

Lycée Jean Jaurès – Argenteuil

Exercices

Physique appliquée

BTS électrotechnique – 2^e année



Julien GUÉRET

Recueil des exercices, travaux dirigés et accompagnements personnalisés

Les exercices sont classés par chapitre, dans l'ordre des fiches de cours.

Sommaire

1 Électricité de base	6
Régime continu	6
Exercice 1.1	6
Exercice 1.2	6
Exercice 1.3	7
Exercice 1.4	8
Exercice 1.5	9
Régime sinusoïdal : déphasage, impédance et vecteur de Fresnel	11
Exercice 1.6	11
Exercice 1.7	11
Exercice 1.8	12
Exercice 1.9	12
Exercice 1.10	12
Exercice 1.11	13
2 Systèmes triphasés équilibrés	14
Exercice 2.1	14
Exercice 2.2	14
Exercice 2.3	14
Exercice 2.4	15
Exercice 2.5	15
Exercice 2.6	15
Exercice 2.7	15
3 Transformateur monophasé	17
Exercice 3.1	17
Exercice 3.2	17
Exercice 3.3	17
Exercice 3.4	17
Exercice 3.5	18
Exercice 3.6	18
4 Transformateur triphasé	20
Exercice 4.1	20
Exercice 4.2	20
Exercice 4.3	20
Exercice 4.4 (BTS 2022)	21
Exercice 4.5 (BTS 2021)	22
5 Qualité de l'énergie électrique	23
Exercice 5.1	23
Exercice 5.2	24
Exercice 5.3	24
Exercice 5.4	25
Exercice 5.5	25
Exercice 5.6 (BTS 2011)	26
Exercice 5.7 (BTS 2021)	28

Exercice 5.8 (BTS 2019)	30
Exercice 5.9 (BTS 2020)	32
Exercice 5.10 (BTS 2020)	34
6 Convertisseurs électromécaniques	38
Exercice 6.1	38
Exercice 6.2	38
Exercice 6.3	39
Exercice 6.4	39
Exercice 6.5	40
Exercice 6.6	41
Exercice 6.7	42
Exercice 6.8 (BTS 2008)	42
Exercice 6.9 (BTS 2007)	43
Exercice 6.10 (BTS 2016)	45
Exercice 6.11 (BTS 2019)	47
Exercice 6.12 (BTS 2019)	48
Exercice 6.13 (BTS 2020)	49
Exercice 6.14 (BTS 2021)	51
Exercice 6.15 (BTS 2018)	53
7 Électromagnétisme	56
Exercice 7.1	56
Exercice 7.2	56
Exercice 7.3	57
Exercice 7.4	57
Exercice 7.5	58
Exercice 7.6	60
Exercice 7.7	60
Exercice 7.8	61
8 Électronique de puissance	63
Exercice 8.1	63
Exercice 8.2	63
Exercice 8.3	64
Exercice 8.4	65
Exercice 8.5	66
9 Mécanique des fluides	68
Exercice 9.1 (BTS 2008)	68
Exercice 9.2	70
Exercice 9.3 (BTS 2001)	70
Exercice 9.4 (BTS 2022)	71
Exercice 9.5 (BTS 2020)	73
Exercice 9.6 (BTS 2016)	75
Exercice 9.7 (BTS 2013)	77
10 Mécanique du solide	81
Exercice 10.1	81

Exercice 10.2 (BTS 2014)	82
Exercice 10.3 (BTS 2018)	84
Exercice 10.4 (BTS 2018)	85
Exercice 10.5 (BTS 2016)	88
Exercice 10.6 (BTS 2016)	90
11 Chimie et thermodynamique	93
Exercice 11.1	93
Exercice 11.2	93
Exercice 11.3	93
Exercice 11.4	94
Exercice 11.5	94
Exercice 11.6 (BTS 2022)	95
Exercice 11.7 (BTS 2019)	96
Exercice 11.8 (BTS 2019)	96
Exercice 11.9 (BTS 2019)	98
Exercice 11.10 (BTS 2018)	99
Exercice 11.11 (BTS 2019)	100
Exercice 11.12 (BTS 2015)	102
12 Transferts thermiques	104
Exercice 12.1	104
Exercice 12.2	104
Exercice 12.3	105
Exercice 12.4	105
Exercice 12.5	106
13 Photométrie et éclairagisme	109
Exercice 13.1	109
Exercice 13.2	109
Exercice 13.3	110
Exercice 13.4	110
Exercice 13.5	111
14 Chaîne de mesure	113
Exercice 14.1	113
Exercice 14.2	113
Exercice 14.3	113
Exercice 14.4	114
Exercice 14.5	114
15 Systèmes linéaires du 1er et du 2e ordre	117
Exercice 15.1	117
Exercice 15.2	117
Exercice 15.3	118
Exercice 15.4	118
Exercice 15.5	120
16 Schéma bloc et asservissement	122

Exercice 16.1	122
Exercice 16.2	122
Exercice 16.3	122
Exercice 16.4	123
Exercice 16.5	124
Exercice 16.6	124
Exercice 16.7 (BTS 2011)	125
Exercice 16.8 (BTS 2024)	126
Exercice 16.9 (BTS 2017)	129
17 Mesure et incertitudes	134
Exercice 17.1	134
Exercice 17.2	134
Exercice 17.3	134
Exercice 17.4	135
Exercice 17.5	135

1

Électricité de base

Exercices – Cours de 2^e année en BTS électrotechnique

Régime continu

★ Exercice 1.1

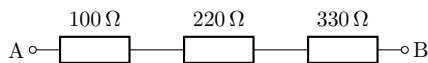
I- Loi d'Ohm

1. Une résistance $R = 47\ \Omega$ est parcourue par un courant $I = 0,25\text{ A}$. Calculez la tension U à ses bornes.
2. Un voltmètre indique $U = 9,0\text{ V}$ aux bornes d'une résistance $R = 1,5\text{ k}\Omega$. Calculez l'intensité I du courant qui la traverse, en mA.
3. Une résistance chauffante alimentée sous $U = 24\text{ V}$ absorbe un courant $I = 0,80\text{ A}$. Calculez sa résistance R et la puissance P qu'elle dissipe par effet Joule.

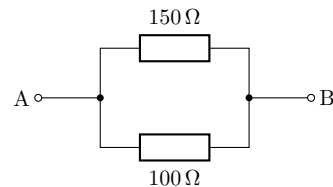
II- Résistances équivalentes

Calculez la résistance équivalente R_{eq} vue entre les bornes A et B de chacun des quatre montages ci-dessous.

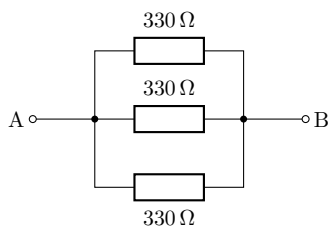
(a)



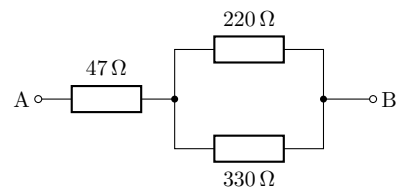
(b)



(c)



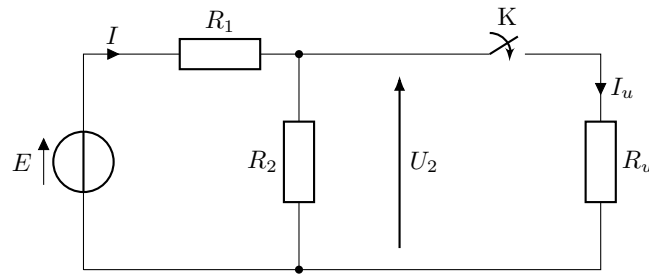
(d)



4. Calculez R_{eq} pour les montages (a), (b), (c) et (d).
5. On applique une tension continue $U_{AB} = 12\text{ V}$ au montage (d). Calculez l'intensité I du courant absorbé, la tension aux bornes de l'association en parallèle, puis les courants dans les résistances de $220\ \Omega$ et de $330\ \Omega$. Vérifiez la loi des nœuds.

★ Exercice 1.2

Une entrée d'automate n'accepte pas plus de 10 V . Pour y raccorder un signal de tension continue $E = 15\text{ V}$, on réalise le pont diviseur de tension ci-dessous, avec $R_1 = 2,2\text{ k}\Omega$ et $R_2 = 3,3\text{ k}\Omega$. La charge R_u (résistance d'entrée du récepteur) est raccordée par l'interrupteur K.



I- Fonctionnement à vide (K ouvert)

1. Justifiez que R_1 et R_2 sont parcourues par le même courant, puis établissez l'expression de U_2 en fonction de E , R_1 et R_2 .
2. Calculez U_2 . L'entrée de l'automate est-elle protégée ?
3. Calculez l'intensité I débitée par la source et la puissance consommée par le pont.

II- Pont diviseur chargé (K fermé)

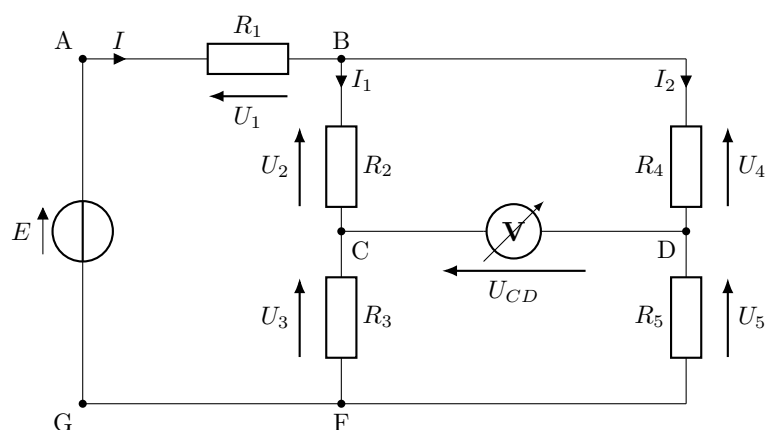
4. Le récepteur a une résistance d'entrée $R_u = 3,3 \text{ k}\Omega$. Calculez la résistance R_p équivalente à R_2 en parallèle avec R_u , puis la nouvelle valeur U'_2 de la tension. Exprimez l'écart relatif par rapport à la tension à vide.
5. Reprenez le calcul pour $R_u = 33 \text{ k}\Omega$ puis pour $R_u = 330 \text{ k}\Omega$. Concluez : à quelle condition la formule du pont diviseur à vide reste-t-elle utilisable ?

III- Dimensionnement

6. On conserve $R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega$. Quelle valeur faut-il donner à R_2 pour obtenir $U_2 = 5,0 \text{ V}$ à vide ?

★ Exercice 1.3

Le réseau ci-dessous est alimenté par une source de tension continue $E = 24 \text{ V}$. Les flèches de tension et de courant ont été placées arbitrairement. Un voltmètre est branché entre les points C et D.



Mesures effectuées

$E = 24,0 \text{ V}$; $U_1 = 9,6 \text{ V}$; $U_2 = 4,5 \text{ V}$; $U_4 = 3,4 \text{ V}$; $I = 80 \text{ mA}$; $I_1 = 30 \text{ mA}$.

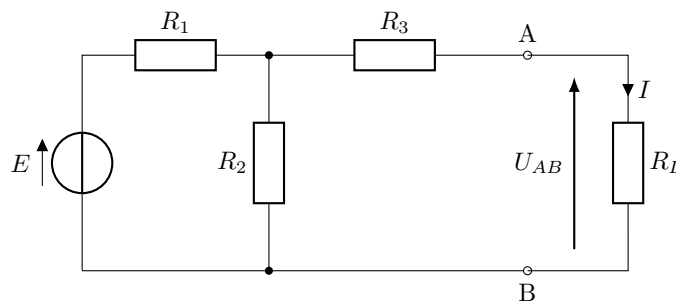
1. Repérez les nœuds du circuit. Combien de branches relient les nœuds B et F ?
2. En appliquant la loi des mailles dans la maille ABCFGA, calculez U_3 . Indiquez le sens de parcours

choisi.

- En appliquant la loi des mailles dans la maille BCFDB, calculez U_5 . Que remarque-t-on sur les tensions aux bornes des deux branches en parallèle ?
- En appliquant la loi des nœuds au nœud B, calculez I_2 . Vérifiez la loi des nœuds au nœud F.
- Le voltmètre est supposé parfait (aucun courant ne le traverse). Par une loi des mailles, calculez la tension U_{CD} qu'il indique. Interprétez son signe.
- À l'aide de la loi d'Ohm, calculez les valeurs des résistances R_1 à R_5 .
- Calculez la résistance équivalente R_{eq} du réseau vu par la source et vérifiez la valeur mesurée de I .
- Calculez la puissance fournie par la source et la somme des puissances reçues par les cinq résistances. Conclure.

★ Exercice 1.4

On souhaite connaître le courant débité dans une charge R_L branchée entre les bornes A et B du circuit ci-dessous, pour plusieurs valeurs de R_L , sans refaire à chaque fois l'étude complète du réseau.



$$E = 12 \text{ V}; \quad R_1 = 1,0 \text{ k}\Omega; \quad R_2 = 1,5 \text{ k}\Omega; \quad R_3 = 220 \Omega.$$

I- Détermination du modèle de Thévenin vu entre A et B

- La charge est débranchée. Justifiez que R_3 n'est parcourue par aucun courant, puis montrez que la tension à vide vaut $E_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times E$. Calculez E_{Th} .
- Dessinez le circuit lorsque la source E est éteinte. Calculez la résistance R_{Th} vue entre A et B.
- Dessinez le modèle de Thévenin équivalent, chargé par R_L .

II- Utilisation du modèle

- Pour $R_L = 1,2 \text{ k}\Omega$, calculez le courant I , la tension U_{AB} et la puissance reçue par la charge.
- Vérifiez la valeur de I obtenue en étudiant directement le circuit complet (résistances équivalentes et pont diviseur).
- Calculez le courant de court-circuit I_{cc} obtenu lorsque l'on relie directement A et B par un fil.

III- Détermination expérimentale d'un modèle de Thévenin

Un module d'alimentation inconnu (« boîte noire ») possède deux bornes de sortie. Un voltmètre branché seul entre ces bornes indique $U_0 = 9,0 \text{ V}$. Lorsque l'on branche une résistance de 100Ω , la tension de sortie chute à $U = 7,5 \text{ V}$.

7. Déduisez-en E_{Th} , puis le courant débité dans la résistance de $100\ \Omega$ et la résistance R_{Th} du module.
8. Prévoyez le courant débité et la tension de sortie si l'on branche une charge de $50\ \Omega$.

★ Exercice 1.5

Une station de pompage d'eau potable est surveillée à distance par une armoire de télégestion (automate, modem, relais, électrovannes, éclairage). Cette armoire est alimentée en 24 V continu par un **chargeur** raccordé au réseau, associé à une **batterie** tampon qui prend le relais en cas de coupure du réseau. Le chargeur et la batterie sont reliés au jeu de barres P–N du local technique ; une ligne bifilaire de résistance totale R_L (aller et retour) relie ce jeu de barres à l'armoire (bornes M–M').

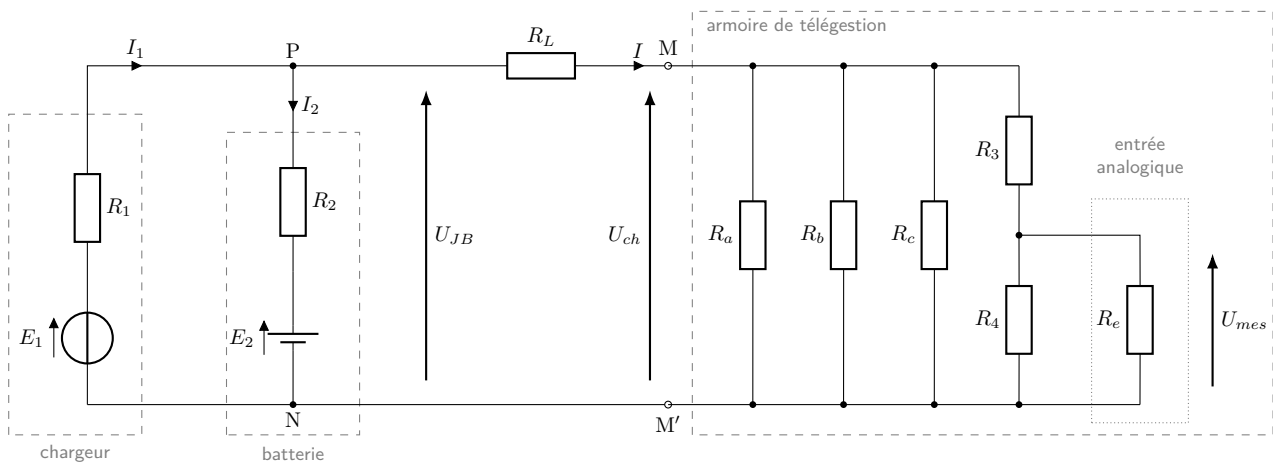


Fig. 1 – Schéma électrique équivalent de l'installation (en régime continu).

- ▷ Chargeur (modèle de Thévenin) : $E_1 = 27,0\text{ V}$, $R_1 = 0,20\ \Omega$. Batterie (2 éléments 12 V en série, partiellement déchargée) : $E_2 = 24,0\text{ V}$, $R_2 = 0,050\ \Omega$.
- ▷ Ligne : $R_L = 0,060\ \Omega$.
- ▷ Récepteurs de l'armoire, modélisés par des résistances : automate et modem $R_a = 24\ \Omega$; relais et électrovannes $R_b = 8,0\ \Omega$; éclairage et ventilation $R_c = 12\ \Omega$.
- ▷ Mesure de la tension de l'armoire : pont diviseur $R_3 = 15\text{ k}\Omega$, $R_4 = 10\text{ k}\Omega$; l'entrée analogique 0 V à 10 V de l'automate a une résistance d'entrée $R_e = 100\text{ k}\Omega$.
- ▷ Cahier des charges : en cas de coupure du réseau, la batterie, dont l'énergie utilisable est de $1,2\text{ kW} \cdot \text{h}$, doit assurer une autonomie d'au moins 8 h.

Partie A : réduction du circuit de l'armoire

1. Calculez la résistance R_{ch} équivalente aux trois récepteurs R_a , R_b et R_c , puis la résistance de la branche de mesure (R_3 en série avec l'association de R_4 et R_e). Montrez que la branche de mesure est négligeable : on prendra $R_{ch} = 4,0\ \Omega$ pour la charge totale de l'armoire.

Partie B : modèle de Thévenin de l'alimentation vue de l'armoire

2. L'armoire est débranchée (bornes M–M' ouvertes) : le chargeur et la batterie forment alors une seule maille. Par la loi des mailles, calculez le courant I_0 qui y circule et indiquez si le chargeur recharge la batterie. Déduisez-en la tension à vide $E_{Th} = U_{MM'}$.

3. Calculez la résistance R_{Th} vue entre M et M', sources éteintes, puis dessinez le modèle de Thévenin de l'alimentation chargé par R_{ch} .

Partie C : fonctionnement normal (réseau présent)

4. À l'aide du modèle de Thévenin, calculez le courant I absorbé par l'armoire et la tension U_{ch} à ses bornes.
5. Calculez la tension U_{JB} du jeu de barres puis, par des lois des mailles, les courants I_1 (débité par le chargeur) et I_2 (reçu par la batterie). Vérifiez la loi des nœuds au point P.
6. Calculez la puissance reçue par chacun des trois récepteurs de l'armoire, puis faites le bilan des puissances de l'installation : puissance $E_1 \times I_1$ fournie par la source E_1 , pertes par effet Joule dans R_1 , R_2 et R_L , puissance $E_2 \times I_2$ stockée dans la batterie, puissance reçue par l'armoire. Vérifiez la conservation de la puissance.

Partie D : mesure de la tension de l'armoire

7. L'automate a été programmé en considérant le pont diviseur à vide, de rapport $k = U_{mes}/U_{ch} = R_4/(R_3 + R_4)$. Calculez k , puis la tension U_{mes} réellement appliquée à l'entrée analogique (R_e branchée) et la tension U_{mes}/k affichée par l'automate. Calculez l'erreur relative commise.
8. Le constructeur propose une carte d'entrées de résistance $R_e = 1\text{ M}\Omega$. L'erreur devient-elle inférieure à 1 % ?

Partie E : coupure du réseau

9. Le chargeur est hors tension (sa branche est ouverte). Dessinez le circuit équivalent et calculez le courant I débité par la batterie, la tension U_{ch} aux bornes de l'armoire et la puissance fournie par la source E_2 de la batterie.
10. En supposant E_2 constante pendant la décharge, calculez l'autonomie de l'installation. Le cahier des charges est-il respecté ?

Régime sinusoïdal : déphasage, impédance et vecteur de Fresnel

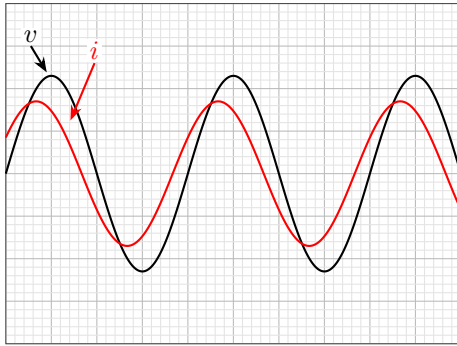
★ Exercice 1.6

L'expression instantanée d'un courant alternatif est :

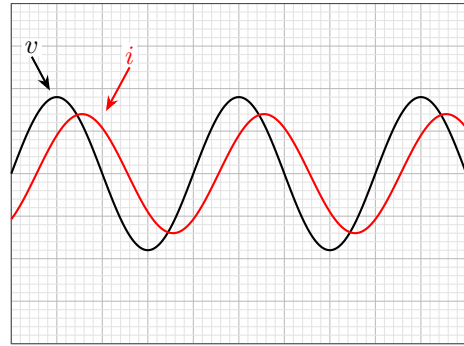
$$i(t) = 17 \times \sin(314t + 1,047)$$

1. Précisez la valeur de l'intensité maximale du courant.
2. Précisez la valeur efficace de l'intensité du courant.
3. Précisez la pulsation ω , la fréquence f et la période T du courant.

★ Exercice 1.7



Calibre des temps : 50 μ s/div.
Tension (mesurée directement) : 2 V/div.
Courant (sonde 100 mV/A) : 5 mV/div.



Calibre des temps : 5 ms/div.
Tension (sonde 1/20^e) : 2 V/div.
Courant (sonde 100 mV/A) : 50 mV/div.

Pour les deux oscillogrammes ci-dessus, répondez aux questions suivantes :

1. Déterminez la période T , la fréquence f et la pulsation ω des grandeurs relevées.
2. La charge est-elle de type inductif ou capacitif? Justifiez. Quel sera le signe du déphasage Φ ?
3. Déterminez la valeur maximale et la valeur efficace du signal $v(t)$.
4. Déterminez la valeur maximale et la valeur efficace du signal $i(t)$.
5. Calculez la valeur du déphasage Φ .

Pour l'oscillogramme de gauche

6. En prenant $i(t)$ comme origine des phases, réalisez la représentation de Fresnel de $i(t)$ et $v(t)$ (échelle : 25 mA/cm et 1 V/cm).
7. En prenant $v(t)$ comme origine des phases, réalisez la représentation de Fresnel de $i(t)$ et $v(t)$ (échelle : 25 mA/cm et 1 V/cm).

Pour l'oscillogramme de droite

8. En prenant $i(t)$ comme origine des phases, réalisez la représentation de Fresnel de $i(t)$ et $v(t)$ (échelle : 0,25 A/cm et 10 V/cm).
9. En prenant $v(t)$ comme origine des phases, réalisez la représentation de Fresnel de $i(t)$ et $v(t)$ (échelle : 0,25 A/cm et 10 V/cm).

★ Exercice 1.8

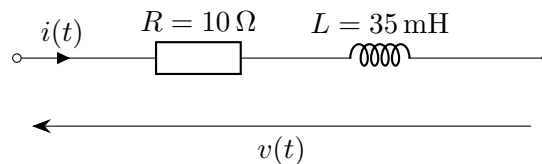
Soient les deux tensions :

$$u_1(t) = 2\sqrt{2} \times \sin(\omega t - 0,784) \quad u_2(t) = 3\sqrt{2} \times \sin(\omega t + 0,524)$$

1. En choisissant une échelle adaptée, tracez les vecteurs de Fresnel $\vec{u}_1$ et $\vec{u}_2$ associés aux deux tensions précédentes.
2. La loi des mailles donne $u(t) = u_1(t) + u_2(t)$. Tracez le vecteur $\vec{u}$ associé à cette tension.
3. En déduire l'expression de la tension instantanée $u(t)$.

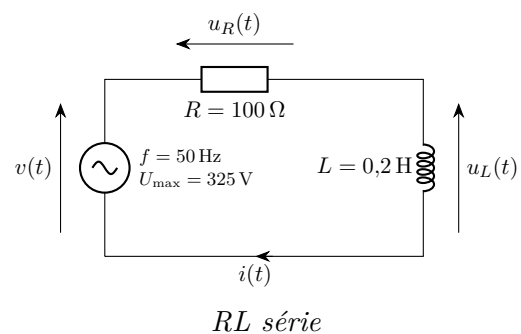
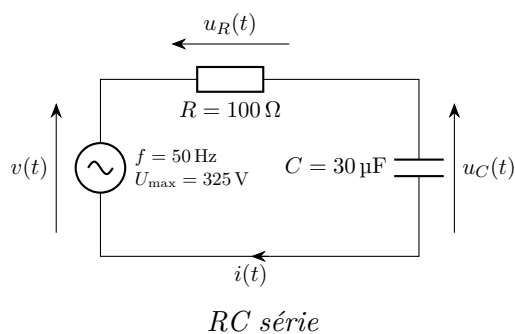
★ Exercice 1.9

Une bobine est alimentée sous une tension alternative sinusoïdale $v(t)$ de valeur efficace $U_{\text{eff}} = 50 \text{ V}$ et de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$. La situation est schématisée ci-dessous.



1. Que modélise la résistance R sur le schéma ?
2. Donnez l'expression de l'impédance $\underline{Z}$ pour la situation proposée.
3. En déduire la valeur de son module Z avec les données du problème.
4. En déduire la valeur efficace I_{eff} de l'intensité du courant absorbé par la bobine.
5. D'après la notice, $I_{\text{max}} = 4 \text{ A}$ pour la bobine. Peut-on réaliser l'expérience sans l'endommager ?
6. Calculez la valeur du déphasage Φ .
7. Donnez la formule de la puissance active P , réactive Q et de la puissance apparente S .
8. Calculez la valeur de ces puissances.
9. Donnez la formule du facteur de puissance.
10. Calculez sa valeur.

★ Exercice 1.10



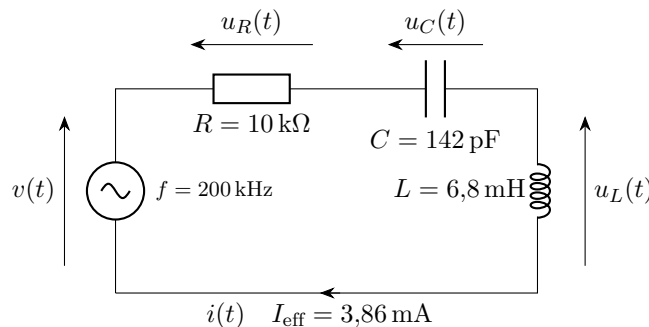
La source de tension $v(t)$ sera prise comme origine des phases. Pour chaque montage électrique,

répondez aux questions suivantes :

1. Donnez l'expression de l'impédance équivalente $\underline{Z}_{eq}$ (circuit en série).
2. Calculez, à partir des données du problème, la valeur de son module Z_{eq} et de sa phase à l'origine Φ_{eq} (vous donnerez votre résultat sous sa forme de Fresnel $[Z_{eq}; \Phi_{eq}]$).
3. Calculez la valeur efficace de la tension U_{eff} à partir des données du problème.
4. En déduire le vecteur de Fresnel $\vec{i(t)} = [I_{eff}; \Phi_i]$ en calculant I_{eff} et Φ_i .
5. En déduire les vecteurs de Fresnel $\vec{u_R(t)} = [U_R; \Phi_{u_R}]$ et $\vec{u_L(t)} = [U_L; \Phi_{u_L}]$ (ou $\vec{u_C(t)} = [U_C; \Phi_{u_C}]$) en calculant les grandeurs efficaces et les phases à l'origine.
6. En utilisant la loi des mailles, construisez le diagramme de Fresnel des tensions (vous prendrez une échelle adaptée).

★ Exercice 1.11

Le circuit ci-dessous peut être utilisé comme sélecteur de fréquence de radio.



1. Donnez l'expression de l'impédance équivalente $\underline{Z}_{eq}$ (circuit en série).
2. Calculez, à partir des données du problème, la valeur de son module Z_{eq} et de sa phase à l'origine Φ_{eq} (vous donnerez votre résultat sous sa forme de Fresnel $[Z_{eq}; \Phi_{eq}]$).
3. En déduire le vecteur de Fresnel $\vec{v(t)} = [V_{eff}; \Phi_v]$ en calculant V_{eff} et Φ_v (en sachant que $\Phi_i = 0$).
4. Calculez les grandeurs efficaces des signaux $u_R(t)$, $u_C(t)$ et $u_L(t)$.
5. En utilisant la loi des mailles, tracez le diagramme de Fresnel des tensions en prenant $i(t)$ comme origine des phases.
6. Calculez les différentes puissances (active P_R , réactives Q_L et Q_C , apparente S).

2

Systèmes triphasés équilibrés

Exercices – Cours de 2^e année en BTS électrotechnique

★ Exercice 2.1

Soit un récepteur triphasé équilibré constitué de trois radiateurs $R = 100\ \Omega$. Ce récepteur est alimenté par un réseau triphasé 230 V/400 V à 50 Hz.

1. Calculez la valeur efficace I du courant de ligne et la puissance active P consommée quand le couplage du récepteur est en étoile.
2. Reprenez la question précédente avec un couplage en triangle.
3. Concluez sur l'efficacité des couplages.

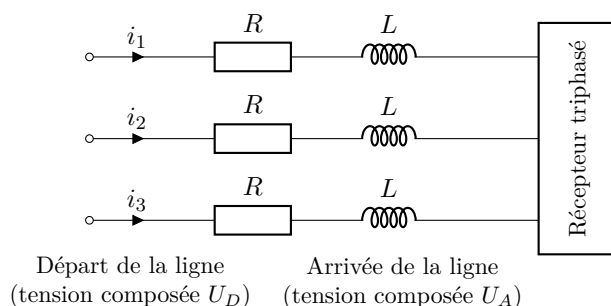
★ Exercice 2.2

Sur un réseau (230 V/400 V, 50 Hz) sans neutre, on branche en étoile trois récepteurs capacitifs identiques de résistance $R = 20\ \Omega$ en série avec une capacité $C = 20\ \mu\text{F}$.

1. Déterminez l'impédance complexe de chaque récepteur. Calculez son module et son argument.
2. Déterminez la valeur efficace des courants en ligne, ainsi que leur déphasage par rapport aux tensions simples.
3. Calculez les puissances active et réactive consommées par le récepteur triphasé, ainsi que la puissance apparente.

★ Exercice 2.3

Une ligne triphasée moyenne tension alimente un récepteur triphasé équilibré qui consomme une puissance active de 4,2 MW et qui impose un facteur de puissance de 0,938. Chaque fil de ligne a pour résistance $R = 2,43\ \Omega$ et pour inductance $L = 11,2\ \text{mH}$. La tension efficace entre phases à l'arrivée de la ligne est $U_A = 20,0\ \text{kV}$. La fréquence de la tension est 50 Hz. Le but du problème est de calculer la chute de tension due à la ligne.



1. Calculez l'intensité efficace I du courant dans un fil de ligne.
2. Pour la ligne, calculez la puissance active consommée et la puissance réactive consommée.
3. Pour l'ensemble ligne + récepteur, calculez la puissance active consommée, la puissance réactive

consommée et la puissance apparente consommée.

4. Déduisez-en la tension efficace entre phases U_D au départ de la ligne.

★ Exercice 2.4

Une installation triphasée absorbe par phase un courant de $I = 100 \text{ A}$ sous une tension composée $U = 125 \text{ V}$ avec un facteur de puissance $\cos \Phi = f_p = 0,707$. Pour améliorer le $\cos \Phi$ du réseau, on monte entre les bornes 3 condensateurs.

1. Dans le cas d'un couplage en étoile, calculez la valeur de la capacité de chacun des trois condensateurs si on veut un facteur de puissance de 0,9.
2. Même question pour le cas d'un couplage en triangle.

★ Exercice 2.5

On s'intéresse à l'installation électrique triphasée 230 V/400 V d'un atelier comportant :

- ▷ des luminaires et des appareils de bureautique représentant 6 kW répartis uniformément sur les trois phases et de facteur de puissance unitaire ;
- ▷ trois machines triphasées consommant chacune 5 kW avec un facteur de puissance de 0,8 arrière ;
- ▷ un appareillage particulier représentant trois impédances identiques $\underline{Z} = 10 + j 15$ (en Ω) câblées en triangle sur les phases.

1. Calculez les puissances active P_Z et réactive Q_Z consommées par les impédances.
2. Calculez la puissance active totale P_{tot} consommée par l'atelier.
3. Calculez la puissance réactive totale Q_{tot} consommée par l'atelier.
4. Déduisez-en la puissance apparente totale et la valeur du courant de ligne I consommé.
5. Calculez la valeur du facteur de puissance de l'atelier. Ce facteur est-il tolérable par le fournisseur d'énergie ?
6. Calculez la valeur des capacités C , câblées en étoile, permettant de relever le facteur de puissance à la valeur 1.

★ Exercice 2.6

Un système fonctionne avec un moteur asynchrone dont la plaque signalétique indique : 400 V/230 V ; 9 A/15,6 A ; $\cos \Phi = 0,85$.

Ce moteur est alimenté par un réseau triphasé de valeur efficace entre phases $U = 230 \text{ V}$.

1. Justifiez que le couplage des enroulements du moteur est en triangle.
2. Déterminez les intensités efficaces nominales J dans un enroulement et I en ligne.
3. Déduisez-en les puissances active P , réactive Q et apparente S du moteur.

★ Exercice 2.7

Une installation électrique est alimentée par un réseau triphasé 400 V. L'installation comporte :

- ▷ un système de chauffage d'un bain de dégraissage constitué de trois thermoplongeurs (éléments résistifs) répartis sur chaque phase. Chaque élément dissipe une puissance de 2 kW ;
 - ▷ dix alimentations de moteurs triphasés identiques de facteur de puissance $f_{pM} = 0,75$. Les moteurs développent au point nominal une puissance utile unitaire de 2,2 kW. Le rendement du moteur est 0,81.
1. Calculez séparément les puissances actives absorbées par le système de chauffage P_{th} et par l'ensemble des moteurs P_M . Déduisez-en la puissance active P de l'ensemble de l'installation.
 2. Déterminez la puissance réactive Q absorbée par l'installation.
 3. Déduisez-en la puissance apparente S de l'installation, le facteur de puissance f_p et l'intensité efficace I du courant de ligne.
 4. On place en amont de l'installation des condensateurs montés en triangle pour relever le facteur de puissance à 0,93.
 - a) La puissance active absorbée par l'installation a-t-elle été modifiée ? Indiquez la nouvelle puissance réactive Q' fournie par le réseau.
 - b) Déduisez-en la puissance réactive Q_C fournie par l'ensemble des condensateurs.
 - c) Calculez la puissance apparente S' en amont de l'installation et la valeur efficace du nouveau courant de ligne I' .

3

Transformateur monophasé

Exercices – Cours de 2^e année en BTS électrotechnique

★ Exercice 3.1

Soit un transformateur réel 380 V/220 V, 50 Hz de puissance apparente nominale $S = 2 \text{ kVA}$.

1. Calculez les courants nominaux I_{1n} et I_{2n} .
2. Calculez le rapport de transformation m .
3. La charge inductive est constituée d'une résistance $R = 20 \Omega$ en série avec une inductance $L = 50 \text{ mH}$. Calculez le module Z_2 de l'impédance de cette charge ainsi que sa phase Φ_2 .
4. Déduisez-en la valeur de I_2 (en sachant que $U_2 = U_{2n}$) et celle de la puissance active fournie P_2 .

★ Exercice 3.2

Un transformateur de commande et de signalisation monophasé a les caractéristiques suivantes : 230 V/24 V, 50 Hz, 630 VA.

1. Les pertes totales à charge nominale sont de 54,8 W. Calculez le rendement nominal du transformateur pour $\cos \Phi_2 = 1$ et $\cos \Phi_2 = 0,3$.
2. Calculez le courant nominal au secondaire I_{2n} .
3. Les pertes à vide (pertes fer P_{fer}) sont de 32,4 W. Déduisez-en les pertes Joule P_{joule} à charge nominale.
4. Déduisez-en la valeur de R_S , la résistance des enroulements ramenée au secondaire.
5. La chute de tension au secondaire pour $\cos \Phi_2 = 0,6$ (inductif) est de 3,5 % de la tension nominale ($U_{2n} = 24 \text{ V}$). Déduisez-en la valeur de $X_S = L_S \omega$, la réactance de fuite ramenée au secondaire.

★ Exercice 3.3

Un transformateur de distribution possède les caractéristiques nominales suivantes : $S_{2n} = 25 \text{ kVA}$, $P_{\text{joule},n} = 700 \text{ W}$ et $P_{\text{fer}} = 115 \text{ W}$.

1. Calculez le rendement nominal pour une charge résistive ($\cos \Phi_2 = 1$).
2. Calculez le rendement nominal pour une charge inductive de facteur de puissance $\cos \Phi_2 = 0,8$.
3. Calculez le rendement pour une charge résistive qui consomme la moitié du courant nominal.

★ Exercice 3.4

La puissance apparente d'un transformateur monophasé 5 kV/230 V ; 50 Hz est $S = 21 \text{ kVA}$.

L'essai à vide a donné les résultats suivants : $U_1 = 5000 \text{ V}$, $U_{20} = 230 \text{ V}$, $I_{10} = 0,50 \text{ A}$ et $P_{10} = 250 \text{ W}$.

L'essai en court-circuit avec $I_{2cc} = I_{2n}$ a donné les résultats suivants : $P_{1cc} = 300 \text{ W}$ et $U_{1cc} = 200 \text{ V}$.

1. Calculez le rapport de transformation m .
2. Quel est le facteur de puissance à vide ($\cos \Phi_{10}$) de ce transformateur ?
3. Quelle est l'intensité efficace du courant secondaire I_{2n} ?
4. Déterminez la valeur des éléments R_S , Z_S et L_S de ce transformateur.
5. Calculez le rendement de ce transformateur lorsqu'il débite un courant d'intensité nominale dans une charge inductive de facteur de puissance 0,83.

★ Exercice 3.5

L'étude d'un transformateur monophasé 1 500 V, 225 V, 50 Hz de puissance apparente 44 kVA a donné les essais suivants :

- ▷ Essai en continu au primaire : $U_1 = 2,5$ V, $I_1 = 10$ A.
- ▷ Essai à vide : $U_1 = 1\,500$ V, $I_{10} = 2$ A, $U_{20} = 225$ V et $P_{10} = 300$ W.
- ▷ Essai en court-circuit : $U_{1cc} = 22,5$ V, $I_{1cc} = 22,5$ A, $P_{1cc} = 225$ W.

1. Déterminez le rapport de transformation m .
2. Vérifiez que l'on peut négliger les pertes par effet Joule lors de l'essai à vide.
3. Calculez la valeur des éléments R_S et $X_S = L_S \omega$ des enroulements ramenés au secondaire.

Le transformateur alimenté au primaire sous une tension $U_1 = 1\,500$ V débite un courant constant d'intensité $I_2 = 200$ A, quelle que soit la charge.

4. Déterminez la valeur du déphasage Φ_2 entre courant et tension secondaire pour que la chute de tension ΔU_2 soit nulle.
5. Déterminez la chute de tension ΔU_2 pour un facteur de puissance de 0,8.
6. Déterminez le rendement associé à $f_p = 0,8$.

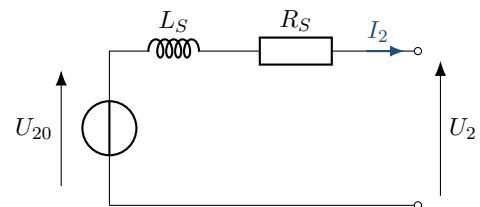
★ Exercice 3.6

La puissance apparente d'un transformateur monophasé 5 kV/240 V, 50 Hz est $S = 20$ kVA. La section droite (constante) du circuit magnétique est $s = 60$ cm². La valeur maximale du champ magnétique est $B_{\max} = 1,1$ T.

Le modèle équivalent du transformateur vu du secondaire est représenté sur la figure ci-contre.

Des essais ont donné les résultats suivants :

- ▷ essai à vide ($I_2 = 0$) : $U_{10} = 5$ kV ; $I_{10} = 0,5$ A ;
 $P_{10} = 250$ W ; $U_{20} = 240$ V ;
- ▷ essai en court-circuit : $U_{1cc} = 250$ V ; $I_{2cc} = 80$ A ;
 $P_{1cc} = 100$ W.



1. Déterminez les valeurs efficaces nominales des courants au primaire I_{1N} et au secondaire I_{2N} .
2. Calculez le rapport de transformation m .
3. Indiquez la signification de chaque élément du modèle.
4. À partir des essais, déterminez les éléments du modèle.

5. Une charge inductive de facteur de puissance 0,8 est connectée au secondaire. Pour $I_2 = 20\text{ A}$, 40 A et 80 A , calculez :
- ▷ la tension U_2 ;
 - ▷ la puissance P_2 fournie par le transformateur ;
 - ▷ les pertes Joule P_J ;
 - ▷ les pertes fer P_{fer} ;
 - ▷ la puissance P_1 absorbée par le transformateur ;
 - ▷ le rendement η du transformateur.

4

Transformateur triphasé

Exercices – Cours de 2^e année en BTS électrotechnique

★ Exercice 4.1

Le transformateur triphasé est couplé en triangle-étoile. L'essai à vide a donné les valeurs suivantes : $U_{1n} = 15 \text{ kV}$, $U_{20} = 395 \text{ V}$, $P_{10} = 1,8 \text{ kW}$ et $I_{10} = 10,9 \text{ A}$. L'essai en court-circuit a donné les valeurs suivantes : $U_{1cc} = 485 \text{ V}$, $I_{2cc} = 520 \text{ A}$ et $P_{1cc} = 9,3 \text{ kW}$.

