainte ?

**QA17** : Calculer le courant de court-circuit maximum  $I_{CCB}$  en régime permanent dans le jeu de barre du poste 3. Déterminer la valeur crête de  $\hat{I}_{ccb}$  de  $I_{ccB}$ . Le jeu de barres actuellement installé peut-il supporter cette nouvelle contrainte ?

**QA18** : L'une des conséquences de l'augmentation de la valeur crête du courant de court-circuit est l'augmentation des effets électrodynamiques sur le jeu de barres du poste 3. Donner l'expression de l'effort électrodynamique maximal exercé sur un jeu de barres  $F$  en cas de court-circuit en fonction de  $I$ ,  $d$  distance entre les deux barres et  $L$ , longueur du jeu de barre. Préciser si l'effort est attractif ou répulsif. Nous supposons que les barres sont de longueur infinie. Nous négligerons également l'influence de leur forme.



Dans le poste n°3 les barres sont distantes de 10 cm et ont une longueur de 3 mètres. Calculer  $F$ . Déterminer le pourcentage de dépassement de l'effort admissible par rapport au dimensionnement effectif du jeu de barres. Que risque-t-on ? Quelles sont les solutions.

### Extension du poste n°3, Compensation de l'énergie réactive.

Afin d'améliorer les performances de la station de retraitement des eaux, on envisage la mise en place d'une station d'ozonolyse. Cette nouvelle installation nécessite une puissance de 2000kW sous 660V et présente un facteur de puissance de 0,95. Nous allons vérifier qu'il est possible d'alimenter cette station à partir du transformateur T3.1. Les puissances indiquées sur le document DR1 sont les puissances actives.

**QA19 :** *Effectuer un bilan de puissance aux bornes du transformateur T3.1. Le facteur de puissance des compresseurs 1 et 2 de l'évaporateur 4 est de 0,8 ainsi que le facteur de puissance des moteurs 1 et 2 du sécheur 1. Le facteur de puissance du ventilateur de tirage du sécheur de gluten est de 0,85. Est-il possible en l'état de relier directement la station d'ozonolyse au jeu de barres du transformateur T3.1 ?*

**QA20 :** *Déterminer la puissance réactive minimale de la batterie de condensateurs à installer sur le jeu de barres pour que la puissance apparente appelée soit toujours inférieure à la puissance apparente de T3.1.*

**QA21 :** Pour cette question on supposera qu'il est nécessaire d'installer une batterie de condensateurs de puissance réactive totale égale à 436 kVar. Compte tenu des variations importantes du niveau de charge envisagées sur le transformateur T3.1, la compensation de l'énergie réactive est réalisée en gradin avec régulation automatique. *Expliquer le principe de la compensation varométrique. A l'aide des documents ressource DR5, DR6 et DR7 donner :*

- *valeurs, nombre et référence des condensateurs*
- *référence et séquence de gradinage*
- *référence et caractéristiques des contacteurs*

*Proposer un schéma de câblage.*

## Exploitation pédagogique

**QP1 :** On souhaite, dans le cadre des activités **d'essais de systèmes en STS Electrotechnique**, mettre en évidence les notions de **sélectivité et de filiation**. En vous appuyant sur le schéma de distribution de la société Chamtor et des différents systèmes dont vous disposez dans votre établissement, *proposer une ou plusieurs séquences pédagogiques en précisant le ou les support(s) utilisé(s) ainsi que la raison de votre choix et tout le matériel nécessaire à la séquence. Indiquer le déroulement chronologique de cette (ces) séquence(s), les compétences attendues et la forme des éventuelles évaluations.*

## **PARTIE B : Unité de compression de la vapeur**

### **LA COMPRESSION MECANIQUE DE VAPEUR**

La compression mécanique de vapeur (C.M.V) découle du même principe que la pompe à chaleur à compression. Elle permet d'utiliser comme vapeur de chauffage d'un procédé industriel, la vapeur produite dans le même procédé ou un procédé voisin. Cette dernière y est comprimée et donc rendue apte à assurer l'échange thermique par augmentation de sa température de condensation.

Cette technique est florissante depuis que l'électricité est largement disponible et depuis que son prix de vente est proche de celui de l'énergie thermique produite par le fioul ou par le gaz. En effet, l'entraînement du surpresseur ou compresseur est faite même dans une gamme de puissance importante par un moteur électrique.

La fiabilité des compresseurs et de l'alimentation en énergie électrique conduit à un large éventail d'applications existantes qui se regroupent généralement en 3 catégories :

- applications à la concentration de vapeur,
- applications à la distillation,
- applications à la récupération thermique.

Dans l'application qui nous intéresse, il s'agit de récupérer de l'énergie thermique pour aider à la chauffe du produit.

La vapeur d'eau est donc récupérée sous faible pression à partir de l'évaporation de l'énergie thermique évacuée du procédé. Elle est ensuite comprimée pour être de nouveau utilisée comme fluide de chauffage dans le même procédé.

### **CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'UNITE : COMPRESSION MECANIQUE DE VAPEUR**

L'ensemble du groupe compresseur de vapeur, comprend :

- un moteur électrique de type asynchrone pour l'entraînement de l'ensemble,
- un accouplement à dentures entre le moteur et le multiplicateur,
- un multiplicateur de vitesse,
- un accouplement à dentures entre multiplicateur et surpresseur (compresseur),
- un surpresseur de vapeur équipé d'un dispositif de réglage de l'aspiration,
- une centrale d'huile pour la lubrification du multiplicateur et des paliers du moteur.

L'ensemble est monté sur un socle formant la caisse à huile.

La régulation de vitesse et/ou de couple permettant d'adapter le débit de pression peut s'envisager de 2 manières :

- un dispositif mécanique piloté électriquement par un servo-moteur et réglant l'aspiration au moyen de l'orientation des ailettes de la roue du surpresseur.
- un convertisseur statique placé en amont du moteur d'entraînement et permettant le réglage du couple et/ou de la vitesse.

Un dimensionnement du moteur d'entraînement nous fournira les éléments nécessaires à la mise en place de cette régulation. Cette étude nous permettra ensuite de comparer les 2 solutions et de quantifier les économies possibles pour un fonctionnement moyen.

## CARACTERISTIQUES GENERALES DU COMPRESSEUR

Le compresseur retenu pour cette application est de type centrifuge. A la différence des compresseurs volumétriques, ces compresseurs élèvent la pression en communiquant au fluide une certaine vitesse. Les débits peuvent être élevés, par contre, le taux de compression par étage est relativement faible.

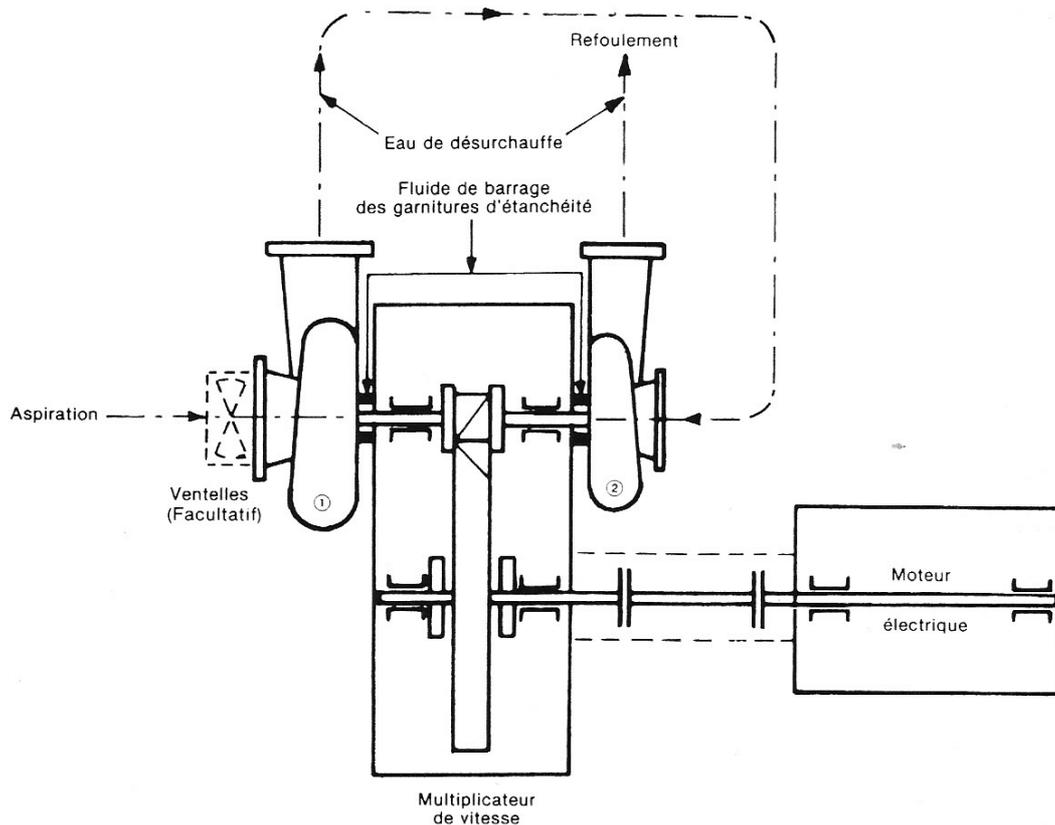


Figure B1 : Compresseur centrifuge à 2 étages

Ces machines peuvent être de 2 catégories :

- les machines apparentées aux ventilateurs, à un ou deux étages de compression, le plus souvent montés sur roulement à billes et tournant à 3000 tr/min. Les élévations de température de vapeur saturée ( $\Delta t_c$ ) par étage sont d'environ 3 à 5°C;
- les machines à un, deux, trois ou quatre étages de compression, avec roue ouverte montée en bout d'arbre d'un multiplicateur de vitesse. Les élévations de température saturée peuvent aller jusqu'à 20°C par étage.

Compte tenu des élévations de température souhaitées dans cette application, c'est la seconde solution qui est retenue. Le rotor tourne donc à grande vitesse dans des paliers à patins oscillants. Cela justifie la présence du circuit de lubrification.

Le rendement mécanique est compris entre 0.92 et 0.98.

La plage des débits aspirés s'étend de 10 000 m<sup>3</sup>/h à 200 000 m<sup>3</sup>/h environ.