1. Calculez le rapport de transformation m .
2. Calculez la valeur de la résistance R_F .
3. Déterminez les valeurs de S_{10} et Q_{10} . En déduire la valeur de l'inductance L_M .
4. Déterminez la valeur des éléments R_S , Z_S et X_S du transformateur triphasé.

★ Exercice 4.2

Soit un transformateur triphasé Dyn qui possède les caractéristiques suivantes : $U_{1n} = 1,5 \text{ kV}$ / $U_{2n} = 236 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, de puissance apparente nominale $S = 28,7 \text{ kVA}$.

1. Calculez le rapport de transformation m .
2. Calculez les courants nominaux I_{1n} et I_{2n} .
3. Calculez la puissance active P_2 fournie par le secondaire à une charge purement résistive (on a $U_2 = U_{2n}$, $I_2 = I_{2n}$).
4. Calculez la puissance active P'_2 fournie par le secondaire à une charge inductive de facteur de puissance $\cos \Phi_2 = 0,85$ (on a $U_2 = U_{2n}$, $I_2 = 50 \text{ A}$).

★ Exercice 4.3

Les essais d'un transformateur triphasé Dy ont donné :

- ▷ à vide : $U_{1v} = 20 \text{ kV} = U_{1n}$, $U_{2v} = 400 \text{ V}$, $I_{1v} = 0,2 \text{ A}$ et $P_{1v} = 400 \text{ W}$;
- ▷ en court-circuit : $U_{1cc} = 900 \text{ V}$, $I_{2cc} = 180 \text{ A} = I_{2n}$ et $P_{1cc} = 2 \text{ kW}$.

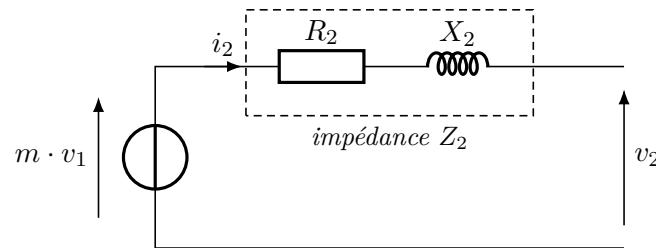
1. Calculez le rapport de transformation m .
2. Calculez la valeur des éléments du schéma équivalent par phase : R_F (côté primaire) et R_S , L_S (côté secondaire).

Le transformateur alimente une charge de trois impédances Z_c identiques couplées en étoile, qui absorbe une puissance $P_2 = 80 \text{ kW}$ sous une tension entre phases $U_2 = U_{2n} = 380 \text{ V}$ avec un facteur de puissance $\cos \Phi_c = 0,9$.

3. Calculez le courant I_2 absorbé par la charge. En déduire la valeur du module de l'impédance Z_c .
4. Déterminez la valeur de la chute de tension ΔU_2 dans le transformateur.
5. Calculez le rendement η de ce transformateur.

★ Exercice 4.4 : BTS 2022

On rappelle le schéma équivalent d'une phase du transformateur triphasé, vu du secondaire (les éléments R_2 et X_2 modélisent les imperfections du transformateur; m est le rapport de transformation; v_1 est la tension simple au primaire; v_2 est la tension simple au secondaire) :



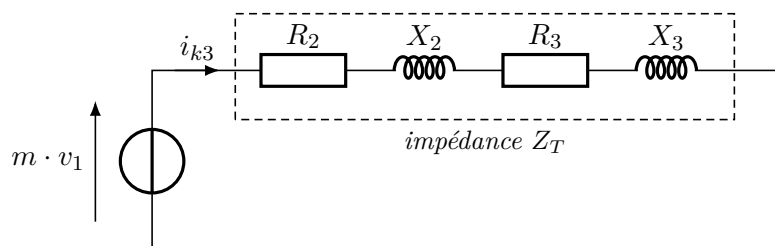
Les caractéristiques du transformateur sont les suivantes :

- ▷ tension efficace nominale entre phases au primaire : $U_{1N} = 15 \text{ kV}$;
- ▷ tension efficace à vide entre phases au secondaire : $U_{20} = 410 \text{ V}$;
- ▷ résistance modélisant les pertes Joule : $R_2 = 2,2 \text{ m}\Omega$;
- ▷ réactance modélisant les fuites magnétiques : $X_2 = 12,4 \text{ m}\Omega$.

On rappelle l'expression de l'impédance Z équivalente à l'association série d'une résistance R et d'une réactance X : $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$.

1. Calculez le rapport de transformation m .
2. Calculez la valeur du module de l'impédance Z_2 .
3. On réalise un court-circuit. Établissez la relation entre m , V_1 , Z_2 et la valeur efficace I_{k3} (courant de court-circuit triphasé).
4. Calculez la valeur efficace du courant de court-circuit $I_{k3,\text{transfo}}$ au secondaire du transformateur lorsqu'il est alimenté sous tension nominale.

Lors d'un court-circuit triphasé au niveau du TGBT, le schéma équivalent d'une phase devient le suivant (R_3 et X_3 modélisent les imperfections du jeu de barres et du câble reliant le transformateur au TGBT) :



Connaissant les caractéristiques du câble reliant le transformateur au TGBT (aluminium, longueur 95 m, section $4 \times 300 \text{ mm}^2$), ainsi que celles du jeu de barres, on a pu déterminer les valeurs : $R_3 = 2,9 \text{ m}\Omega$ et $X_3 = 3,2 \text{ m}\Omega$.

5. Calculez l'impédance totale Z_T lors d'un court-circuit au niveau du TGBT.
6. Calculez la valeur efficace du courant $I_{k3,\text{TGBT}}$ lors d'un court-circuit triphasé au niveau du TGBT.

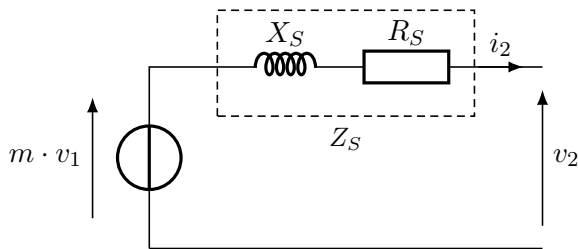
La méthode que l'on vient d'appliquer pour trouver $I_{k3,\text{transfo}}$ et $I_{k3,\text{TGBT}}$ s'appelle la méthode des impédances.

★ Exercice 4.5 : BTS 2021

Détermination des paramètres du transformateur. La plaque signalétique du transformateur triphasé indique :

Puissance apparente nominale	400 kVA
Tension primaire nominale U_1	20 kV
Tension secondaire à vide U_{20}	410 V
Couplage	Dyn11

Le modèle équivalent d'un enroulement du transformateur est donné ci-dessous :



R_S : résistance équivalente du transformateur ramenée au secondaire ;
 X_S : réactance équivalente du transformateur ramenée au secondaire ;
 $Z_S = \sqrt{R_S^2 + X_S^2}$: impédance équivalente du transformateur ramenée au secondaire.

Les données suivantes concernent un essai en court-circuit du transformateur :

$$U_{1CC\%} = 6,0\% \quad I_{2CC} = 563 \text{ A} \quad P_{1CC} = 5\,220 \text{ W}$$

($U_{1CC\%}$ correspond au pourcentage de la tension efficace nominale primaire appliquée entre phases durant l'essai en court-circuit).

1. Donnez la signification de Dyn11.
2. Calculez le rapport de transformation m du transformateur.
3. Montrez que la tension efficace simple $m \times V_{1cc}$ au secondaire pendant l'essai en court-circuit vaut 14 V.
4. Représentez le schéma équivalent d'un enroulement secondaire du transformateur lors de l'essai en court-circuit et calculez la valeur de l'impédance équivalente Z_S .

L'essai en court-circuit du transformateur a permis de déterminer les valeurs suivantes : $R_S = 5 \text{ m}\Omega$ et $X_S = 24 \text{ m}\Omega$. La chute de tension au secondaire du transformateur pour une intensité I_2 débitée au secondaire se calcule avec la formule suivante :

$$\Delta U_2 = \sqrt{3} (R_S \cos \Phi_2 + X_S \sin \Phi_2) I_2$$

5. Calculez ΔU_2 pour $\cos \Phi_2 = 0,95$ et une intensité débitée $I_2 = 452 \text{ A}$. En déduire la valeur efficace de la tension secondaire U_2 .
6. Dites si cette valeur est compatible avec le CCTP imposant une tension efficace U_2 de 400 V minimum au secondaire du transformateur.
7. Après avoir calculé la valeur du module de l'impédance Z_S , calculez la valeur efficace de l'intensité de court-circuit I_{2cc} au secondaire lorsque le transformateur est alimenté sous sa tension primaire nominale.
8. Le pouvoir de coupure du disjoncteur placé au secondaire du transformateur est de 50 kA. Justifiez ce choix.

★ Exercice 5.1

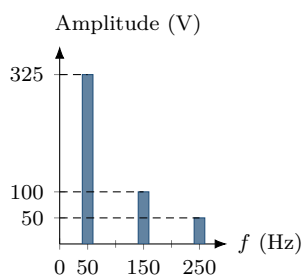


Figure 1

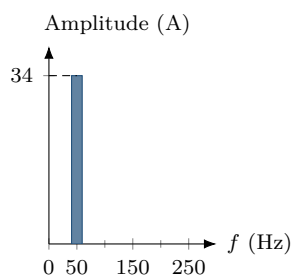


Figure 2

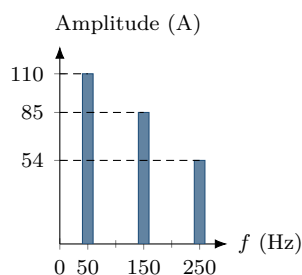


Figure 3

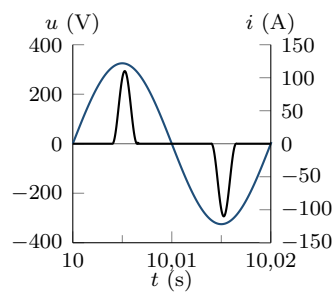


Figure 4

Pour chacune des situations suivantes, indiquez, **en justifiant**, la ou les bonnes réponses.

1. Pour le spectre représenté sur la **figure 1** :

- ▷ la fréquence du signal U est de 60 Hz ;
- ▷ la valeur moyenne du signal est nulle ;
- ▷ le fondamental a une amplitude de 325 V.

2. Pour le spectre représenté sur la **figure 2** :

- ▷ la période du courant I est de 20 ms ;
- ▷ la valeur moyenne du signal est de 50 A ;
- ▷ le taux de distorsion harmonique est nul.

3. Pour le spectre représenté sur la **figure 3** :

- ▷ la valeur efficace du fondamental est $I_{1,\text{eff}} = 110 \text{ A}$;
- ▷ la valeur efficace du fondamental est $I_{1,\text{eff}} = 78 \text{ A}$;
- ▷ le taux de distorsion harmonique est supérieur à 91 %.

4. Pour les signaux représentés sur la **figure 4** (avec $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$ et $I_{\text{eff}} = 34 \text{ A}$) :

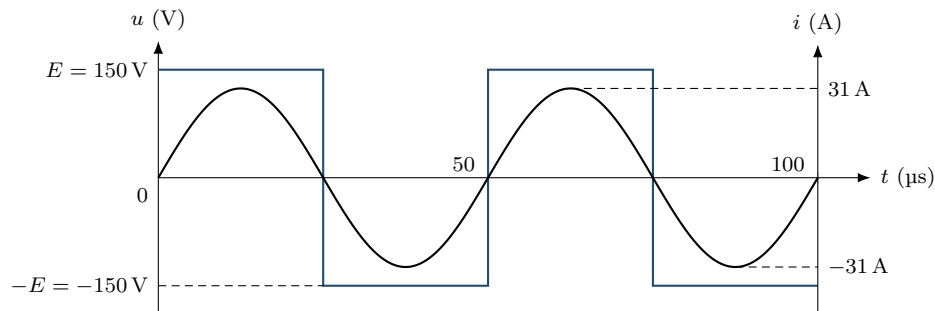
- ▷ la puissance apparente est $S = 7,82 \text{ kVA}$;
- ▷ la puissance déformante D est nulle ;
- ▷ le facteur de puissance est égal à 1.

5. Aux bornes d'un dipôle, la tension est sinusoïdale de valeur efficace $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$, la valeur efficace du fondamental du courant est $I_{1,\text{eff}} = 30 \text{ A}$, le facteur de déplacement en puissance est de 0,8 et le facteur de puissance est $f_p = 0,55$. Nous avons :

- ▷ la puissance active P qui vaut 5,5 kW ;
- ▷ la puissance apparente S qui vaut 6,9 kVA ;
- ▷ la puissance réactive Q qui vaut 4,1 kVAR ;
- ▷ la puissance déformante D qui vaut 740 VAD.

★ Exercice 5.2

L'onduleur de tension à résonance pour table à induction délivre une tension en forme de créneaux et un courant quasi-sinusoïdal à travers un inducteur. On représente sur la figure ci-dessous ces deux grandeurs électriques pour une fréquence correspondant à la puissance nominale.



Le développement en série de Fourier de cette tension $u(t)$ est donné par :

$$u(t) = \frac{4E}{\pi} \sin(\omega t) + \frac{4E}{3\pi} \sin(3\omega t) + \frac{4E}{5\pi} \sin(5\omega t) + \dots + \frac{4E}{(2k+1)\pi} \sin((2k+1)\omega t)$$

Cette décomposition ne fait apparaître que des harmoniques de rangs impairs.

1. Déterminez la fréquence f de ce signal créneau.
2. Donnez la valeur de $U_{1\max}$, l'amplitude du fondamental $u_1(t)$, celle de $U_{3\max}$, l'amplitude de l'harmonique de rang 3 $u_3(t)$ et celle de $U_{5\max}$, l'amplitude de l'harmonique de rang 5 $u_5(t)$.
3. Représentez sur le même graphique les signaux $u(t)$, $u_1(t)$ et $u_3(t)$.
4. Représentez le spectre en amplitude de la tension $u(t)$ en se limitant aux 3 premières raies.
5. Calculez les valeurs efficaces U_{eff} de la tension $u(t)$ et $U_{1\text{eff}}$ du fondamental $u_1(t)$.
6. Montrez que le taux de distorsion harmonique TDH_u est proche de 50 %. Conclure.
7. Déterminez la valeur efficace I_{eff} du courant et le déphasage Φ_1 (déphasage entre $i(t)$ et $u_1(t)$).
8. En déduire la valeur de la puissance active P transférée à l'inducteur.

★ Exercice 5.3

Sur la figure ci-dessous, on représente en fonction du temps un courant sous forme triangulaire :

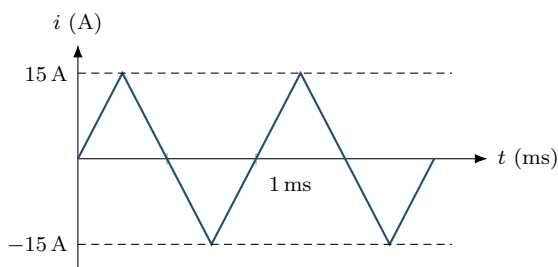


Figure 1

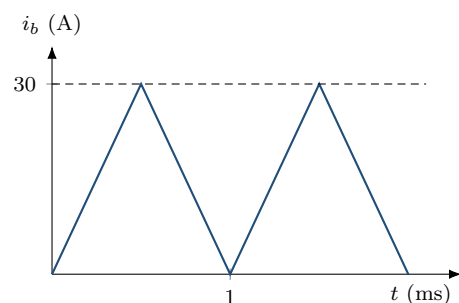


Figure 2

Le développement en série de Fourier du courant $i(t)$ est donné par :

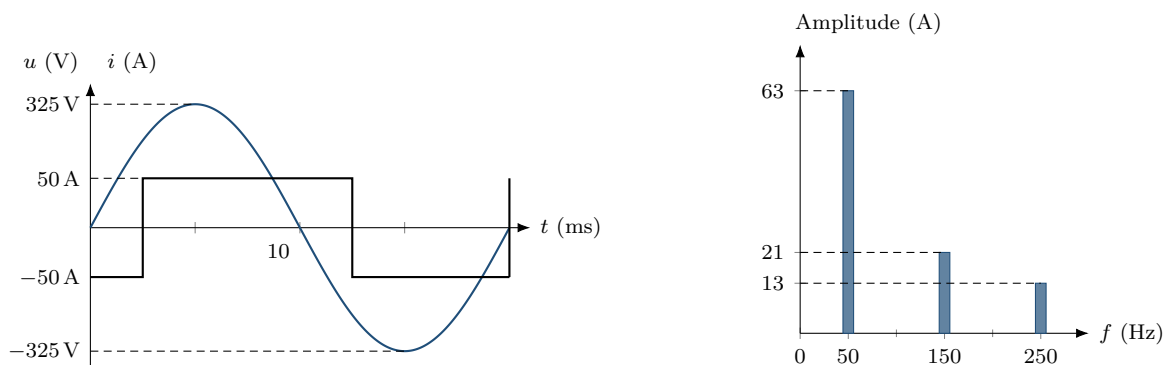
$$i(t) = \frac{8I}{\pi^2} \sin(\omega t) - \frac{8I}{3^2\pi^2} \sin(3\omega t) + \frac{8I}{5^2\pi^2} \sin(5\omega t) + \dots + (-1)^k \frac{8I}{(2k+1)^2\pi^2} \sin((2k+1)\omega t)$$

Cette décomposition ne fait apparaître que des harmoniques de rangs impairs. Par ailleurs, I représente l'amplitude du signal $i(t)$.

1. Déterminez la fréquence du courant $i(t)$.
2. Donnez la valeur de $I_{1\max}$, l'amplitude du fondamental $i_1(t)$, celle de $I_{3\max}$, l'amplitude de l'harmonique de rang 3 $i_3(t)$ et celle de $I_{5\max}$, l'amplitude de l'harmonique de rang 5 $i_5(t)$.
3. Représentez sur le même graphique les signaux $i(t)$, $i_1(t)$ et $i_3(t)$.
4. Représentez le spectre en amplitude du courant $i(t)$ en se limitant aux 3 premières raies.
5. Quelle différence a-t-on entre $i(t)$ et $i_b(t)$? En déduire le spectre en amplitude de $i_b(t)$.
6. Calculez les valeurs efficaces I_{eff} du courant $i(t)$ et $I_{1\text{eff}}$ du fondamental $i_1(t)$.
7. En déduire la valeur du taux de distorsion harmonique TDH_i .
8. Que représente le taux de distorsion d'un signal ? Pour un signal carré, le taux de distorsion est de l'ordre de 50 %. Analysez l'écart avec le taux de distorsion du signal triangulaire.

★ Exercice 5.4

La tension simple $u(t)$ et le courant $i(t)$ circulant en entrée d'un convertisseur sont représentés sur la figure de gauche ci-dessous. La figure de droite représente le spectre en amplitude de $i(t)$.

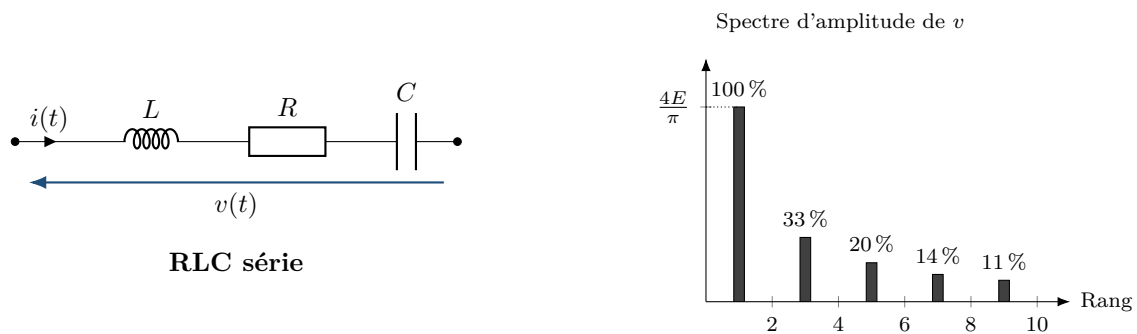


1. Calculez les valeurs efficaces U_{eff} et I_{eff} de la tension $u(t)$ et du courant $i(t)$.
2. Représentez sur le même graphique $u(t)$, $i(t)$ et $i_1(t)$.
3. Calculez la valeur efficace $I_{1\text{eff}}$ du fondamental du courant $i(t)$ et le déphasage Φ_1 (déphasage entre $i_1(t)$ et $u(t)$).
4. Calculez le taux de distorsion harmonique TDH_i du courant $i(t)$.
5. Calculez les puissances : apparente S ; active P ; réactive Q et déformante D .
6. Montrez que le facteur de puissance est $f_p \approx 0,64$. Sur quelle grandeur doit-on agir pour améliorer ce facteur de puissance ?

★ Exercice 5.5

Dans un système de cuisson par induction, les échanges d'énergie s'effectuent entre la charge (le récipient et son contenu) et un inducteur. Cet ensemble, qui se comporte comme une charge inductive, est mis en série avec un condensateur et alimenté par un onduleur, comme le représente la figure ci-

dessous. Des informations du constructeur donnent, pour un réceptif défini : $R = 2,4\,\Omega$, $L = 50\,\mu\text{H}$ et $C = 1,2\,\mu\text{F}$.



On considère que l'onduleur fournit une tension sinusoïdale de valeur efficace V .

1. Exprimez l'impédance complexe $\underline{Z}$ associée au montage RLC série.
2. En déduire une expression de son module, noté Z , en fonction de R , L , C et ω .
3. À partir de la relation liant Z , I et V , exprimez la valeur efficace I du courant $i(t)$ en fonction de V , R , L , C et ω .
4. Calculez la pulsation de résonance du RLC série donnée par la relation $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

La tension alternative délivrée par l'onduleur n'est pas sinusoïdale mais correspond à un signal en créneaux d'amplitude $E = 300\text{ V}$ et de période $T = 38,5\,\mu\text{s}$. Le spectre en amplitude de $v(t)$ est représenté ci-dessus.

5. Précisez les pulsations ω_1 , ω_3 et ω_5 et les amplitudes V_{H1} , V_{H3} , V_{H5} des harmoniques de tension de rangs 1, 3 et 5.
6. Calculez l'amplitude du courant fondamental I_{H1} , généré par la tension fondamentale V_{H1} .
7. Calculez l'amplitude du courant I_{H3} , généré par la tension V_{H3} (harmonique de rang 3).
8. Calculez l'amplitude du courant I_{H5} , généré par la tension V_{H5} (harmonique de rang 5).
9. Représentez le spectre du courant $i(t)$ jusqu'au rang 5. Expliquez pourquoi le courant $i(t)$ est quasiment sinusoïdal alors que la tension ne l'est pas.

★ Exercice 5.6 : BTS 2011

Influence du système de chauffage et du variateur de vitesse sur les contraintes de fonctionnement du réseau

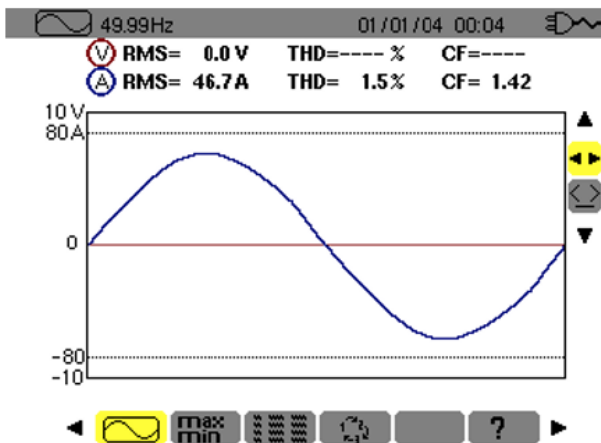
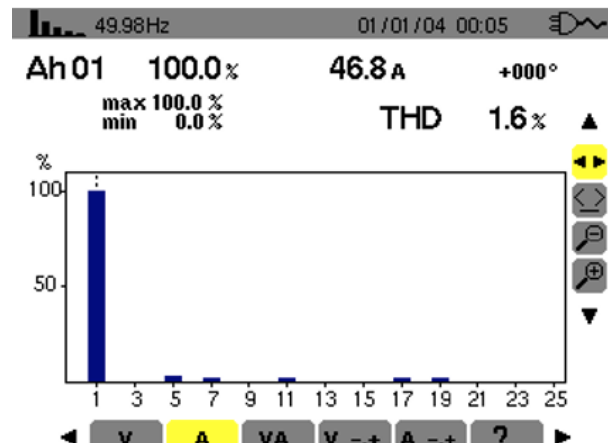
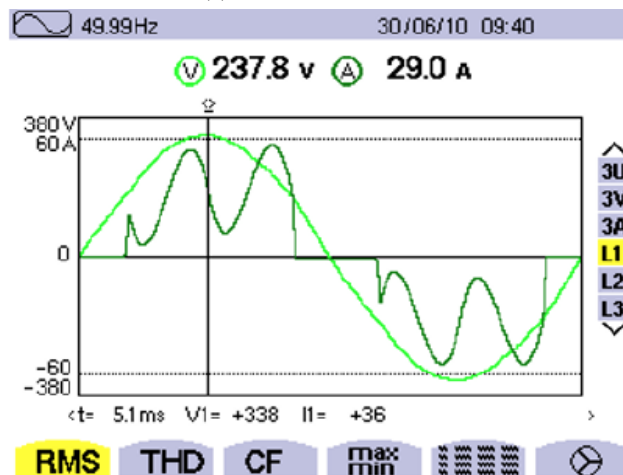
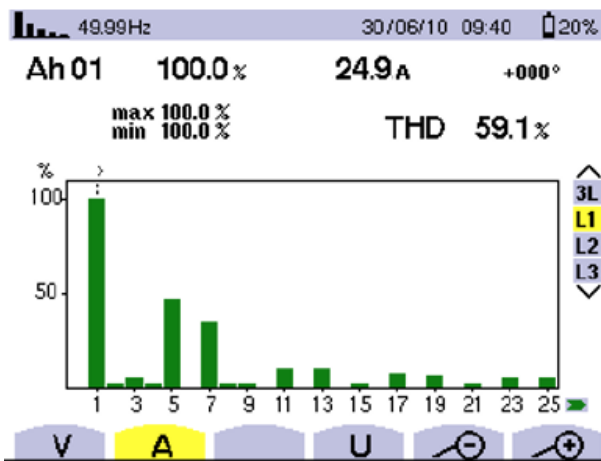
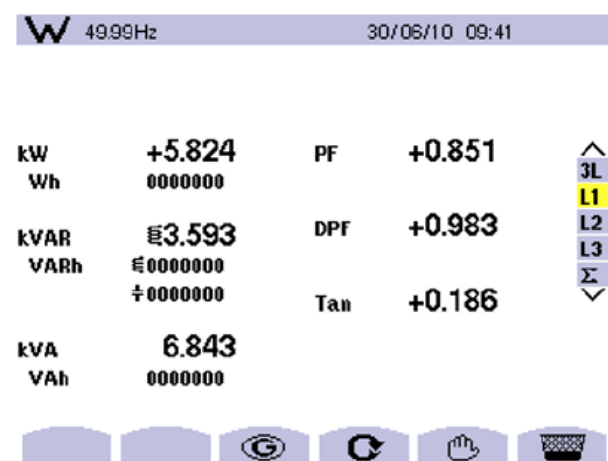
Nous allons étudier dans cette partie les conséquences de l'installation du réchauffeur et du variateur de vitesse sur les contraintes pesant sur le réseau d'alimentation électrique, notamment en termes de pollution harmonique.

Un analyseur a permis d'effectuer les relevés présentés ci-dessous. Les différentes puissances sont données pour une phase du réseau.

Les tensions délivrées par le réseau sont considérées comme sinusoïdales. Sur l'analyseur, l'indication délivrée en kVAR sur l'écran 5 correspond au bilan des puissances réactive et déformante. On notera par la suite cette grandeur Q'_1 .

On rappelle la relation donnant le taux de distorsion harmonique d'un courant i noté THD_i et sa valeur efficace I :

$$THD_i = 100 \times \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} (\%) \quad I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}$$

Courant de ligne $i_r(t)$ en entrée du réchauffeurÉcran 1 (courant $i_r(t)$)Écran 2 (spectre de $i_r(t)$)Courant de ligne $i_v(t)$ et puissances en entrée du variateurÉcran 3 (tension $v_1(t)$ et courant $i_v(t)$)Écran 4 (spectre de $i_v(t)$) – on note I_{vHn} la valeur efficace des composantes de rang n 

Écran 5 (puissances absorbées par une phase du variateur)

I- Analyse des relevés en entrée du réchauffeur

1. Que peut-on dire de l'allure du courant $i_r(t)$? Son spectre est-il en accord ?
2. Donnez la valeur efficace I_r de ce courant de ligne puis calculez sa valeur maximale $I_{r,max}$.

3. Le réchauffeur génère-t-il une pollution harmonique sur le réseau ?

II- Analyse des relevés en entrée du variateur

1. L'allure du courant $i_v(t)$ est-elle en accord avec son spectre ?
2. Relevez la valeur efficace I_v du courant de ligne $i_v(t)$.
3. Donnez les fréquences des deux harmoniques de courant les plus polluants pour le réseau, puis estimez leurs valeurs efficaces grâce au spectre de $i_v(t)$.
4. Calculez le taux de distorsion harmonique THD_{iv} en ne tenant compte que des harmoniques citées. Comparez ce résultat à celui relevé par l'analyseur.
5. À l'aide du relevé d'écran 5, donnez la valeur du facteur de déplacement DPF que l'on notera par la suite $\cos \Phi_1$. Que représente physiquement cette grandeur ?
6. Donnez deux expressions possibles de la puissance active P_1 consommée par une phase du variateur en fonction du facteur de puissance (que l'on notera f_p) puis du facteur de déplacement $\cos \Phi_1$.
7. Calculez la valeur de cette puissance P_1 dans les deux cas. Aux erreurs de mesures près, on constate que ces valeurs sont identiques. Quelle est la propriété illustrée ici, quant à la puissance active transmise par les harmoniques de courants ?
8. Déterminez la valeur de la puissance déformante D_1 pour une phase. Retrouvez la valeur Q'_1 affichée sur l'analyseur.
9. Déterminez les valeurs des puissances active, réactive, apparente et déformante, respectivement P , Q , S et D , consommées globalement par le variateur.
10. Quelles nouvelles contraintes sont imposées au réseau électrique d'alimentation par l'utilisation de ce variateur ? Proposez des solutions permettant de réduire éventuellement ces contraintes.

★ Exercice 5.7 : BTS 2021

Lorsque les pompes fonctionnent, elles sont alimentées par des variateurs. Ce dispositif génère de la pollution harmonique sur les courants absorbés. Par contre, on suppose que les tensions restent sinusoïdales. On donne ci-dessous les mesures effectuées en entrée du variateur.

I_{RMS} (A)	172,1
I_1 (A)	155,2
THD_i (%)	47,8
U_{RMS} (V)	399,6
THD_v (%)	1,47
P (kW)	105,3
S (kVA)	119,1

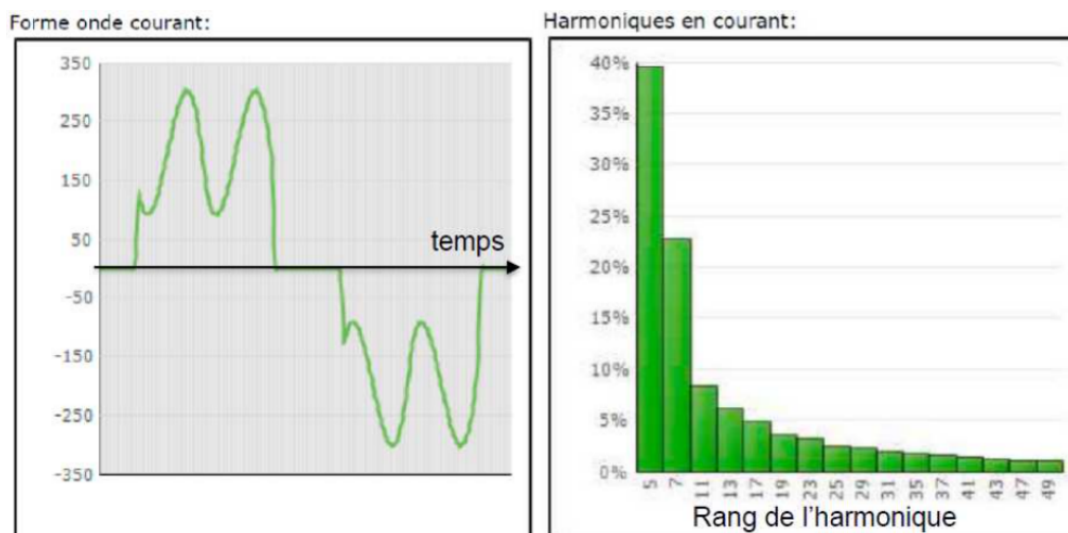
Le taux de distorsion harmonique (THD) peut se calculer de deux manières :

$$THD_i = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

où I est la valeur efficace du courant i dans un fil de ligne et I_n la valeur efficace de l'harmonique de rang n de i .

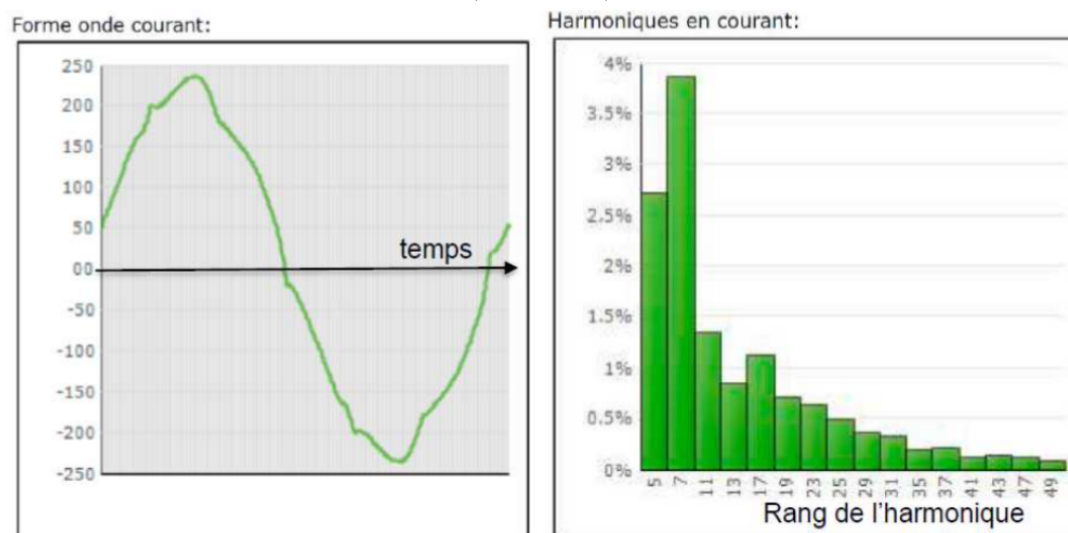
Annexe n°3 – Forme d'onde et spectre du courant absorbé par une phase du variateur (sans filtre).

Les valeurs efficaces des harmoniques sont exprimées en pourcentage du fondamental du courant ($I_1 = 100\%$).



Annexe n°4 – Forme d'onde et spectre du courant absorbé par une phase du variateur (avec filtre passif).

Les valeurs efficaces des harmoniques sont exprimées en pourcentage du fondamental du courant ($I_1 = 100\%$).



Document réponse n°3

	P (kW)	$\cos \Phi$	D (kVAD)	Q (kVAR)	S (kVA)	P_u (kW)	rendement
pompe + variateur	212	0,98	103	43		196	0,924
ventilation + variateur		0,98	4,5	1,6	9,4	7,5	0,924
agitateur	20	0,82	0		24	14	0,7
autres	40	0,8	0	30	50		
TOTAL			107,5				

I- Détermination du facteur de puissance de l'installation avec les pompes

Un bilan de puissance des différents systèmes constituant l'installation a été fait suite à l'augmentation de la hauteur du bassin et le remplacement des agitateurs (voir document réponse n°3). Il est rappelé que la puissance apparente S est déterminée à partir de la puissance active P , réactive Q et déformante D par la relation : $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$.

1. Complétez le document réponse n°3 avec les valeurs manquantes de P , Q et S .

2. Calculez pour l'installation les puissances totales active P_T et réactive Q_T . En déduire la puissance apparente totale S_T (vous complétez le document réponse n°3).
3. Calculez le facteur de puissance f_P et le facteur de déplacement $\cos \Phi$ global de l'installation. Commentez ces deux valeurs.

II- Analyse du courant en entrée de variateur

1. À partir des mesures des valeurs efficaces des courants, retrouvez par le calcul la valeur du THD_i indiqué dans le tableau.
2. À partir des mesures, retrouvez par le calcul les valeurs des puissances active P et apparente S indiquées.
3. La forme d'onde et le spectre du courant absorbé par une phase du variateur sont donnés en annexe n°3. Donnez les valeurs efficaces (en A) et les fréquences (en Hz) des deux harmoniques les plus importants.
4. Afin de corriger le problème lié à la présence d'harmoniques, le CCTP impose l'utilisation d'un filtre. On donne en annexe n°4 la forme d'onde et le spectre du nouveau courant absorbé par une phase du variateur, obtenu avec l'installation d'un filtre passif. Au regard des annexes n°3 et n°4, commentez les améliorations apportées par le filtre. En particulier, précisez si le filtre agit sur un harmonique de rang particulier ou sur l'ensemble des harmoniques.
5. Le bureau d'étude propose une deuxième solution utilisant un filtre actif. Expliquez brièvement le principe de fonctionnement d'un filtre actif et d'un filtre passif. Citez les avantages d'un filtre actif.

★ Exercice 5.8 : BTS 2019

On a relevé à l'entrée du variateur (ATV 71), les formes d'onde du courant $i_1(t)$ et de la tension $v_{1N}(t)$ de la phase 1 (voir figure ci-dessous), leurs spectres ainsi que les puissances lors de la mise en service de 52 bobines (voir annexe n°2).

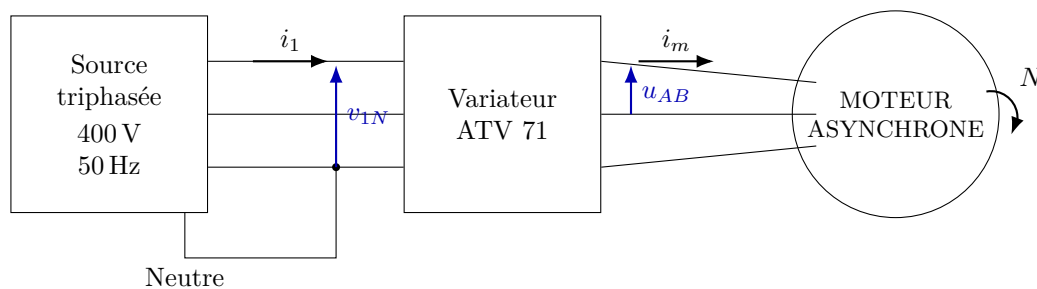
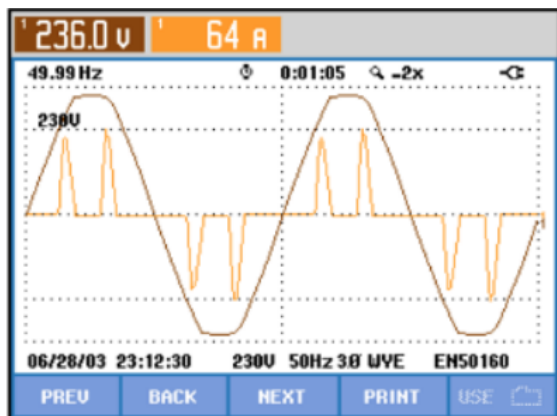
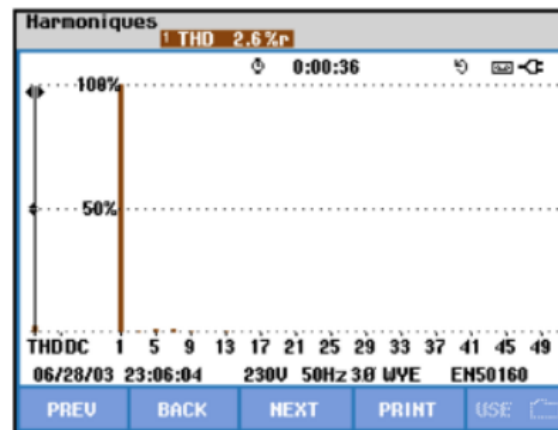


Fig. 2 – Moteur asynchrone associé à son variateur.

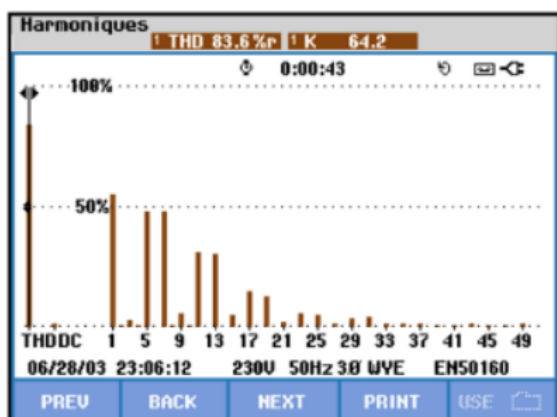
Annexe n°2 – Relevés à l'entrée du variateur (côté source triphasée) pour 52 bobines



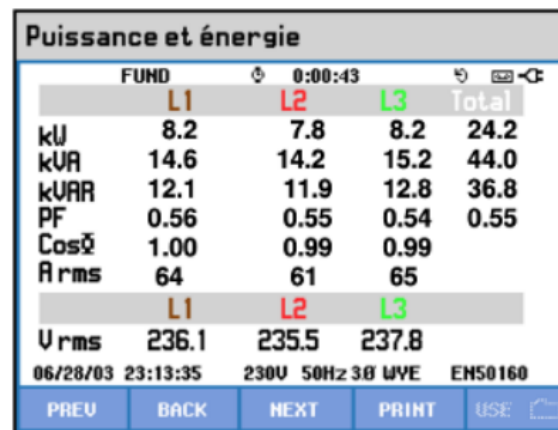
Formes d'onde du courant $i_1(t)$ et de la tension $v_{1N}(t)$ de la phase 1.



Spectre de la tension $v_{1N}(t)$ avec $V_{RMS} = 236$ V.



Spectre du courant $i_1(t)$ avec un fondamental de valeur efficace $H1 = 34,9$ A. L'amplitude des raies est exprimée en pourcent de la valeur efficace I_1 .



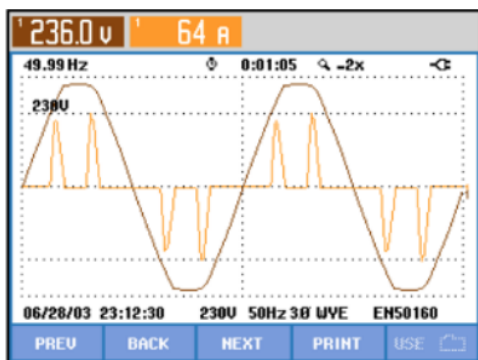
Valeurs des différentes puissances (écran « Puissance et énergie »).

Pour les appareils absorbant un courant supérieur à 16 A et inférieur ou égal à 75 A, valeur maximale admissible $\frac{I_H}{I}$ en % :

I_3/I en %	I_5/I en %	I_7/I en %	I_9/I en %	I_{11}/I en %	I_{13}/I en %
27	15	10	6	5	4

Document réponse n°3

Allure du fondamental de $i_1(t)$



Document réponse n°4

Valeur efficace des harmoniques à l'entrée du variateur

Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11	13
Fréquence (Hz)							
Valeur efficace (A)							

- Repérez, sur le document réponse n°3, le signal de la tension $v_{1N}(t)$ et du courant $i_1(t)$. Justifiez la réponse.

2. Déterminez les valeurs efficaces des premiers harmoniques de courant et renseignez le tableau dans le document réponse n°4. (On pourra négliger l'harmonique si sa valeur efficace est inférieure à 5 A.)
3. Respecte-t-on les normes ? Justifiez la réponse.
4. Que représentent PF et le Φ du $\cos \Phi$ de l'écran « Puissance et énergie » de l'annexe n°2 ?
5. Déterminez le déphasage Φ_f existant entre la tension simple v_{1N} et le fondamental du courant en ligne i_{1f} en justifiant la réponse. Tracez sur la forme d'onde de i_1 , la forme d'onde de i_{1f} (document réponse n°3).
6. Sur l'écran « Puissance et énergie » de l'annexe n°2, la puissance réactive Q' relevée sur la ligne L1 tient compte de la puissance réactive Q due au fondamental du courant et de la puissance déformante D due aux autres harmoniques de courant. La puissance réactive Q' est-elle majoritairement due au fondamental des courants ou aux autres harmoniques des courants ? Justifiez la réponse.
7. Relevez le taux de distorsion harmonique du courant en ligne. Proposez une solution pour réduire ce taux.

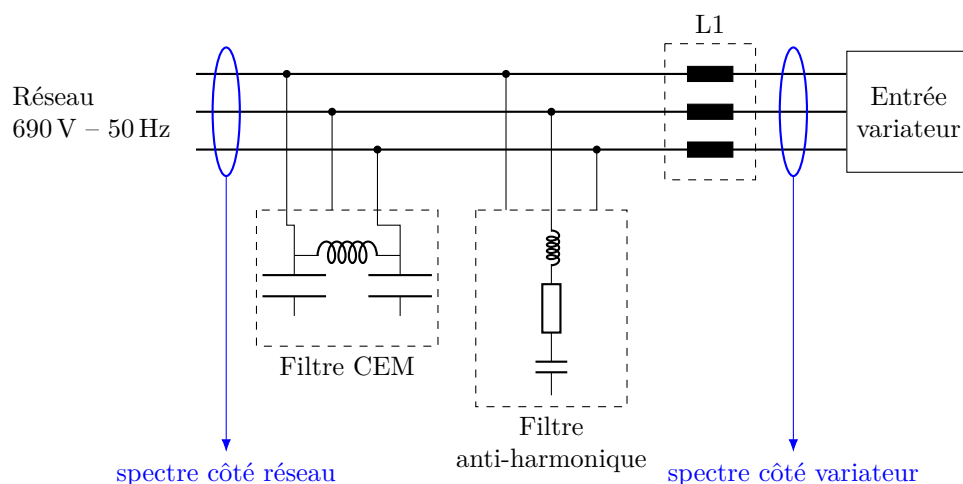
★ Exercice 5.9 : BTS 2020

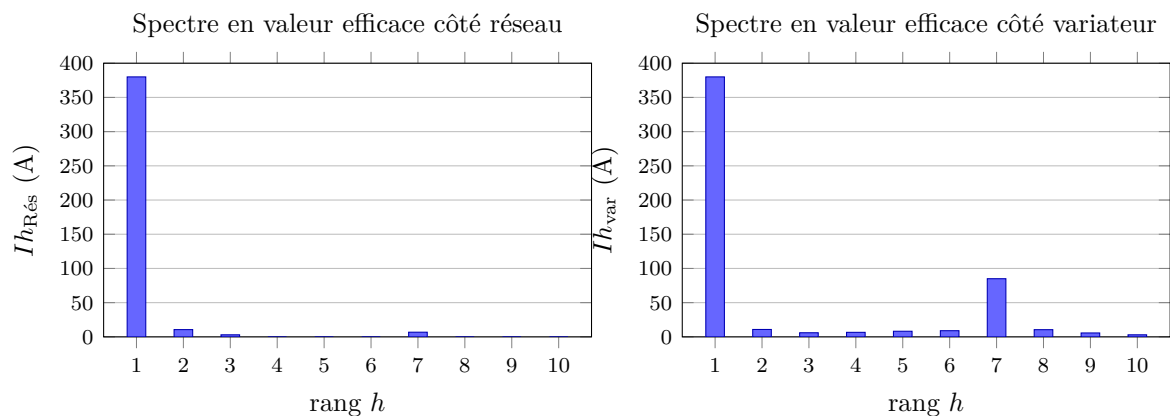
On rappelle que la station de captage de Mauves-sur-Loire comporte 3 unités de pompage. Chaque unité comprend une pompe entraînée par un moteur asynchrone alimenté par son variateur permettant un débit variable.

$$THD = 100 \times \frac{\sqrt{S_{\text{eff}}^2 - S_1^2}}{S_1}$$

où S_{eff} est la valeur efficace du signal $s(t)$ et S_1 la valeur efficace de son fondamental.

Annexe 2 : mesures réalisées sur le variateur

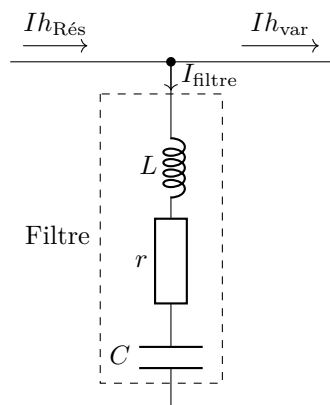




Rang h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Ih_{R\acute{e}s}$ (A)	380	10,6	3	0	0	0	6,8	0	0	0
Ih_{var} (A)	380	10,8	6	6,6	8,2	9	85	10,5	5,7	3

Mesures	Côté réseau	Côté variateur
Tension composée (V)	690	
Courant efficace en ligne (A)	380,4	390
THD courant %	4,6	
PF	0,98	0,945
PFD	0,99	
P (kW)		445

Annexe 3 : modélisation monophasée du filtre anti-harmonique entre une phase et le neutre.



Dimensionnement		
$r = 100 \text{ m}\Omega$	$C = 220 \text{ }\mu\text{F}$	$L = 0,94 \text{ mH}$

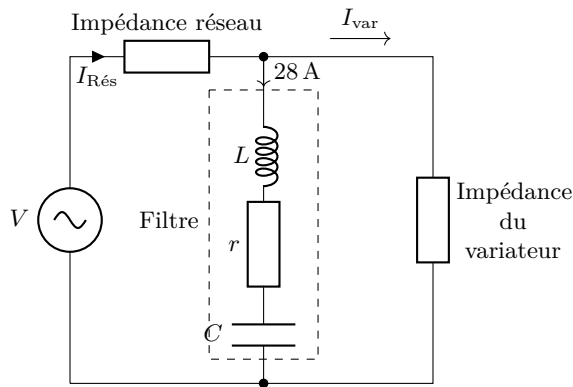
Expression de l'impédance du filtre :

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

Pulsation de résonance : $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Rappel : $\omega = 2\pi f$

Document réponse n°2 – Modélisation monophasée du filtre anti-harmonique entre une phase et le neutre pour le fondamental



Bilan de puissance de l'ensemble du filtre triphasé pour le fondamental :

	Puissance active consommée (W)	Puissance réactive consommée (var)
Inductances		
Résistances		
Condensateurs		
Total du filtre		

Le schéma d'implantation des filtres est donné en annexe 2. On dispose également des relevés du spectre du courant sur une phase en amont des filtres (côté réseau) et en aval (côté variateur qui contient un autre filtre non étudié ici).

1. Calculez le taux de distorsion harmonique du courant de phase côté variateur $THD_{i\text{ var}}$.
2. En utilisant les données de l'annexe 2, calculez la puissance active $P_{\text{réseau}}$ fournie par le réseau et en déduire la puissance active P_{filtres} consommée par les filtres.
3. Parmi les problèmes listés ci-dessous, citez-en deux liés à un THD trop important : modification de la séquence du réseau ; surdimensionnement de certains équipements ; vieillissement accéléré des éléments du réseau ; perturbation des appareils électroniques.
4. Le filtre anti-harmonique est composé de trois branches identiques couplées en étoile sur le réseau de tension efficace composée $U = 690 \text{ V}$. Le modèle monophasé d'une branche est donné sur l'annexe 3. En comparant les 2 spectres en courant de l'annexe 2, donnez la fréquence de l'harmonique éliminé par le filtre.
5. À partir des caractéristiques du filtre données à l'annexe 3, calculez sa pulsation de résonance ω_0 et vérifiez qu'il est bien accordé pour éliminer cet harmonique.
6. On étudie maintenant le comportement du filtre pour la composante fondamentale de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$. En calculant pour cette fréquence l'impédance Z du filtre monophasé, montrez en détaillant les étapes du calcul que la valeur efficace de la composante fondamentale du courant qui traverse chaque branche du filtre vaut $I_f = 28 \text{ A}$.
7. Citez le ou les élément(s) du filtre qui consomme(nt) de la puissance réactive.
8. Sur le document réponse n°2, faites le bilan de puissance de l'ensemble du filtre triphasé pour le fondamental.
9. Interprétez l'action des condensateurs du filtre sur le facteur de puissance de l'installation.

★ Exercice 5.10 : BTS 2020

L'arrêté du 17 mars 2003 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement au réseau public de distribution d'une installation de consommation d'énergie électrique fixe des limites pour les courants harmoniques injectés sur le réseau.

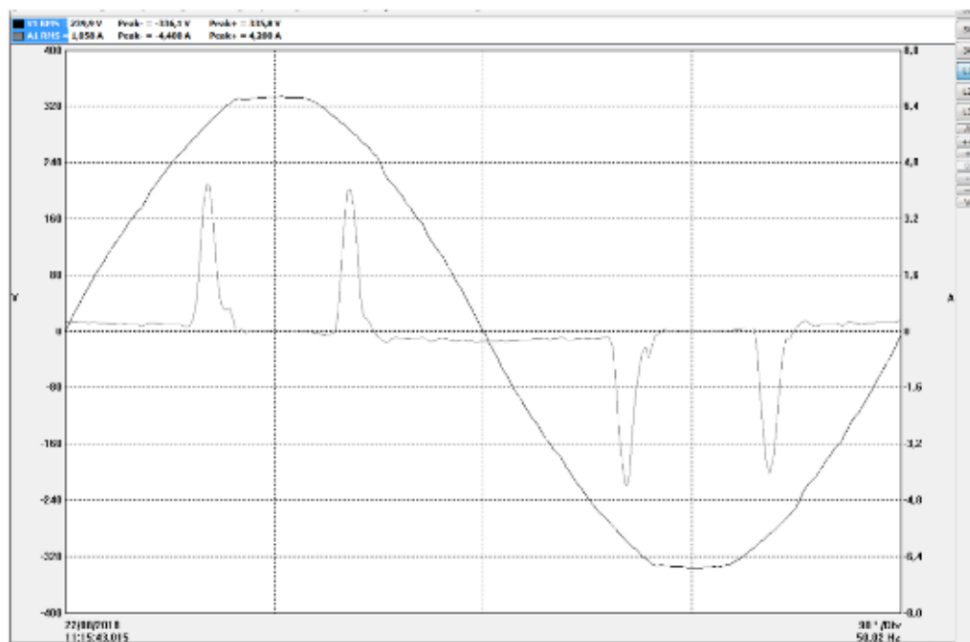
Harmoniques : le gestionnaire d'une installation de consommation de puissance souscrite supérieure à 100 kV · A doit limiter les courants harmoniques injectés sur ce réseau. Les limites sont déterminées au prorata de la puissance souscrite S_{ref} . À chaque harmonique de rang n est associé un coefficient de limitation K_n . Le gestionnaire de l'installation doit limiter ses courants harmoniques I_{Hn} à la valeur :

$$I_{Hn} = K_n \cdot I_{\text{ref}} \quad (I_{\text{ref}} \text{ correspondant au courant de ligne à la puissance souscrite } S_{\text{ref}})$$

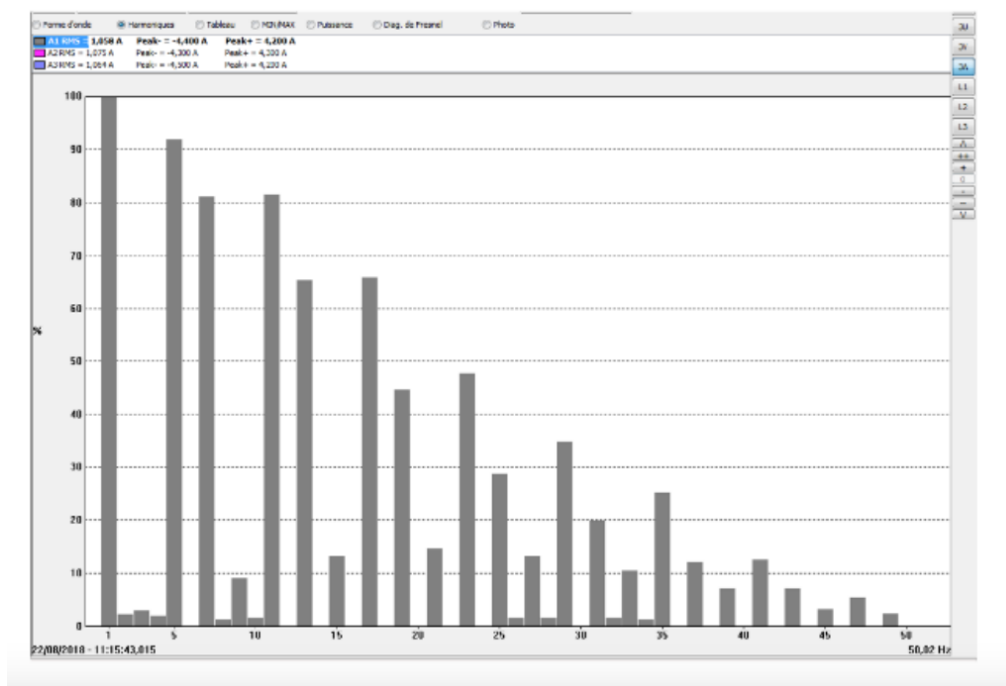
Rangs impairs	K_n (%)	Rangs pairs	K_n (%)
3	4,0	2	2,0
5 et 7	5,0	4	1,0
9 et > 13	2,0	> 4	0,5
11 et 13	3,0		

Tab. 1 – Coefficient de limitation pour chaque harmonique (figure 6 du sujet).

Annexe 2 : écran « forme d'onde » d'un analyseur de réseau : tension simple et courant entrant sur la phase 1 d'un variateur de vitesse pour une vitesse de 8,0 tr/min (échelle de gauche : tension en V ; échelle de droite : courant en A ; 90°/div).



Annexe 3 : écran « harmoniques » d'un analyseur de réseau : représentation spectrale en pourcentage du fondamental du courant entrant sur la phase 1 du variateur de vitesse pour une vitesse de 8,0 tr/min.



Annexe 4 : écran « puissances » d'un analyseur de réseau branché sur un variateur de vitesse pour une vitesse de 8,0 tr/min.

Voie	W	var	VA	PF	DPF	Tan
L1	105	-42	250	0,421	0,929	-0,399
L2	105	-38	249	0,422	0,941	-0,36
L3	108	-42	252	0,429	0,932	-0,389
Total	319	-121	751	0,424	0,934	-0,382

Document réponse 4 : valeurs efficaces maximales autorisées pour les harmoniques

Rangs impairs	K_n (%)	I_{Hn} maximum	Rangs pairs	K_n (%)	I_{Hn} maximum
3	4,0		2	2,0	12 A
5 et 7	5,0		4	1,0	6 A
9 et > 13	2,0		> 4	0,5	3 A
11 et 13	3,0	18 A			

Document réponse 5 : valeurs efficaces des harmoniques les plus importants pour un puis pour 48 variateurs permettant une agitation à 8,0 tr/min

Rang de l'harmonique	I_{Hn} pour un variateur	I_{Hn} pour 48 variateurs
5		
7		
11	0,39 A	19 A
13	0,31 A	15 A

Le domaine a une puissance souscrite $S_{\text{ref}} = 422 \text{ kV} \cdot \text{A}$ et est connecté à un réseau triphasé dont la valeur efficace de la tension simple a été mesurée à 240 V.

1. Montrez que la valeur efficace de l'intensité du courant I_{ref} correspondant à la puissance souscrite S_{ref} est $I_{\text{ref}} = 586 \text{ A}$.
2. Calculez, à l'aide de cette valeur et des pourcentages donnés figure 6, les valeurs efficaces maximales autorisées des courants harmoniques. Reportez ces valeurs sur le document réponse 4.

On donne en annexe 2 le relevé de la forme d'onde de la tension et de l'intensité du courant appelé par le variateur de vitesse pour une vitesse d'agitation $n_{\text{agit}} = 8,0 \text{ tr/min}$; en annexe 3 la représentation spectrale de l'intensité du courant appelé par la phase 1. Enfin, on donne en annexe 4 l'écran « puissances » d'un analyseur de réseau triphasé branché sur un variateur de vitesse pour une vitesse d'agitation $n_{\text{agit}} = 8,0 \text{ tr/min}$.

3. Commentez l'importance des harmoniques de rangs multiples de 3.
Les premiers harmoniques à surveiller pour respecter cet arrêté sont ceux de rang 5, 7, 11 et 13.
4. À partir de l'annexe 4, montrez que la valeur efficace du fondamental du courant dans la phase 1 est $I_{1f} = 0,47 \text{ A}$.
5. Utilisez cette valeur I_{1f} et la représentation spectrale de l'intensité du courant appelé par la phase 1 donnée en annexe 3 pour calculer les valeurs efficaces des harmoniques à surveiller pour respecter cet arrêté. Complétez la colonne « I_{Hn} pour un variateur » sur le document réponse 5 (calculs et résultats).

Après équipement de toutes les cuves, 48 variateurs seront commandés pour une utilisation simultanée. Dans le cas le plus défavorable, on admet que les courants de même fréquence sur une ligne sont en phase et que leurs valeurs efficaces s'additionnent.

6. Calculez les valeurs efficaces des harmoniques générés lorsque les 48 variateurs fonctionneront simultanément. Complétez la colonne « I_{Hn} pour 48 variateurs » du document réponse 5.
7. Comparez ces valeurs aux valeurs maximales autorisées par l'arrêté du 17 mars 2003. Conclure sur le respect de l'arrêté et faire d'éventuelles propositions.

★ Exercice 6.1

Pour chacune des situations suivantes, indiquez, **en justifiant**, la ou les bonnes réponses.

1. **Un moteur à courant continu à excitation indépendante est alimenté sous tension nominale $U_n = 190 \text{ V}$. Il entraîne une charge exerçant un couple résistant de $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ à la fréquence de rotation $N = 1\,500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$. L'intensité du courant d'induit vaut alors $I = 3,5 \text{ A}$ et la résistance de l'enroulement d'induit est $R = 4,3 \Omega$.**
 - ▷ La puissance utile P_u développée par le moteur est de 380 W .
 - ▷ Le rendement η du moteur est de $70,9 \%$.
 - ▷ Le moment du couple électromagnétique est de $3,9 \text{ N} \cdot \text{m}$.
2. **Un moteur à courant continu à aimants permanents, alimenté sous tension nominale $U_n = 12 \text{ V}$, développe une puissance utile $P_u = 30 \text{ W}$. Sa résistance d'induit R vaut $0,6 \Omega$, l'intensité du courant d'induit est $I = 3,4 \text{ A}$ et sa vitesse de rotation Ω est de $104,7 \text{ rad/s}$.**
 - ▷ La constante de f.é.m du moteur est $k = 88 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{s/rad}$.
 - ▷ Les pertes par effet Joule dans l'induit valent 11 W .
 - ▷ Le moment du couple de pertes vaut environ $37 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$.
3. **Un moteur à courant continu à aimants permanents, alimenté en tension nominale $U_n = 24 \text{ V}$, entraîne une charge exerçant un couple résistant de $1,2 \text{ N} \cdot \text{m}$. Sa résistance d'induit R vaut $2,7 \Omega$, sa constante de couple k vaut $0,8 \text{ N} \cdot \text{m/A}$ et le couple de pertes est négligé.**
 - ▷ L'intensité du courant d'induit est de $0,5 \text{ A}$.
 - ▷ La f.é.m d'induit E vaut 12 V .
 - ▷ Le moteur tourne à la vitesse angulaire de rotation $\Omega \approx 25 \text{ rad/s}$.
4. **Un moteur à courant continu, à excitation indépendante et constante, a une résistance d'induit $R = 80 \text{ m}\Omega$ et une constante de f.é.m $k = 0,38 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$. Alimenté sous tension nominale $U_n = 24 \text{ V}$, il entraîne, à la vitesse $\Omega = 52,3 \text{ rad/s}$, une charge exerçant un couple résistant de moment $C_r = 19 \text{ N} \cdot \text{m}$.**
 - ▷ La f.é.m d'induit est $E = 15 \text{ V}$.
 - ▷ L'intensité du courant d'induit est $I = 51,6 \text{ A}$.
 - ▷ Le rendement η est de $80,2 \%$.

★ Exercice 6.2

On dispose d'un moteur à courant continu à excitation indépendante qui est utilisé en mode moteur. La résistance de l'induit est $R = 1,2 \Omega$ et la constante de f.é.m k vaut $1,465 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$.

1. Le moteur fonctionne d'abord à vide ; l'intensité du courant dans l'induit est $I_0 = 1,5 \text{ A}$ et la tension à ses bornes est $U_0 = 220 \text{ V}$. Calculez la valeur des différentes grandeurs suivantes :
 - ▷ la force électromotrice E_0 ;
 - ▷ les pertes par effet Joule dans l'induit P_0 ;
 - ▷ la fréquence de rotation Ω_0 (en rad/s) puis n_0 (en $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$) ;
 - ▷ le moment du couple utile C_u puis la puissance utile P_u ;
 - ▷ la somme des pertes mécaniques et des pertes fer ($P_m + P_f$) ;
 - ▷ le moment du couple de pertes C_p correspondant aux pertes mécaniques et pertes fer.
2. Le moteur fonctionne maintenant en charge ; la tension d'alimentation de l'induit est $U = 220 \text{ V}$ et l'intensité du courant qui le traverse est $I = 10 \text{ A}$. Le moment C_p sera le même que précédemment. Calculez la valeur des différentes grandeurs suivantes :
 - ▷ la force électromotrice E ;
 - ▷ la fréquence de rotation Ω (en rad/s) puis n (en $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$) ;
 - ▷ le moment du couple électromagnétique C_{em} ;
 - ▷ le moment du couple utile C_u puis la puissance utile P_u ;
 - ▷ le rendement η .

★ Exercice 6.3

Un scooter électrique fonctionne grâce à un moteur à courant continu à excitation indépendante dont les caractéristiques sont les suivantes :

$U_n = U_{ex} = 18 \text{ V}$; $I_n = 100 \text{ A}$; $R = 0,05 \Omega$; $I_{ex} = 1,5 \text{ A}$; $n_n = 800 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ pour un scooter qui roule à $45 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

1. Représentez le modèle équivalent de l'induit et de l'inducteur du moteur.
2. Déterminez la f.é.m E de l'induit.
3. À l'aide des données du problème, calculez la valeur de la constante k .
4. En déduire la relation littérale puis numérique de la fonction $n = f(U)$ pour $I = I_n$.
5. Représentez alors sur un graphique cette caractéristique.
6. Déterminez la tension U_d , tension de démarrage du moteur pour $I = I_n$.
7. Déterminez les pertes par effet Joule de l'induit P_{j1} puis de l'inducteur P_{j2} .
8. Sachant que les pertes collectives sont estimées à $P_c = 340 \text{ W}$, déterminez la puissance utile P_u après avoir représenté le bilan des puissances sous la forme d'un schéma.
9. En déduire le rendement du moteur η_n dans les conditions nominales.
10. Enfin, déterminez le couple utile C_{un} du moteur.

★ Exercice 6.4

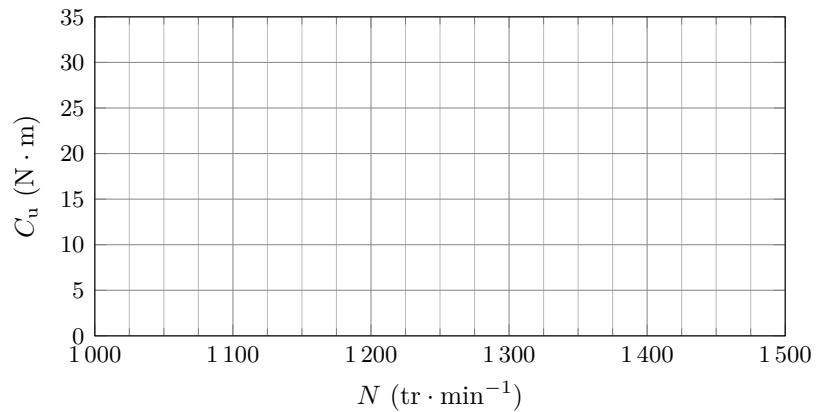
Pour chacune des situations suivantes, indiquez, **en justifiant**, la ou les bonnes réponses.

1. **Un moteur asynchrone à deux paires de pôles est alimenté par un réseau 50 Hz. Sa fréquence de rotation nominale est de $1\,420 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.**
 - ▷ La valeur nominale du glissement g_n est de 6,5 %.
 - ▷ La valeur nominale du glissement g_n est de 5,3 %.
 - ▷ La valeur nominale du glissement g_n est de 9,6 %.
2. **Un moteur asynchrone à quatre pôles est alimenté par un réseau 50 Hz.**
 - ▷ Sa fréquence de rotation de synchronisme N_s vaut $750 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
 - ▷ Sa fréquence de rotation de synchronisme N_s vaut $3\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
 - ▷ Sa fréquence de rotation de synchronisme N_s vaut $1\,500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
3. **Une fraiseuse cinq axes est équipée d'un moteur asynchrone à deux paires de pôles dont les caractéristiques nominales sont : le couple utile nominal $C_{un} = 87 \text{ N} \cdot \text{m}$; la fréquence nominale des courants statoriques $f_n = 97,5 \text{ Hz}$ et le glissement nominal $g_n = 4,27 \%$. Toutes les pertes, exceptées celles par effet Joule au rotor, sont négligées.**
 - ▷ La fréquence de rotation nominale est $N_n = 2\,800 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
 - ▷ La fréquence de rotation de synchronisme est $N_s = 2\,925 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
 - ▷ La puissance utile nominale est $P_{un} = 20,3 \text{ kW}$.
4. **Pour le moteur de la question précédente, la puissance nominale transmise au rotor est $P_{trn} = 26,7 \text{ kW}$. Au fonctionnement nominal :**
 - ▷ Les pertes par effet Joule au rotor valent environ 1,2 kW.
 - ▷ La puissance absorbée est $P_{an} = 27,8 \text{ kW}$.
 - ▷ Le rendement du moteur est $\eta_n \approx 0,96$.
5. **La plaque signalétique d'un moteur asynchrone porte les indications suivantes : $V_n = 230 \text{ V}$, $I_n = 106 \text{ A}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $P_{un} = 55 \text{ kW}$, $N_n = 1\,460 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ et $\cos \Phi = 0,81$.**
 - ▷ Le moment du couple utile nominal est $C_{un} = 360 \text{ N} \cdot \text{m}$.
 - ▷ La puissance nominale absorbée est $P_{an} = 59,2 \text{ kW}$.
 - ▷ Le rendement nominal est de 90 %.

★ Exercice 6.5

Un système de levage est équipé d'un treuil entraîné par une machine asynchrone dont la plaque signalétique est reproduite ci-dessous (à gauche) :

5 kW 1 460 tr.min⁻¹
 cos Φ 0,8 50 Hz
 230 V/400 V
 18,7 A/10,8 A



La charge mécanique exerce sur l'arbre de la machine asynchrone un couple de moment $C_R = 20 \text{ N} \cdot \text{m}$. Dans un premier temps, le moteur est alimenté par un réseau triphasé 400 V – 50 Hz.

- Déterminez, en justifiant, le couplage des enroulements statoriques du moteur.
- Précisez la valeur efficace de l'intensité du courant nominal qui traverse un enroulement.
- Déterminez le nombre de paires de pôles du moteur et la fréquence de synchronisme N_s .
- Pour le point de fonctionnement nominal, déterminez :
 - ▷ la valeur du glissement g_n ;
 - ▷ le moment C_{un} du couple utile du moteur ;
 - ▷ le rendement η_n du moteur.
- On admet que, dans sa partie utile, la caractéristique mécanique du moteur $C_u(N)$ est une droite. Complétez le graphique au début du sujet en traçant la partie utile de cette caractéristique.
- En déduire la fréquence de rotation N du moteur.
- On souhaite que le moment du couple utile soit toujours de $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ mais avec une fréquence de rotation de $1\,200 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$. Pour ce faire, le moteur est alimenté par un onduleur qui impose la condition $U/f = \text{constante}$. Dans ces conditions, la partie utile de la caractéristique mécanique reste parallèle à elle-même pour différentes valeurs de f . Déterminez la fréquence f' et la valeur efficace U' de la tension composée que doit délivrer l'onduleur.

★ Exercice 6.6

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone est reproduite ci-dessous :

1,5 kW cos $\Phi = 0,82$ 1 395 tr · min⁻¹ Δ : 230 V – 5,9 A Y : 400 V – 3,3 A $f = 50 \text{ Hz}$

Ce moteur est alimenté par un réseau 50 Hz dont la tension entre phases a pour valeur efficace 400 V.

- Précisez le type de conversion d'énergie qu'effectue le moteur.
- Comment doit-on coupler les enroulements statoriques du moteur ? Justifiez.
- Déterminez la fréquence de rotation de synchronisme N_s du moteur et en déduire le nombre de paires de pôles p du moteur.
- Pour les conditions nominales de fonctionnement indiquées sur la plaque signalétique, calculez :
 - ▷ la valeur du glissement g_n ;

- ▷ la puissance électrique absorbée P_{an} ;
- ▷ le rendement η_n du moteur ;
- ▷ le moment du couple utile du moteur C_{un} .

★ Exercice 6.7

Pour chacune des situations suivantes, indiquez, **en justifiant**, la ou les bonnes réponses.

1. **Le stator d'une machine synchrone est alimenté en 50 Hz. La vitesse de rotation du rotor est de $1\,500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.**
 - ▷ Son nombre de paires de pôles est de 1.
 - ▷ Son nombre de paires de pôles est de 2.
 - ▷ Son nombre de paires de pôles est de 3.
2. **La valeur efficace de la tension simple d'un alternateur à vide est mesurée à 230 V pour un courant d'excitation de 0,5 A et une vitesse de rotation de $1\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$. On souhaite régler cette valeur efficace à 240 V. Indiquez quels sont les paramètres possibles parmi les propositions suivantes :**
 - ▷ $I_{exc} = 1 \text{ A}$ et $n = 522 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
 - ▷ $I_{exc} = 0,5 \text{ A}$ et $n = 1\,043 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
 - ▷ $I_{exc} = 0,52 \text{ A}$ et $n = 1\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
3. **L'essai à vide d'une machine synchrone effectué à vitesse constante a permis de déterminer la valeur de $k_1 = 2,33 \text{ V/A}$ ($E_v = k_1 \times I_e$). L'essai en court-circuit a par ailleurs donné $k_2 = 1,44$ ($I_{cc} = k_2 \times I_e$). En négligeant la résistance des enroulements, on trouve que :**
 - ▷ La valeur de la réactance synchrone X_s est de $1,62 \Omega$.
 - ▷ La valeur de la réactance synchrone X_s est de $0,62 \Omega$.
 - ▷ La valeur de la réactance synchrone X_s est de $3,35 \Omega$.
4. **Des essais en continu, à vide et en court-circuit ont permis de déterminer les valeurs des éléments du modèle de Behn-Eschenburg : r négligeable, $X = 7 \Omega$, $k_1 = 2,33 \text{ V/A}$ ($E_v = k_1 \times I_e$). Cette machine synchrone triphasée fonctionne en alternateur et débite, sous une tension simple $V = 230 \text{ V}$, un courant d'intensité efficace I sur une charge inductive d'une puissance de 10 kW et de facteur de puissance $f_p = 0,8$. Pour ce point de fonctionnement :**
 - ▷ La valeur du courant d'excitation I_e est d'environ 322 A.
 - ▷ La valeur du courant d'excitation I_e est d'environ 138 A.
 - ▷ La valeur du courant d'excitation I_e est d'environ 750 A.

Astuce : calculez d'abord I puis aidez-vous d'un diagramme vectoriel.

★ Exercice 6.8 : BTS 2008

Chaque turbine est accouplée à un alternateur triphasé raccordé au réseau EDF 20 kV – 50 Hz par l'intermédiaire d'un transformateur élévateur.

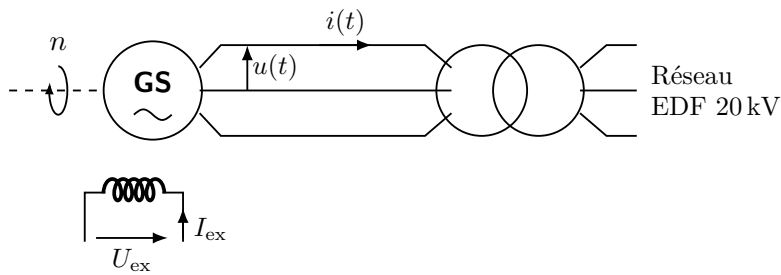


Figure 1

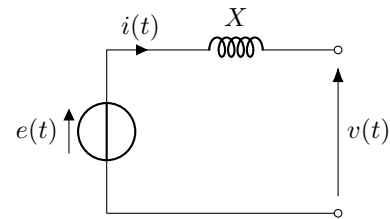


Figure 2

Les alternateurs ont comme caractéristiques :

- ▷ Tension nominale entre phases : $U_n = 6,6 \text{ kV} - f = 50 \text{ Hz}$.
- ▷ Puissance apparente utile nominale : $S_n = 3 \text{ MV} \cdot \text{A}$.
- ▷ Fréquence de rotation nominale : $n_n = 1\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
- ▷ Courant d'excitation maximal : $I_{\text{exc,max}} = 20 \text{ A}$.
- ▷ Couplage des enroulements statoriques : étoile.
- ▷ La résistance des enroulements statoriques est négligée.

Par ailleurs pour l'essai à vide avec $n = 1\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, on obtient la relation $E_v = 300 \times I_{\text{exc}}$ et pour l'essai en court-circuit avec $n = 1\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, on obtient la relation $I_{\text{cc}} = 170 \times I_{\text{exc}}$.

1. Calculez le nombre p de paires de pôles.
2. Calculez la valeur efficace I_n de l'intensité nominale.
3. Le schéma équivalent d'une phase de la machine est donné en figure 2 (la résistance est négligée). Calculez la valeur X de la réactance synchrone d'une phase de l'alternateur.

Le contrat du producteur précise que chaque alternateur doit pouvoir à tout moment fournir au réseau une puissance réactive Q_{al} , telle que $\tan \Phi = 0,49$. La puissance électrique fournie est $P_{\text{al}} = 2,25 \text{ MW}$.

4. Calculez le facteur de puissance f_p .
5. Calculez la valeur efficace I du courant débité $i(t)$.
6. Représentez le diagramme de Fresnel (ou diagramme bipolaire) des tensions (on pourra prendre une échelle de 500 V pour 1 cm).
7. Mesurez graphiquement la f.é.m E_v et en déduire la valeur du courant d'excitation I_{exc} .
8. Calculez le rendement η_a de l'alternateur, sachant que l'ensemble des pertes vaut $P_t = 0,25 \text{ MW}$.
9. Précisez l'origine de ces pertes.

★ Exercice 6.9 : BTS 2007

Le moteur synchrone est à aimants permanents et possède 8 pôles (le nombre de paires de pôles est $p = 4$). Les enroulements du stator sont couplés en étoile. L'intensité efficace nominale du courant dans un enroulement est $I_n = 155 \text{ A}$. Pendant un transitoire de durée limitée, elle peut atteindre la valeur $I_{\text{max}} = 185 \text{ A}$.

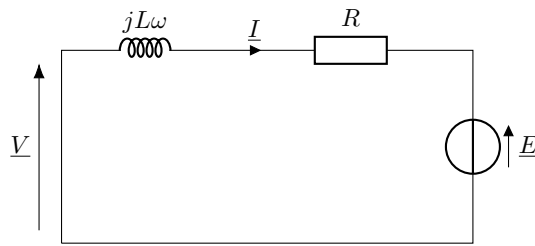


Figure 3

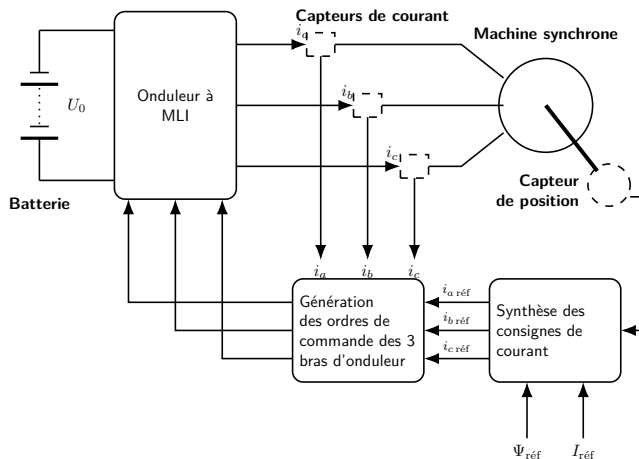
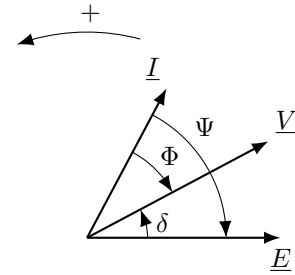


Figure 4

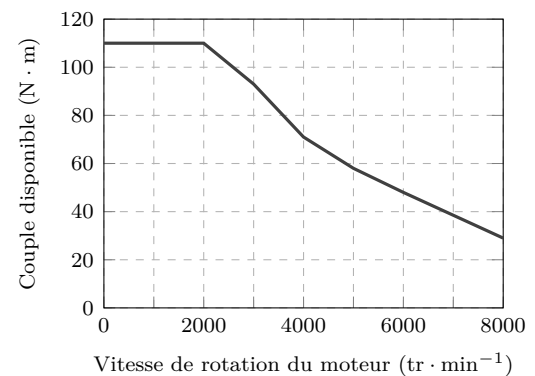


Figure 5

I- Identification des paramètres du modèle :

La machine est étudiée en convention récepteur. Le modèle équivalent à une phase de l'induit est représenté figure 3. Les tensions et courants sont supposés sinusoïdaux de pulsation $\omega = 2\pi f$.

Afin de déterminer les paramètres du modèle, divers essais ont été effectués :

- ▷ Essai n° 1 : on a mesuré la résistance entre deux phases : $r = 0,06 \Omega$.
- ▷ Essai n° 2 : sur un banc d'essais, on a entraîné la machine synchrone à vide par l'intermédiaire d'un moteur auxiliaire à la vitesse $n = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$. On a mesuré la tension simple aux bornes d'une phase : 37 V.
- ▷ Essai n° 3 : avec une alimentation électrique appropriée, on a effectué un essai de la machine en moteur à $1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ pour lequel $\Psi = 0$, $I = I_{\max} = 185 \text{ A}$ et $V = 49 \text{ V}$.

1. Déterminez la fréquence des tensions statoriques quand $n = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
2. Déterminez la valeur de la résistance R d'un enroulement statorique.
3. On pose $E_v = A \times \Omega$ (avec Ω en rad/s) où A est une constante. Déterminez la valeur de A .
4. La résistance R n'étant pas négligée, écrivez la relation entre $\underline{V}$, $\underline{E}_v$ et $\underline{I}$.
5. Tracez sur la copie un diagramme vectoriel relatif à l'essai n° 3 (il n'est pas utile de le faire à l'échelle). On prendra $\underline{E}_v$ comme origine des phases.
6. En déduire, par un calcul simple s'appuyant sur le diagramme vectoriel, la valeur de L .

Dorénavant on négligera R dans le modèle de la machine synchrone. On prendra $L = 0,21 \text{ mH}$ et $A = 0,24 \text{ Wb}$.

II- Détermination de l'expression du couple :

1. Tracez sur la copie un diagramme vectoriel représentatif d'un point de fonctionnement quelconque, avec $0 < \Psi < \frac{\pi}{2}$. On prendra $\underline{E}_v$ comme origine des phases, on placera les vecteurs représentatifs des complexes $\underline{E}_v$, $\underline{V}$ et $jL\omega I$ ainsi que les angles Ψ , Φ et δ .
2. Sachant que $V \cos \Phi = E_v \cos \Psi$, déterminez l'expression de la puissance absorbée par la machine P_a en fonction de V , I et Φ puis en fonction de E_v , I et Ψ .
3. Montrez que l'expression du couple C développé par la machine est donnée par $C = 3AI \cos \Psi$.

III- Étude d'un point de fonctionnement à $\Psi = 0$:

1. Pour une intensité efficace I donnée, pourquoi choisir la valeur particulière $\Psi = 0$ pour maximiser le couple développé par la machine ?

L'autopilotage consiste à maintenir l'angle Ψ constant quelle que soit la position du rotor. À cet effet on réalise un asservissement des courants des trois phases de la machine (cf. figure 4). On choisit d'abord de travailler à $\Psi = 0$, $I = I_n = 155 \text{ A}$ et $n = 1\,500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.