Le réglage du débit de vapeur peut-être réalisé par des ventelles orientables placées à l'aspiration de la roue ou des ailettes de calage ajustable placées au refoulement. Dans notre étude, ces ailettes seront placées à l'aspiration.

Pour les grandes aspirations de débit, la vitesse variable peut se révéler rentable si le retard à l'ébullition est faible. La puissance absorbée varie comme le cube de la vitesse.

Le surpresseur étudié ici est de fabrication GEC-Altshom et sa référence est SP67.

Les caractéristiques de fonctionnement sont les suivantes :

<b>Capacités :</b>	
- Débit poids refoulé en kg/h :	22000
<b>Conditions d'aspiration :</b>	
- Pression à la bride du compresseur (bar absolu) :	0,3696
- Température à la bride du compresseur (°C) :	76
<b>Conditions de refoulement :</b>	
- Pression à la bride du compresseur (bar absolu) :	0,6854
- Température à la bride du compresseur (°C) :	150
<b>Caractéristiques mécaniques :</b>	
- Vitesse de rotation (tr/min) :	11158
- Puissance absorbée à l'accouplement compresseur (kW) :	860

Les courbes prévisionnelles de puissances et de pression de ce surpresseur sont fournies dans le document ressource **DR8**.

## **DIMENSIONNEMENT DU MOTEUR ELECTRIQUE D'ENTRAINEMENT**

On se propose dans cette partie de valider le choix du compresseur et de déterminer un ordre de grandeur de la puissance mécanique absorbée.

### **TYPE DE COMPRESSEUR**

**QB1 :** *A partir des valeurs calculées (approximation au 1<sup>er</sup> ordre) du document ressource DR9, établir la relation numérique qui lie la masse volumique de la vapeur d'eau à sa pression.*

**QB2 :** *En déduire la relation qui lie le volume massique de la vapeur d'eau à la pression. Calculer le volume massique de la vapeur d'eau à l'aspiration du compresseur.*

**QB3 :** *A l'aide du document ressource DR10, calculer le débit volumique du compresseur et valider le choix d'un compresseur centrifuge.*

## CALCUL DU COMPRESSEUR

**QB4** : A partir du **documents ressource DR10**, **calculer** le travail massique de compression ou travail isentropique nécessaire.

**QB5** : En supposant un rendement isentropique de 0,75, **calculer** le travail polytrophique et la puissance de compression nécessaire.

**QB6** : Les pertes mécaniques dans le compresseur sont évaluées à 5% de la puissance de compression. **En déduire** la puissance mécanique absorbée par le compresseur.

## CALCUL DU MOTEUR ELECTRIQUE

Le multiplicateur retenu pour cette application est à priori un multiplicateur de fabrication COMELOR de type GV0280. Le rendement du multiplicateur est estimé à 96% .

**QB7** : **Calculer** la puissance utile du moteur

Le moteur retenu pour cet entraînement est un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné. Un ordre de grandeur des principales caractéristiques électriques et mécaniques fournies par la société AEC Energie est :

- Tension nominale et couplage : 5500 V – Etoile
- Fréquence : 50 Hz
- Nombre de pôles : 2
- Vitesse à puissance nominale : 2976 tr/min
- Courant nominal : 135,9 A
- Facteur de puissance : 0.9

**QB8** : En considérant le fonctionnement comme nominal pour le moteur dans le cadre de cette application, **calculer** un ordre de grandeur du rendement et du couple utile du moteur, ainsi que du rapport de multiplication du multiplicateur. **Le moteur actuellement installé est-il convenablement dimensionné ?**

## **ADAPTATION DU DEBIT DU COMPRESSEUR PAR VARIATION DE VITESSE**

On envisage la substitution du dispositif de régulation à ventelles par un dispositif de variation de vitesse du moteur asynchrone d'entraînement.

Le compresseur étudié est équipé d'un système automatique de régulation de débit par **ventelles** à l'aspiration. Ce dispositif surtout employé pour les compresseurs centrifuges modifie la **caractéristique initiale du compresseur ou du circuit de fluide**, en introduisant des pertes en charge additionnelles.

Cette solution provoque cependant une augmentation de la puissance consommée par rapport au besoin réel. Ce dispositif est également utilisé ici pour limiter le phénomène de pompage auquel est soumis le moteur asynchrone.

## COMPARAISON DES REGULATIONS PAR VENTELLES ET VITESSE VARIABLE

### Etude de la régulation par ventelles (voir document ressource DR11)

**QB9 :** On suppose dans un premier temps une caractéristique du circuit de la forme :  $\Delta p = a.Q^2$ . Avec Q en kg/s. A partir des caractéristiques de la charge présentées page 7, calculer le coefficient **a** du circuit et compléter le tableau ci-dessous.

$\Delta p\%$	100	80	60	40
Q en kg/s				

Avec  $\Delta p\% = \frac{\Delta p}{p_e}$  où  $p_e$  est la pression à l'aspiration

**QB10 :** Tracer sur le document réponse n°4, la caractéristique du circuit de fluide correspondant.

**QB11 :** En déduire sur le **même document**, la caractéristique puissance absorbée en kW en fonction du débit. On fera apparaître clairement les points de fonctionnement correspondant aux angles  $\alpha$  de réglage des ventelles : 0, 30, 50 et 70°.