2. Que vaut le moment du couple C développé par la machine ?
3. Tracez le diagramme vectoriel représentatif de ce fonctionnement. On placera les vecteurs représentatifs des complexes $\underline{E}_v$, $\underline{V}$, $\underline{I}$ et $jL\omega I$ ainsi que l'angle Φ .
4. Calculez la valeur de V .
5. Calculez la valeur de Φ .

IV- Commande à Ψ variable :

Au-delà de $2\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, afin de ne pas dépasser la tension nominale aux bornes des enroulements, on choisit de travailler à Ψ variable. Pour $n = 5\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, $\Psi = -59^\circ$ et $I = I_n = 155 \text{ A}$:

1. Déterminez la valeur du moment du couple C .
2. Sachant que pour $n = 1\,500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ on a $f = 100 \text{ Hz}$, déterminez f puis ω pour $n = 5\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
3. En déduire la valeur de E_v et de $L\omega I$.
4. Tracez à l'échelle le diagramme vectoriel représentant ce point de fonctionnement.
5. Déterminez graphiquement la valeur de V et celle de Φ .
6. Sur la figure 5, on a tracé pour $0 < n < 8\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ la caractéristique du couple disponible en fonction de la vitesse de rotation du moteur n en tours par minute. Quels sont les avantages liés à la traction d'un véhicule électrique mis en évidence par cette caractéristique de couple ?

★ Exercice 6.10 : BTS 2016

Le même motoventilateur doit pouvoir assurer le désenfumage et la ventilation sanitaire d'un tunnel. En ventilation sanitaire, différents débits sont imposés en fonction du taux de pollution mesuré dans le tunnel afin de maintenir la qualité de l'air dans le tube. En désenfumage, le sens de rotation du ventilateur est inversé et la vitesse de rotation est nominale. L'objectif de cette partie est d'étudier les différents points de fonctionnement du motoventilateur correspondant aux différents débits d'air.

Plaque signalétique du moteur asynchrone d'entraînement du ventilateur		
Nombre de pôles		4
Tension composée réseau	V	400
Fréquence	Hz	50
Puissance utile	kW	355
Vitesse nominale	tr/min	1492
Intensité nominale du courant	A	634
Intensité à vide du courant	A	255
Facteur de puissance à 100 % de la charge		0,85

I- Moteur asynchrone alimenté en tension et fréquence fixes ($U = 400 \text{ V}$ et $f = 50 \text{ Hz}$) :

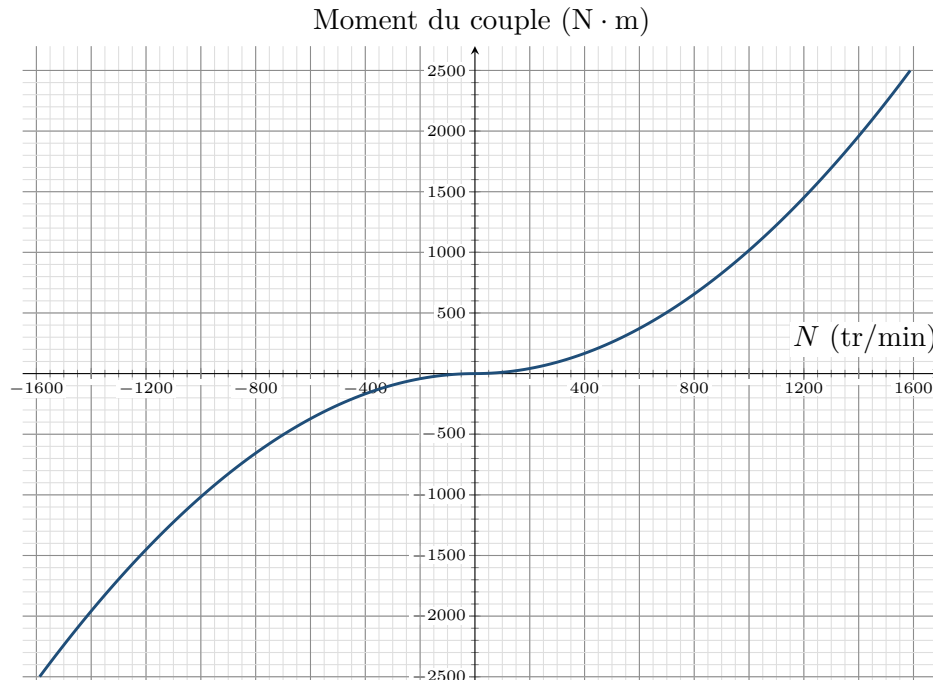
1. À l'aide de la plaque signalétique, déterminez, pour le fonctionnement nominal :

- ▷ la vitesse de synchronisme N_S du moteur asynchrone en tr/min ;
- ▷ le glissement g ;
- ▷ la puissance active P ;
- ▷ le moment du couple utile C_{un} ;
- ▷ le rendement η .

II- Moteur asynchrone alimenté à U/f constant :

Sur le document réponse ci-dessous, on donne la caractéristique mécanique du ventilateur (moment du couple résistant en fonction de la vitesse de rotation). Pour simplifier l'étude de la variation de vitesse du moteur asynchrone, on fait l'hypothèse que le glissement est nul (à vide comme en charge).

Document réponse – Caractéristique mécanique du ventilateur



- En assimilant la partie utile de la caractéristique mécanique du moteur asynchrone à une droite verticale, tracez sur le document réponse la caractéristique mécanique $C_u = f(N)$, notée (D), du moteur asynchrone lorsque $f = 50 \text{ Hz}$ et $U = 400 \text{ V}$.
- Comment évolue la caractéristique mécanique du moteur lorsque la fréquence f diminue en maintenant le rapport U/f constant ?

Lors du fonctionnement en ventilation sanitaire, on définit trois vitesses de rotation du ventilateur : $N_1 = 530 \text{ tr/min}$, $N_2 = 660 \text{ tr/min}$ et $N_3 = 850 \text{ tr/min}$. Lors du fonctionnement en désenfumage, la vitesse de rotation est fixée à sa valeur nominale $N_4 = -1\,500 \text{ tr/min}$.

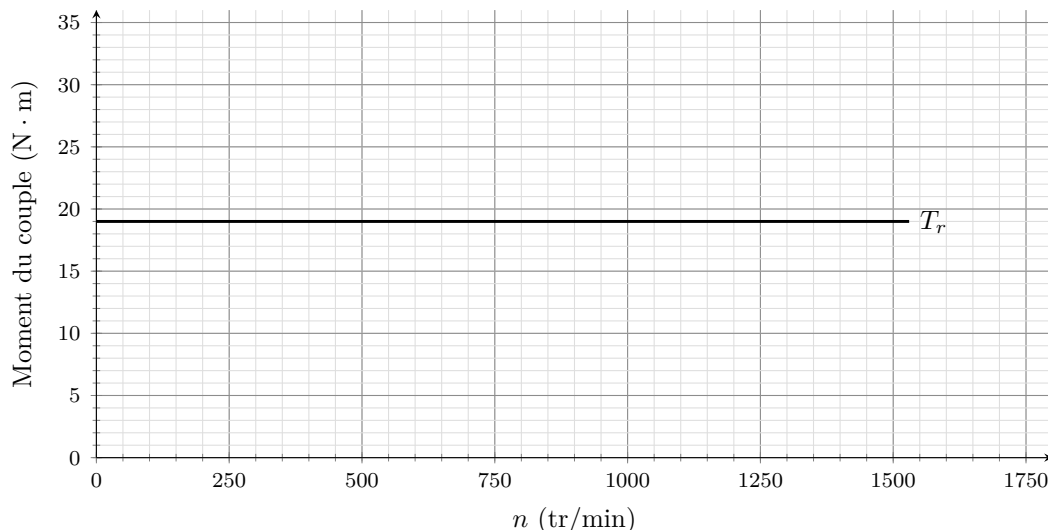
- Placez sur le document réponse les points de fonctionnement P_2 et P_4 du groupe motoventilateur correspondant aux vitesses de rotation N_2 et N_4 en régime permanent. Tracez sur le document réponse les caractéristiques mécaniques notées (D_2) et (D_4) du moteur asynchrone permettant d'obtenir ces points de fonctionnement.
- Pour les points de fonctionnement P_2 et P_4 , donnez les fréquences et les valeurs efficaces du fondamental de la tension d'alimentation entre phases U du moteur. Précisez comment est obtenue la vitesse négative associée au point P_4 .
- Calculez la puissance utile du moteur asynchrone pour les points de fonctionnement P_2 et P_4 .
- Justifiez que le dimensionnement de la machine asynchrone a été effectué pour répondre aux besoins du mode désenfumage.

★ Exercice 6.11 : BTS 2019

Le moteur choisi pour entraîner le convoyeur est un moteur asynchrone dont les caractéristiques nominales sont données dans le tableau suivant :

Caractéristiques du moteur asynchrone : régime nominal	
Tension efficace composée du réseau U_n	400 V
Fréquence f	50 Hz
Vitesse de rotation n_n	905 tr/min
Puissance utile P_{un}	2,2 kW
Nombre de pôles	6

Document réponse n°3



- Déterminez la fréquence de synchronisme nominale n_s du moteur en tr/min.
- Calculez le moment du couple utile nominal T_{un} du moteur asynchrone.
- On suppose que le moteur tourne à sa vitesse de synchronisme lorsqu'il fonctionne à vide. Sur le document réponse n°3, tracez la partie utile de la caractéristique mécanique pour le fonctionnement nominal du moteur. Cette caractéristique sera nommée C_n .

Le moteur du convoyeur est piloté par un variateur de vitesse qui gère la vitesse du moteur asynchrone avec une commande à U/f constant. Pour modifier la vitesse de rotation, le variateur modifie la fréquence des tensions d'alimentation appliquées au moteur.

4. Comment évolue la partie utile de la caractéristique mécanique du moteur ?

Sur le document réponse n°3, on a tracé la courbe du couple résistant T_r ramené sur l'axe du moteur asynchrone. On désire obtenir un point de fonctionnement F_1 pour lequel le moteur tourne à une vitesse $n_1 = 650$ tr/min.

5. Placez le point de fonctionnement F_1 sur le document réponse n°3. Tracez la partie utile de la caractéristique mécanique C_1 qui passe par F_1 .

6. En déduire la vitesse de synchronisme n_{s1} du moteur asynchrone. Montrez que la fréquence des tensions délivrées par le variateur est $f_1 = 36,25$ Hz.

7. À la fréquence $f = 50$ Hz, la masse de bois transportée en une heure par le convoyeur est $m = 1\,300$ kg. En supposant que la masse de bois transportée par le convoyeur est proportionnelle à la fréquence des tensions délivrées par le variateur, calculez la masse m_1 transportée en une heure pour la fréquence $f_1 = 36,25$ Hz.

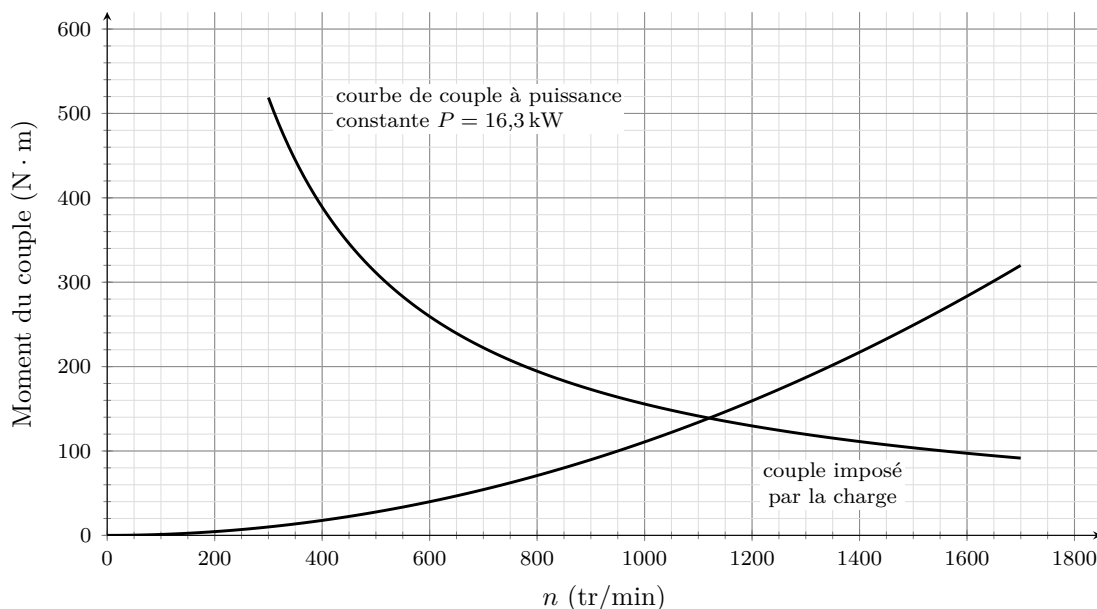
★ Exercice 6.12 : BTS 2019

Les moteurs des pompes sont de marque Siemens. Sur leur plaque signalétique, on peut lire les informations suivantes :

400 V / 690 V ; 97 A / 56 A ; $\cos \Phi = 0,87$; rendement 94 % ; 1 480 tr/min.

Les moteurs sont alimentés par le réseau 230 V/400 V, 50 Hz.

Document réponse n°2 – Caractéristiques couple-vitesse



I- Point de fonctionnement nominal d'un moteur :

1. Déterminez le couplage du moteur asynchrone sur le réseau. Indiquez alors la valeur efficace I_n du courant de ligne absorbé par le moteur.

2. Calculez la valeur de la puissance absorbée P_{an} et celle de la puissance utile P_{un} .
3. Quelle est la valeur de la vitesse de synchronisme n_{sn} de la machine ? En déduire la valeur du nombre de paires de pôles p .
4. Calculez la valeur du moment du couple utile nominal T_{un} pour la vitesse nominale du moteur.
5. Sachant que la courbe du moment du couple utile en fonction de la vitesse est une droite dans sa partie utile, tracez celle-ci sur le document réponse n°2 (on suppose que le glissement est nul pour le fonctionnement à vide du moteur).

II- Point de fonctionnement à grande vitesse :

Afin d'économiser de l'énergie, on alimente chaque groupe motopompe au moyen d'un variateur de fréquence qui permet de réduire la vitesse. Pour ce fonctionnement, les tensions composées délivrées par le variateur ont une valeur efficace de 400 V et une fréquence de 50 Hz.

1. Sur le document réponse n°2, relevez le point de fonctionnement moment du couple-vitesse ($T_{GV}; n_{GV}$) de la machine en charge. Calculez la valeur de la puissance mécanique P_{uGV} fournie par le moteur au fonctionnement grande vitesse.
2. Sachant que le rendement global du moto-variateur est de 93 %, calculez la valeur de la puissance P_{aGV} absorbée par le variateur pour ce fonctionnement.

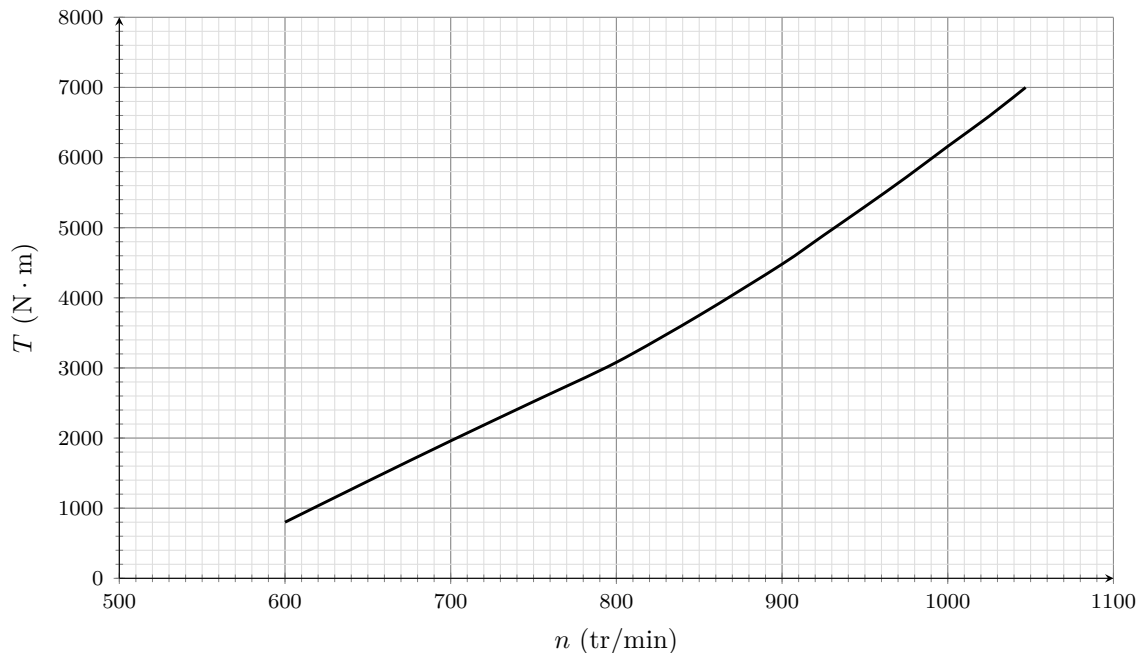
III- Point de fonctionnement à petite vitesse :

On admet que la puissance mécanique fournie par le moteur asynchrone à petite vitesse est de 16,3 kW. La courbe d'utilisation à cette puissance est représentée sur le document réponse n°2.

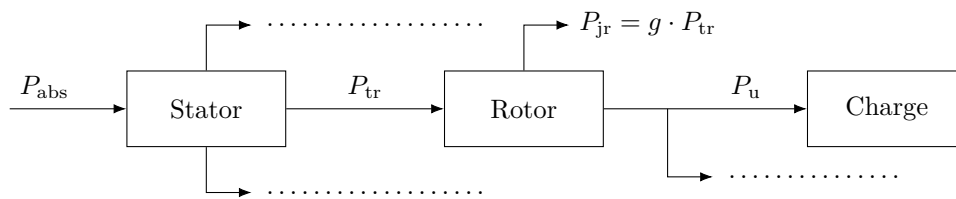
1. En déduire le moment du couple mécanique T_{PV} et la vitesse de fonctionnement n_{PV} de la machine en charge à petite vitesse.
2. On rappelle que les variateurs fonctionnant à U/f constant permettent d'obtenir des droites de couple parallèles entre elles. Tracez la courbe du moment du couple utile du moteur asynchrone alimenté par le variateur pour ce fonctionnement. Déterminez alors graphiquement la valeur de la nouvelle vitesse de synchronisme n_{sPV} correspondant au fonctionnement à petite vitesse.
3. Sachant que la tension fournie par le variateur a pour valeur efficace $U = 400$ V pour une fréquence $f = 50$ Hz, en déduire la fréquence et la valeur efficace des tensions composées fournies par le variateur dans le cas de la petite vitesse.
4. Sachant que le rendement global du moto-variateur est de 92 % pour ce point de fonctionnement, calculez la valeur de la puissance absorbée P_{aPV} par le variateur. Quelle économie réalise-t-on sur la puissance absorbée par un groupe motopompe en réduisant la vitesse ?

★ Exercice 6.13 : BTS 2020

Document réponse n°3 – Courbe de charge d'un moteur pour 2 pompes en fonctionnement simultané



Bilan de puissance du moteur asynchrone



Avec : P_{tr} = puissance transmise au rotor et P_{jr} = pertes Joule au rotor.

Partie I :

Les valeurs nominales figurant sur la plaque signalétique du moteur asynchrone sont données :

800 kW ; 990 tr/min ; 50 Hz ; 690 V ; 810 A ; $\cos \Phi = 0,87$; couplage Y.

1. Calculez la valeur du couple utile nominal du moteur T_{uN} .
2. Déterminez le nombre de paires de pôles du moteur et le glissement g_N au régime nominal.
3. En assimilant la partie utile de la caractéristique mécanique $T_u(n)$ du moteur asynchrone à une droite, tracez cette caractéristique sur le graphique du document réponse n°3 (le glissement est considéré comme nul pour un fonctionnement à vide du moteur).
4. Déterminez les caractéristiques du point de fonctionnement lorsque le moteur est couplé à la charge.

Partie II :

La moyenne journalière du débit doit être portée à 7 500 m³/h. Lorsque les pompes seront en fonctionnement, leur vitesse de rotation sera de 800 tr/min pour une durée moyenne d'utilisation journalière de 7 h. Dans ce domaine de vitesse, on pourra considérer que le variateur fonctionne avec une loi en U/f constant.

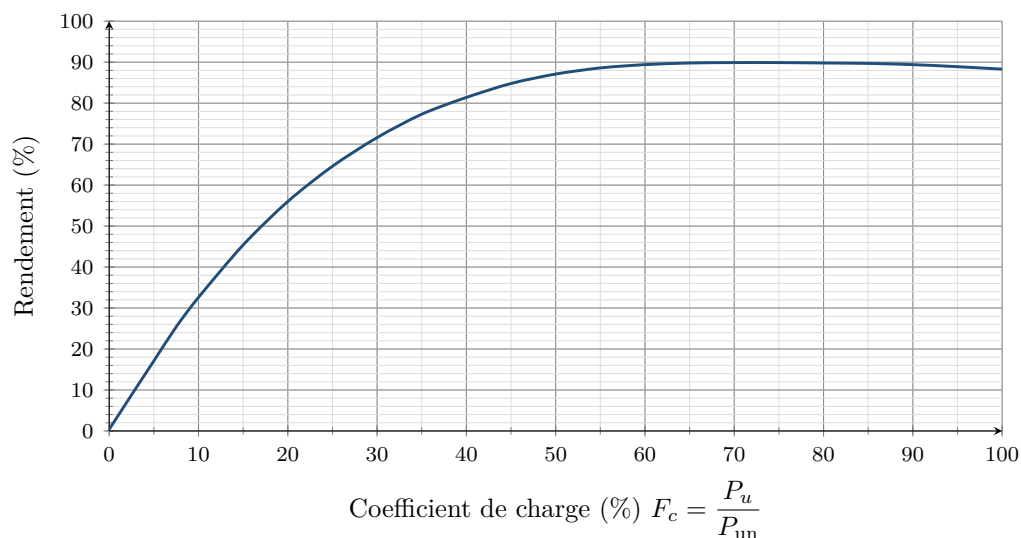
1. Expliquez comment évolue la caractéristique mécanique du moteur lorsque la fréquence f change en maintenant le rapport U/f constant et tracez sur le graphique du document réponse n°3 la nouvelle caractéristique mécanique du moteur permettant d'entraîner la pompe à 800 tr/min.
2. Calculez la nouvelle valeur de la fréquence f' de la tension qui alimente le moteur et en déduire sa valeur efficace U' .
3. Sur le document réponse n°3, complétez le bilan de puissance du moteur asynchrone en précisant le nom des différentes pertes.
4. Pour une vitesse de rotation du moteur de 800 tr/min, le glissement est de 0,5 % et la puissance utile de 260 kW. On néglige les pertes mécaniques. Démontrez que dans ces conditions les pertes Joule au rotor P_{jr} sont de 1,3 kW.
5. Actuellement, les moteurs asynchrones arrivent en fin de vie. Pour leur remplacement, on envisage d'utiliser des moteurs synchrones à aimants permanents qui ont un meilleur rendement car ils font l'économie des pertes Joule au rotor. L'échauffement dû aux pertes étant moins important, la durée de vie du moteur est plus importante. Les pertes d'énergie ramenées sur la durée de vie du moteur peuvent justifier l'investissement dans un contexte où le prix de l'énergie est en constante augmentation. En remplaçant un moteur asynchrone par un moteur synchrone, calculez (en kW · h) l'énergie annuelle E_m qu'il est possible d'économiser.

★ Exercice 6.14 : BTS 2021

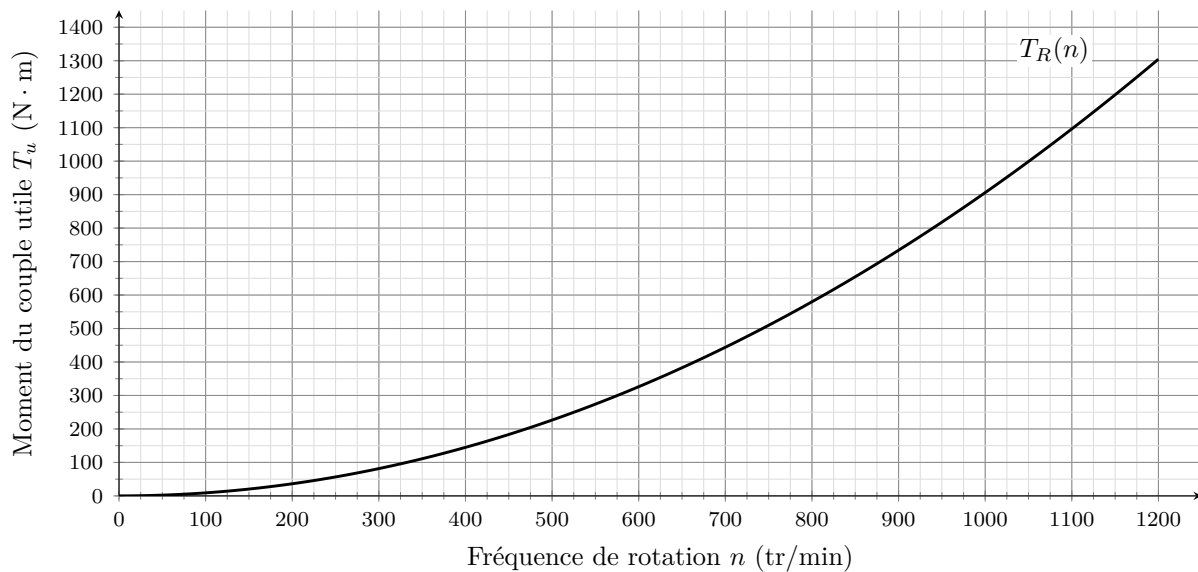
La plaque signalétique du moteur asynchrone triphasé indique :

Puissance utile nominale P_{un}	132 kW
Fréquence d'utilisation f	50 Hz
Fréquence de rotation nominale n	975 tr/min
Tensions réseau admissibles	230 V / 400 V
Intensités en ligne	468 A / 270 A
$\cos \Phi$ en fonctionnement nominal	0,8

Annexe n°2



Document réponse n°2

**I- Détermination du rendement :**

1. Le moteur est alimenté par un réseau triphasé 230 V/400 V – 50 Hz. Déterminez le couplage à effectuer sur les enroulements du stator ainsi que l'intensité efficace en ligne I_n en régime nominal.
2. Déterminez la fréquence de synchronisme n_S du moteur en tr/min ainsi que son nombre de paires de pôles p .
3. Calculez la puissance absorbée P_{an} par le moteur en fonctionnement nominal. En déduire son rendement η_n en fonctionnement nominal.
4. Lors du pompage, la puissance utile du moteur nécessaire est $P_u = 92 \text{ kW}$. À l'aide de l'annexe n°2, déterminez le rendement η' du moteur pour ce fonctionnement.

II- Détermination du point de fonctionnement :

1. Pour le fonctionnement nominal, calculez le moment du couple utile T_{un} .
2. La partie utile de la courbe du moment du couple utile T_u en fonction de la vitesse de rotation n est assimilée à une droite passant par le point de synchronisme. Tracez cette caractéristique mécanique $T_u(n)$ sur le document réponse n°2.
3. La caractéristique de la pompe en charge $T_r(n)$ est donnée sur le document réponse n°2. Placez sur ce document réponse le point de fonctionnement F_{50} du moteur associé à la pompe.
4. Calculez la puissance P_{50} correspondant à ce point de fonctionnement et commentez cette valeur par rapport à la puissance de pompage.

Lorsque la hauteur d'effluent diminue, il est nécessaire de diminuer le débit et donc la vitesse du moteur. Le moteur est donc piloté par un variateur de vitesse à U/f constant.

5. Expliquez comment se déplace la caractéristique du moteur $T_u(n)$ quand la fréquence des tensions délivrées par le variateur diminue.
6. Tracez sur le document réponse n°2 la caractéristique du moteur pour un point de fonctionnement correspondant à une vitesse de 495 tr/min (débit de 120 L/s). En déduire le moment du couple T_{u1} correspondant et la puissance utile P_{u1} du moteur.

7. Déterminez la vitesse de synchronisme n_{s1} du moteur pour ce fonctionnement et en déduire la fréquence f_1 des tensions délivrées par le variateur.

★ Exercice 6.15 : BTS 2018

Le moteur Dahlander étant par ailleurs vétuste, il a été décidé de le changer au profit d'un moteur neuf dont la plaque signalétique est donnée ci-dessous :

CE		VEM motors Thurm GmbH Made in Germany				DIN EN 60034-1	
IE2-WE1R 132 S 2 T H FNS-K 2WE						IM B35 FF265	
13096180011505			IP 55		Th.Kl.155		48 kg 3~M
Bremse:			M _{BR}		Nm /		c/h LS m
50Hz		S1		CODE			60Hz
5.5 kW		IE2 87 %		IE2 89.5 %			6.6 kW
400 / 690 V D/Y cosφ 0.88				460 V D cosφ 0.88			
10.3/5.95 A 2900 min. ⁻¹				10.5 A 3490 min. ⁻¹			
380... 420 / 660... 690 V				440... 480 / ... V			
10.8... 10 / 6.2... 5.95 A				10.9... 10.2 / ... A			
2880..2910 min. ⁻¹ cosφ 0.85				3470..3500 min. ⁻¹ cosφ 0.89			

Fig. 3 – Plaque signalétique du moteur asynchrone

Le modèle équivalent pour une phase du moteur en régime permanent est donné figure suivante :

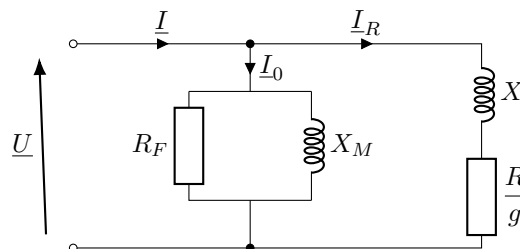
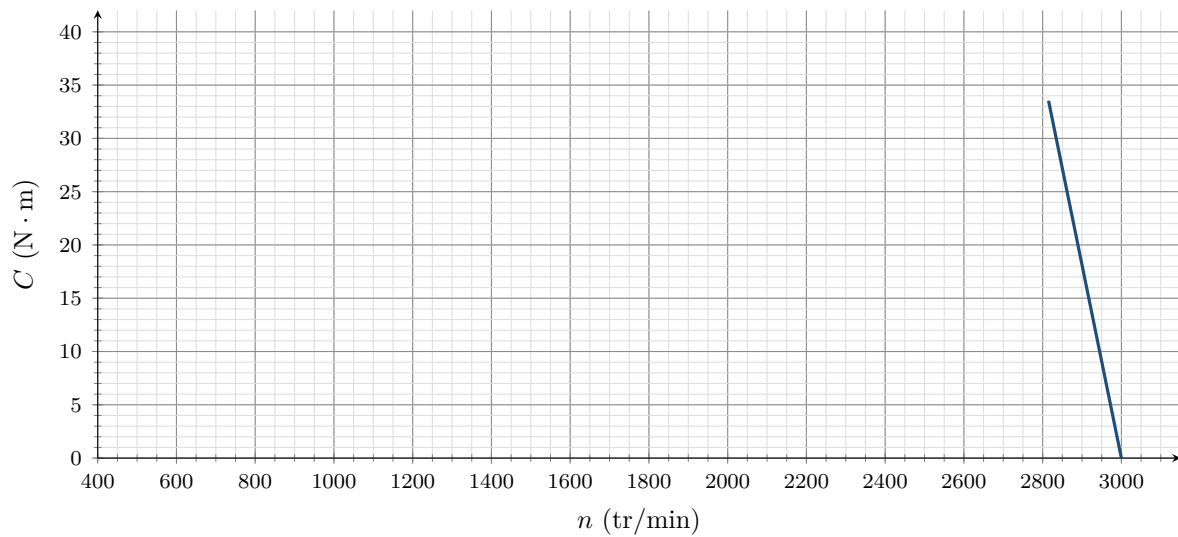


Fig. 4 – Modèle équivalent pour une phase du moteur

avec :

- ▷ R_F : pertes fer statoriques ;
- ▷ X_M : réactance magnétisante ;
- ▷ $X = L\omega$: réactance de fuites magnétiques avec ω pulsation électrique ($\omega = 2\pi f$) ;
- ▷ R : résistance du rotor ramenée au stator : $R = 2,81 \Omega$.

Document réponse n°3



1. Le moteur est alimenté par le réseau 230 V/400 V – 50 Hz. Donnez la signification des indications suivantes de la plaque signalétique : 5,5 kW, 400 V/690 V D/Y, 10,3 A/5,95 A et 2 900 tr/min. En déduire le couplage du moteur sur le réseau utilisé.
2. Pour le fonctionnement nominal, déterminez les valeurs des grandeurs suivantes :
 - ▷ la fréquence de synchronisme n_s en tr/min ;
 - ▷ le nombre de paires de pôles p du moteur ;
 - ▷ le moment du couple utile du moteur C_{um} .
3. Les grandeurs tensions et courants, représentées sur le modèle équivalent, sont écrites en notation complexe. Donnez la signification physique des courants $\underline{I}_0$ et $\underline{I}_R$.
4. Donnez l'expression de la puissance électromagnétique P_{em} développée par la machine en fonction de R , g et $\underline{I}_R$.

À partir de l'expression précédente de la puissance électromagnétique, on peut montrer que le moment du couple électromagnétique C_{em} (que l'on considérera égal au moment du couple utile) peut se mettre sous la forme :

$$C_{em} = \frac{3p^2}{2\pi R \times 60} \times \frac{U^2}{f^2} \times (n_s - n) = K \times (n_s - n)$$

avec U valeur efficace des tensions composées du réseau, f fréquence du réseau qui alimente le moteur, p nombre de paires de pôles du moteur, n_s et n les fréquences de rotation en tr/min.

5. Calculez la valeur de K en précisant son unité. Vous préciserez aussi quelle condition il faut respecter pour que cette valeur soit bien constante pour différentes fréquences de fonctionnement.

La caractéristique du moteur asynchrone, moment du couple électromagnétique C_{em} en fonction de la fréquence de rotation n , est représentée sur le document réponse n°3. Cette caractéristique $C_{em} = K \times (n_s - n)$ a été tracée pour une fréquence $f_1 = 50$ Hz et pour une tension d'alimentation simple dont la valeur efficace du fondamental vaut $V_1 = 230$ V. Le moment du couple résistant ramené à l'axe du moteur est supposé constant et égal à $C_R = 18$ N·m.

6. Tracez sur le document réponse n°3 la caractéristique du moment du couple résistant et notez A le point de fonctionnement du moteur. En déduire la fréquence de rotation du moteur notée n_1 .

Afin de respecter le profil de vitesse de la porte, il est nécessaire d'utiliser un variateur de vitesse qui permettra au moteur de travailler à fréquence de rotation réduite. Le variateur de vitesse travaillera à V/f constant. La nouvelle fréquence de rotation du moteur n_2 devra être égale à 575 tr/min afin de permettre une phase d'approche à vitesse réduite.

7. Représentez sur le document réponse n°3 la nouvelle caractéristique du moteur permettant d'obtenir le nouveau point de fonctionnement noté B . En déduire la nouvelle fréquence de rotation au synchronisme n_{s2} , la nouvelle fréquence f_2 d'alimentation ainsi que la nouvelle valeur efficace du fondamental de la tension d'alimentation notée V_2 .

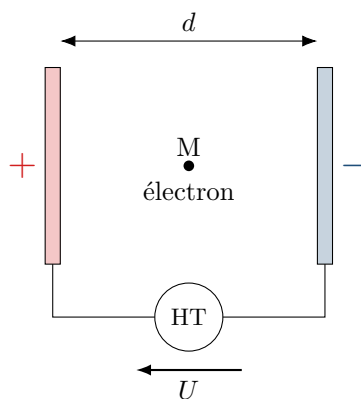
7

Électromagnétisme

Exercices – Cours de 2^e année en BTS électrotechnique

★ Exercice 7.1

Deux plaques métalliques planes et parallèles, distantes de $d = 2,0 \text{ cm}$, sont reliées aux bornes d'un générateur haute tension continue qui délivre $U = 1,5 \text{ kV}$. Un électron est placé au point M, entre les plaques.



1. Calculez la valeur du champ électrique E entre les plaques, en V/m puis en kV/mm. Précisez sa direction et son sens.
2. Calculez la valeur de la force électrique F subie par l'électron (charge $q = -e$). Précisez vers quelle plaque elle est dirigée.
3. Le poids de l'électron vaut $P = mg$ avec $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ et $g = 9,81 \text{ N/kg}$. Comparez F et P ; concluez.
4. L'air sec a une rigidité diélectrique $E_c = 3 \text{ kV/mm}$. À partir de quelle tension un arc électrique s'établit-il entre les plaques ? Y a-t-il un risque ici ?
5. On veut appliquer $U = 20 \text{ kV}$. Quelle distance minimale faut-il laisser entre les plaques dans l'air ?

★ Exercice 7.2

I- Isolant d'un câble basse tension

Un câble industriel de tension assignée 1 kV possède une gaine isolante en PVC d'épaisseur $d = 0,8 \text{ mm}$.

1. Calculez la tension de claquage U_c de cet isolant.
2. Calculez le coefficient de sécurité $s = \frac{U_c}{U}$ pour $U = 1 \text{ kV}$. Pourquoi prévoit-on une marge aussi importante ?

II- Distance d'isolement dans l'air

3. Une ligne aérienne fonctionne sous une tension de 400 kV . Calculez la distance minimale théorique

dans l'air sec entre deux conducteurs portés à cette différence de potentiel.

4. En pratique, les distances d'isolement d'une ligne 400 kV sont de plusieurs mètres. Proposez deux raisons.

III- Identification d'un isolant

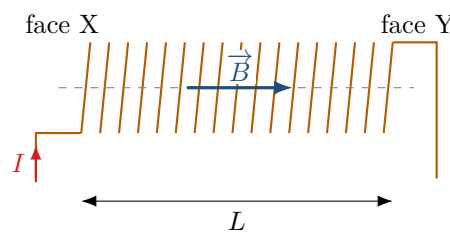
Au laboratoire, on mesure la tension de claquage U_c d'échantillons d'un même isolant de différentes épaisseurs d :

d (mm)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
U_c (kV)	4,1	7,9	12,2	15,8	20,1

5. Tracez la courbe $U_c = f(d)$. Quelle est sa nature? Déduisez-en la rigidité diélectrique E_c de l'isolant et identifiez-le à l'aide des valeurs du cours.
6. Quelle épaisseur minimale de cet isolant faut-il prévoir pour qu'il supporte 30 kV?

★ Exercice 7.3

On étudie le champ magnétique au centre d'une bobine longue (solénoïde) de $N = 500$ spires et de longueur $L = 20$ cm, sans noyau. La sonde à effet Hall d'un teslamètre est placée au centre de la bobine, et l'on fait varier l'intensité I du courant continu.



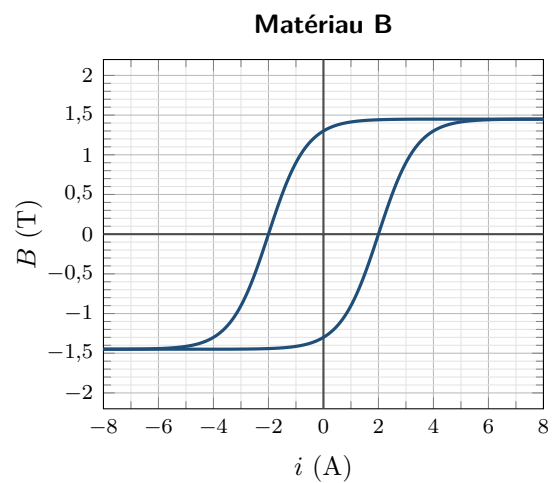
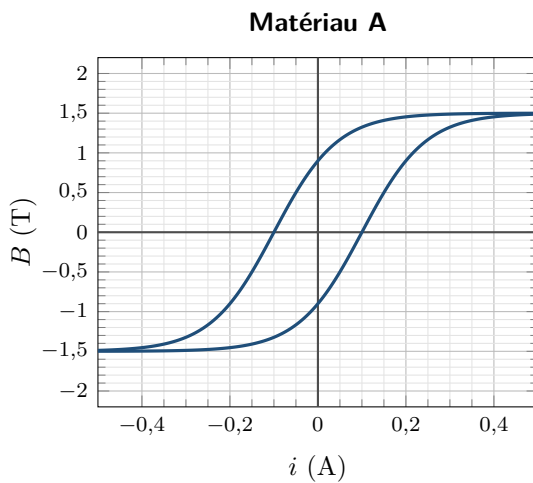
I (A)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
B (mT)	0	1,6	3,1	4,8	6,2	7,9

- Comment doit-on orienter la sonde du teslamètre pour mesurer correctement le champ au centre de la bobine?
- Tracez la courbe $B = f(I)$. Montrez que la relation $B = k \times I$ est vérifiée et déterminez graphiquement le coefficient k en mT/A.
- Calculez la valeur théorique $k_{th} = \mu_0 \times \frac{N}{L}$ et comparez-la à la valeur expérimentale.
- Quelle intensité faut-il faire circuler dans la bobine pour obtenir un champ égal au champ terrestre ($\approx 47 \mu\text{T}$)? Pourquoi faut-il faire le zéro du teslamètre, bobine non alimentée, avant de commencer les mesures?
- Le sens du champ à l'intérieur de la bobine est indiqué sur le schéma. Laquelle des faces X ou Y se comporte comme un pôle nord? Que se passe-t-il si l'on inverse le sens du courant?
- On introduit un noyau de fer doux dans la bobine. Pour $I = 1,0$ A, le teslamètre indique désormais $B = 0,70$ T. Par combien le champ a-t-il été multiplié? Pour $I = 3,0$ A, on ne mesure que $B = 1,5$ T : expliquez.

★ Exercice 7.4

I- Choix d'un matériau

On a relevé le cycle d'hystérésis $B(i)$ de deux matériaux ferromagnétiques A et B placés successivement dans la même bobine (i : intensité du courant dans la bobine).



1. Pour chaque matériau, relevez la valeur du champ de saturation, du champ rémanent B_r et de l'intensité de démagnétisation I_c .
2. Lequel des deux matériaux est doux ? Lequel est dur ? Justifiez.
3. Lequel choisir pour réaliser le circuit magnétique d'un transformateur ? Pour réaliser l'aimant permanent du rotor d'une machine synchrone ? Justifiez.
4. En assimilant chaque cycle à un parallélogramme de « hauteur » $2 B_{sat}$ et de « largeur » $2 I_c$, estimez le rapport des aires des deux cycles. Que peut-on en déduire pour les pertes par hystérésis ?
5. Le circuit magnétique d'un transformateur réalisé avec le matériau doux présente des pertes par hystérésis de 18 W à 50 Hz. Que deviennent-elles, au même champ maximal, à 60 Hz ? À 400 Hz (réseau de bord d'un avion) ?

II- Induction

On lâche un aimant néodyme qui traverse une bobine de $N = 250$ spires reliée à un oscilloscope. Lorsque l'aimant traverse la bobine à la vitesse $v = 1,0$ m/s, la f.é.m. induite atteint $E_{max} = 0,40$ V.

6. Quelle valeur de E_{max} peut-on prévoir avec une bobine de 500 spires et une vitesse de passage de 2,0 m/s ? Avec la bobine de 250 spires, à 1,0 m/s, mais un aimant ferrite (environ 3 fois moins puissant) ?
7. L'aimant est maintenant immobile à l'intérieur de la bobine. Quelle est la f.é.m. induite ? Justifiez.
8. On lâche le même aimant dans un tube vertical en cuivre, puis dans un tube identique en PVC. Dans quel tube la chute est-elle la plus lente ? Expliquez à l'aide de la loi de Lenz.

★ Exercice 7.5

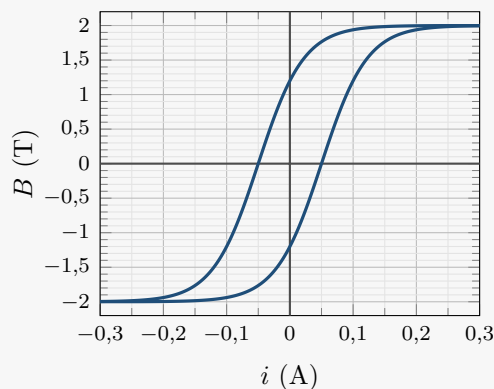
Un site industriel est alimenté par un poste de transformation équipé d'un transformateur triphasé immergé dans l'huile, de puissance 630 kV · A, 20 kV/410 V, couplage Dyn11. Le responsable maintenance étudie l'isolement et les pertes fer de ce transformateur, en vue de son remplacement

par un modèle à pertes réduites.

Document 1 : extrait de la fiche technique

- ▷ Diélectrique : huile minérale, rigidité diélectrique $E_c = 12 \text{ kV/mm}$ (air sec : 3 kV/mm).
- ▷ Tension de tenue au choc de foudre de l'enroulement HTA : 125 kV (valeur de crête).
- ▷ Distance minimale entre l'enroulement HTA et la cuve (dans l'huile) : 30 mm .
- ▷ Circuit magnétique en tôles fer-silicium à grains orientés, d'épaisseur $e = 0,35 \text{ mm}$, isolées entre elles ; champ maximal en fonctionnement : $B_{max} = 1,7 \text{ T}$.
- ▷ Sur chaque colonne : enroulement HTA (en triangle) sous 20 kV ; enroulement BT (en étoile) de $N_2 = 24$ spires, sous 237 V .
- ▷ Essai à vide sous tension nominale, à 50 Hz : puissance absorbée $P_0 = 600 \text{ W}$ (pertes fer).

Document 2 : cycle d'hystérésis relevé sur une colonne du circuit magnétique



Document 3 : lois d'évolution des pertes fer (à champ maximal B_{max} constant)

- ▷ Pertes par hystérésis proportionnelles à la fréquence : $P_{hyst} = a \times f$.
- ▷ Pertes par courants de Foucault proportionnelles au carré de la fréquence et au carré de l'épaisseur e des tôles : $P_{Foucault} = b \times f^2$, avec b proportionnel à e^2 .
- ▷ Pour garder le même B_{max} à une autre fréquence, la tension d'alimentation doit être proportionnelle à la fréquence.

Partie A : isolement

1. Indiquez les deux rôles de l'huile dans le transformateur. Calculez l'épaisseur d'huile minimale théorique pour que l'isolement entre l'enroulement HTA et la cuve résiste au choc de foudre de 125 kV . Même calcul si l'isolant était de l'air sec ; conclure.
2. Calculez le champ électrique dans l'huile lors du choc de foudre avec la distance réelle de 30 mm , puis le coefficient de sécurité correspondant.

Partie B : circuit magnétique et induction

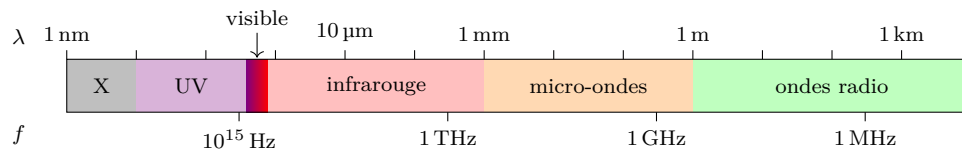
3. Pourquoi le circuit magnétique est-il réalisé en matériau ferromagnétique ? Relevez sur le document 2 le champ de saturation, le champ rémanent et l'intensité de démagnétisation. Le matériau est-il doux ou dur ? Est-ce adapté ?
4. Comparez B_{max} au champ de saturation. Pourquoi le constructeur ne fait-il pas fonctionner le transformateur plus près de la saturation ?
5. À l'aide de la loi de Faraday, expliquez pourquoi une tension apparaît aux bornes de l'enroulement BT, et pourquoi un transformateur ne peut pas fonctionner en courant continu.
6. La tension induite dans une spire est la même pour les deux enroulements d'une colonne. Calculez la tension par spire, puis le nombre de spires N_1 de l'enroulement HTA.

Partie C : pertes fer

7. Un second essai à vide est réalisé à 60 Hz, sous une tension augmentée de 20 % (même B_{max}) : on mesure $P'_0 = 768 \text{ W}$. À l'aide du document 3, déterminez les pertes par hystérésis et par courants de Foucault à 50 Hz.
8. Le nouveau transformateur utilise des tôles de 0,23 mm au lieu de 0,35 mm, de même qualité magnétique. Expliquez pourquoi le feuilletage réduit les courants de Foucault, puis calculez les nouvelles pertes fer à 50 Hz.
9. Le transformateur est sous tension en permanence (8 760 h par an). Calculez l'énergie annuelle économisée et le gain financier correspondant, pour un prix de 0,20 € le $\text{kW} \cdot \text{h}$.

★ Exercice 7.6

Données : célérité de la lumière dans le vide et dans l'air $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$; constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$.

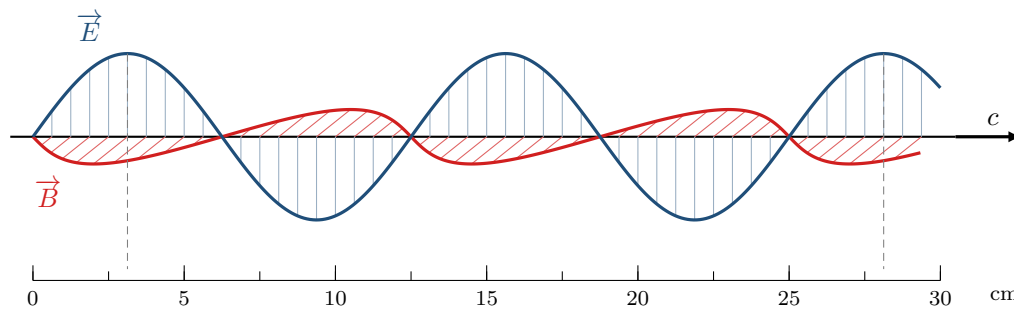


1. Un four à micro-ondes fonctionne à la fréquence $f = 2,45 \text{ GHz}$. Calculez la longueur d'onde λ de l'onde émise par son magnétron. À l'aide de l'échelle ci-dessus, indiquez le domaine de cette onde.
2. Une station de radio émet à $f = 98,0 \text{ MHz}$. Calculez la longueur d'onde et indiquez le domaine.
3. Une caméra thermique détecte les rayonnements de longueurs d'onde comprises entre $8 \mu\text{m}$ et $14 \mu\text{m}$. Calculez les fréquences correspondantes. Dans quel domaine travaille-t-elle ?
4. Une lampe de désinfection émet un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 254 \text{ nm}$. Calculez sa fréquence, puis l'énergie d'un photon de ce rayonnement, en joules puis en électronvolts. Dans quel domaine se situe ce rayonnement ?
5. Calculez en électronvolts l'énergie d'un photon émis par le four à micro-ondes, par l'émetteur radio et par un objet qui rayonne à $8 \mu\text{m}$. Classez les quatre rayonnements étudiés par énergie de photon croissante. Que remarquez-vous ?
6. Calculez la longueur d'onde associée à la fréquence 50 Hz du réseau électrique. Comparez-la à la longueur d'une ligne de transport de 100 km ; concluez.

★ Exercice 7.7

I- Onde émise par un point d'accès Wi-Fi

La figure ci-dessous représente, à un instant donné, l'onde électromagnétique émise par l'antenne d'un point d'accès Wi-Fi (la règle donne les distances réelles).



1. Nommez les deux champs représentés. Comment sont-ils orientés l'un par rapport à l'autre et par rapport à la direction de propagation ?
2. Mesurez le plus précisément possible la longueur d'onde λ sur la figure. Déduisez-en la fréquence de l'onde ($c = 3,00 \times 10^8$ m/s) et son domaine.
3. Calculez l'énergie, en électronvolts, d'un photon de cette onde ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ J · s ; $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$ J). Rompre une liaison chimique demande quelques électronvolts : un photon Wi-Fi peut-il le faire ? Quel est alors le seul effet de cette onde sur le corps humain ?

II- Champ électrique au voisinage d'une antenne relais

Une antenne relais de téléphonie mobile émet à 900 MHz avec une puissance rayonnée équivalente $P = 800$ W. Loin de l'antenne, la valeur efficace du champ électrique à la distance d est donnée en ordre de grandeur par :

$$E \approx \frac{\sqrt{30 \cdot P}}{d} \quad (E \text{ en V/m, } P \text{ en W, } d \text{ en m})$$

La valeur limite d'exposition du public à 900 MHz est 41 V/m.

4. Calculez le champ électrique à $d = 50$ m de l'antenne.
5. Complétez le tableau ci-dessous, puis tracez la courbe $E = f(d)$. Comment varie le champ quand la distance double ? Que vaut le produit $E \times d$?

d (m)	25	50	100	200
E (V/m)				

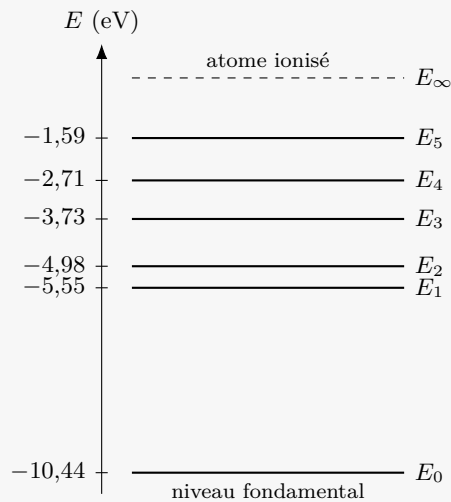
6. À partir de quelle distance de l'antenne la valeur limite d'exposition est-elle respectée ? Que doit-on prévoir autour de l'antenne ?
7. L'opérateur double la puissance rayonnée. Par combien le champ est-il multiplié en un point donné ? Que devient la distance calculée à la question précédente ?

★ Exercice 7.8

Une station de traitement d'eau potable fait appel au technicien de maintenance électrique pour trois chantiers : la désinfection de l'eau par lampes ultraviolettes, la rénovation de l'éclairage de l'atelier et la surveillance thermographique des armoires électriques.

Constantes : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$; $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Document 1 : niveaux d'énergie simplifiés de l'atome de mercure



Document 2 : lampe UV à vapeur de mercure basse pression

Spectre d'émission formé de raies, dont une raie très intense dans les UV-C (domaine germicide : 200 nm à 280 nm).
Puissance rayonnée dans cette raie : 25 W.

Document 3 : tube fluorescent

La poudre déposée sur la paroi du tube absorbe les photons UV émis par la vapeur de mercure et réémet de la lumière visible, principalement à 545 nm.

Document 4 : caméra thermique

Bande spectrale : $7,5 \mu\text{m}$ à $14 \mu\text{m}$. Loi de Wien : $\lambda_{\text{max}} \times T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ (T en kelvins).

Partie A : désinfection de l'eau par rayonnement ultraviolet

1. Le spectre d'émission de la lampe est un spectre de raies. Expliquez pourquoi à l'aide du document 1.
2. Calculez l'énergie, en eV puis en J, du photon émis lors de la transition de E_1 vers E_0 . Déduisez-en la longueur d'onde de la raie correspondante. Est-elle dans le domaine germicide ?
3. La lampe émet aussi une faible lumière bleue. Montrez qu'elle correspond à la transition de E_4 vers E_1 .
4. Un atome de mercure dans son état fondamental reçoit un photon de 3,00 eV, puis un photon de 4,89 eV. Lequel peut-il absorber ? Justifiez.
5. Calculez le nombre de photons UV-C émis chaque seconde par la lampe (document 2).
6. Pourquoi un rayonnement infrarouge, même très intense, ne peut-il pas désinfecter l'eau comme les UV-C ?

Partie B : éclairage de l'atelier

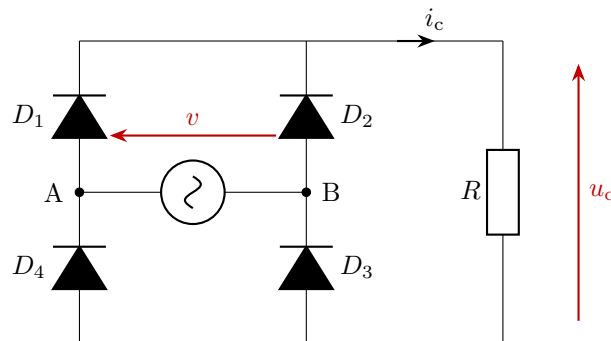
7. Dans un tube fluorescent (document 3), calculez l'énergie d'un photon visible émis par la poudre. Quelle fraction de l'énergie de chaque photon UV absorbé est perdue (sous forme de chaleur) ? Conclure sur le rendement des tubes fluorescents.
8. Les tubes sont remplacés par des luminaires à LED dont les puces émettent à 455 nm. Calculez l'énergie des photons émis en électronvolts. Sachant que chaque électron qui traverse la jonction émet au plus un photon, donnez un ordre de grandeur de la tension de seuil de ces LED.

Partie C : thermographie des armoires électriques

9. Une connexion desserrée d'un jeu de barres atteint 85°C . Calculez la longueur d'onde λ_{max} de son maximum d'émission, puis la fréquence correspondante. Dans quel domaine se trouve ce rayonnement ? La caméra du document 4 est-elle adaptée ?
10. Calculez l'énergie d'un photon à λ_{max} en électronvolts. Le capteur d'un appareil photo ordinaire est en silicium : un photon n'y est détecté que si son énergie dépasse 1,12 eV. Expliquez pourquoi un appareil photo ordinaire ne peut pas remplacer la caméra thermique.

★ Exercice 8.1

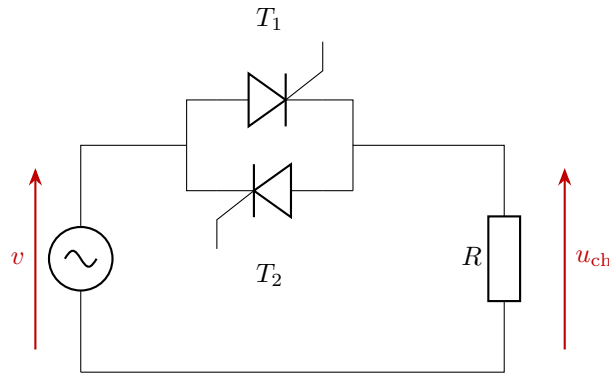
Un pont de Graëtz (PD2) à diodes parfaites est alimenté par le réseau $v(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t)$ de valeur efficace $V = 230\text{ V}$ et de fréquence $f = 50\text{ Hz}$. Il alimente une résistance chauffante $R = 50\ \Omega$.



1. Calculez la valeur maximale $V_{\max}$ de la tension du réseau.
2. Pendant l'alternance positive de v , quelles diodes conduisent ? Exprimez alors $u_c(t)$ en fonction de $v(t)$. Même question pendant l'alternance négative.
3. Représentez $v(t)$ et $u_c(t)$ sur deux périodes du réseau. Quelle est la fréquence de u_c ?
4. Calculez la valeur moyenne $\langle u_c \rangle$ de la tension aux bornes de la résistance, puis la valeur moyenne $\langle i_c \rangle$ du courant.
5. Justifiez que la valeur efficace de u_c est égale à V . En déduire la puissance P reçue par la résistance.
6. Un élève calcule la puissance par $\langle u_c \rangle \times \langle i_c \rangle$. Quelle valeur obtient-il ? Pourquoi est-ce faux ?

★ Exercice 8.2

Un four de séchage de peinture comporte une résistance R qui absorbe $P_{\max} = 2,0\text{ kW}$ sous la tension du réseau $V = 230\text{ V}$, 50 Hz . Sa puissance est réglée par un gradateur monophasé à deux thyristors tête-bêche.



I- Commande par angle de phase

1. Calculez la valeur de la résistance R .
2. Représentez l'allure de $u_{ch}(\theta)$ sur une période ($\theta = \omega t$) pour un angle de retard à l'amorçage $\alpha = 60^\circ$.
3. Calculez la valeur efficace U_{ch} et la puissance P reçue par le four pour $\alpha = 90^\circ$. Commentez le résultat.
4. Même question pour $\alpha = 60^\circ$.

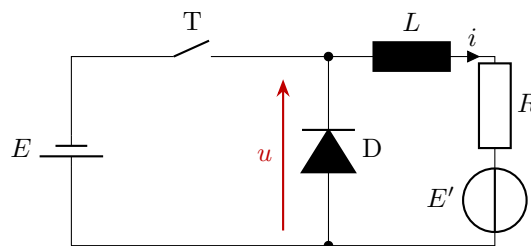
II- Commande par train d'ondes

On remplace la commande précédente par une commande par train d'ondes de durée de cycle $T_c = 2$ s.

5. Combien de périodes du réseau contient un cycle ?
6. Calculez la durée de conduction T_{on} (et le nombre de périodes correspondant) pour que le four reçoive une puissance moyenne de 1 200 W.
7. Pourquoi ce mode de commande convient-il au four, mais pas à un variateur de lumière ?

★ Exercice 8.3

Un petit convoyeur est entraîné par un moteur à courant continu alimenté par un hacheur série (transistor T, diode de roue libre D, bobine de lissage d'inductance L inconnue).



On relève à l'oscilloscope la tension $u(t)$ aux bornes de la diode (voie 1) et, à l'aide d'une sonde de courant, le courant $i(t)$ dans le moteur (voie 2, **couplage AC**). Un ampèremètre magnétoélectrique (position DC) placé en série avec le moteur indique 5,0 A.

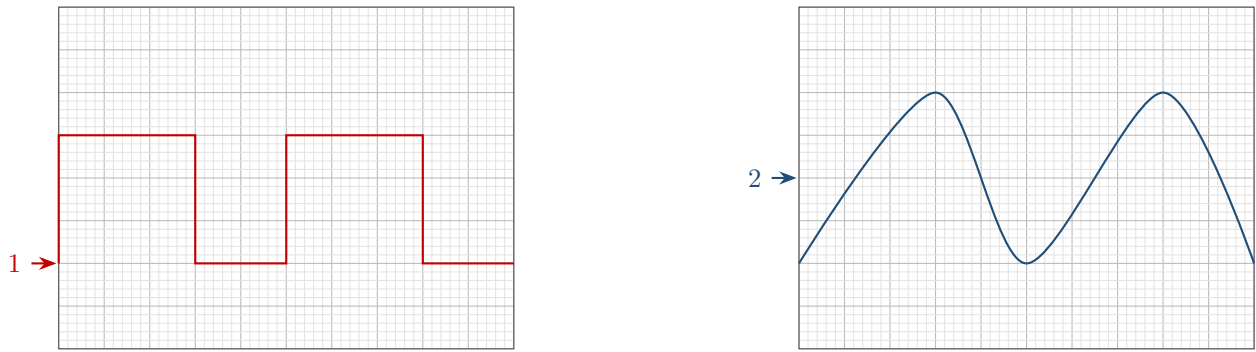
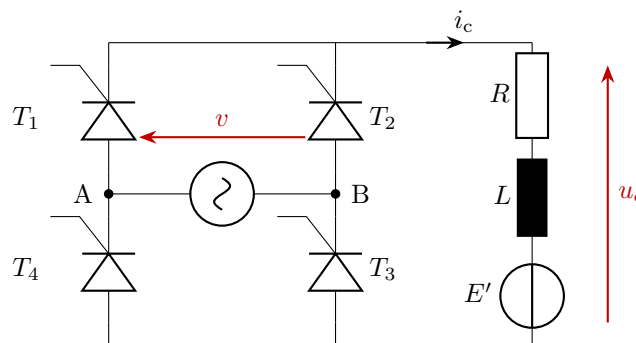


Fig. 5 – À gauche, voie 1 : $u(t)$, 20 V/div. À droite, voie 2 : $i(t)$ en couplage AC, 0,1 A/div. Base de temps commune : 10 μs/div. Les flèches repèrent le niveau zéro de chaque voie.

1. À partir de l'oscillogramme de la voie 1, déterminez la tension E de la source, la période T et la fréquence de découpage f .
2. Déterminez la durée de fermeture du transistor et le rapport cyclique α .
3. Calculez la valeur moyenne $\langle u \rangle$ et la valeur efficace U_{eff} de $u(t)$. Avec quel appareil, et dans quelle position, mesurerait-on chacune d'elles ?
4. Pourquoi le courant $i(t)$ est-il observé en couplage AC ? Déterminez l'ondulation crête à crête ΔI , puis les valeurs extrêmes I_{max} et I_{min} du courant.
5. En déduire la valeur de l'inductance L .
6. La résistance de l'induit vaut $R = 0,6 \Omega$. Calculez la f.é.m. E' du moteur.
7. Le courant étant quasiment constant, calculez la puissance P reçue par le moteur et sa puissance électromagnétique $P_{\text{em}} = E' \langle i \rangle$.
8. Quelle serait l'ondulation maximale du courant si l'on faisait varier α ? Pour quelle valeur de α est-elle atteinte ?

★ Exercice 8.4

Le moteur à courant continu d'un treuil de levage est alimenté par un pont PD2 à thyristors raccordé au réseau $V = 230 \text{ V}$, 50 Hz. L'inductance L de l'induit et d'une bobine de lissage est suffisante pour que le courant i_c soit **constant** : $I_c = 15 \text{ A}$ (conduction continue).



- ▷ Résistance de l'induit : $R = 0,8 \Omega$; f.é.m. : $E' = k \Omega$ avec $k = 1,25 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$ (Ω en rad/s).
- ▷ Thyristors parfaits ; T_1 et T_3 sont amorcés à $\theta = \alpha$, T_2 et T_4 à $\theta = \alpha + \pi$ ($\theta = \omega t$).

I- Étude du pont

- Indiquez les thyristors passants pour $\alpha < \theta < \alpha + \pi$ et pour $\alpha + \pi < \theta < \alpha + 2\pi$. Exprimez u_c en fonction de v dans chaque cas.
- Représentez $v(\theta)$ et $u_c(\theta)$ sur une période et demie pour $\alpha = 45^\circ$. Pourquoi u_c peut-elle être négative alors que le courant est toujours positif ?
- Calculez la valeur moyenne $\langle u_c \rangle$ pour $\alpha = 45^\circ$. Quelle est sa valeur maximale, et pour quel angle ?

II- Montée de la charge

- Pour $\alpha = 45^\circ$, calculez la f.é.m. E' , la vitesse angulaire Ω et la fréquence de rotation n (en $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$) du moteur.
- Calculez la puissance P reçue par le moteur, ses pertes Joule d'induit et sa puissance électromagnétique.
- Quel angle α faut-il régler pour que le moteur tourne à $1400 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ avec le même courant ?

III- Descente de la charge

Pour la descente, la charge entraîne le moteur en sens inverse ; le courant garde le même sens et la même valeur $I_c = 15 \text{ A}$. On règle $\alpha = 120^\circ$.

- Calculez $\langle u_c \rangle$ puis la puissance $P = \langle u_c \rangle \times I_c$. Interprétez son signe : dans quel sens l'énergie circule-t-elle ? Comment appelle-t-on ce fonctionnement du pont ?
- Calculez la f.é.m. E' et la fréquence de rotation de descente.

★ Exercice 8.5

Une entreprise protège son local serveurs par une alimentation sans interruption (ASI) « en ligne » : la charge (serveurs, 10 kW, monophasée 230 V, 50 Hz) est **toujours** alimentée par un onduleur, lui-même alimenté par un bus continu. En cas de coupure du réseau, la batterie prend le relais. La figure 6 présente la structure retenue.

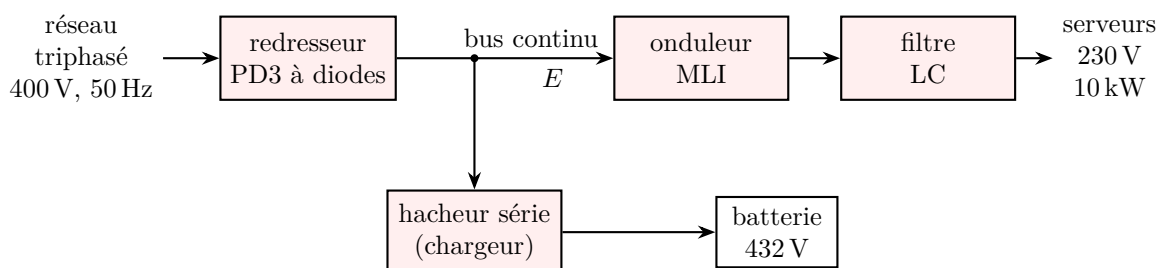


Fig. 6 – Structure simplifiée de l'ASI (le dispositif qui renvoie l'énergie de la batterie vers le bus en cas de coupure n'est pas étudié).

- ▷ Redresseur : pont PD3 à diodes ; tension de seuil d'une diode $V_{\text{seuil}} = 1,0 \text{ V}$ (autres pertes négligées) ; on admet que le bus continu est bien filtré : $E = \langle u_c \rangle$.
- ▷ Batterie : 36 éléments de 12 V en série, modélisée par une f.é.m. $E_b = 432 \text{ V}$ en série avec une résistance $R_b = 0,12 \Omega$; courant de charge souhaité $\langle i \rangle = 10 \text{ A}$.
- ▷ Hacheur série (chargeur) : interrupteurs parfaits, fréquence de découpage $f = 10 \text{ kHz}$, inductance de lissage $L = 10 \text{ mH}$.
- ▷ Onduleur monophasé en pont complet (quatre IGBT K_1 à K_4 avec diodes en antiparallèle), rendement $\eta_o = 97 \%$, porteuse MLI à $f_{\text{déc}} = 10 \text{ kHz}$.

Partie A : le redresseur

1. Montrez que la tension du bus continu vaut $E \approx 540 \text{ V}$. Quelle est la fréquence de l'ondulation de la tension redressée ? Pourquoi le filtrage du bus est-il plus facile qu'avec un pont PD2 ?
2. À chaque instant, deux diodes du pont conduisent le courant I_c appelé par le bus. Montrez que les pertes totales des diodes valent $P_D = 2 V_{\text{seuil}} I_c$.

Partie B : le chargeur de batterie

3. Calculez la valeur moyenne $\langle u \rangle$ de la tension que doit appliquer le hacheur à la batterie pour obtenir le courant de charge souhaité. En déduire le rapport cyclique α .
4. Calculez l'ondulation ΔI du courant de charge, puis I_{max} .
5. Le constructeur impose $\Delta I \leq 2 \text{ A}$ quel que soit α . L'inductance choisie convient-elle ?

Partie C : l'onduleur

6. Pourquoi les interrupteurs K_1 et K_4 d'un même bras ne doivent-ils jamais être fermés simultanément ?
7. En commande pleine onde, calculez la valeur efficace $U_{1\text{eff}}$ du fondamental de la tension de sortie ainsi que celles des harmoniques 3 et 5. Pourquoi ce mode de commande ne convient-il pas ici ?
8. En commande MLI, calculez l'indice de modulation m qui donne un fondamental de valeur efficace 230 V. Où se situent les premiers harmoniques ? Quel est le rôle du filtre LC ?

Partie D : bilan de puissance en fonctionnement normal

9. Le réseau étant présent, la charge absorbe 10 kW et la batterie se charge sous 10 A. En considérant le hacheur parfait, calculez la puissance fournie par le bus continu à l'onduleur et au chargeur, puis le courant moyen I_c débité par le redresseur.
10. En déduire les pertes P_D dans les diodes du redresseur et le rendement du redresseur. Conclure sur l'intérêt des convertisseurs statiques.

★ Exercice 9.1 : BTS 2008

A. Comment garantir la hauteur d'un jet d'eau ?

Intéressons-nous à l'alimentation d'un seul jet d'eau, celui du parterre Nord, dont le circuit hydraulique est représenté figure 7 : c'est un croquis et les distances ne sont pas représentées à l'échelle.

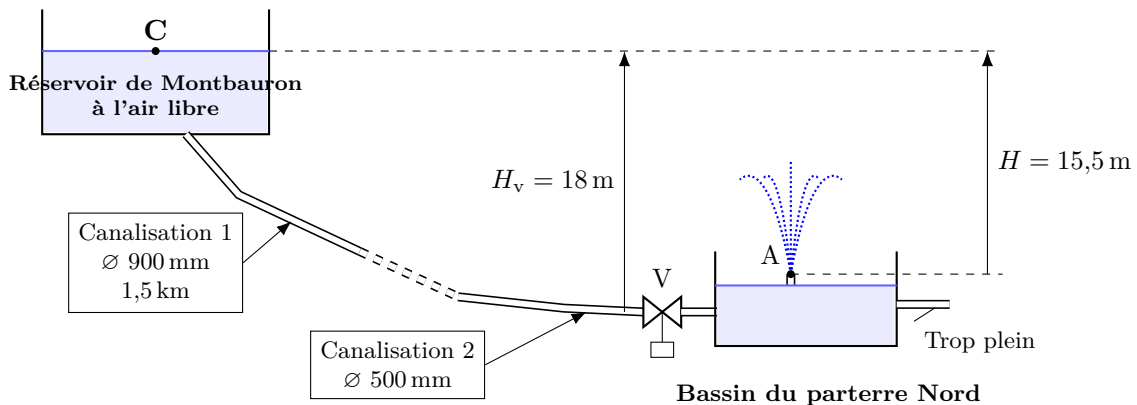
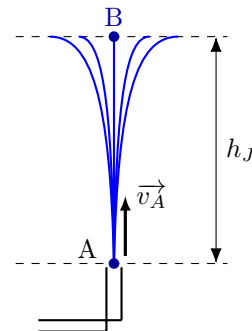


Fig. 7 – Alimentation du jet d'eau du parterre Nord (croquis, pas à l'échelle).

L'eau s'écoule par gravitation du réservoir de Montbauron au bassin du parterre Nord situé sur la grande terrasse. Une vanne V, commandée en tout ou rien, permet d'empêcher ou d'autoriser l'écoulement. L'eau du jet est récupérée dans le bassin et s'écoule par un trop plein vers d'autres bassins non étudiés.

- ▷ Masse volumique de l'eau : $\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$; accélération de la pesanteur : $g = 9,81\text{ m/s}^2$.
- ▷ Pression atmosphérique : $p_{\text{at}} = 1,013 \times 10^5\text{ Pa}$.
- ▷ Le fluide est considéré comme incompressible.

Suivons le déplacement d'une petite masse m d'eau entre les points A et B représentés sur la figure ci-contre. On appelle $\vec{v}_A$ la vitesse de cette petite masse d'eau à la sortie de la conduite au niveau du bassin. B est la position moyenne pour laquelle la vitesse est nulle. **On adopte une énergie potentielle nulle en A** et on note h_J la hauteur moyenne du jet.

**I- Hauteur du jet d'eau :**

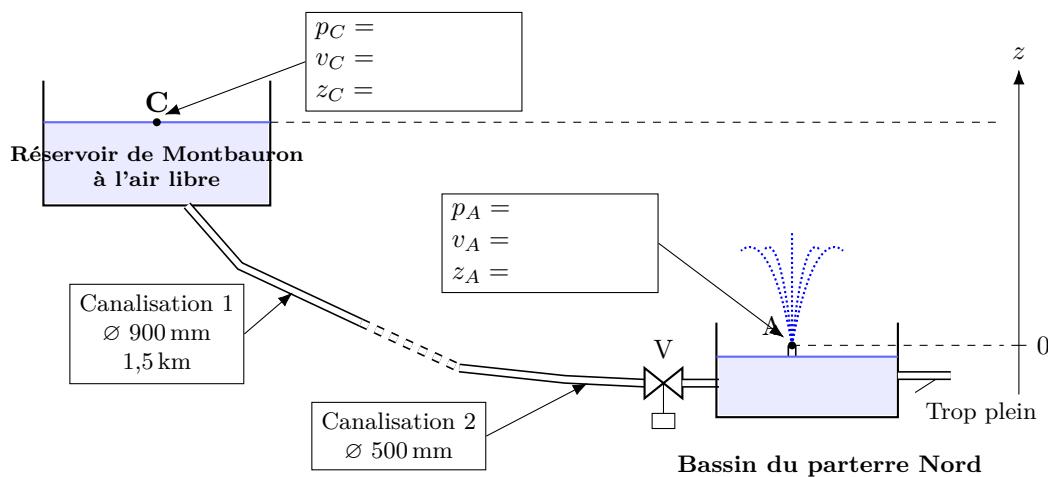
1. Donnez l'expression de l'énergie cinétique, notée $E_{c,A}$, de la petite masse m d'eau en A.

- Donnez l'expression de l'énergie cinétique, notée $E_{c,B}$, de la petite masse m d'eau en B.
- Donnez l'expression de l'énergie potentielle, notée $E_{p,A}$, de la petite masse m d'eau en A.
- Donnez l'expression de l'énergie potentielle, notée $E_{p,B}$, de la petite masse m d'eau en B.
- En exploitant le principe de conservation de l'énergie mécanique, trouvez la relation existant entre la vitesse v_A et la hauteur du jet h_J . Calculez la valeur de h_J lorsque $v_A = 17,4$ m/s.

II- Étude de l'alimentation du jet d'eau :

- En régime statique, la vanne V est fermée : calculez la pression p_v au niveau de la vanne du côté amont (côté de la canalisation 2).

En régime dynamique, la vanne V est maintenant ouverte, et on suppose l'écoulement laminaire et permanent. Nous nous proposons d'évaluer les vitesses de l'eau dans les différentes parties du circuit hydraulique sans tenir compte des pertes de charge. On adoptera une vitesse d'écoulement égale à zéro au point C (en raison de la grande surface du réservoir de Montbauron) ; et on s'appuiera pour les raisonnements sur le document ci-dessous :



On peut appliquer le principe de conservation de l'énergie le long de cet écoulement. Elle est traduite par l'équation de Bernoulli :

$$\frac{p_C - p_A}{\rho} + g(z_C - z_A) + \frac{v_C^2 - v_A^2}{2} = 0.$$

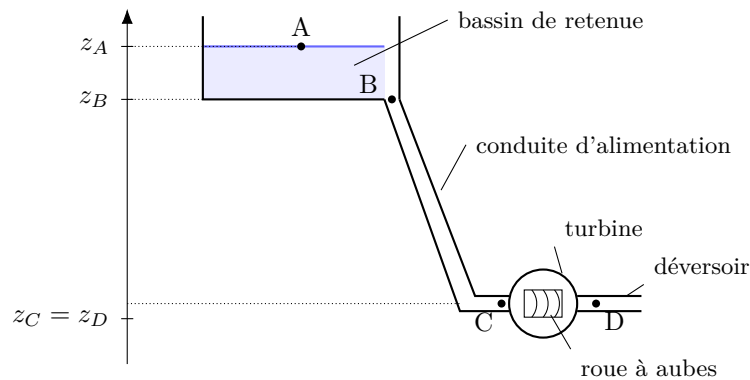
- Que représentent les grandeurs p , z et v ?
- Quelles sont les valeurs de p au point C (notée p_C) et au point A (notée p_A) ? Les indiquer sur le document ci-dessus.
- Quelles sont les valeurs de z au point C (notée z_C) et au point A (notée z_A) ? Les indiquer sur le document ci-dessus.
- Quelle est la valeur de v au point C (notée v_C) ? L'indiquer sur le document ci-dessus.
- En utilisant l'équation de Bernoulli, calculez la valeur de v au point A, notée v_A .
- On rappelle l'expression du débit volumique Q d'un fluide s'écoulant à la vitesse v dans une canalisation de section S : $Q = S \times v$, où Q est en m³/s, v en m/s et S en m². Calculez la valeur du débit volumique Q au point A si le diamètre de la section de la tuyère est $d_A = 110$ mm.
- Quelle est la grandeur qui se conserve le long du circuit hydraulique ?
- En déduire les vitesses dans les deux canalisations : v_1 dans la canalisation de diamètre $d_1 = 900$ mm et v_2 dans la canalisation de diamètre $d_2 = 500$ mm.

III- Retour sur l'enjeu :

1. Sachant que l'alimentation de tous les jets d'eau alimentés par le réservoir de Montbauron correspond à un débit de $2\,500\text{ m}^3/\text{h}$ et que les jeux d'eau durent $1\text{ h }30\text{ min}$, calculez le volume d'eau V_{mb} utilisé.
2. En déduire la valeur de la diminution ΔH du niveau dans le réservoir de Montbauron, sachant que la surface S_{mb} de ce réservoir est $16 \times 10^3\text{ m}^2$.

★ Exercice 9.2

Une turbine est alimentée par une retenue d'eau selon le schéma ci-dessous :



- ▷ Pour un fluide en écoulement permanent entre 2 points 1 et 2, sans perte de charge, recevant d'une machine une puissance P , l'équation de Bernoulli est :

$$p_2 - p_1 + \rho g (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = \frac{P}{Q_v}.$$

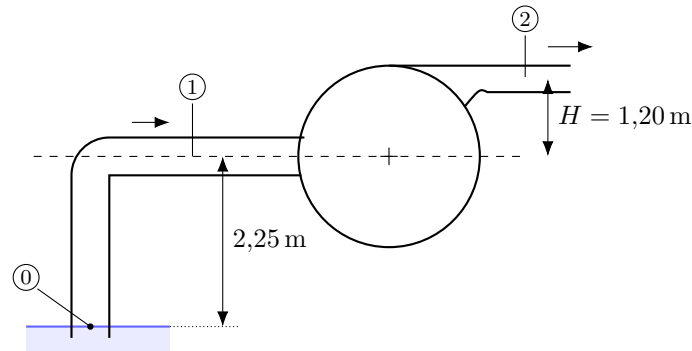
- ▷ Diamètre d de la conduite d'alimentation et du déversoir : $d = 700\text{ mm}$.
 ▷ Pression aux points A, C et D : $p_A = p_D = 1,01\text{ bar}$ et $p_C = 1,1\text{ bar}$.
 ▷ Altitude des points A, B et C : $z_A = 363\text{ m}$, $z_B = 361\text{ m}$ et $z_C = 353\text{ m}$.

L'eau sera considérée comme un fluide parfait incompressible et on supposera que le niveau de l'eau dans la retenue est constant.

1. Calculez, dans ces hypothèses, la vitesse d'écoulement v_C du fluide au point C (c'est-à-dire à l'entrée de la turbine).
2. En déduire le débit volumique Q_v de l'eau dans la conduite.
3. Justifiez que les vitesses d'écoulement en B et en C sont égales.
4. Calculez la pression p_B à l'entrée de la conduite.
5. Calculez la puissance fournie par l'eau à la turbine.

★ Exercice 9.3 : BTS 2001

Une pompe hydraulique (cf. schéma ci-dessous) débite $300 \text{ m}^3/\text{h}$ d'eau froide.



- ▷ Pour un fluide en écoulement permanent entre 2 points 1 et 2, sans perte de charge, recevant d'une machine une puissance P , l'équation de Bernoulli est :

$$p_2 - p_1 + \rho g (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = \frac{P}{Q_v}$$

- ▷ Sa conduite d'aspiration a un diamètre $d_1 = 200 \text{ mm}$.
 ▷ Sa conduite de refoulement a un diamètre $d_2 = 100 \text{ mm}$.
 ▷ La masse volumique de l'eau est $\rho_0 = 1\,000 \text{ kg/m}^3$; $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ et $p_{\text{atm}} = p_0 = 10^5 \text{ Pa}$.

1. Calculez la vitesse d'écoulement v_1 dans la tuyauterie d'aspiration.
2. Calculez la vitesse d'écoulement v_2 dans la tuyauterie de refoulement.
3. La pompe aspire l'eau stagnante d'un bassin ouvert situé $2,25 \text{ m}$ au-dessous du niveau (1), d'entrée de la pompe. Calculez la pression p_1 à l'entrée de la pompe, en (1).
4. Calculez le débit massique Q_m de la pompe en kg/s .
5. Sachant que la pression de l'eau à la sortie de la pompe, en (2), est $p_2 = 1,60 \times 10^5 \text{ Pa}$, calculez la puissance mécanique utile P_u fournie par la pompe pour assurer ce débit.
6. Cette pompe est actionnée par un moteur électrique. Le rendement global du groupe est de 80% . Calculez la puissance électrique P_a consommée.

★ Exercice 9.4 : BTS 2022

Documents : DTEC2 : réseaux fluides de l'installation ; DRES2 : correspondance des dimensions de tuyauteries.

- ▷ débit volumique maximal attendu : $Q_V = 10 \text{ m}^3/\text{h}$;
 ▷ accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m/s}^2$;
 ▷ masse volumique du VG : $\rho_{VG} = 1\,260 \text{ kg/m}^3$;
 ▷ la pression atmosphérique sera prise comme référence, toutes les pressions seront donc relatives.

Afin de déterminer les caractéristiques d'une pompe du circuit VG, il est nécessaire de faire une

étude hydraulique entre les points A et B repérés sur le DTEC2. Le point A est situé au niveau du **rez-de-chaussée** (en bas de la cuve). La figure 8 représente le schéma simplifié d'une cuve de VG associée à sa pompe.