**QB12 :** En considérant que le débit aspiré de 100% ( $Q_{100\%}$ ) est obtenu pour une élévation de pression de 100% et que la puissance absorbée par le compresseur à ce point de fonctionnement est de 10% supérieure au point de fonctionnement estimé pour l'application (860 kW – 22000 kg/h), compléter le tableau ci-dessous :

$\alpha$ en °	0	30	50	70
Q en kg/s				
Q/ $Q_{100\%}$				
P en kW				
P/ $P_{100\%}$				

On précisera la valeur de  $Q_{100\%}$  et celle de  $P_{100\%}$ . P est la puissance absorbée mécaniquement par le compresseur.

**QB13 :** Le rendement du moteur est fixé constant à 93%. Celui du multiplicateur est estimé à 96%. Les conditions d'utilisation du compresseur sont les suivantes :

- Fonctionnement à  $\alpha = 0^\circ$  pendant 50% du temps,
- Fonctionnement à  $\alpha = 30^\circ$  pendant 20% du temps,
- Fonctionnement à  $\alpha = 50^\circ$  pendant 20% du temps,
- Fonctionnement à  $\alpha = 70^\circ$  pendant 10% du temps.

Compléter à partir du tableau précédent, le tableau ci-dessous :

$\alpha$ en °	0	30	50	70
P/ $P_{100\%}$				
durée/durée_totale	50%	20%	20%	10%
Energie consommée par le moteur en %				

**QB14 :** Calculer la moyenne pondérée de P/ $P_{100\%}$ .

**QB15 :** Le compresseur fonctionne sur le rythme précédent 24h par jour sur une année de 365 jours. 5 jours de maintenance sont prévus sur une année. Compte tenu de la puissance du moteur calculée

précédemment, calculer l'énergie moyenne consommée chaque année pour faire tourner ce compresseur.

**QB16 :** Pour un coût moyen de 0.03 centimes d'euro par kWh, hors prime fixe, calculer le prix de la facture en électricité pour faire tourner ce compresseur sur une année.

**Etude de la régulation par variation de vitesse**

On remplace le dispositif précédent par un ensemble moteur-convertisseur de fréquence.

**QB17 :** On suppose toujours une caractéristique du circuit de la forme :  $\Delta p = a.Q^2$ . Compte tenu de l'effet de la vitesse sur le débit et sur la puissance absorbée par le compresseur, compléter le tableau ci-dessous.

$\Delta p$ %	86	100	80	60	40
Q en kg/s	6.11				
N en tr/min	11158				
N en tr/s	186				
P en kW	860				

N est la vitesse de rotation du compresseur et P la puissance absorbée mécaniquement par le compresseur.

**QB18 :** En considérant que le débit aspiré de 100% est obtenu pour une élévation de pression de 100% et que la puissance absorbée par le compresseur à ce point de fonctionnement est de 10% supérieure aux 860 kW nécessaires, compléter le tableau suivant.

$\Delta p$ en %	86	80	60	40
P en kW				
P/P <sub>100%</sub>				

Le rendement du convertisseur est donné par la figure ci-dessous :

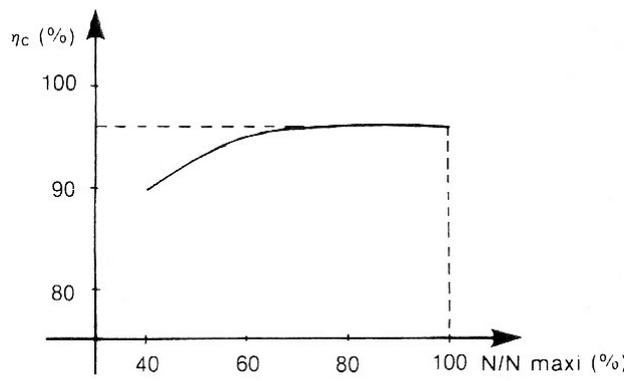


Figure B2 : Evolution du Rendement du convertisseur en fonction de la vitesse de rotation rapportée à la vitesse maximale

**QB19 :** Déterminer graphiquement le rendement du convertisseur.

**QB20 :** Le rendement du moteur est fixé constant à 93%. Celui du multiplicateur est estimé à 96%. Les conditions d'utilisation du compresseur sont les suivantes :

- Fonctionnement à  $\Delta p = 86\%$  pendant 50% du temps,
- Fonctionnement à  $\Delta p = 80\%$  pendant 20% du temps,
- Fonctionnement à  $\Delta p = 60\%$  pendant 20% du temps,
- Fonctionnement à  $\Delta p = 40\%$  pendant 10% du temps.

Compléter à partir du tableau précédent, le tableau ci-dessous :

$\Delta p\%$	86	80	60	40
$P/P_{100\%}$				
durée/durée totale	50%	20%	20%	10%
Energie consommée en %				

**QB21** : Calculer la moyenne pondérée de  $P/P_{100\%}$ .

**QB22** : Le compresseur fonctionne sur le rythme précédent 24h par jour sur une année de 365 jours. 5 jours de maintenance sont prévus sur une année. Compte-tenu de la puissance du moteur calculée précédemment, calculer l'énergie moyenne consommée chaque année pour faire tourner ce compresseur.

**QB23** : Pour un coût moyen de 0.03 centimes d'euro par kWh, hors prime fixe, calculer le prix de la facture en électricité pour faire tourner ce compresseur sur une année.

**QB24** : Calculer le gain en économie d'énergie (kWh/an et euros/an) apporté par la solution avec variation de la vitesse par rapport à la solution à ventelles.

### Exploitation pédagogique

**QP2** : Dans le cadre de l'enseignement du génie électrique en terminale STI génie électrotechnique, on souhaite aborder la **notion de point de fonctionnement d'un ensemble convertisseur électromécanique plus charge**. On s'intéressera plus particulièrement aux charges de type pompes ou ventilateurs. Proposer une ou plusieurs séquences pédagogiques (cours, travaux dirigés ou pratiques) permettant d'atteindre cet objectif. Situer cet apprentissage dans une progression annuelle. Indiquer le déroulement chronologique de cette (ces) séquence(s), les compétences attendues et la forme des éventuelles évaluations.

## Partie C : Protection moteurs RMV

Les unités de compression de vapeur sont entraînées par des moteurs asynchrones triphasés à cage d'une puissance électrique de 1,1 MW et alimentés par un réseau de moyenne tension triphasé de 5500 V sous une fréquence de 50 Hz (RMV3, RMV4 RMV9 et RMVA).

Les moteurs sont directement alimentés par le réseau de moyenne tension et fonctionnent en permanence. Le démarrage des moteurs et la surveillance des grandeurs électriques (courant et tension) sont assurés par un module de communication type Micom P241.

Ce système garantit une protection complète de l'installation grâce à une réalisation programmable et adaptable à différents types d'installations. Ce système est entièrement configurable tant sur les grandeurs électriques que thermiques en régime établi et durant le démarrage des unités de production. Un dialogue est assuré par une liaison série avec le dispositif de télésurveillance de l'usine. Ce système fait partie du dispositif de mesures et de maintenance en informant sur les valeurs instantanées et en renseignant un fichier sur les éventuels défauts permanents ou transitoires relevés pendant le fonctionnement de l'unité.

### Interfaçage du dispositif Micom P241 et le réseau de moyenne tension

Le système possède des entrées et des sorties opto couplées et programmables, il est nécessaire également de fournir au système, une image des courants absorbés par le moteur asynchrone et une image du réseau de tensions triphasées. Concernant l'image des courants, le constructeur propose le schéma électrique classique suivant:

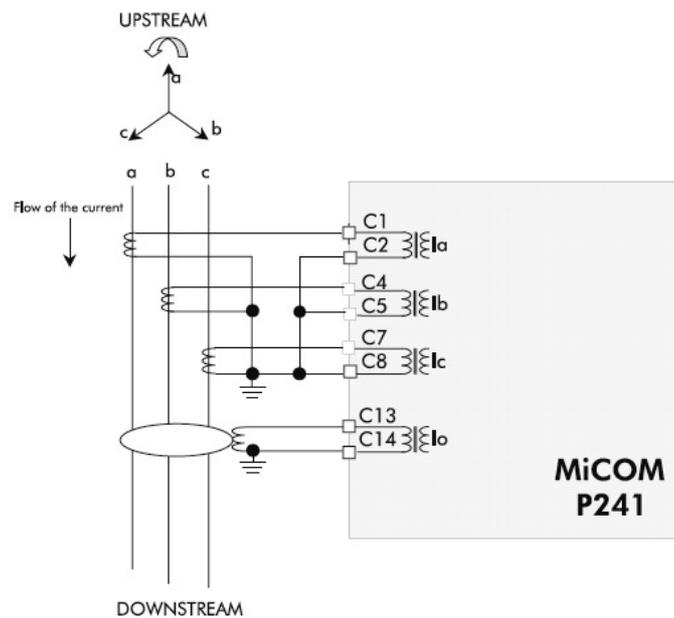


Figure C 1: mesures des courants

**QC1 :** Montrer que la proposition est surabondante et proposer un schéma utilisant moins de transformateurs de courant sans détériorer la sécurité.

QC2 : Pour la mesure des tensions, le constructeur propose le schéma suivant:

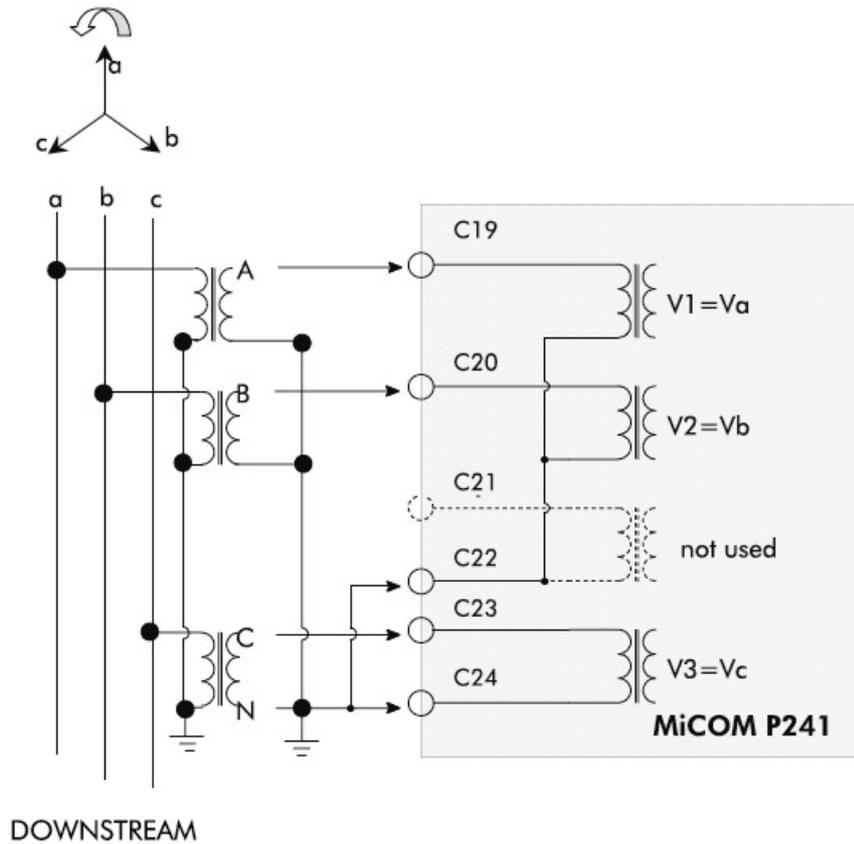


Figure C 2: mesures des tensions

En utilisant le schéma de la **figure C1** et celui de la **figure C2**, comment peut-on calculer la puissance absorbée à partir des grandeurs instantanées dans le cas d'un courant non sinusoïdal.

**QC3 :** Comment peut-on calculer la puissance absorbée à partir des grandeurs instantanées dans le cas d'un courant non sinusoïdal à partir du schéma que vous avez proposé en réponse à la question QC2

**QC4 :** Le transformateur de courant utilisé est réalisé par un bobinage secondaire bobiné sur un tore ferromagnétique et traversé par le câble dont le courant est à mesurer comme indiqué sur la figure 3:

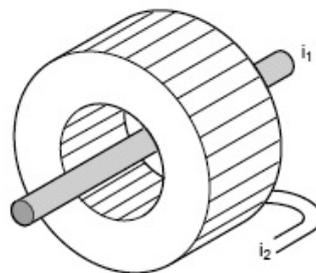


Figure C 3: Transformateur de courant

Soit  $D = 7\text{mm}$  le diamètre du fil de puissance, et  $\phi = 14\text{mm}$  le diamètre intérieur du tore. Le fil de puissance est porté à un potentiel  $V_1 = 3175 * \sqrt{2}\text{ V}$  (on négligera l'épaisseur du fil secondaire).

On supposera que le champ électrique ne dépend que du rayon (symétrie axiale) et est indépendant de la hauteur  $h=50\text{mm}$  de la bobine.

*Calculer la capacité entre le fil de puissance et l'enroulement du secondaire.*

Les bornes de l'enroulement secondaire sont court-circuitées et liées à la masse par une capacité de  $4\text{pF}$ . *Dans ces conditions, calculer le potentiel de l'enroulement secondaire par rapport à la*

*masse. (la permittivité de l'air est  $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$  )*

**QC5 :** Afin d'éviter un amorçage électrique avec l'enroulement secondaire, celui-ci est enveloppé dans une protection isolante d'une épaisseur de  $e = 2 \text{ mm}$  en verre-époxy dont la permittivité relative est  $\epsilon_r = 5$ .

Entre le conducteur de puissance et le diélectrique, le potentiel électrique  $V(x)$  s'écrit sous la forme:

$$v(x) = A_1 * \ln(x) + A_2$$

Entre le diélectrique et la bobine secondaire qui est reliée à la Terre, le potentiel électrique  $V(x)$  s'écrit sous la forme:

$$v(x) = B_1 * \ln(x) + B_2$$

*Expliciter les quatre constantes:  $A_1, A_2, B_1$  et  $B_2$ . Représenter le potentiel entre le câble de puissance et l'enroulement secondaire. Préciser le potentiel à la surface du diélectrique. Représenter le champ électrique et conclure.*

**QC6 :** *A l'aide de ces résultats, expliquer le schéma proposé à la figure C1 et C2.*

**QC7 :** Nous allons comparer les avantages de deux types de capteurs de courant, la bobine de Rogowski et le transformateur de courant:

Sur le schéma de la figure C3, la première solution possède un enroulement secondaire, mais le support n'est pas ferromagnétique et l'enroulement secondaire n'est pas chargé. Dans ces conditions, *exprimer le champ magnétique  $H(x)$  en tous points. Exprimer le flux enlacé par l'enroulement secondaire.* On supposera que les spires  $N_2=40$  de l'enroulement secondaire sont également réparties sur toute la circonférence. Le diamètre intérieur est  $D = 14\text{mm}$ , le diamètre extérieur est  $D_e = 28\text{mm}$  et la hauteur de la bobine est  $h = 50\text{mm}$ .

On rappelle que la perméabilité de l'air  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

**QC8 :** La tension de l'enroulement secondaire dépend de la dérivée du courant primaire:  $e_2 = K \cdot \frac{di_1}{dt}$ .