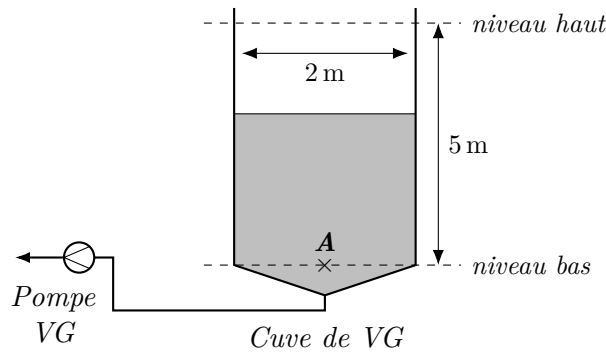


Fig. 8 – Schéma simplifié d'une cuve de VG.

Ø nominal	Pouces	Ø int. / Ø ext. (en mm)
DN 6	1/8"	5 / 10
DN 8	1/4"	8 / 13
DN 10	3/8"	12 / 17
DN 15	1/2"	15 / 21
DN 20	3/4"	20 / 27
DN 25	1"	26 / 34
DN 32	1¼"	33 / 42
DN 40	1½"	40 / 49
DN 50	2"	50 / 60
DN 60	2¼"	60 / 70
DN 65	2½"	66 / 76
DN 80	3"	80 / 90
DN 90	3½"	90 / 102
DN 100	4"	102 / 114
DN 125	5"	125 / 139
DN 150	6"	150 / 168

Tab. 2 – DRES2 : correspondance des dimensions des tuyauteries.

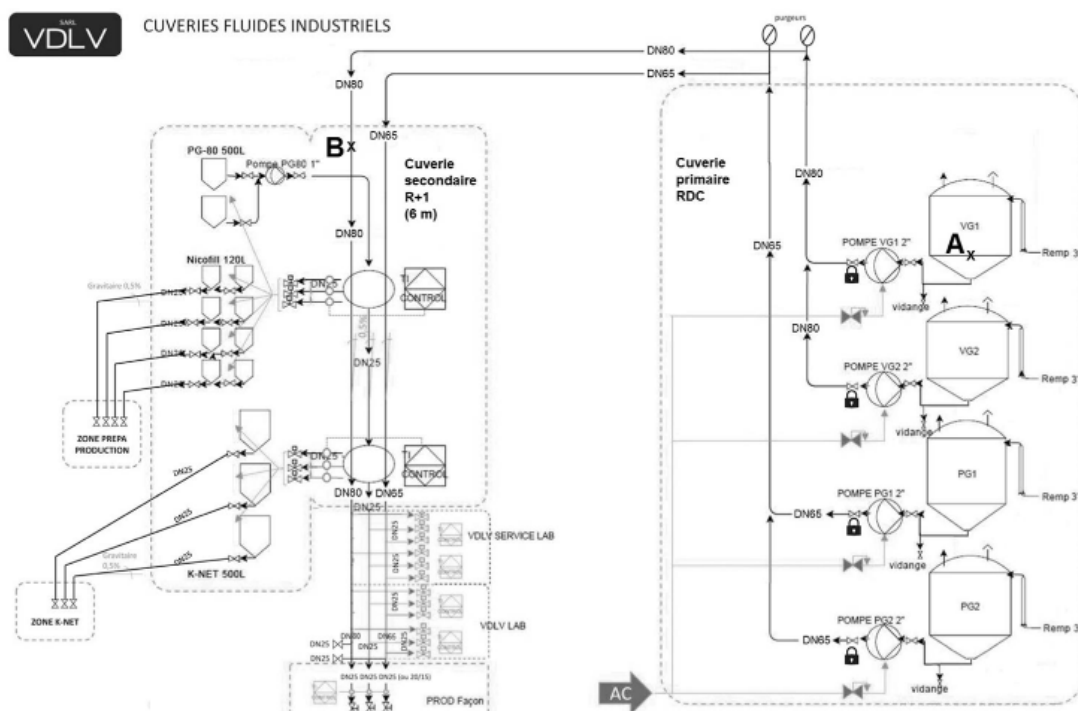


Fig. 9 – DTEC2 : réseaux fluides (extrait du dossier technique). Point A : dans la cuve VG1 de la cuverie primaire (RDC) ; point B : cuverie secondaire au R+1 (6 m).

Partie I :

1. Calculez la pression relative $p_{A,h}$ au niveau du point A lorsque la cuve est à son niveau haut (cuve pleine).
2. Calculez la pression relative $p_{A,b}$ au niveau du point A lorsque la cuve est à son niveau bas (cuve

vide).

3. En déduire le cas le plus défavorable (cuve pleine ou cuve vide) pour le dimensionnement de la pompe.

Compte tenu du diamètre important de la cuve, on néglige la vitesse v_A du fluide au niveau du point A (point bas dans la cuve). Le point B, repéré sur le DTEC2, est situé au premier étage (dans le tuyau, très proche de la sortie). Les points A et B sont à pression atmosphérique.

On rappelle le théorème de Bernoulli appliqué à un fluide s'écoulant d'un point A vers un point B, avec présence d'une pompe générant une différence de pression Δp_{pompe} et sans tenir compte des pertes de charge (v = vitesse en m/s, z = altitude en m, p = pression en Pa, ρ = masse volumique en kg/m³) :

$$p_A + \rho g z_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 + \Delta p_{\text{pompe}} = p_B + \rho g z_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

Partie II :

1. À partir du DTEC2, estimez la différence d'altitude ($z_B - z_A$) à remonter pour amener le fluide au niveau du point B.
2. À partir du DTEC2 et du DRES2, calculez la section intérieure S du tuyau qui achemine le VG.
3. Montrez que pour le débit volumique maximal attendu, la vitesse v_B du fluide au point B (dans le tuyau à l'étage) est d'environ 0,55 m/s.
4. Calculez la valeur de la différence de pression Δp_{pompe} que devra créer la pompe pour acheminer le VG du point A au point B.

Compte tenu de la viscosité élevée du VG, de la longueur de tuyau et des différents coudes, les pertes de charge sont ici très importantes et ont été évaluées à $\Delta p_{\text{pertes}} = 7,3 \times 10^5$ Pa.

On rappelle l'expression de la puissance hydraulique d'une pompe en fonction du débit et de la pression : $P_{\text{hyd}} = Q_v \times \Delta p$, avec P_{hyd} en W, Q_v en m³/s et Δp en Pa.

Partie III :

1. Calculez la valeur de la différence de pression totale $\Delta p'_{\text{pompe}}$ que devra générer la pompe en tenant compte de ces pertes de charge et concluez sur l'élément le plus important à prendre en compte pour son calcul.
2. Calculez la puissance hydraulique maximale que devra pouvoir fournir la pompe.

★ Exercice 9.5 : BTS 2020

Partie A : faut-il ajouter une quatrième pompe pour fournir une production suffisante à l'horizon 2030 ?

La station de captage de Mauves-sur-Loire comporte trois unités de pompage. Chaque unité comprend une tuyauterie d'aspiration avec sa vanne, une autre pour le refoulement avec sa vanne et un « groupe électropompe » composé d'une pompe entraînée par un moteur alimenté par son variateur permettant un débit variable.

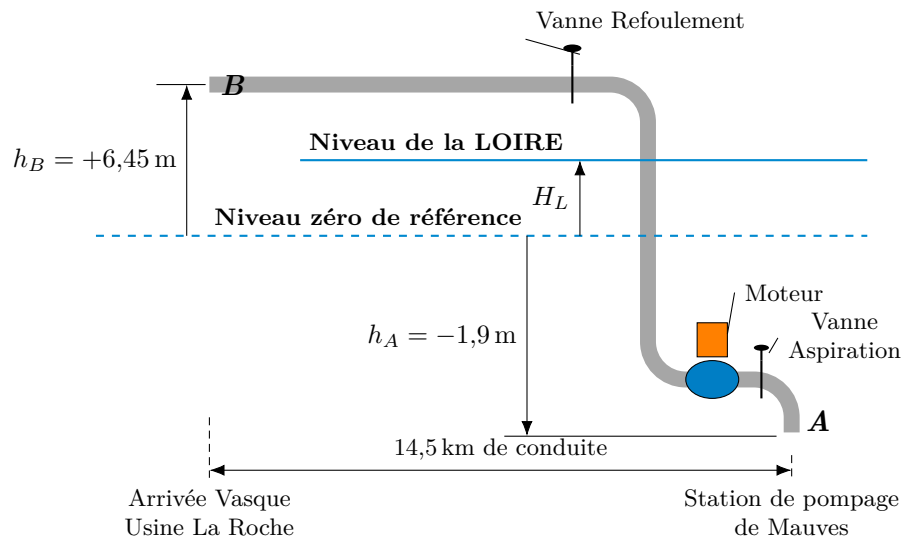
Actuellement la production peut évoluer de 2 000 m³/h à 12 500 m³/h en fonction de la demande de l'usine de traitement des eaux de la Roche. Une ou deux pompes sont alors en production et la 3^e à l'arrêt. À pleine puissance, il y a toujours une pompe à l'arrêt pour pouvoir remplacer une éventuelle pompe défaillante. C'est un principe de sûreté de fonctionnement imposé et nommé : « redondance $n - 1$ ».

À l'horizon 2030, l'usine de pompage souhaite atteindre un **débit maximum de 15 000 m³/h**.

Nantes étant proche de l'océan Atlantique, les marées modifient le niveau de la Loire en fonction de

l'heure et de leur coefficient. La station est prévue pour fonctionner avec une hauteur de la Loire H_L comprise entre $-0,3\text{ m}$ et $4,0\text{ m}$ par rapport au « niveau zéro », référence de l'Institut Géographique National.

Le profil de la conduite hydraulique qui relie l'aspiration au niveau de la Loire et le canal d'amenée de l'usine de traitement de La Roche est le suivant :



Document 1 : expression du théorème de Bernoulli généralisé

$$(p_B - p_A) + \rho \cdot g \cdot (h_B - h_A) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_B^2 - v_A^2) = \rho \cdot g \cdot (H_{mt} - \Delta H)$$

H_{mt} : hauteur manométrique totale de la pompe exprimée en mètres ; p : pression en pascals ; ρ : masse volumique du fluide en kg/m^3 ; g : accélération de la pesanteur en m/s^2 ; h : altitude en mètres ; v : vitesse d'écoulement en m/s ; ΔH : pertes de charge en mètres.

Document 2 : caractéristiques de la conduite

Dimension : on pourra considérer que chaque « ligne de pompage » est constituée d'une conduite de diamètre $D = 800\text{ mm}$.

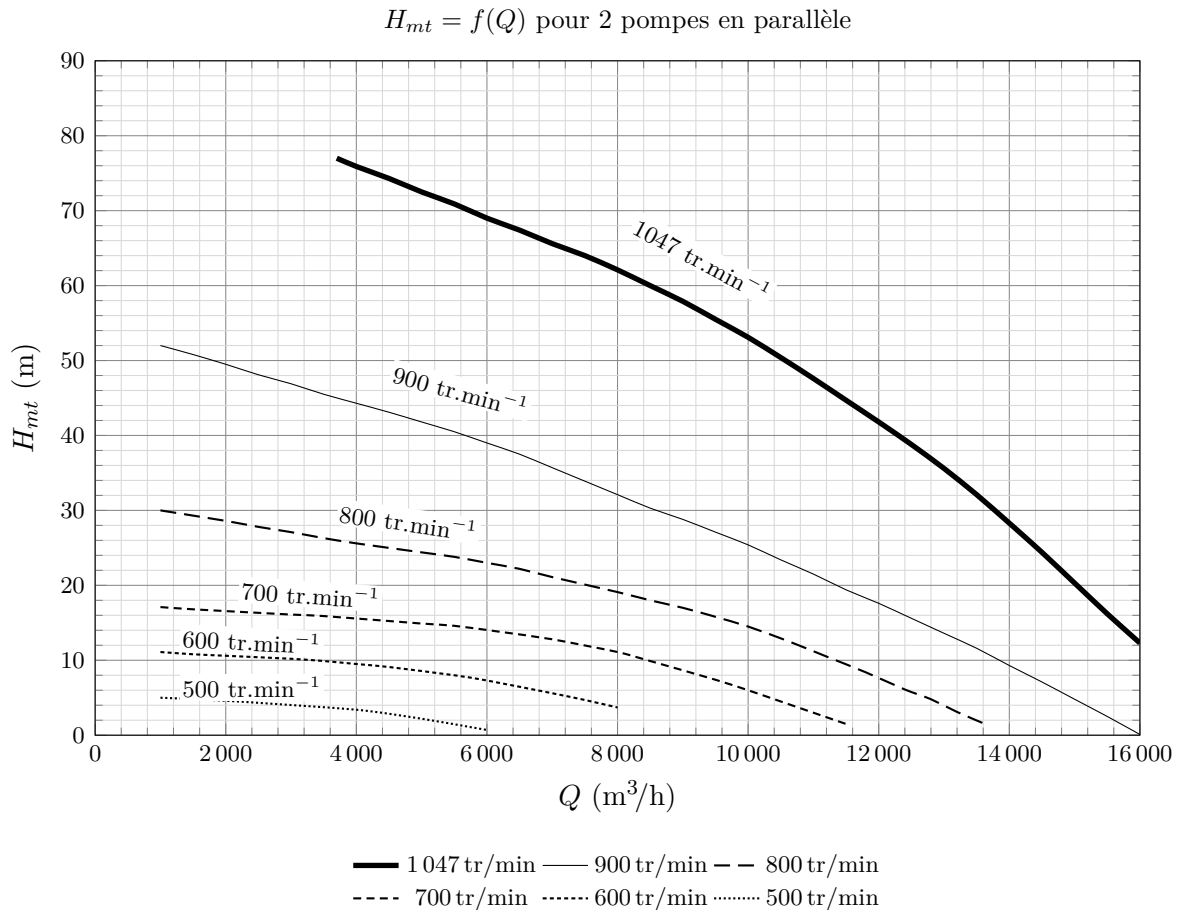
Pertes de charge ΔH : $\Delta H = 2,4 \cdot Q_0^2$, avec ΔH : pertes de charge en mètres ; Q_0 : débit en m^3/s .

Partie I :

1. La section de la canalisation aux extrémités A et B de la conduite étant la même, comparez les vitesses du fluide en ces points.
2. Pour un débit Q_0 de $4\text{ m}^3/\text{s}$, calculez les vitesses v_A et v_B de l'eau pour les points A et B placés à chaque extrémité de la conduite.
3. En exploitant la relation de l'hydrostatique et à partir du profil de la conduite hydraulique, exprimez la pression p_A au point A en fonction de H_L , ρ , g , h_A et de la pression atmosphérique p_{atm} .
4. Montrez que si la pression au point B est égale à la pression atmosphérique, le théorème de Bernoulli peut s'écrire : $H_{mt} = \Delta H + (h_B - H_L)$.
5. À partir du document 2, et dans le cas le plus défavorable correspondant à une hauteur de la Loire la plus basse, démontrez que la relation qui donne la hauteur manométrique totale H_{mt} en fonction du débit Q (en m^3/h), correspondant à Q_0 , s'exprime : $H_{mt} = 6,8 + 1,9 \times 10^{-7} \times Q^2$.

6. Calculez la hauteur manométrique totale H_{mt} que doit vaincre la pompe pour un débit de $15 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ dans le cas le plus défavorable.

Dans la suite de cette partie, on considérera que la hauteur manométrique totale dans le cas le plus défavorable est $H_{mt} = 50 \text{ m}$. Le document ci-dessous donne la caractéristique $H_{mt} = f(Q)$ pour 2 pompes fonctionnant en parallèle à différentes vitesses de rotation. La vitesse de rotation maximale des moteurs alimentés par leurs variateurs est de $1\,047 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$. Les pompes ayant la même vitesse de rotation, le débit total de n pompes en parallèle est égal à n fois le débit d'une pompe.



Partie II :

1. Pour la vitesse maximale de rotation, effectuez sur le document précédent le tracé qui permet de déterminer la hauteur manométrique maximale $H_{mt,\max}$ que peuvent vaincre les 2 pompes pour un débit total de $15 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$. Concluez.
2. Sur ce même document, effectuez le tracé qui permet de déterminer le débit maximal $Q_{\max}$ des 2 pompes pour une hauteur manométrique de 50 m.
3. Vérifiez que l'ajout d'une troisième pompe permettrait d'obtenir un débit de $15 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ dans la conduite.

★ Exercice 9.6 : BTS 2016

Partie A. Dimensionnement des motoventilateurs.

L'objectif de cette partie est de vérifier le dimensionnement des groupes motoventilateurs de l'usine ouest afin d'assurer l'extraction des fumées en cas d'incendie dans le tube sud.

A.1. Débit de désenfumage. L'instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers réglemente la ventilation de désenfumage en cas d'incendie. Pour les tunnels urbains de longueur supérieure à 300 m, on a extrait les prescriptions pour le désenfumage en ventilation semi-transversale :

Doc 1 : extrait de la circulaire n° 2000-63 du 25 août 2000

« Les dispositions qui suivent sont basées sur un incendie de dimensionnement de poids lourd présentant les caractéristiques suivantes :

▷ (...)

▷ Débit de fumées de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ (...)

Le débit d'aspiration doit être majoré par rapport au débit de fumées produit par l'incendie pour tenir compte de l'inévitable entraînement d'air frais au niveau de l'extraction. Celui-ci sera au minimum égal au débit de l'incendie de dimensionnement ($80 \text{ m}^3/\text{s}$) augmenté d'un débit (en m^3/s) égal en valeur à une fois et demie la section transversale intérieure du tunnel (en m^2). Ainsi par exemple, pour une section intérieure de 50 m^2 , le débit d'extraction sera au moins de $155 \text{ m}^3/\text{s}$. (...) Il est recommandé de limiter la vitesse moyenne nominale de l'air aspiré à 15 m/s au passage des bouches de désenfumage. »

Données pour le tube sud du tunnel de Neuilly

▷ section transversale intérieure du tube sud : $S = 67,5 \text{ m}^2$;

▷ circuit d'extraction des fumées : réalisé à l'aide de 176 bouches réparties le long du tunnel ; bouches de désenfumage rectangulaires de dimensions $0,5 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$; débit supposé identique pour chaque bouche.

Chaque motoventilateur, placé dans un cylindre (nommé virole), d'axe horizontal, relié aux gaines de ventilation du tunnel, assure un débit Q_v d'extraction des fumées égal à $125 \text{ m}^3/\text{s}$. On considère l'écoulement de l'air entre un point A situé en amont du motoventilateur et un point B situé en aval. Pour toute cette étude on supposera que le fluide est incompressible et que le régime d'écoulement est permanent.

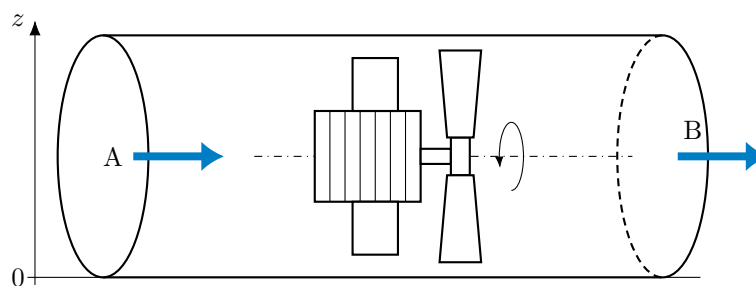


Fig. 10 – Motoventilateur placé dans sa virole.

On rappelle la relation de Bernoulli pour l'écoulement d'air, avec échange d'énergie entre deux points A et B :

$$\frac{1}{2}\rho v_A^2 + p_A + \rho g z_A + \frac{P_{\text{vent}}}{Q_v} = \frac{1}{2}\rho v_B^2 + p_B + \rho g z_B$$

P_{vent} : puissance aéraulique du ventilateur en W ; Q_v : débit d'extraction dans la virole en m^3/s .

I- Débit de désenfumage :

1. Déterminez le débit d'extraction minimum, noté Q_{min} , pour assurer le désenfumage compatible avec les prescriptions.

2. Pour une vitesse moyenne de l'air de 15 m/s au niveau de chaque bouche de désenfumage, vérifiez que le débit d'air traversant chaque bouche, noté Q_{bouche} , est égal à 1,5 m³/s. En déduire le débit maximum, appelé Q_{max} , assuré par l'ensemble des bouches de désenfumage.
3. En pratique, l'extraction des fumées est assurée par 2 motoventilateurs, qui, en fonctionnement simultané, possèdent chacun un débit nominal de 125 m³/s. Montrez que ce choix permet un débit d'extraction compris entre Q_{min} et Q_{max} déduits de la circulaire n° 2000-63.

II- Puissance aéraulique d'un ventilateur :

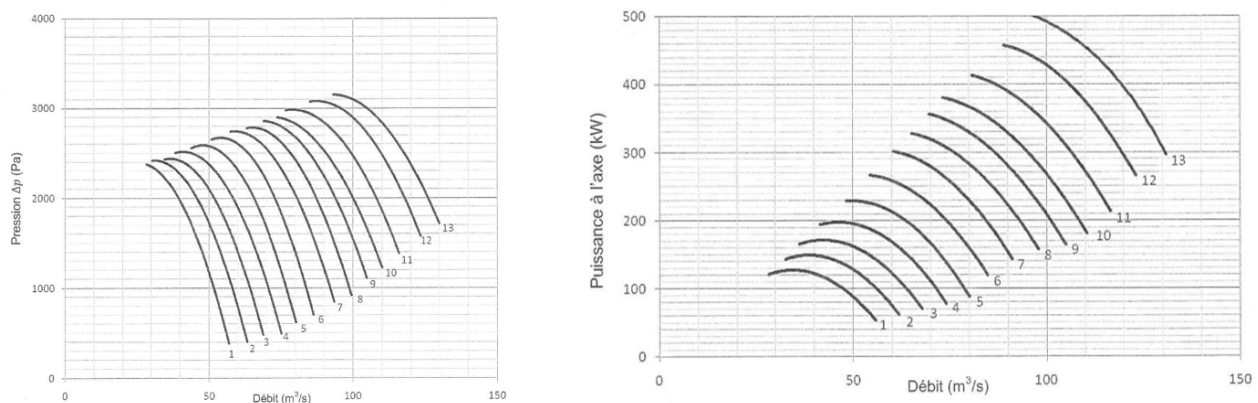
1. Justifiez pourquoi les débits amont et aval du motoventilateur sont égaux. En déduire une relation entre les vitesses en amont v_A et en aval v_B du motoventilateur.
2. En appliquant la relation de Bernoulli au cas étudié, exprimez P_{vent} en fonction de Q_v et $\Delta p = p_B - p_A$.

La différence de pression Δp doit permettre de vaincre l'ensemble des pertes de charge (régulières et singulières) du réseau aéraulique de la ventilation relié à la virole d'un ventilateur. Ces pertes de charge sont estimées à 2 000 Pa lors du fonctionnement en désenfumage.

3. Calculez la puissance aéraulique P_{vent} d'un ventilateur nécessaire au désenfumage.

III- Puissance mécanique :

Le document ci-dessous présente les différentes caractéristiques « $\Delta p - Q_v$ » d'un des deux ventilateurs ainsi que la puissance mécanique absorbée sur l'arbre tournant à 1 500 tr · min⁻¹. Le constructeur propose différents réglages des pales numérotés de 1 à 13. Le réglage de l'angle des pales est effectué en usine et permet d'atteindre le point de fonctionnement désiré.



À gauche : pression Δp (Pa) en fonction du débit (m³/s) ; à droite : puissance à l'axe (kW) en fonction du débit (m³/s), pour les positions de pales 1 à 13.

1. Placez sur le document ci-dessus le point de fonctionnement d'un ventilateur (Δp de 2 000 Pa et débit de 125 m³/s). En déduire le numéro de position de pales permettant de garantir ce point de fonctionnement.
2. Déterminez la puissance mécanique correspondante à fournir sur l'arbre du ventilateur tournant à 1 500 tr · min⁻¹.
3. En déduire le rendement du ventilateur pour ce point de fonctionnement. Comparez votre résultat à la valeur de 71 % donnée par le constructeur.

★ Exercice 9.7 : BTS 2013

A. Détermination de la puissance hydraulique mise en jeu

Pour des raisons environnementales, il a été retenu de supprimer les 6 centrales existantes au fil de l'eau par une centrale souterraine unique en tirant profit du potentiel hydraulique. Nous allons dans cette partie étudier les propriétés de l'ouvrage hydraulique retenu et vérifier qu'il permet une production unitaire de 47 MW.

Le circuit hydraulique est schématiquement représenté en figure 11 : c'est un croquis et les distances ainsi que les altitudes ne sont pas représentées à l'échelle.

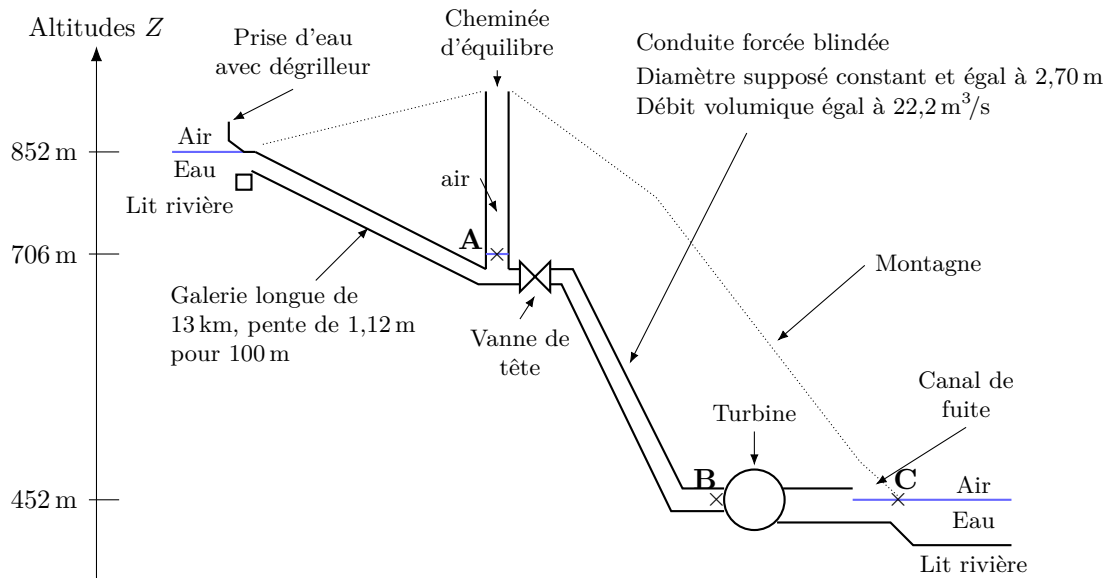


Fig. 11 – Circuit hydraulique de l'aménagement (croquis, pas à l'échelle).

L'eau est prélevée dans le lit de la rivière à l'altitude 852 m. Elle s'écoule par gravitation jusqu'à la sortie du canal de fuite à l'altitude 452 m.

On rappelle que la charge de l'eau à une altitude z quelconque, notée charge $_z$, est exprimée en J/m³. La charge a pour expression $P + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v^2$ avec P la pression relative de l'eau à l'altitude z exprimée en Pa ou en J/m³, $\rho g z$ l'expression de l'énergie potentielle volumique à l'altitude z exprimée en J/m³ et $\frac{1}{2} \rho v^2$ l'expression de l'énergie cinétique volumique à l'altitude z exprimée en J/m³.

La pression atmosphérique notée P_{at} sera prise comme **origine des pressions**. Toutes les pressions utilisées seront donc des pressions relatives mesurées par rapport à cette origine arbitraire.

On donne la masse volumique de l'eau $\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$ et la valeur de l'accélération de la pesanteur $g = 9,81\text{ m/s}^2$.

L'altitude absolue (mesurée par rapport au niveau de la mer) de la surface libre en sortie du canal de fuite, repérée par le point C de la figure 11, est notée Z_C et est égale à 452 m. L'altitude absolue de la surface libre de l'eau dans la cheminée d'équilibre, repérée par le point A de la figure 11, est notée Z_A ; elle est égale à 706 m. Par la suite, **C sera pris comme origine des altitudes**. Les altitudes prises en référence à C seront notées z .

I- Calcul de la charge de l'eau à l'entrée de la conduite forcée blindée (point A) :

- Montrez que la valeur de la pression relative de l'eau, notée P_A , à la surface libre au point A de la figure 11 est nulle.
- Donnez les valeurs de z_C et z_A . Calculez la valeur de l'énergie potentielle volumique de l'eau au point A, notée $E_{p,vA}$.

Le diamètre intérieur de la conduite forcée blindée est égal à 2,70 m et est supposé constant sur toute la longueur de celle-ci. Dans les conditions de fonctionnement nominal, la valeur du débit volumique

est égale à $22,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

3. Calculez la valeur de la section interne de la conduite blindée. En déduire la valeur nominale de la vitesse linéaire d'écoulement de l'eau à l'entrée de la conduite blindée.
4. Calculez la valeur de l'énergie cinétique volumique de l'eau au point A, notée $E_{c,vA}$.
5. Montrez que la valeur de la charge de l'eau au point A, notée charge_A, est voisine de $2,5 \text{ MJ/m}^3$.

II- Calcul de la charge de l'eau à l'entrée de la turbine (point B) :

On rappelle que le théorème de Bernoulli correspond à un bilan de charge appliqué à l'écoulement de l'eau entre deux altitudes, à savoir :

$$\text{charge}_{\text{en amont de l'écoulement}} = \text{charge}_{\text{en aval de l'écoulement}} + \text{pertes de charge.}$$

On estime que les pertes de charge dans la conduite forcée ont pour valeur $21,9 \text{ kJ/m}^3$.

1. Appliquez le théorème de Bernoulli à l'écoulement du point A au point B pour déterminer la valeur de la charge de l'eau au point B, notée charge_B.

III- Calcul de la charge de l'eau à la sortie du canal de fuite (point C) :

1. Donnez la valeur de la pression relative de l'eau, notée P_C , à la surface libre au point C.
2. Calculez la valeur de l'énergie potentielle volumique de l'eau au point C, notée $E_{p,vC}$ (on considérera que $z_C = z_B$).
3. Donnez la valeur du débit volumique au point C juste à la sortie du canal de fuite, supposé sans perte de charge et de section identique à la conduite forcée. En déduire la valeur de l'énergie cinétique volumique de l'eau au point C, notée $E_{c,vC}$.
4. Calculez la valeur de la charge de l'eau au point C, notée charge_C.

IV- Calcul de l'énergie prélevée au niveau de la turbine :

1. Appliquez le théorème de Bernoulli à l'écoulement du point B au point C pour déterminer la valeur des pertes de charge ponctuelles de la turbine, notées ΔP .

V- Calcul de la puissance hydraulique de la turbine :

1. À l'aide d'une analyse dimensionnelle, montrez que l'expression $Q_v \times \Delta P$ est homogène à une puissance.
2. On considère que la valeur des pertes de charge ponctuelles de la turbine est égale à $2,47 \text{ MJ/m}^3$. Calculez la valeur de la puissance hydraulique de la turbine, notée $P_{\text{hydro}} = Q_v \times \Delta P$.

VI- Calcul de la puissance active électrique fournie par le transformateur élévateur :

Intéressons-nous aux différentes conversions d'énergie mises en œuvre par le groupe de production et le transformateur élévateur de l'aménagement hydroélectrique. Ceci est représenté schématiquement en figure 12.

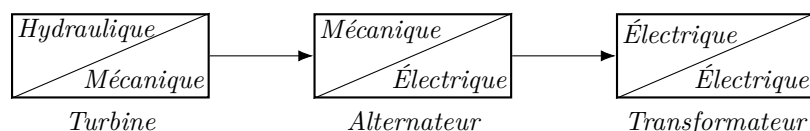


Fig. 12 – Chaîne de conversion de l'énergie.

Pour le fonctionnement dans les conditions nominales, la valeur des pertes de la turbine est égale à $4,9 \text{ MW}$. Dans les mêmes conditions, le rendement de l'alternateur, noté η_{alt} , est égal à $97,4 \%$ et les pertes du transformateur sont égales à $1,4 \text{ MW}$.

1. Calculez la valeur nominale de la puissance active électrique P_t fournie en sortie du transformateur élévateur pour une puissance hydraulique de 54,8 MW fournie à la turbine. Quel est le rendement global de l'installation ?

VII- Rôle de l'épaisseur de blindage de la conduite forcée :

L'épaisseur du blindage de la conduite forcée est égale à 40 cm sur le premier tiers de la conduite et à 80 cm sur les 2/3 inférieurs de la conduite. On rappelle que dans les conditions de fonctionnement nominal la vitesse de l'écoulement de l'eau dans la conduite vaut 3,87 m/s.

1. On considère que la valeur de la charge au point B est 2,48 MJ/m³. Calculez la valeur de la pression relative de l'eau au point B, notée P_B .
2. Comment expliquer le fait que l'épaisseur du blindage est plus importante sur la moitié inférieure de la conduite forcée ?

★ Exercice 10.1

Pour chacune des situations suivantes, indiquez, **en justifiant**, la ou les bonnes réponses.

1. Dans une chaîne de fabrication, un tapis est mis en mouvement grâce à une poulie de diamètre $D = 35,5 \text{ cm}$ entraînée par un motoréducteur introduisant un rapport de réduction $k_r = 1600$. La fréquence de rotation du moteur N_m est de 510 tr/min.
 - ▷ Le couple en sortie du réducteur est plus faible qu'en entrée.
 - ▷ La vitesse linéaire du tapis est d'environ 6 mm/s.
 - ▷ La vitesse angulaire de rotation de la poulie est de 0,32 rad/s.
2. Pour le dispositif de la question précédente, la tension de la bande crée un couple résistant au niveau du moteur de moment $C_r = 0,6 \text{ N} \cdot \text{m}$. On néglige toutes les pertes.
 - ▷ La puissance développée par le moteur est de 32 W.
 - ▷ Le moment du couple d'entraînement de la poulie est de 360 N · m.
 - ▷ Le rendement du réducteur est de 47 %.
3. Un skieur emprunte un téléski pour gravir une piste de longueur $L = 200 \text{ m}$. La perche exerce sur le skieur une force de traction constante $\vec{F}$ d'intensité $F = 400 \text{ N}$ qui fait un angle de 25° avec la direction de déplacement. Les frottements exercés par la piste sont modélisés par une force $\vec{f}$.
 - ▷ Au cours du mouvement l'énergie mécanique est conservée.
 - ▷ Le poids $\vec{P}$ exerce un travail moteur et la force $\vec{f}$ un travail résistant.
 - ▷ Le travail de la force $\vec{F}$ est de 72,5 kW.
4. Un moteur développant un couple $C_m = 16 \text{ N} \cdot \text{m}$ entraîne une charge mécanique exerçant sur son arbre un couple résistant constant $C_r = 11 \text{ N} \cdot \text{m}$. Le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes est $J = 0,18 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.
 - ▷ La vitesse angulaire du moteur est constante.
 - ▷ L'accélération angulaire du moteur est de 27,8 rad/s².
 - ▷ La charge mécanique est de type levage.
5. Un atelier est équipé d'une scie circulaire dont la lame a un rayon $r = 30 \text{ cm}$. Cette lame tourne à une fréquence de rotation de 1 800 tr/min.
 - ▷ La vitesse angulaire de rotation de la lame est de 157 rad/s.
 - ▷ La vitesse de coupe est d'environ 57 m/s.
 - ▷ La vitesse de coupe est d'environ 87 m/s.
6. Un véhicule en mouvement rectiligne, de vitesse initiale $v_0 = 15 \text{ km/h}$, possède une accélération constante de 1,5 m/s².
 - ▷ Le solide est en mouvement rectiligne uniforme.

- ▷ En 5 s, le véhicule atteint une vitesse de 42 km/h.
- ▷ En 3 s, le véhicule a parcouru 67,5 m.

★ Exercice 10.2 : BTS 2014

On décompose, comme représenté ci-dessous, les déplacements du portique en 4 phases suivant son sens de déplacement et suivant sa position par rapport au point milieu. Le câble d'alimentation du portique est fixé au quai au point milieu et s'enroule (ou se déroule) sur un enrouleur à tambour porté par le portique.

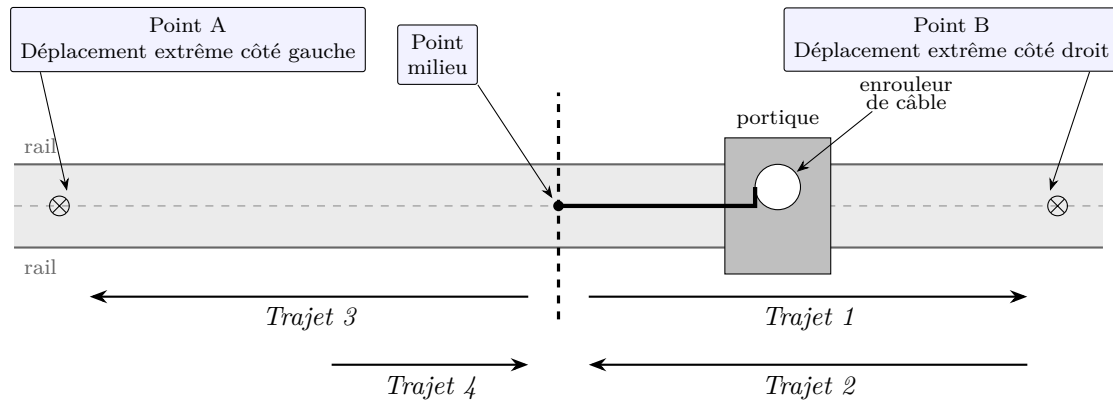


Figure 1 – Déplacements du portique le long du quai (vue de dessus schématique).

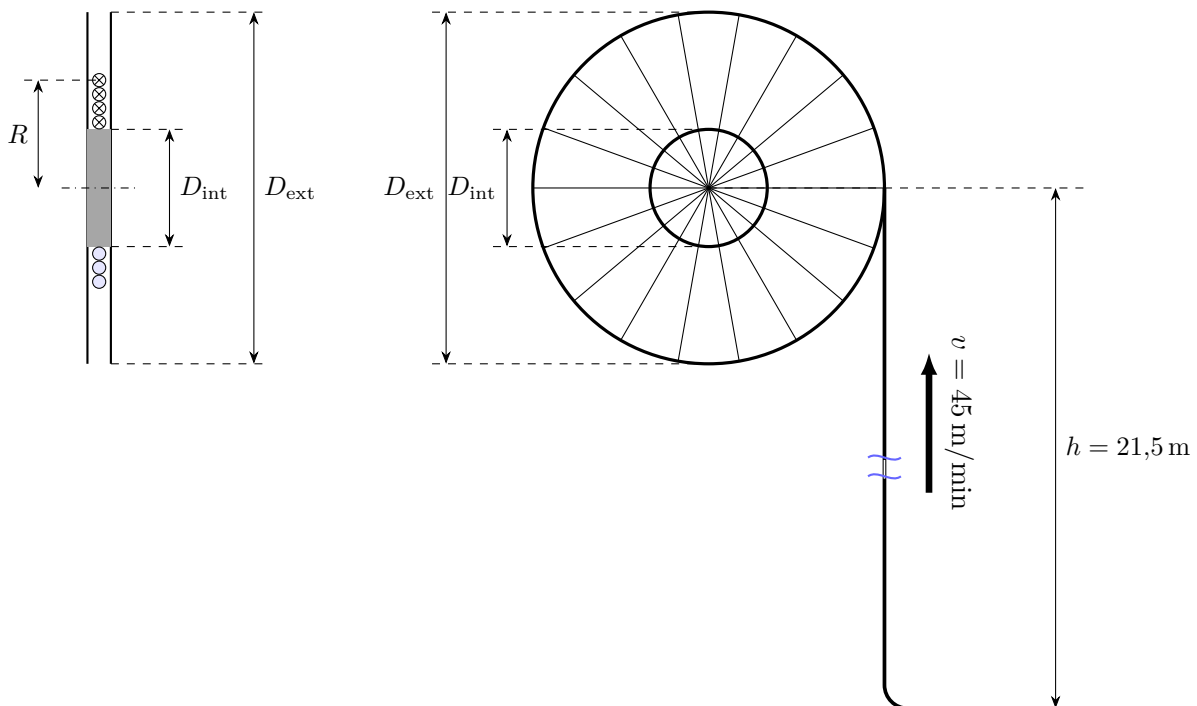


Figure 2 – Enrouleur à tambour : coupe (à gauche) et vue de face (à droite).

On note :

- ▷ D_{ext} , le diamètre extérieur du tambour (7,50 m) ;
- ▷ D_{int} , le diamètre intérieur du tambour (2,50 m) ;
- ▷ R , le rayon d'enroulement ;
- ▷ h , hauteur de l'axe de l'enrouleur par rapport au sol (21,5 m) ;
- ▷ $D_{\text{câble}}$, le diamètre du câble électrique (57,0 mm) ;
- ▷ m_L , la masse linéique du câble (8,02 kg/m) ;
- ▷ L , longueur totale de câble électrique (600 m) ;
- ▷ v , vitesse du câble (45,0 m/min) ;
- ▷ Ω_{tambour} , vitesse de rotation du tambour (rad/s) ;
- ▷ C_{tambour} , le moment du couple sur l'axe du tambour ;
- ▷ g , constante de pesanteur (9,81 m/s²).

I – Détermination de la plage de variation de vitesse de rotation du tambour

1. Calculez le rayon minimum R_{min} d'enroulement des spires de câble sur le tambour. Indiquez sur votre copie, en utilisant les notations de la figure 1 (point A, point milieu ou point B), les positions du portique correspondant à cet état d'enroulement.
2. Le rayon maximum R_{max} d'enroulement des spires de câble sur le tambour est $R_{\text{max}} = 3,53$ m. Indiquez sur votre copie, en utilisant les notations de la figure 1, les positions du portique correspondant à cet état d'enroulement.
3. Lorsque la totalité du câble est enroulée, l'enrouleur comporte 40 spires. Vérifiez que les dimensions du tambour permettent d'enrouler la totalité de ces 40 spires.

La vitesse de déplacement du portique le long du quai est supposée constante et égale à 45 mètres par minute. Cela impose que la vitesse linéaire d'enroulement ou de déroulement du câble soit aussi de 45 mètres par minute. La vitesse de rotation du tambour devra donc s'adapter à cette contrainte tout au long du déplacement.

4. Lorsque le rayon d'enroulement augmente, comment la vitesse angulaire de rotation évolue-t-elle ?
5. En déduire les vitesses angulaires de rotation maximale $\Omega_{\text{tambour,max}}$ et minimale $\Omega_{\text{tambour,min}}$ du tambour (en rad/s).

II – Étude de la puissance au niveau du tambour

Dans une première approche, en négligeant les frottements, on peut considérer que le seul effort de rotation qui s'exerce sur le tambour est le moment du couple résultant du poids du câble suspendu à enrouler.