*Calculer le coefficient  $K$ . Proposer un montage électronique pour obtenir une image du courant primaire telle que  $V_s = \lambda \cdot i_1$ .*

**QC9 :** La deuxième solution est un transformateur de courant représenté également à la figure C3, par contre le support du circuit secondaire est ferromagnétique avec une perméabilité relative  $\mu_r = 100$  et l'enroulement secondaire qui comporte  $N_2 = 40$  spires est chargé par une résistance  $R_s = 400 \cdot 10^{-3} \Omega$ . On supposera que le champ électromagnétique  $H(x) = H_{fer}$  est constant dans le matériau

ferromagnétique, dont le diamètre moyen sera  $\rho = \frac{D_e + D}{2}$ . *Exprimer le champ électromagnétique*

*$H(x)$  en tous points. En déduire l'expression du flux  $\Phi$  dans le circuit ferro-magnétique en fonction des courants primaire, secondaire.*

**QC10 :** Exprimer la relation entre le flux total  $\Phi_t$ , enlacé par le circuit secondaire et le courant primaire, calculer la pulsation de coupure de ce capteur. Exprimer la relation entre les courants primaire et secondaire lorsque la pulsation est grande devant la pulsation de coupure.

**QC11 :** Le courant de démarrage du moteur asynchrone peut être 5 ou 6 fois le courant correspondant au régime nominal. Le transformateur de courant présente un rapport de transformation  $\eta = \frac{1}{40}$ , l'enroulement secondaire est fermé sur une résistance de  $R_s = 400m\Omega$ , et la fonction  $B = f(H)$  du matériau ferromagnétique est représentée à la figure C4:

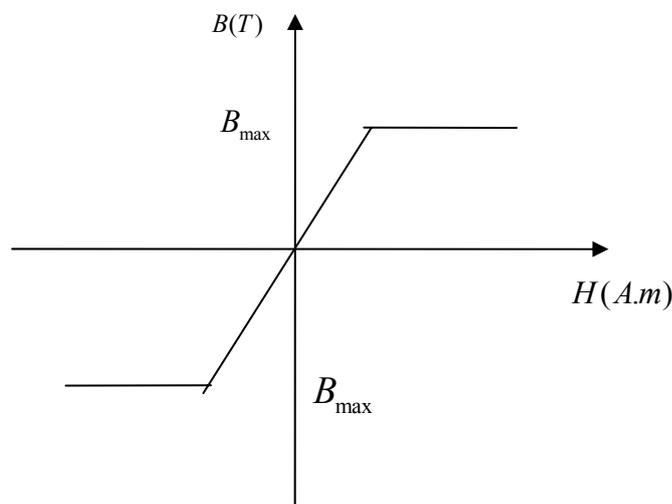


Figure C 4: Caractéristiques du matériau ferromagnétique ( $\mu_r = 100$ )

Le courant est sinusoïdal de fréquence de 50 Hz. *Quels sont les défauts constatés ? Représenter le courant lors de cette phase de démarrage, en précisant les limites pour atteindre les zones de saturation ( $B_{max} = 0.7T$ ).*

*Quelle est la solution à apporter au dispositif pour améliorer la linéarité ? Quelle est la solution à apporter au dispositif pour un fonctionnement satisfaisant à une fréquence d'utilisation de 50 Hz ?*

**QC12 :** Comparer ces deux solutions et préciser les avantages par des  $+$  et les inconvénients par des  $-$  dans le tableau représenté à la figure C5:

Solutions	Sensibilités CEM	Complexité De la réalisation	linéarité	Bande passante
Rogowski				
Transformateur				

Figure C 5: Comparaisons entre les deux solutions

## Surveillance du fonctionnement du moteur asynchrone en régime établi

L'ensemble des fonctions des unités de transformation font l'objet d'une télésurveillance qui est réalisée à partir d'informations transmises à un ordinateur central par l'intermédiaire d'un réseau. Pour cette unité, le fonctionnement du moteur asynchrone doit être affiché en particulier le courant efficace absorbé par phase, la tension efficace, la puissance électrique et le couple électromagnétique transmis. Bien entendu les capteurs d'informations ne doivent pas être redondants, il a par conséquent été décidé que seules les informations de courant et de tension échantillonnées dans le temps seraient transmises pour effectuer ces affichages.

**QC13 :** Exprimer la valeur efficace du courant à partir des valeurs instantanées échantillonnées.

**QC14 :** Exprimer la puissance électrique absorbée à partir des valeurs instantanées échantillonnées en courant et en tension.

Certaines données affichées seront calculées à partir d'un schéma équivalent qui est représenté à la figure C6.

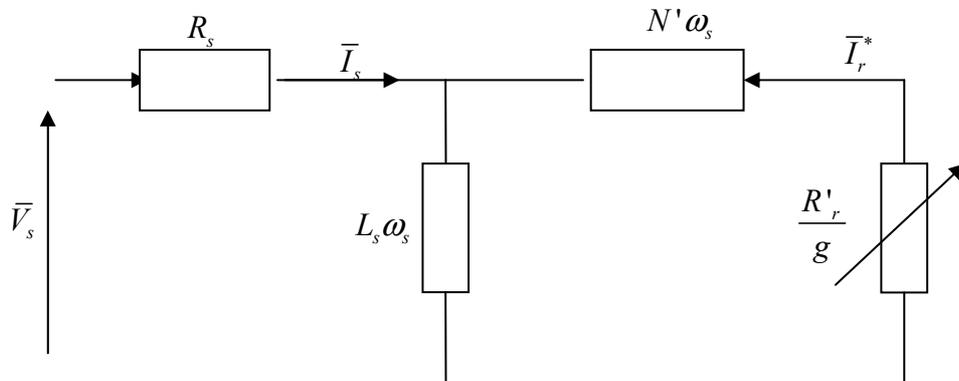


Figure C 6: Schéma équivalent du moteur asynchrone

**QC15 :** Montrer que les quatre éléments du schéma équivalent représenté à la figure 6 peuvent s'exprimer à partir des équations électriques en régime sinusoïdal rappelées ci-dessous:

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + j \omega_s L_s \bar{I}_s + j \omega_s M \bar{I}_r$$

$$0 = \frac{R'_r}{g} \bar{I}_r + j \omega_s L_r \bar{I}_r + j \omega_s M \bar{I}_s$$

On explicitera en particulier  $N' \omega_s$ ,  $\frac{R'_r}{g}$  et  $\bar{I}_r^*$ .

**QC16 :** Exprimer la valeur du couple électromagnétique transmis à la charge (on négligera la puissance perdue par effet joule dans la résistance  $R_s$ ).

**QC17 :** Comment afficher le couple en l'absence d'information sur la vitesse ?

## Surveillance du fonctionnement du moteur asynchrone, identification paramétrique.

La maintenance prédictive de l'installation requiert une surveillance de l'évolution de certains paramètres, ainsi pour le moteur asynchrone, il faut prévenir les risques électriques et mécaniques, en particulier le rotor peut voir ses barres se fragiliser, l'isolation du circuit primaire se détériorer (court circuit entre spires), etc.... Une amélioration de l'installation consisterait à faire une identification paramétrique à chaque démarrage du moteur asynchrone et de comparer les résultats à l'historique des démarrages antérieurs. Ainsi une intervention préventive pourrait être programmée sur des heures creuses en anticipant sur l'arrêt obligatoire dû à une maintenance curative.

**QC18 :** Lorsque le moteur asynchrone est mis sous tension, il existe une phase transitoire durant laquelle les courants s'établissent mais le rotor lié à la charge mécanique n'a pas encore tourné. On peut considérer que durant cette phase, le moteur est alimenté sous pleine tension et que le rotor est bloqué.

Les tensions, les courants et les flux peuvent s'exprimer à partir de leurs projections sur deux axes d et q qui dans notre cas seront liés au référentiel du stator. On définit l'axe d pour les composantes directes et l'axe q pour les composantes en quadratures, ainsi les équations du moteur asynchrone en régime transitoire s'écrivent:

$$\begin{aligned}v_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + \dot{\phi}_{ds} \\v_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \dot{\phi}_{qs} \\0 &= R_r \cdot i_{dr} - \omega_m \phi_{qr} + \dot{\phi}_{dr} \\0 &= R_r \cdot i_{qr} + \omega_m \phi_{dr} + \dot{\phi}_{qr}\end{aligned}$$

Dans ces équations l'indice s indique le stator, l'indice r indique le rotor et l'exposant  $\circ$  une dérivée fonction du temps t, par exemple la dérivée de  $\frac{d(x(t))}{dt}$  est notée  $x^\circ$ .

Dans cette relation les flux sont définis par:

$$\begin{aligned}\phi_{ds} &= L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \phi_{dr} &= L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds}\end{aligned}$$

Dans le cas où le rotor est bloqué  $\omega_m = 0$ . *Démontrer la relation suivante qui existe entre la tension instantanée  $V_{ds}$  et le courant  $i_{ds}$  :*

$$v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} - T_r \cdot v_{ds}^\circ + (T_r \cdot R_s + L_s) \cdot i_{ds}^\circ + T_r L_s \sigma \cdot i_{ds}^{\circ\circ}$$

**QC19 :** Le dispositif ne fournit que les tensions et les courants instantanés échantillonnés. *Indiquer, à partir de la mise en mémoire de la séquence de démarrage, comment on peut calculer les valeurs  $v_{ds}^\circ$ ,  $i_{ds}^\circ$  et  $i_{ds}^{\circ\circ}$  ?*

**QC20 :** *Dans ces conditions, exprimer le vecteur contenant les paramètres à identifier  $[\Theta]_{param}$  à partir de la matrice d'observation  $[W]$  et du vecteur de mesures  $[Y]$  :*

$$[\Theta]_{param} = \begin{bmatrix} R_s \\ T_r \\ T_r \cdot R_s + L_s \\ T_r \cdot L_s \cdot \sigma \end{bmatrix}, [W] = \begin{bmatrix} i_{ds} & -v_{ds}^\circ & i_{ds}^\circ & i_{ds}^{\circ\circ} \end{bmatrix} \text{ et } [Y] = [v_{ds}]$$

**QC21** : La dérivée seconde d'une grandeur ( $i_{ds}''$ ) introduit beaucoup de bruit et perturbe l'identification paramétrique. *Indiquer quelle méthode mettre en œuvre pour limiter l'opération de dérivation à l'ordre 1.*

**QC22** : *Montrer que la connaissance des composantes du vecteur paramètre permet d'identifier les éléments du schéma équivalent représenté à la figure C6.*

---