1. Montrez que la masse du câble suspendu est $m = 172$ kg.
2. La puissance nécessaire au niveau du tambour, notée P_{tambour} , pour enrouler le câble est donnée en fonction de g , m et v par la relation : $P_{\text{tambour}} = m \times g \times v$. Calculez cette puissance pendant l'enroulement du câble.
3. Montrez que cette puissance est constante au cours de l'enroulement.
4. Montrez que l'expression du moment du couple au niveau du tambour est $C_{\text{tambour}} = m \times g \times R$.

5. Comment évolue le moment du couple au niveau du tambour lors de l'enroulement ?
6. Calculez les valeurs extrêmes du moment du couple au niveau du tambour.

★ Exercice 10.3 : BTS 2018

Le principe de fonctionnement du système d'entraînement est représenté ci-dessous :

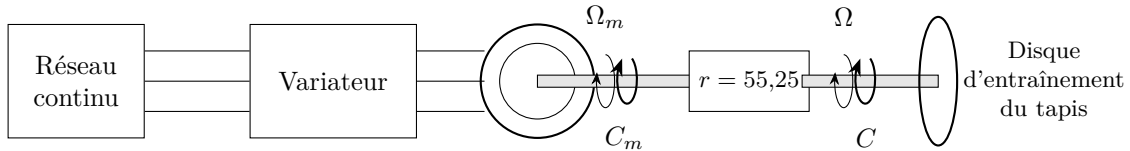


Figure 4 – Entraînement du convoyeur.

Caractéristiques du moteur synchrone triphasé :

- ▷ rotor (ou « roue polaire ») : aimant permanent ;
- ▷ stator : couplé en étoile ;
- ▷ $\cos \Phi = 0,94$;
- ▷ 230 V / 400 V.

Caractéristiques du réducteur de vitesse :

- ▷ rapport de réduction $r = \frac{\Omega_m}{\Omega} = 55,25$;
- ▷ rendement $\eta = 0,92$.

En régime permanent le tapis se déplace à une vitesse $v = 5,2 \text{ m/min}$. Il est entraîné par un disque de diamètre $D = 185 \text{ mm}$. Le moment d'inertie de l'ensemble du système à entraîner vaut : $J = 160 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Le moment du couple résistant C_r de l'ensemble du système à entraîner est constant : $C_r = 200 \text{ N} \cdot \text{m}$.

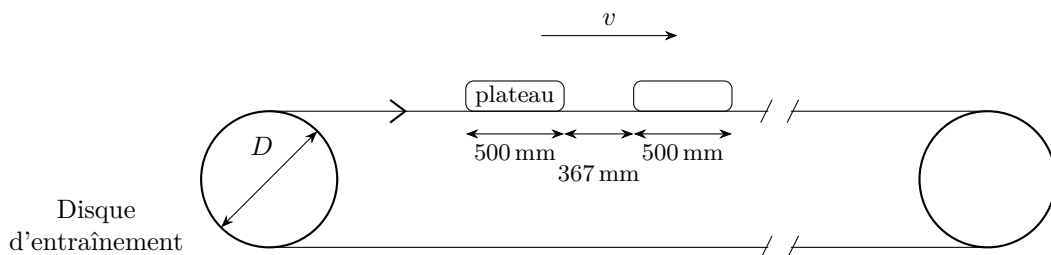


Figure 5 – Schéma de l'entraînement du convoyeur.

La caractéristique donnant la vitesse v du tapis en fonction du temps est représentée sur la figure 6 ci-dessous :

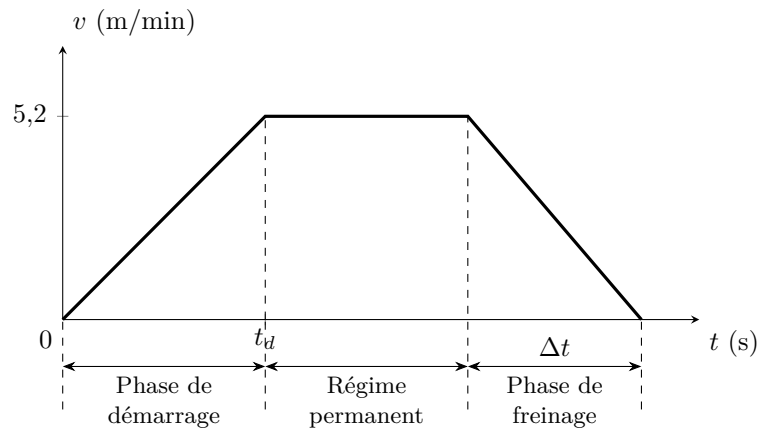


Figure 6 – Profil de vitesse du convoyeur.

I – Caractéristiques mécaniques du tapis

1. En régime permanent, on souhaite un débit de 360 plateaux par heure. Chaque plateau a une largeur de 500 mm et l'espacement entre deux plateaux est de 367 mm. Montrez que la vitesse v de déplacement du tapis est égale à 5,2 m/min.
2. Déterminez la vitesse angulaire Ω du disque d'entraînement.
3. Calculez l'accélération angulaire $\frac{d\Omega}{dt}$ lors de la phase de démarrage pour $t_d = 0,50$ s.
4. En appliquant la relation fondamentale de la dynamique pour un solide en rotation $C = J \times \frac{d\Omega}{dt} + C_r$, calculez le moment du couple C nécessaire pour assurer le démarrage.
5. Pendant la phase de freinage le moment du couple de freinage C vaut $-100 \text{ N} \cdot \text{m}$. Calculez la durée de la phase de freinage Δt .

II – Caractéristiques mécaniques du moteur

Pour l'entraînement du tapis en régime permanent, on donne les valeurs des grandeurs mécaniques suivantes : la vitesse angulaire Ω du disque d'entraînement vaut $0,937 \text{ rad/s}$; le moment du couple de l'ensemble du système à entraîner vaut $C = 200 \text{ N} \cdot \text{m}$.

1. Calculez, pour le régime permanent, la vitesse angulaire de rotation du moteur Ω_m .
2. Calculez, pour le régime permanent, la puissance mécanique délivrée par le moteur P_m .
3. Calculez, pour le régime permanent, le moment du couple moteur C_m .

III – Caractéristiques électriques du moteur

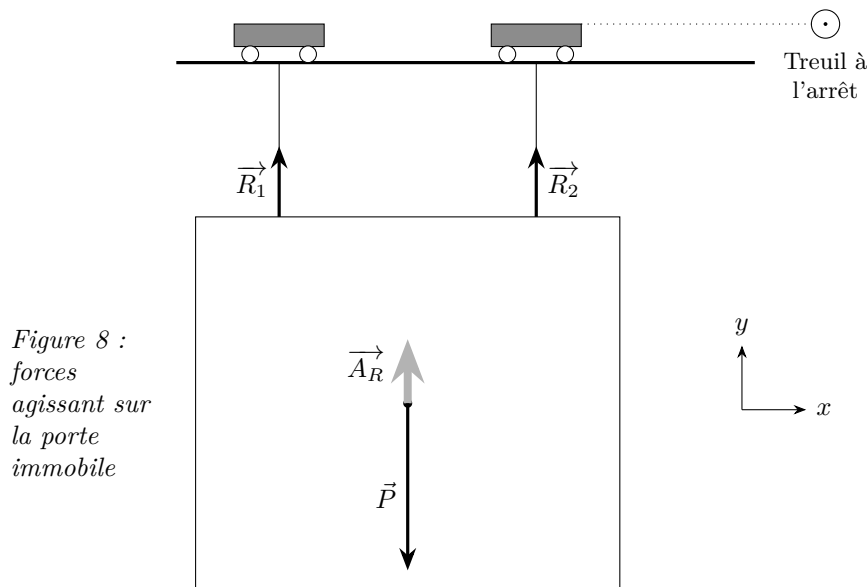
1. Donnez la valeur efficace V du fondamental de la tension aux bornes de chaque enroulement du stator pour un fonctionnement nominal.
2. Pour une fréquence d'alimentation de 30 Hz, le moteur tourne à une vitesse de 450 tr/min, calculez son nombre de pôles.
3. Le moteur absorbe une puissance électrique $P_a = 220 \text{ W}$. Calculez la valeur efficace I du courant dans un enroulement du stator (le courant est supposé sinusoïdal).
4. Déterminez le rendement de ce moteur synchrone.
5. Quel est, d'un point de vue énergétique, l'avantage d'une machine synchrone à aimant permanent par rapport à une machine asynchrone ?

★ Exercice 10.4 : BTS 2018

Dans un premier temps, on considère la porte (d'une écluse) en position fermée, sans aucun mouvement, avec **un même niveau d'eau** des deux côtés.

Sur la figure 8, on a représenté par leurs vecteurs respectifs les quatre forces qui agissent sur la porte lorsqu'elle est immobile :

- ▷ le poids $\vec{P}$;
- ▷ la poussée d'Archimède $\vec{A}_R$ (force verticale dirigée du bas vers le haut et due à l'action de l'eau sur la porte) d'intensité $A_R = \rho g V$ où $V = 3,3 \text{ m}^3$ est le volume de la porte soumis à la poussée d'Archimède ;
- ▷ les actions des chariots sur la porte qui sont représentées par deux forces $\vec{R}_1$ et $\vec{R}_2$ avec $R_1 = R_2 = R$.



Le profil de vitesse (vitesse de la porte en fonction du temps), lors de son ouverture, est représenté sur la figure 9.

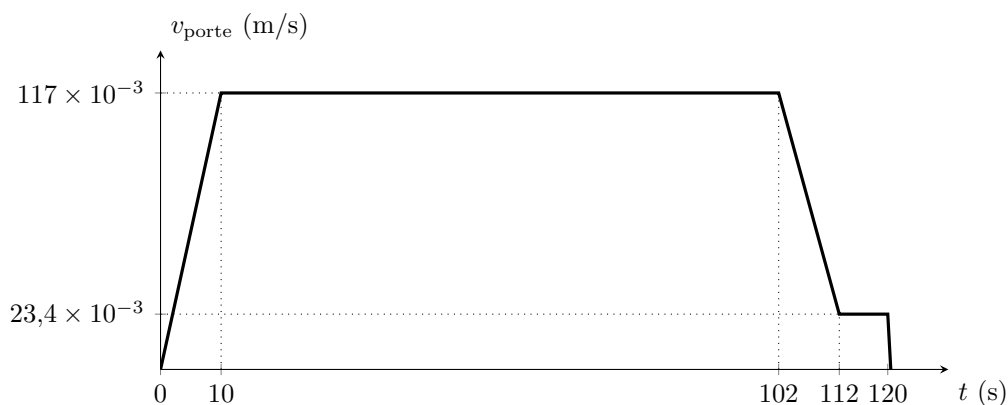


Figure 9 – Profil de vitesse lors de l'ouverture de la porte.

La chaîne cinématique est représentée sur la figure 10 :

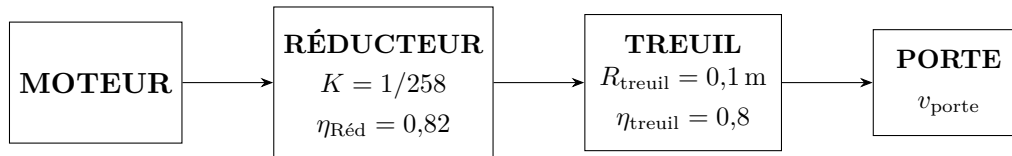


Figure 10 – Chaîne cinématique.

On considère que la puissance mécanique P_{treuil} en sortie du treuil est égale à 3,62 kW et que la vitesse de translation de la porte est égale à $v_{\text{porte}} = 117 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (phase 2).

On note :

- ▷ Ω_{treuil} et Ω_{moteur} : vitesses de rotation du treuil et du moteur en rad/s ;
- ▷ K : rapport de transmission du réducteur $\left(K = \frac{\Omega_{\text{treuil}}}{\Omega_{\text{moteur}}} = \frac{1}{258} \right)$;
- ▷ R_{treuil} : rayon du treuil égal à 0,1 m ;
- ▷ C_{treuil} : moment du couple en sortie du treuil ;
- ▷ η_{treuil} et $\eta_{\text{Réd}}$: rendements respectifs du treuil et du réducteur ;
- ▷ P_M : puissance mécanique fournie par le moteur ;
- ▷ C_M : moment du couple utile du moteur.

I – Mouvement de translation horizontal de la porte

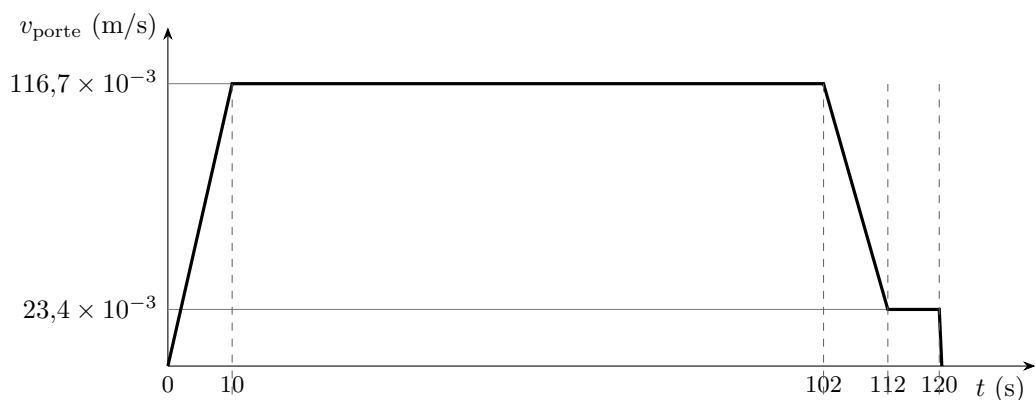
- Énoncez le principe fondamental de la dynamique appliqué à un solide en mouvement de translation, la masse du solide étant notée M et son accélération notée $\vec{a}$.
- Dans le cas où la porte est fermée et sans mouvement, écrivez l'équation traduisant le principe fondamental de la dynamique. En déduire la relation entre R , P et A_R .
- On rappelle que la masse M de la porte vaut 86 tonnes. Calculez les valeurs numériques de P et de A_R .
- En déduire l'intensité R des forces représentant les actions des chariots sur la porte.

II – Chaîne cinématique

- Montrez que la valeur de l'accélération entre 0 et 10 s vaut : $a = 11,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$.
On rappelle que pour un mouvement uniformément accéléré, la distance parcourue D (en mètre) pendant une durée t (en seconde) est donnée par : $D = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t$ avec v_0 la vitesse initiale.
- Calculez la distance parcourue par la porte lors des différentes phases du mouvement (de 0 à 10 s, de 10 s à 102 s et de 112 s à 120 s).
- Reportez les valeurs sur le document réponse n°2 et montrez que la distance totale parcourue par la porte est égale à la largeur de l'écluse, soit 12 m.
On considère que la force $\vec{T}$ exercée par le treuil sur la porte a une intensité constante sur toute la durée du mouvement. On prendra comme valeur $T = 31 \text{ kN}$.
- Donnez l'expression de la puissance mécanique en sortie du treuil notée P_{treuil} en fonction de T et de la vitesse de la porte v_{porte} . Tracez le profil de la puissance P_{treuil} en fonction du temps sur le document réponse n°2.
- Donnez l'expression de v_{porte} en fonction de Ω_{treuil} et R_{treuil} . Calculez alors la valeur de Ω_{treuil} .

6. Calculez la valeur de Ω_{moteur} et en déduire la fréquence de rotation du moteur n_M en tr/min.
7. Calculez les valeurs de P_M et C_M .

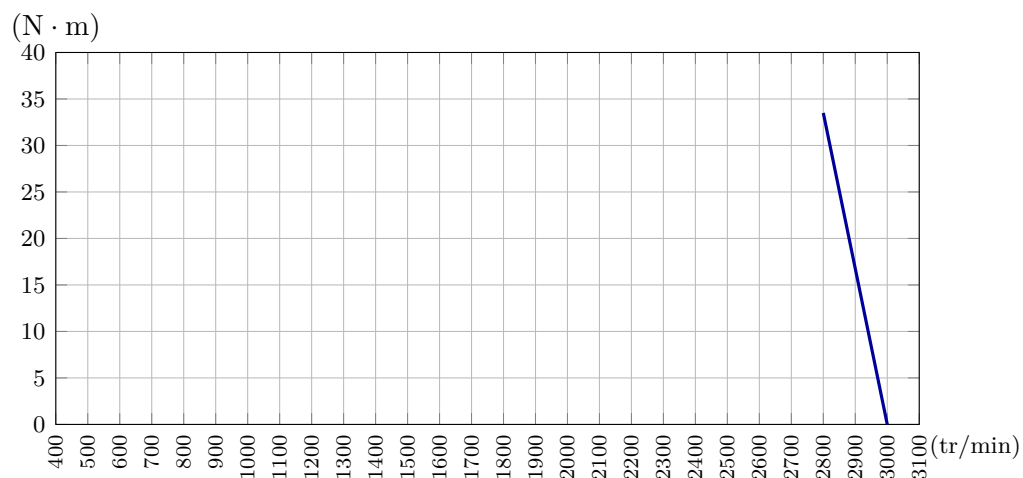
Document réponse n°2



Distance parcourue	0,47 m	Distance totale :
--------------------	--------	-------------------



Document réponse n°3



★ Exercice 10.5 : BTS 2016

L'objectif de cette partie est de déterminer le temps nécessaire à l'arrêt des agitateurs afin d'étudier la conformité de la mise en sécurité de la machine. Pour étudier le mouvement du dispositif, on s'intéresse à la chaîne cinématique.

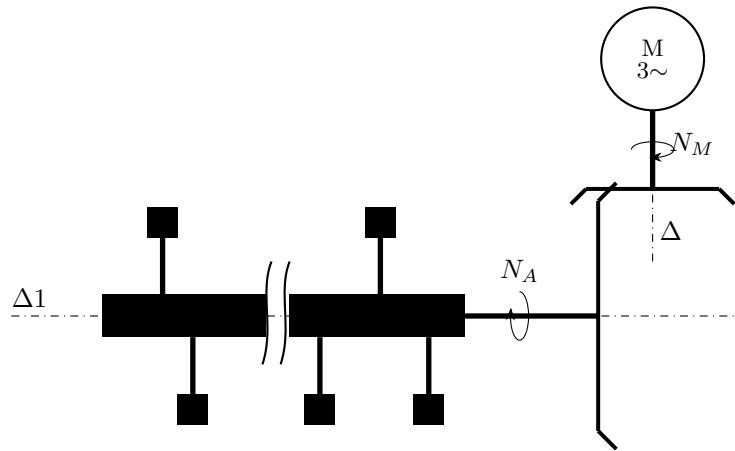


Figure 3 – Chaîne cinématique simplifiée {moteur + réducteur + agitateur}.

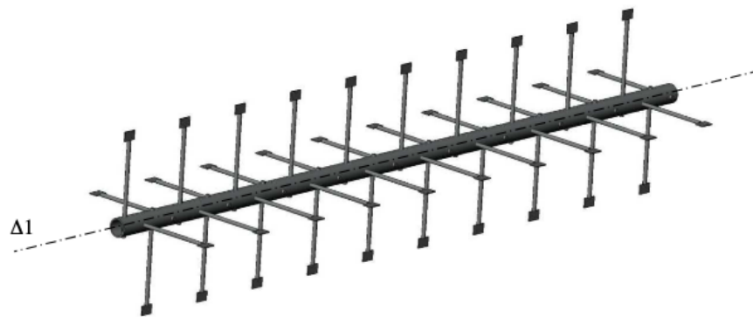


Figure 4 – Agitateur seul, longueur 4 m, diamètre des pales 1 m.

Chaque agitateur est entraîné à l'aide d'un motoréducteur (voir figures 3 et 4). L'ensemble a les caractéristiques suivantes :

- ▷ réducteur à engrenages coniques supposé sans pertes ;
- ▷ rapport de réduction : $r = 1/24$;
- ▷ moment d'inertie du réducteur négligé ;
- ▷ moment d'inertie du moteur par rapport à l'axe du rotor Δ : $J_{M/\Delta} = 0,45 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;
- ▷ moment d'inertie d'un agitateur par rapport à son axe de rotation $\Delta1$: $J_{A/\Delta1} = 4,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;
- ▷ vitesse de rotation du moteur en régime établi : $N_{M0} = 1\,400 \text{ tr/min}$.

Pour réaliser l'étude cinématique, on choisit l'axe Δ de rotation du moteur. On rappelle que l'énergie cinétique E_C d'un solide S en rotation autour d'un axe Δ est donnée par l'expression suivante $E_C = \frac{1}{2} J_{S/\Delta} \Omega_\Delta^2$ avec :

- ▷ Ω_Δ vitesse angulaire en rad/s ;
- ▷ $J_{S/\Delta}$ moment d'inertie du solide S par rapport à l'axe de rotation Δ en $\text{kg} \cdot \text{m}^2$.

1. En appliquant le principe de conservation de l'énergie cinétique d'un solide en rotation, montrez

que le moment d'inertie de l'agitateur par rapport à l'axe de rotation du moteur vaut $J_{A/\Delta} = 7,8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

2. En déduire le moment d'inertie total $J_{T/\Delta}$ {moteur + réducteur + agitateur} par rapport à l'axe de rotation du moteur.

Le moteur, de type asynchrone triphasé, exerce un couple utile de moment C_u sur l'arbre moteur. La charge lui oppose un couple résistant de moment $C_{R/\Delta}$ ramené sur l'arbre moteur. Afin de simplifier l'étude, on considère que ce dernier est dû uniquement à des frottements secs avec $C_{R/\Delta} = 380 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$.

3. Appliquez le principe fondamental de la dynamique au mouvement de rotation du moteur : on notera Ω_M la vitesse angulaire de rotation du moteur en rad/s et t le temps en s.

Lors de la phase d'arrêt, le moteur est en roue libre (c'est-à-dire non alimenté). Sa vitesse de rotation décroît alors de 1 400 tr/min à 0 tr/min.

4. Simplifiez la relation obtenue à la question 3.
5. La solution de l'équation différentielle obtenue à la question précédente est

$$\Omega_M(t) = \Omega_{M0} - \frac{C_{R/\Delta}}{J_{T/\Delta}} t$$

en prenant $t = 0 \text{ s}$ comme début de la phase d'arrêt. Déterminez le temps t_1 nécessaire pour atteindre l'arrêt de la rotation du moteur.

6. Lors d'un prélèvement d'échantillon, la main de l'opérateur peut atteindre la zone dangereuse en un peu moins d'une seconde. Conclure sur la situation de danger.

★ Exercice 10.6 : BTS 2016

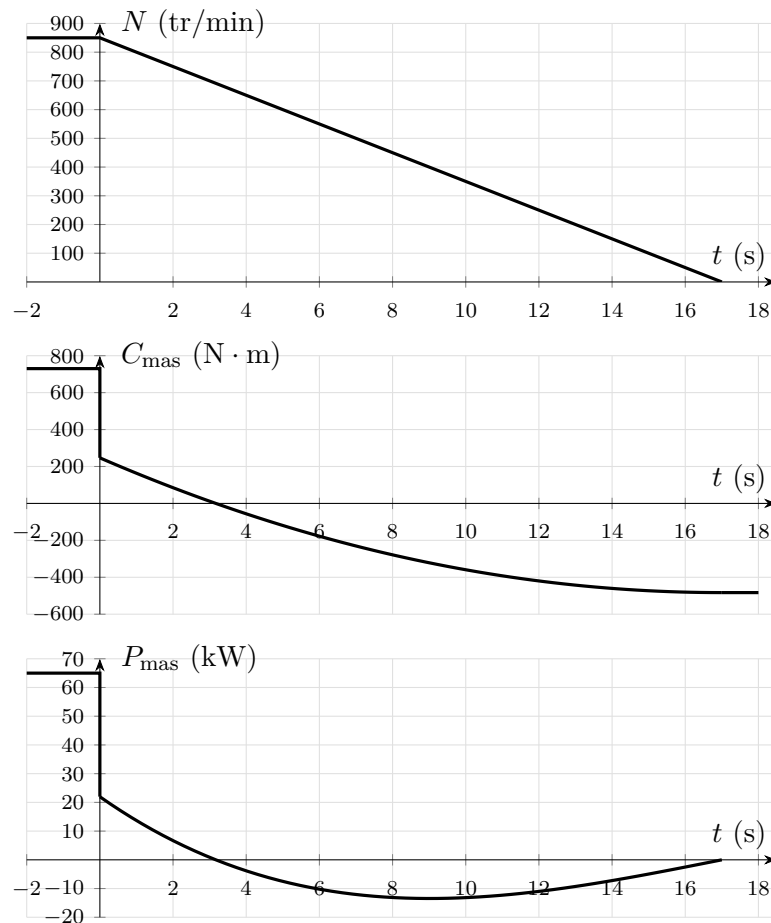
Pour le paramétrage du variateur, la fréquence maximale de rotation du motoventilateur sera limitée à une valeur de 1 320 tr/min. Malgré cette limitation, le débit d'air reste suffisant pour répondre aux exigences lors du désenfumage.

En cas d'incendie dans le tunnel, il faut être capable d'arrêter la ventilation sanitaire, pour ensuite démarrer en mode désenfumage. On étudie maintenant le comportement du variateur pendant le freinage électrique du ventilateur. Le concepteur a choisi de ne pas implanter de résistance de freinage. On considère le cas où le ventilateur tourne initialement à une vitesse de rotation égale à $N_3 = 850 \text{ tr/min}$. La rampe de décélération imposée par le variateur de fréquence est réglée afin d'obtenir un arrêt de l'arbre en 17 secondes (voir la représentation de la vitesse de rotation $N(t)$ en annexe 1). On néglige tous les frottements.

Données :

- ▷ moment d'inertie du moteur $J_{\text{moteur}} = 7,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;
- ▷ moment d'inertie du ventilateur $J_{\text{ventilateur}} = 85 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;
- ▷ moment du couple moteur délivré par la machine asynchrone noté C_{mas} ;
- ▷ expression du moment du couple résistant associé au ventilateur : $C_R = k \Omega^2$ avec $k = 0,099 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}^2$;
- ▷ capacité du condensateur présent à l'étage 2 (bus continu du variateur) : $C = 200 \text{ mF}$;
- ▷ énergie stockée par un condensateur de capacité C soumis à une tension U : $W_C = \frac{1}{2} C U^2$.

Annexe 1



1. Calculez le moment d'inertie J_{total} du groupe motoventilateur.
2. Calculez l'accélération angulaire $\frac{d\Omega}{dt}$ durant la décélération.
3. Appliquez le principe fondamental de la dynamique des systèmes en rotation sur l'arbre du motoventilateur et exprimez C_{mas} en fonction de J , $\frac{d\Omega}{dt}$, k et Ω .
4. En déduire alors l'expression suivante pour le moment du couple moteur : $C_{\text{mas}} = -483 + 0,099 \times \Omega^2$ avec C_{mas} en N·m et Ω en rad/s.
Les représentations des évolutions temporelles de $C_{\text{mas}}(t)$ et de la puissance mécanique associée $P_{\text{mas}}(t)$ sont données en annexe 1.
5. Déterminez graphiquement la valeur de la vitesse de rotation correspondant à $C_{\text{mas}} = 0$ N·m. Vérifiez que cette valeur numérique est cohérente avec la relation donnée dans la question 4.
6. Comment évolue le signe de P_{mas} , la puissance mécanique de la machine asynchrone, durant la phase de décélération ? Précisez le fonctionnement de la machine (moteur ou génératrice) pendant les différents intervalles de temps. Sur quel intervalle de temps la machine peut-elle renvoyer de l'énergie électrique vers le variateur ?

Avant la phase de décélération la tension aux bornes du condensateur du bus continu a pour valeur $U_{dc} = 570$ V. Pendant la phase de freinage, compte tenu des pertes de la machine asynchrone et du variateur, l'énergie renvoyée sur l'étage 2 est évaluée à 90 kJ. Par protection, le variateur se met en défaut dès que la tension U_{dc} dépasse 750 V.

7. Calculez l'énergie stockée W_{Ci} par le condensateur avant la phase de décélération. En déduire alors l'énergie stockée W_{Cf} par le condensateur après arrêt de la machine.
8. Déterminez la tension $U_{dc,f}$ aux bornes du condensateur obtenue après arrêt de la machine.

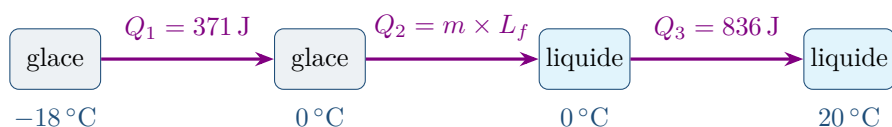
★ Exercice 11.1

1. Un particulier souhaite acheter une pompe à chaleur (PAC) pour chauffer, en hiver, la pièce principale de son habitation de volume $V = 100 \text{ m}^3$, et passer d'une température $\theta_i = 15^\circ\text{C}$ à une température de confort $\theta_f = 19^\circ\text{C}$. Calculez la variation d'énergie interne pour réaliser une telle opération en sachant que $c_{m,\text{air}} = 1,004 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ et que $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$.
2. Une énergie Q de 500 J est nécessaire pour faire fondre 1,26 g d'aluminium solide. Calculez l'énergie massique de fusion L_f de l'aluminium, en kJ/kg.
3. Calculez l'énergie Q transférée lors de la vaporisation de 2,5 kg d'ammoniac (NH_3) en sachant que son énergie massique de vaporisation L_v est égale à $1,37 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$.

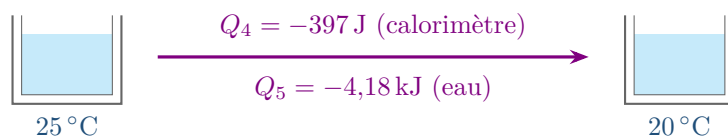
★ Exercice 11.2

Un glaçon d'eau de masse $m = 10 \text{ g}$ à la température -18°C est plongé dans une masse $m_{\text{eau}} = 200 \text{ g}$ d'eau liquide à la température 25°C contenue dans un calorimètre à la même température (aucun échange avec le milieu extérieur). La température finale de l'ensemble est de 20°C . Les énergies transférées lorsque le glaçon a entièrement fondu sont données ci-dessous.

Glaçon ($m = 10,0 \text{ g}$) :



Eau ($m_{\text{eau}} = 200,0 \text{ g}$) + calorimètre :



1. Commentez les signes des énergies transférées Q_1 , Q_3 , Q_4 et Q_5 .
2. Calculez l'énergie massique L_f de fusion de l'eau.

★ Exercice 11.3

Le lait, le calorimètre et l'eau liquide sont incompressibles. Les pertes thermiques sont négligées. On dispose d'un calorimètre de capacité thermique $C = 225 \text{ J/K}$ et contenant une masse d'eau $m_1 = 300 \text{ g}$. L'ensemble est à la température $\theta_1 = 18^\circ\text{C}$. L'échantillon de lait de masse $m_2 = 100 \text{ g}$ est placé dans une étuve à une température fixée $\theta_2 = 92^\circ\text{C}$. On le plonge ensuite rapidement dans

le calorimètre et l'eau. La température finale de l'ensemble est $\theta_f = 19,9^\circ\text{C}$.

Donnée : capacité thermique massique de l'eau liquide : $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Document A – Le laiton

Le laiton est un alliage de cuivre et de zinc, utilisé notamment pour fabriquer des instruments de musique. Lors de cette fabrication, on recherche du laiton ayant un pourcentage massique de 80 % en cuivre et 20 % en zinc.

Document B – Capacités thermiques

Pourcentage massique		Capacité thermique
en cuivre	en zinc	massique du laiton (J/(kg · °C))
90	10	386
80	20	388
70	30	390

1. Calculez la variation d'énergie interne $\Delta U_1 = Q_1$ du sous-système 1 (calorimètre + eau).
2. Exprimez la variation d'énergie interne $\Delta U_2 = Q_2$ du sous-système 2 (laiton).
3. En justifiant, donnez la relation entre Q_1 et Q_2 .
4. Exprimez puis calculez la capacité thermique massique c_2 du laiton.
5. Cet échantillon de laiton est-il utilisable pour la fabrication d'un instrument de musique ?

★ Exercice 11.4

On fait couler dans une baignoire un volume $V_c = 80 \text{ L}$ d'eau chaude à la température $T_c = 50^\circ\text{C}$. Pour obtenir un bain à la température $T_{\text{final}} = 37^\circ\text{C}$, on ajoute un volume V_f d'eau froide à la température $T_f = 10^\circ\text{C}$. Seuls les transferts thermiques ayant lieu entre l'eau chaude et l'eau froide sont pris en compte, tout échange avec l'extérieur est négligé.

Donnée : capacité thermique massique de l'eau liquide : $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

1. Calculez l'énergie Q_c cédée par l'eau chaude à l'eau froide.
2. Exprimez l'énergie thermique Q_f reçue par l'eau froide en fonction de la masse m_f d'eau froide ajoutée.
3. Donnez la relation entre Q_c et Q_f . En déduire la valeur du volume V_f d'eau froide ajoutée.

★ Exercice 11.5

Une entreprise de production de denrées alimentaires procède au refroidissement d'une masse de 1 tonne d'aliments pris à une température initiale $T_i = 18^\circ\text{C}$ et congelée à une température finale $T_f = -24^\circ\text{C}$. On suppose que la congélation (changement d'état) se fait à la température $T_{\text{état}} = -2,2^\circ\text{C}$. La puissance frigorifique nécessaire pour congeler ces denrées est $P = 102 \text{ kW}$.

Données :

- ▷ Capacité thermique massique des aliments avant la congélation : $3,43 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.
- ▷ Capacité thermique massique des aliments après la congélation : $1,8 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.
- ▷ Énergie massique de changement d'état des aliments : 259 kJ/kg .

1. Calculez la valeur de la chaleur échangée Q_1 durant la phase de refroidissement (de 18°C à $-2,2^\circ\text{C}$).
2. Calculez la valeur de la chaleur échangée Q_2 durant le changement d'état à $-2,2^\circ\text{C}$.
3. Calculez la valeur de la chaleur échangée Q_3 durant la phase de congélation (de $-2,2^\circ\text{C}$ à -24°C).
4. En déduire alors l'énergie totale Q_{tot} qu'il faut pour congeler une tonne d'aliments.
5. Enfin, calculez le temps nécessaire pour réaliser cette opération.

★ Exercice 11.6 : BTS 2022**Extrait du CCTP****4.13 APPAREILLAGE****4.13.5 Appareillages divers****4.13.5.13 Onduleur**

Les caractéristiques des ASI à fournir sont les suivantes :

Marque	Type	kVA	kW	Entrée : Sortie	Autonomie
SOCOMEK (*)	MASTERYS BC (*)	20	18	3 : 3	10 min

(*) : ou techniquement équivalent.

- on-line double conversion ;
- double alimentation ;
- bypass automatique ;
- bypass de maintenance manuel ;
- pas de pollution harmonique sur le réseau ;
- correcteur de facteur de puissance ;
- tension de sortie parfaitement sinusoïdale ;
- rendement proche de 1 ;
- communication à distance.

L'étude porte sur les caractéristiques de l'onduleur et de ses batteries, afin d'alimenter une partie de l'installation en assurant la continuité et la qualité de l'énergie électrique.

1. En s'appuyant sur la partie 4.13 du CCTP, calculez l'énergie E (en $\text{W} \cdot \text{h}$) que les batteries de l'onduleur doivent pouvoir fournir afin de garantir l'autonomie imposée par le CCTP.
2. En vous appuyant sur l'homogénéité des unités, établissez la relation entre l'énergie E stockée dans les batteries (en $\text{W} \cdot \text{h}$), la tension U aux bornes des batteries (en V) et la capacité Q des batteries (en $\text{A} \cdot \text{h}$).
3. Calculez la capacité utile Q_u des batteries qui permettrait d'obtenir l'autonomie demandée en

cas de coupure réseau, avec une tension aux bornes des batteries $U = 480 \text{ V}$.

4. En déduire la valeur de la capacité nominale Q_n de ces batteries, sachant que pour les préserver, on n'utilise que 70 % de cette capacité nominale.

★ Exercice 11.7 : BTS 2019

Certains appareils sensibles de l'hôpital sont alimentés par des ASI (Alimentation Sans Interruption). Ces ASI isolent les charges qu'elles alimentent des perturbations du réseau et leur assurent, en cas de défaillance de celui-ci, une autonomie de fonctionnement qui peut aller de quelques minutes à plusieurs heures. Cette autonomie dépend de la capacité des batteries installées dans chaque ASI. Pour estimer l'autonomie des ASI, on s'intéresse à un module monophasé dont le schéma simplifié est donné sur la figure 13.

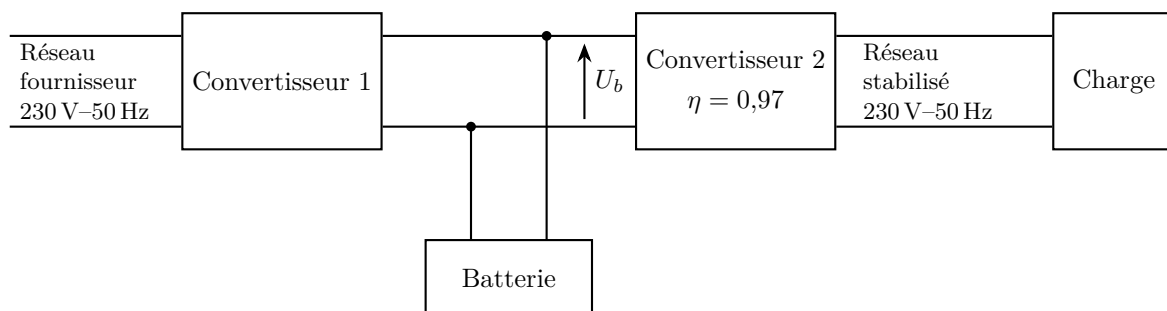


Fig. 13 – Schéma simplifié d'un module ASI en fonctionnement normal.

En fonctionnement normal, l'énergie est fournie par le réseau du fournisseur d'énergie électrique. La batterie est utilisée pour éliminer les perturbations éventuelles de ce réseau. On considère que la tension U_b est parfaitement continue.

1. Donnez les types de conversions réalisées par les convertisseurs 1 et 2.

En cas de défaillance du réseau du fournisseur, le module fonctionne en mode secours. L'énergie électrique est entièrement fournie par la batterie au convertisseur 2. La puissance utile nominale du module (fournie par le convertisseur 2 à la charge) est $P_u = 6 \text{ kW}$ et son rendement est $\eta = 0,97$.

2. Calculez la puissance P_b fournie par la batterie lorsque le module fonctionne à son régime nominal en mode secours.
3. La batterie est caractérisée par sa capacité utile $Q = 7,2 \text{ A} \cdot \text{h}$ et sa tension $U_b = 252 \text{ V}$. Montrez que l'énergie utile stockée dans la batterie est $E_b = 1,8 \text{ kW} \cdot \text{h}$.
4. La batterie peut fournir la puissance P_b pendant un temps t_b . Exprimez E_b en fonction de P_b et t_b .
5. Calculez la valeur de t_b en minutes. Commentez ce résultat sachant qu'en cas de défaillance, le réseau du fournisseur d'énergie peut être rétabli en 15 minutes et qu'il peut être remplacé par celui provenant des groupes électrogènes en 8 secondes environ.
6. Pour réaliser la batterie, le constructeur propose des boîtiers constitués de 7 éléments branchés en série. Un élément est une batterie élémentaire de $12 \text{ V} - 7,2 \text{ A} \cdot \text{h}$. Calculez le nombre N de boîtiers nécessaires pour réaliser la batterie $252 \text{ V} - 7,2 \text{ A} \cdot \text{h}$.

★ Exercice 11.8 : BTS 2019

Les chariots élévateurs utilisaient un moteur thermique, ils ont été remplacés par des chariots électriques utilisant des batteries. Dans un souci de développement durable, la charge des batteries est réalisée à l'aide de panneaux photovoltaïques.

La continuité de service des chariots étant indispensable pour assurer la pose et la dépose des bobines, il convient de s'assurer de l'autonomie des chariots électriques et donc de la durée de fonctionnement des batteries.

On s'intéresse à un chariot de gestion de stock : montée et descente de palettes dans une zone de stockage. Ce chariot est capable de soulever des charges de 3 000 kg à une hauteur maximale de 4,5 m.

Caractéristiques principales d'une batterie

Type	Tension nominale d'une cellule	Capacité Q_{bat}	Nombre de cellules	Masse
5HPZS 625	2 V	620 A · h	40	1 558 kg

Une batterie est composée de 40 cellules câblées en série. L'énergie stockée dans une batterie se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$E_{\text{bat}} = U_{\text{bat}} \times Q_{\text{bat}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} E_{\text{bat}} : \text{énergie stockée dans la batterie en W} \cdot \text{h} ; \\ U_{\text{bat}} : \text{tension aux bornes de la batterie en V} ; \\ Q_{\text{bat}} : \text{capacité de la batterie en A} \cdot \text{h}. \end{cases}$$

La chaîne d'énergie relative au levage de la charge est représentée sur la figure 14.

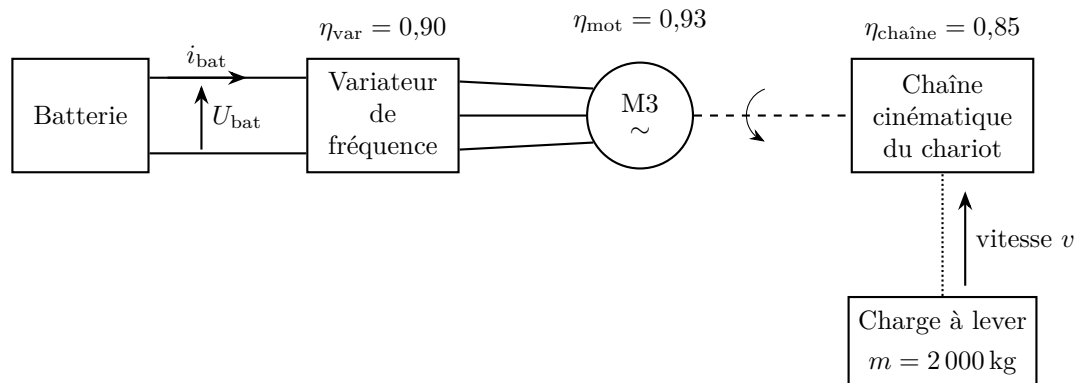


Fig. 14 – Synoptique du dispositif de levage.

Performances	Unité	CE 12	CE 15	CE 18
Vitesse de translation, en charge / à vide	m/s	20/20	20/20	20/20
Vitesse de levage, en charge / à vide	m/s	0,45/0,6	0,5/0,65	0,45/0,6
Effort de traction nominal, en charge / à vide	N	9300/9700	9300/9700	9100/9550
Pente franchissable maximale, en charge / à vide	%	23/28	23/28	20/34

- Montrez que l'énergie utile stockée par une batterie est $E_{\text{bat}} = 49,6 \text{ kW} \cdot \text{h}$.
- Le chariot doit lever une masse $m = 2\,000 \text{ kg}$ à une hauteur $h = 2,2 \text{ m}$ en un temps $t = 4,4 \text{ s}$. Choisissez alors le modèle du chariot parmi CE 12, CE 15, CE 18 qui permet de respecter le

temps de levage en charge. Justifiez votre réponse.

- On donne la valeur de l'accélération de la pesanteur : $g = 10 \text{ m/s}^2$. Calculez l'énergie potentielle E_p acquise par la masse m lorsqu'elle atteint la hauteur h .
- En tenant compte des différents rendements de la chaîne cinématique, calculez l'énergie fournie par une batterie E_{batL} en $\text{kW} \cdot \text{h}$ pour une opération de levage.
- Le cariste manipule la charge 20 fois par heure et travaille 8 h par jour. Calculez l'énergie fournie par une batterie E_{batJ} en $\text{kW} \cdot \text{h}$ pour une journée de travail du cariste.
- L'entreprise fonctionne en continu 24 h sur 24 h, il y a donc 3 postes de travail pour couvrir une journée. Pour tenir compte des déplacements du chariot et de la descente du bras du chariot, on admet que l'énergie fournie par la batterie est de $5,75 \text{ kW} \cdot \text{h}$ par jour. D'autre part, la batterie doit être rechargée lorsque son énergie stockée devient inférieure à 30 % de l'énergie maximale qu'elle peut stocker. Déterminez la durée de fonctionnement Δt de la batterie en nombre de jours avant de la recharger.

★ Exercice 11.9 : BTS 2019

La circulation d'eau imposée par les pompes permet de refroidir la manchette, la gaine et la chambre de post-combustion. Une mesure à un instant donné a permis de relever les températures des fumées aux entrées et aux sorties des 3 parties ainsi que celles de l'eau.

Refroidissement de la chambre de post-combustion

Pour les fumées	Pour l'eau de refroidissement
Débit de fumée $Q_{VF} = 87\,000 \text{ m}^3/\text{h}$	Débit d'eau $Q_{VE} = 110 \text{ m}^3/\text{h}$
Température d'entrée $\theta_e = 785^\circ\text{C}$	Écart de température entrée-sortie $\Delta\theta = 20^\circ\text{C}$
Température de sortie $\theta_s = 705^\circ\text{C}$	

Pour les calculs, on néglige l'influence des poussières dans les fumées et on considère que la capacité thermique massique des fumées est $c_F = 1\,000 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$. On supposera que la masse volumique des fumées est celle de l'air à 20°C , soit $\rho_F = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (cette masse volumique est plus faible à forte température mais compensée par la masse des poussières dans les fumées).

Refroidissement de la chambre de post-combustion, de la gaine et de la manchette

Les débits d'eau nécessaires pour refroidir la manchette et la gaine sont respectivement $85 \text{ m}^3/\text{h}$ et $175 \text{ m}^3/\text{h}$. On rappelle que le débit pour refroidir la chambre de combustion est $Q_{VE} = 110 \text{ m}^3/\text{h}$.

I – Refroidissement de la chambre de post-combustion

- Calculez le débit des fumées Q_{VF} en m^3/s . En déduire la masse m_f de fumée extraite à chaque seconde.
- On rappelle que l'énergie ΔE échangée par une masse m d'un corps (de capacité thermique massique c) soumis à une variation de température $\Delta\theta$ est donnée par la relation $\Delta E = c \times m \times \Delta\theta$. Montrez que l'énergie à extraire pour refroidir le flux de fumées à chaque seconde est $E_f = 2,32 \text{ MJ}$.
- Sachant que la capacité thermique massique de l'eau est $c_e = 4\,180 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$ et que sa masse volumique est $\rho_e = 1\,000 \text{ kg/m}^3$, montrez que l'énergie E_e que peut évacuer l'eau à chaque seconde est suffisante pour refroidir les fumées.

II – Refroidissement de la chambre de post-combustion, de la gaine et de la manchette

1. Calculez le débit total $Q_{e,t}$ que doivent garantir les pompes à grande vitesse.
2. Sachant qu'à leur point nominal (grande vitesse), chaque pompe fournit un débit $Q_{\text{pompe}} = 60 \text{ L/s}$, déterminez le nombre de pompes à mettre en route pour assurer le refroidissement des fumées.
3. Pensez-vous qu'il est possible de supprimer l'une des 3 pompes de l'installation ? Justifiez votre réponse au regard de la continuité de service.

★ Exercice 11.10 : BTS 2018

L'objectif de cette partie est d'étudier l'aspect énergétique du fonctionnement de l'arche (four tunnel de cuisson), aussi bien au niveau du chauffage nécessaire à la céramisation des plaques qu'au niveau du refroidissement de celles-ci après la cuisson.

Bilan thermique du chauffage des plaques

On s'intéresse à une plaque à céramiser associée à son support :

- ▷ masse de l'ensemble plaque et support : $m = 65 \text{ kg}$;
- ▷ capacité thermique massique de l'ensemble plaque et support : $C_1 = 720 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$;
- ▷ on suppose que la capacité thermique massique C_1 est indépendante de la température.

Bilan thermique du refroidissement des plaques

On souhaite calculer le débit d'air nécessaire au refroidissement des plaques et vérifier que les ventilateurs permettent d'assurer ce débit.

On considère une plaque avec son support. Le refroidissement débute en sortie de la zone n° 8 de l'arche et s'achève à l'entrée de la zone de déchargement. De l'air frais est introduit aux deux extrémités de la zone de refroidissement et l'air chaud est aspiré au centre de cette même zone.

À chaque extrémité de la zone de refroidissement, le soufflage d'air frais est assuré par un ventilateur comprenant :

- ▷ un moteur triphasé asynchrone de puissance $P_{\text{moteur}} = 7,5 \text{ kW}$;
- ▷ un réducteur et une hélice.

L'air frais est acheminé par une gaine jusqu'à un ensemble de buses qui permettent de le distribuer au plus près de la plaque.

La plaque doit être refroidie à une température de 65°C avant son déchargement. Ce refroidissement libère une énergie $Q_2 = 39,1 \times 10^6 \text{ J}$.

- ▷ L'air frais aspiré par les ventilateurs est à une température $\theta_{1\text{air}} = 30^\circ\text{C}$.
- ▷ Après échange de chaleur avec la plaque, la température de l'air vaut $\theta_{2\text{air}} = 135^\circ\text{C}$.
- ▷ On donne la capacité thermique massique de l'air $C_{\text{air}} = 1\,004 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$. Cette valeur est considérée comme indépendante de la température.
- ▷ On donne la masse volumique de l'air à 30°C sous une pression atmosphérique de $1\,013 \text{ hPa}$: $\rho_{\text{air}} = 1,17 \text{ kg/m}^3$.

I – Bilan thermique du chauffage des plaques

La plaque défile dans la zone n° 1 de l'arche dont la puissance installée est égale à 160 kW . À l'entrée de la zone n° 1, la plaque est à température ambiante $\theta_1 = 25^\circ\text{C}$. Pour assurer la céramisation de la plaque, on souhaite que sa température, en sortie de la zone n° 1, soit $\theta_2 = 600^\circ\text{C}$. On suppose

que toute l'énergie fournie par les résistances est utilisée pour le chauffage de la plaque et de son support.

1. Calculez la différence de température des plaques $\Delta\theta$ entre les deux extrémités de la zone n° 1 de l'arche.
2. Calculez l'énergie Q_1 que doivent recevoir la plaque et son support pour que sa température soit portée à 600 °C en sortie de la zone n° 1 de l'arche.
3. On souhaite que l'arche soit capable de traiter $N = 14$ plaques par heure. Calculez Q_{h1} , l'énergie nécessaire pour une heure de production, dans la zone n° 1 de l'arche. En déduire que la puissance P_1 , que doivent fournir les résistances de chauffe de la zone n° 1, vaut 105 kW.
4. La puissance installée dans la zone n° 1 de l'arche est-elle suffisante pour assurer la production ? Proposez une explication à la différence entre la valeur de la puissance P_1 et la puissance installée.

II – Bilan thermique du refroidissement des plaques

1. Calculez la masse d'air m_1 nécessaire au refroidissement d'une plaque avec son support.
2. En déduire le volume d'air V_1 nécessaire au refroidissement d'une plaque avec son support.
3. Déterminez le débit volumique d'air frais D_v que doit fournir le dispositif de refroidissement pour traiter 14 plaques par heure. Ce débit sera exprimé en mètres cubes par heure (m^3/h).
4. Chaque ventilateur, lorsqu'il fonctionne à plein régime, peut souffler un débit d'air de 8 000 m^3/h . Les deux ventilateurs installés permettent-ils d'assurer le refroidissement de la nouvelle production de 14 plaques par heure ? Sur quel paramètre de l'alimentation des moteurs peut-on agir pour assurer un fonctionnement de l'installation avec une puissance adaptée ?

★ Exercice 11.11 : BTS 2019

Détermination de la puissance de chauffe à installer

Les besoins en chauffage d'un bâtiment sont liés à de nombreux paramètres. Les principaux sont :

- ▷ le type de construction et la norme d'isolation respectée ;
- ▷ le volume du bâtiment ;
- ▷ la température de base du lieu de construction (c'est une valeur représentant la température minimale du lieu, c'est une donnée réglementaire) ;
- ▷ les besoins en eau chaude sanitaire (liés au nombre d'occupants).

La méthode de calcul est la suivante :

- ▷ on détermine la puissance du flux thermique statique, c'est-à-dire les pertes de chaleur du bâtiment liées à la constitution de la construction, à la surface des parois externes et aux rayonnements (cette valeur est déterminée par un logiciel spécialisé) ;
- ▷ on détermine la puissance du flux thermique de pertes dynamiques liées au renouvellement de l'air par les systèmes de ventilation mécanique contrôlée (VMC) ;
- ▷ on ajoute, le cas échéant, la puissance nécessaire pour produire l'eau chaude sanitaire qui est calculée à part.

Pour l'hôpital Nord Franche-Comté, les données suivantes ont été calculées :

Grandeur	Valeur
Volume d'air renouvelé à chaque seconde (calculé à partir des débits des ventilations)	$V_a = 358 \text{ m}^3$
Température à l'intérieur des locaux	$\theta_{\text{int}} = 19^\circ\text{C}$
Température de base pour la zone de construction	$\theta_b = -15^\circ\text{C}$
Degrés Jour Unifiés	DJU = 2929
Puissance du flux statique	$P_{\text{statique}} = 1322 \text{ kW}$
Puissance nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire	$P_{\text{ECS}} = 963 \text{ kW}$

On donne également :

- ▷ la capacité thermique massique de l'air : $C_{m_a} = 1004 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;
- ▷ la masse volumique de l'air (supposée constante) : $\rho_a = 1,26 \text{ kg}/\text{m}^3$;
- ▷ la relation exprimant l'énergie absorbée par un corps lors d'une variation de température : $Q = C_m \times m \times \Delta\theta$ où C_m est la capacité thermique massique du corps, m est sa masse et $\Delta\theta$ la variation de sa température.

Détermination de l'autonomie de l'installation

La puissance installée ne sera pas utilisée en permanence, car elle varie en fonction de la température extérieure. On peut relier l'énergie consommée annuellement par un chauffage et la puissance installée par la relation empirique suivante :

$$\text{Consommation} = \frac{P_{\text{inst}} \times \text{DJU} \times 24}{\theta_{\text{int}} - \theta_b}$$

- Consommation en $\text{kW} \cdot \text{h}$;
- $P_{\text{inst}} = 4,63 \times 10^3 \text{ kW}$: puissance installée ;
- DJU = 2929 : valeur des DJU du lieu ;
- $\theta_{\text{int}} = 19^\circ\text{C}$: température à l'intérieur en $^\circ\text{C}$;
- $\theta_b = -15^\circ\text{C}$: température de base du lieu en $^\circ\text{C}$.

I – Détermination de la puissance de chauffe à installer

1. Calculez la masse d'air m_a renouvelée à chaque seconde.
2. Vérifiez que l'énergie à fournir à cette masse d'air pour la porter depuis la température de base jusqu'à la température intérieure est $E_a = 15,4 \text{ MJ}$.
3. Le système installé est une ventilation à double flux. Un échangeur de chaleur entre l'air entrant et l'air sortant permet de fournir à l'air entrant 80 % de l'énergie qui vient d'être calculée. Montrez que la puissance nécessaire pour fournir le complément d'énergie est $P_{\text{dyn}} = 3,08 \text{ MW}$. On rappelle que la masse d'air m_a est renouvelée chaque seconde.

La chaudière étant installée dans un local séparé de l'ensemble des bâtiments, une partie de la chaleur produite est perdue lors de son transport. Seuls 95 % de la puissance produite sont donc réellement utilisés pour le chauffage des bâtiments de l'hôpital.

4. En tenant compte de la puissance du flux statique (P_{statique}), montrez que la puissance totale qui doit être installée pour le chauffage est $P_{\text{inst}} = 4,63 \text{ MW}$.

II – Détermination de l'autonomie de l'installation

1. Montrez que l'énergie annuelle consommée par les installations de chauffage est $E_c = 9,6 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$.

Pour simplifier le raisonnement, on suppose que la chaudière bois fonctionne à pleine puissance 190 jours par an (saison froide) et à mi-puissance 175 jours par an (production d'eau chaude uniquement). La chaudière bois choisie a une puissance utile (pleine puissance) $P = 2 \times 10^3 \text{ kW}$.

2. Montrez que la chaudière bois produit une énergie annuelle $E_{\text{an}} = 13,3 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$.
3. La consommation d'énergie annuelle pour l'eau chaude E_{ec} est estimée à $8,6 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$. L'objectif du cahier des charges (70 % de la production énergétique annuelle à partir du bois) est-il atteint ?
Le bois qui sert de combustible à la chaudière a un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) de $1,99 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$ (le PCI est la quantité de chaleur minimale qui sera produite lors de la combustion d'un kilogramme de combustible). Pour un fonctionnement à pleine puissance (2 MW de puissance utile), le fabricant indique un rendement de la chaudière $\eta_c = 90 \%$.
4. Déterminez (en $\text{kW} \cdot \text{h}$) l'énergie E_{1t} produite par une tonne de combustible.
5. En tenant compte du rendement de la chaudière, montrez que la masse de combustible brûlée en 1 heure lorsque la chaudière produit sa puissance maximale est $m_{1h} = 1,12 \text{ t}$.
6. Sachant que le silo de stockage peut contenir 87 tonnes de bois, en déduire l'autonomie de l'installation à pleine puissance.

★ Exercice 11.12 : BTS 2015

L'objectif de cette partie est de déterminer le volume de fioul nécessaire pour le déroulement des spectacles. La consommation correspond au débit en litres par heure (L/h) du fioul absorbé par un moteur diesel. Elle est liée à la puissance qu'il fournit suivant la caractéristique donnée figure 15.

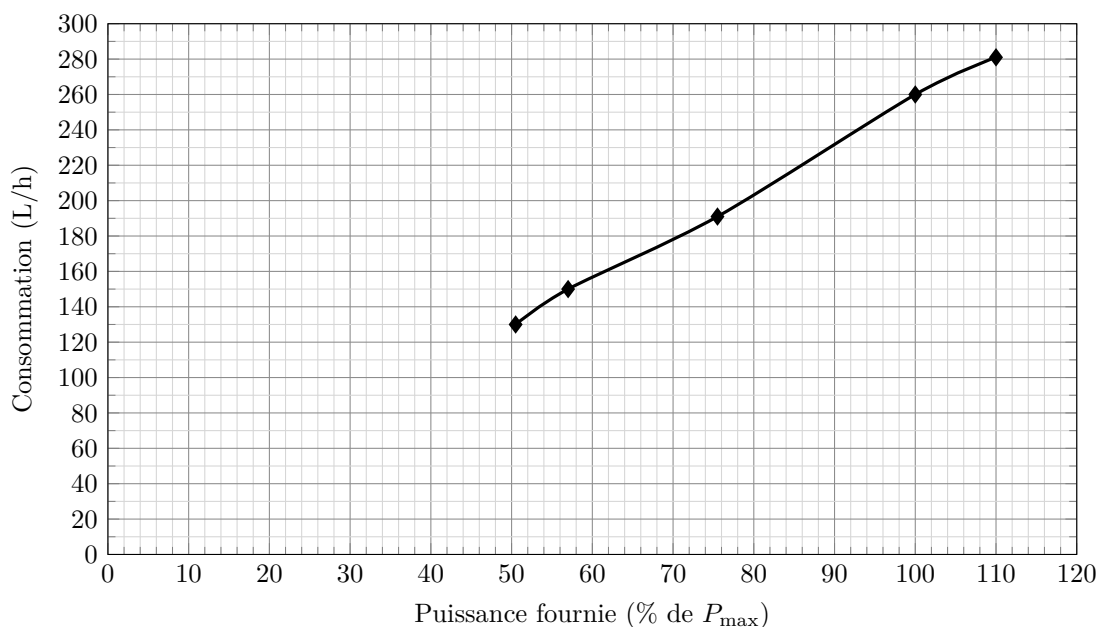


Fig. 15 – Consommation d'un moteur diesel en fonction de la puissance fournie.

Le pouvoir calorifique inférieur PCI d'un combustible représente l'énergie dégagée sous forme thermique par la combustion de 1 kg de ce combustible. Le pouvoir calorifique inférieur du fioul

utilisé est $\text{PCI} = 11,9 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$. La masse volumique de ce fioul est $\rho = 0,95 \text{ kg/L}$.

1. Indiquez la valeur de la consommation, en L/h, d'un moteur lorsqu'il fournit une puissance $P = P_{\text{max}} = 1\,100 \text{ kW}$.
2. On supposera qu'un spectacle dure en moyenne 2 h 30 min et que pendant le spectacle chaque moteur diesel fournit une puissance mécanique de 625 kW. Montrez que le volume V_1 de fioul consommé par chaque moteur durant un spectacle vaut $V_1 = 375 \text{ L}$.
3. Calculez alors la masse de fioul correspondant au volume V_1 .
4. Calculez l'énergie thermique Q_1 , en kW · h, correspondant à la combustion du fioul par moteur pendant la durée d'un spectacle.
5. En déduire la valeur du rendement d'un moteur.

Le fioul est stocké dans une citerne d'une capacité de 10 000 L enterrée sous le sous-sol du bâtiment pour des raisons de sécurité. Un réservoir journalier d'une capacité de 500 L est implanté dans le local de la centrale groupe électrogène sur la terrasse et alimente les moteurs.

6. Calculez le volume total de fioul nécessaire par spectacle. Le réservoir journalier suffit-il, ou doit-il être approvisionné pendant le spectacle ?

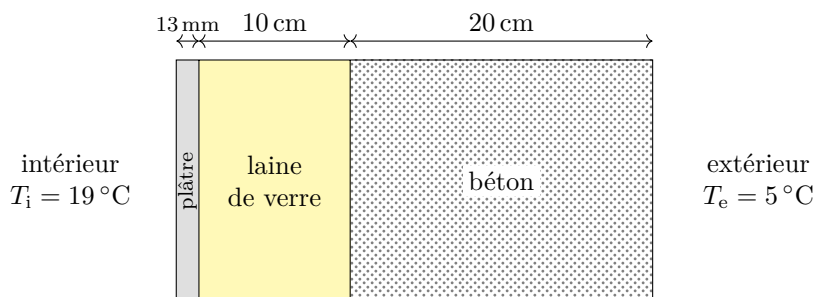
★ Exercice 12.1

Le local technique d'un atelier est séparé de l'extérieur par un mur en béton de surface $S = 12 \text{ m}^2$ et d'épaisseur $e = 20 \text{ cm}$. En hiver, on mesure 19°C sur sa face intérieure et 5°C sur sa face extérieure. Conductivité thermique du béton : $\lambda = 1,75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

1. Indiquez le sens du transfert thermique. Par quel mode la chaleur traverse-t-elle le mur ?
2. Calculez le flux thermique Φ qui traverse le mur, puis le flux surfacique φ .
3. Calculez la résistance thermique R_{th} du mur et vérifiez la valeur de Φ à l'aide de l'analogie avec la loi d'Ohm.
4. Calculez l'énergie thermique Q perdue en 24 h, en joules puis en kilowattheures.
5. Quelle épaisseur de laine de verre ($\lambda = 0,035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) aurait la même résistance thermique que ce mur ? Conclure.

★ Exercice 12.2

On isole par l'intérieur le mur de l'exercice précédent. La paroi comporte alors, de l'intérieur vers l'extérieur : une plaque de plâtre, une couche de laine de verre et le mur en béton.



- ▷ Conductivités : plâtre $\lambda_1 = 0,35$, laine de verre $\lambda_2 = 0,035$, béton $\lambda_3 = 1,75$ (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).
- ▷ Résistances superficielles : $R_{\text{si}} = 0,13$ et $R_{\text{se}} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$; surface du mur $S = 12 \text{ m}^2$.
- ▷ Saison de chauffage : 5 000 h avec un écart moyen de température de 12 K ; prix de l'électricité : 0,20 € le $\text{kW} \cdot \text{h}$.

1. Calculez la résistance surfacique R de la paroi isolée et son coefficient de transmission U .
2. Calculez le flux surfacique φ et le flux Φ perdu à travers le mur isolé.
3. Avant isolation, la paroi n'était constituée que du béton (avec les mêmes R_{si} et R_{se}). Calculez son coefficient U_0 et le flux Φ_0 . Par combien les pertes ont-elles été divisées ?

4. Calculez la température aux interfaces plâtre/laine et laine/béton, puis tracez l'allure du profil de température dans la paroi. Dans quelle couche la température chute-t-elle le plus ? Pourquoi ?
5. Estimez l'économie annuelle réalisée grâce à l'isolation, en kW · h puis en euros.

★ Exercice 12.3

Le module IGBT d'un hacheur dissipe $P = 45 \text{ W}$ (pertes par conduction et par commutation). Il est monté sur un dissipateur placé dans une armoire où l'air atteint $T_a = 40^\circ\text{C}$.

- ▷ Module IGBT : $T_{j,\max} = 150^\circ\text{C}$; résistance thermique jonction-boîtier $R_{jc} = 0,5 \text{ K/W}$.
- ▷ Contact boîtier-dissipateur avec pâte thermique : $R_{cd} = 0,2 \text{ K/W}$.
- ▷ Par sécurité, le bureau d'études impose $T_j \leq 125^\circ\text{C}$ en fonctionnement normal.

Référence	DS-A	DS-B	DS-C	DS-D (avec ventilateur)
Refroidissement	naturel	naturel	naturel	forcé
R_{da} (K/W)	2,1	1,5	1,1	0,6 (1,8 si le ventilateur est à l'arrêt)
Prix indicatif	18 €	26 €	39 €	34 € + ventilateur 15 €

Tab. 3 – Extrait d'un catalogue de dissipateurs.

1. Représentez le schéma thermique équivalent (analogie électrique) entre la jonction et l'air ambiant. Que représentent la « source de courant » et les « potentiels » ?
2. Montrez que la résistance thermique du dissipateur doit vérifier $R_{da} \leq \frac{T_j - T_a}{P} - R_{jc} - R_{cd}$, puis calculez la valeur maximale admissible.
3. Quels dissipateurs à refroidissement naturel conviennent ? Choisissez le moins cher.
4. Pour le dissipateur choisi, calculez les températures du dissipateur T_d , du boîtier T_c et de la jonction T_j .
5. Quelle puissance maximale le module pourrait-il dissiper avec ce dissipateur sans dépasser $T_{j,\max}$?
6. Un technicien propose le modèle DS-D, plus performant mais plus cher (34 € + ventilateur 15 €, soit 49 € contre 39 € pour DS-C). Calculez T_j en fonctionnement normal, puis en cas de panne du ventilateur. Concluez.
7. Le dissipateur DS-C évacue la chaleur par convection naturelle ($h \approx 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). Estimez la surface d'échange nécessaire. Comment l'obtient-on avec un encombrement réduit ?

★ Exercice 12.4

Un moteur asynchrone fermé, à ventilation extérieure (ventilateur calé sur l'arbre), fournit $P_u = 15 \text{ kW}$ avec un rendement $\eta = 91\%$. C'est un moteur ancien dont l'isolation est de **classe B**. Il fonctionne dans un local à $T_a = 40^\circ\text{C}$.

- ▷ Surface d'échange de la carcasse à ailettes : $S = 1,6 \text{ m}^2$, peinte en noir mat (émissivité $\varepsilon = 0,95$).
- ▷ Coefficient de convection : $h = 40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ avec le ventilateur, $h = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ en convection naturelle.
- ▷ Flux *net* échangé par rayonnement entre la carcasse (température T_s) et les murs du local (température T_a) : $\Phi_{\text{ray}} = \varepsilon \sigma S (T_s^4 - T_a^4)$, températures en kelvins.
- ▷ Le point le plus chaud du bobinage est environ 60 K au-dessus de la température de la carcasse.

1. Calculez les pertes P_p du moteur. Que deviennent-elles ?
2. En supposant que toutes les pertes sont évacuées par convection, calculez la température T_s de la carcasse.
3. Calculez le flux net rayonné Φ_{ray} à cette température. Quelle part des pertes représente-t-il ? L'hypothèse de la question 2 est-elle pessimiste ou optimiste ?
4. Calculez la température du point chaud du bobinage. Est-elle compatible avec la classe d'isolation ?
5. À l'aide de la loi de Wien, déterminez la longueur d'onde du maximum d'émission de la carcasse. Dans quel domaine se situe-t-elle ? Un technicien vise la plaque signalétique (aluminium brut, $\varepsilon \approx 0,1$) avec une caméra thermique réglée sur $\varepsilon = 0,95$: la température affichée sera-t-elle correcte ?
6. Le ventilateur est cassé : la carcasse n'est plus refroidie que par convection naturelle. Calculez T_s en négligeant le rayonnement. Une résolution numérique tenant compte du rayonnement donne $T_s \approx 90^\circ\text{C}$: commentez, puis évaluez les conséquences sur la durée de vie de l'isolation.
7. Le ventilateur réparé, on installe le moteur dans un local à 50°C . Évaluez la nouvelle température du point chaud et la réduction de durée de vie. Quelle solution adopte-t-on en pratique ?

★ Exercice 12.5

Une station de pompage d'eau potable est pilotée depuis une armoire électrique installée dans un local non climatisé, où la température peut atteindre $T_e = 35^\circ\text{C}$ en été. Le constructeur du variateur impose une température de l'air intérieur de l'armoire au plus égale à $T_{i,\text{max}} = 40^\circ\text{C}$.

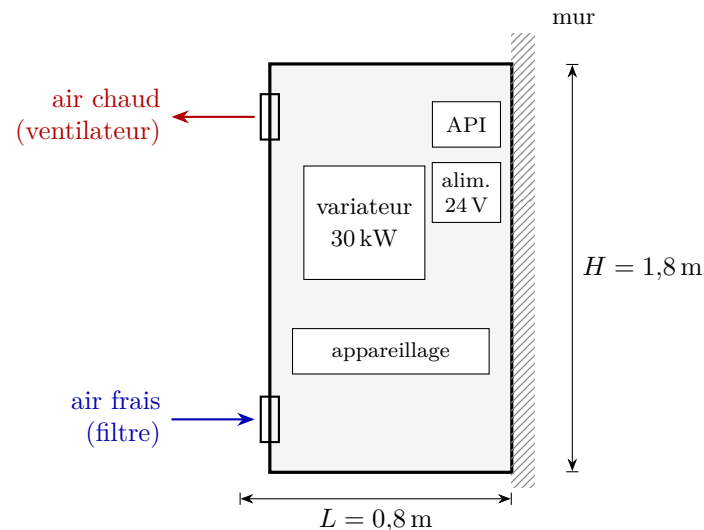


Fig. 16 – Armoire adossée à un mur, profondeur $P = 0,5\text{ m}$ (vue de face, ventilation éventuelle sur le côté).

Document 1 : équipements de l'armoire

Variateur de vitesse de la pompe : puissance nominale 30 kW, pertes égales à 2,5 % de cette puissance ; alimentation 24 V : 40 W de pertes ; automate (API) : 25 W ; appareillage (disjoncteurs, contacteurs, borniers) : 60 W.

Document 2 : armoire

Tôle d'acier peinte d'épaisseur $e = 2\text{ mm}$ ($\lambda = 50\text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Surface d'échange effective d'une armoire adossée à un mur (d'après la norme CEI 60890) : $S = 1,8 H (L + P) + 1,4 L P$. Coefficients de convection naturelle sur les faces intérieure et extérieure : $h_i = h_e = 6\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Document 3 : extraits de catalogues

Ventilateurs à filtre : débit (m^3/h)	105	230	550	700
Climatiseurs d'armoire : puissance frigorifique (W)	500	1000	1500	2000

Partie A : bilan thermique

1. Calculez la puissance totale P dissipée dans l'armoire.

Partie B : évacuation par les parois

2. Calculez la surface d'échange effective S de l'armoire.
3. La chaleur traverse successivement la couche d'air intérieure (convection), la tôle (conduction) et la couche d'air extérieure (convection). Calculez les trois résistances thermiques correspondantes, puis la résistance thermique R_{th} de l'armoire. Quelle résistance peut-on négliger ?
4. Sans ventilation, quelle serait la température de l'air intérieur en été ? Concluez.
5. Calculez la puissance P_{parois} que les parois peuvent évacuer lorsque $T_i = T_{i,\text{max}}$ et $T_e = 35^\circ\text{C}$.

Partie C : ventilation et climatisation

6. Calculez la puissance P_{vent} à évacuer par ventilation et le débit d'air nécessaire D_v . Choisissez un ventilateur dans le document 3.
7. Pourquoi l'entrée d'air frais est-elle placée en bas de l'armoire et la sortie en haut ? Pourquoi l'entrée est-elle munie d'un filtre ?

8. Lors d'une canicule, la température du local atteint 45 °C. La ventilation est-elle encore efficace ? Calculez la puissance frigorifique que devrait fournir un climatiseur d'armoire pour maintenir $T_i = 40\text{ °C}$ et choisissez un modèle.

Partie D : maintenance par thermographie

Lors d'une visite de maintenance, une caméra thermique (réglée sur $\varepsilon = 0,95$) révèle sur le bornier de puissance du variateur une borne à 85 °C, alors que les bornes voisines sont à 45 °C.

9. Calculez la longueur d'onde du maximum d'émission de la borne chaude. Pourquoi faut-il une caméra infrarouge ? Quelle est la cause probable de cet échauffement ?
10. La barre de cuivre nu qui relie cette borne au variateur ($\varepsilon \approx 0,1$) apparaît à 42 °C sur l'image. Pourquoi cette valeur n'est-elle pas fiable ? Que faire pour mesurer correctement sa température ?

★ Exercice 13.1

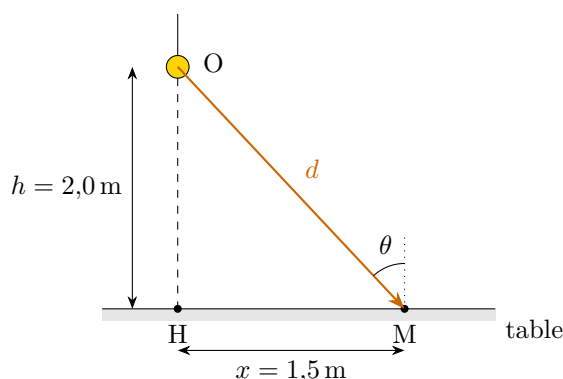
Dans un couloir, on remplace une lampe halogène par une lampe LED. Les emballages indiquent :

	Lampe halogène	Lampe LED
Puissance électrique absorbée	53 W	9 W
Flux lumineux	840 lm	806 lm

1. Calculez l'efficacité lumineuse η_H de la lampe halogène, puis η_{LED} de la lampe LED. Ces valeurs sont-elles conformes aux ordres de grandeur du cours ?
2. Quelle puissance P' devrait absorber une lampe LED de même technologie (même efficacité) pour produire exactement le flux de la lampe halogène ?
3. La lampe fonctionne 1 000 h par an. Calculez l'énergie électrique économisée chaque année en remplaçant la lampe halogène par la lampe LED de 9 W, puis l'économie réalisée au prix de 0,25 €/kW · h.
4. Une LED verte émet un rayonnement de puissance $P_{ray} = 0,20$ W à la longueur d'onde $\lambda = 530$ nm, pour laquelle la sensibilité relative de l'œil vaut $V(\lambda) = 0,86$. Calculez le flux lumineux Φ émis.
5. Pourquoi un rayonnement de même puissance à 555 nm produirait-il un flux plus grand ? Quelle est alors la valeur de ce flux ?

★ Exercice 13.2

Une lampe nue, assimilée à une source ponctuelle qui émet uniformément dans tout l'espace un flux $\Phi = 1\,200$ lm, est suspendue au point O, à la hauteur $h = 2,0$ m au-dessus d'une table horizontale.



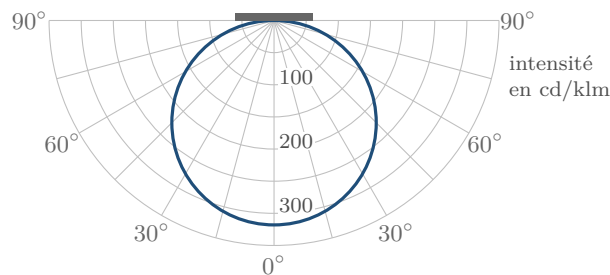
1. Calculez l'intensité lumineuse I de la lampe (la même dans toutes les directions).
2. Calculez l'éclairement E_H au point H de la table, situé à la verticale de la lampe.
3. Le point M est situé à $x = 1,5$ m de H. Calculez la distance $d = OM$, la valeur de $\cos \theta$ puis l'éclairement E_M en M.

4. On descend la lampe à 1,0 m au-dessus de la table. Par quel facteur l'éclairement en H est-il multiplié ? Calculez sa nouvelle valeur.
5. Un poste de travail de bureau exige 500 lx. Cette lampe nue convient-elle ? Comment augmenter l'éclairement sur la table sans augmenter le flux de la lampe ?

★ Exercice 13.3

Un bureau est équipé de *downlights* LED encastrés au plafond, munis d'un diffuseur opale. Chacun émet le flux $\Phi_L = 2500 \text{ lm}$ et se comporte comme une source lambertienne : $I(\theta) = I_0 \cos \theta$. Le catalogue donne son indicatrice en cd/klm (figure ci-dessous).

Le plafond est à 2,85 m du sol et le plan de travail à 0,85 m : la hauteur utile est $h_u = 2,0 \text{ m}$.

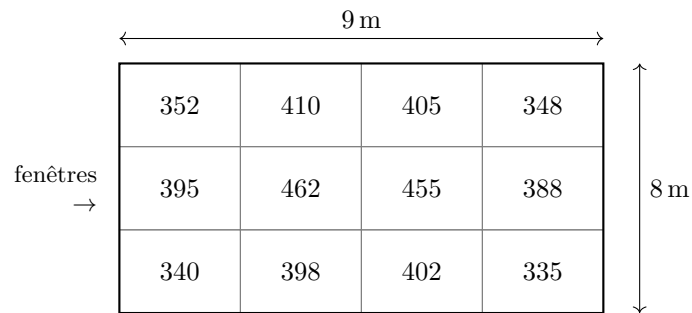


1. Lisez sur l'indicatrice l'intensité dans l'axe pour 1 000 lm, puis calculez l'intensité I_0 du downlight dans l'axe.
2. Calculez l'éclairement E_A sur le plan de travail au point A situé à la verticale du downlight.
3. Le point P du plan de travail est situé à 1,2 m de A (horizontalement).
 - a) Calculez l'angle θ sous lequel le downlight « voit » le point P.
 - b) Montrez que, pour une source lambertienne, l'éclairement en P s'écrit $E_P = \frac{I_0 \cos^3 \theta}{h_u^2}$.
 - c) Calculez E_P .
4. Deux downlights identiques D_1 et D_2 sont espacés de 2,4 m. On néglige la lumière réfléchie par les parois.
 - a) Calculez l'éclairement au point du plan de travail situé à mi-distance des deux downlights.
 - b) Calculez l'éclairement au point situé à la verticale de D_1 (contributions de D_1 et de D_2).
 - c) Que peut-on dire de l'uniformité de l'éclairement entre ces deux points ? Conclure sur le choix de l'espacement.

★ Exercice 13.4

Une salle de classe de $9 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ vient d'être rénovée : elle est équipée de $N = 12$ dalles LED de puissance $P = 28 \text{ W}$ et de flux $\Phi_L = 3\,400 \text{ lm}$ chacune (température de couleur 4 000 K, IRC $R_a = 85$, UGR < 19).

Pour la réception des travaux, on découpe la salle en 12 zones de même surface et on mesure au luxmètre l'éclairement au centre de chaque zone, sur le plan de travail (valeurs en lx) :



Salle de classe : $E_{\text{moy}} \geq 300 \text{ lx}$ (éclairage maintenu); $U_0 \geq 0,60$; $\text{UGR} \leq 19$; $R_a \geq 80$.
Facteur de maintenance de l'installation : $M = 0,8$.

1. Calculez l'éclairement moyen E_{moy} mesuré.
2. Calculez l'uniformité U_0 . Où se trouve la zone la moins éclairée ? Proposez une explication.
3. L'installation est neuve. L'éclairement *maintenu* (après vieillissement et encrassement) vaudra $M \times E_{\text{moy}}$. Calculez-le et concluez sur la conformité de l'éclairement et de l'uniformité.
4. Les autres exigences de la norme (éblouissement, rendu des couleurs) sont-elles respectées ? Que signifie « 4 000 K » ?
5. L'installation étant neuve ($M = 1$ au moment des mesures), la méthode des flux s'écrit

$$E_{\text{moy}} = \frac{N \Phi_L U}{S}.$$

Déduisez-en l'utilance U réelle de la salle. Cette valeur est-elle vraisemblable?

6. Calculez l'efficacité lumineuse d'une dalle, la puissance totale installée et la puissance installée par mètre carré.
7. L'ancienne installation comportait 12 luminaires fluorescents de 80 W chacun (ballast compris). Pour 1 400 h d'utilisation par an, calculez l'énergie consommée par chaque installation et l'économie annuelle d'énergie.

★ Exercice 13.5

Une entreprise de fabrication d'armoires électriques souhaite rénover l'éclairage de son atelier de câblage (montage moyen), de dimensions $a = 24$ m et $b = 12$ m. Les luminaires sont suspendus à $h_u = 3,0$ m au-dessus du plan de travail. L'atelier fonctionne en deux équipes, soit 4000 h par an.

Installation actuelle : 40 luminaires fluorescents équipés de 2 tubes de 36 W (flux 3 350 lm par tube neuf) et de ballasts ferromagnétiques absorbant chacun 9 W (un ballast par tube). Relevé au luxmètre : $E_{\text{moy}} = 390 \text{ lx}$; $E_{\text{min}} = 250 \text{ lx}$.

Luminaire LED proposé (suspension industrielle) : $P = 95 \text{ W}$; $\Phi_{\text{L}} = 13\,000 \text{ lm}$; $T_{\text{c}} = 4\,000 \text{ K}$; $R_{\text{a}} = 82$; $\text{UGR} < 22$; driver à facteur de puissance $f_{\text{p}} = 0,95$; prix posé : 280 € par luminaire.

Norme NF EN 12464-1, atelier de montage moyen : $E_{\text{moy}} \geq 500 \text{ lx}$; $U_0 \geq 0,60$; $\text{UGR} \leq 22$; $R_{\text{a}} \geq 80$.

Utilance du luminaire LED (facteurs de réflexion plafond/murs/sol : 0,7/0,5/0,2) :

Indice du local K	1,5	2	2,5	3	4	5
Utilance U	0,58	0,63	0,67	0,70	0,73	0,75

On retiendra la valeur de U correspondant à la valeur tabulée de K immédiatement inférieure.
Facteur de maintenance : $M = 0,8$. Prix de l'énergie : 0,18 €/kW · h.

Partie A – Diagnostic de l'installation actuelle

1. Calculez la surface S de l'atelier et l'indice du local K . En déduire l'utilance U .
2. L'installation actuelle respecte-t-elle la norme ? Justifiez par le calcul de U_0 .
3. Calculez la puissance absorbée par un luminaire actuel, la puissance totale installée et l'efficacité lumineuse d'un luminaire (tubes neufs).
4. Avec des tubes neufs, la méthode des flux prévoyait

$$E_{\text{moy}} = \frac{N \Phi_{\text{L}} U M}{S}.$$

Calculez cette valeur, puis le facteur de maintenance réel M_{r} correspondant à l'éclairement mesuré. Proposez deux causes de cet écart.

Partie B – Dimensionnement de la solution LED

5. Par la méthode des flux, déterminez le nombre N de luminaires LED nécessaires.
6. On les répartit en 3 rangées régulières. Combien de luminaires par rangée ? Calculez l'espacement entre deux luminaires d'une rangée et entre deux rangées, puis proposez un schéma d'implantation coté.
7. Calculez l'éclairement moyen maintenu obtenu avec cette implantation.
8. Le luminaire proposé respecte-t-il les autres exigences de la norme ?

Partie C – Bilan énergétique et qualité de l'énergie

9. Calculez la puissance installée de la nouvelle installation, ainsi que l'énergie annuelle consommée par l'ancienne et par la nouvelle installation.
10. Calculez l'économie annuelle (en kW · h puis en euros) et le temps de retour sur investissement.
11. Une gradation DALI en fonction de la lumière du jour permettrait de réduire encore de 30 % l'énergie consommée par la nouvelle installation. Calculez l'économie supplémentaire en euros par an.
12. Les drivers de LED sont des charges non linéaires. Quels courants absorbent-ils en plus du fondamental ? Dans quel conducteur ces courants s'additionnent-ils ? Pourquoi le cahier des charges impose-t-il $f_{\text{p}} > 0,9$?

★ Exercice 14.1

Un transmetteur de température 2 fils est réglé sur l'étendue de mesure 0°C à 150°C . Il est raccordé à l'entrée analogique 4–20 mA d'un automate, qui mesure le courant de boucle grâce à une résistance de $250\,\Omega$.

1. Quels courants le transmetteur impose-t-il pour 0°C et pour 150°C ?
2. Calculez le courant I dans la boucle lorsque la température est $\theta = 60^{\circ}\text{C}$, puis la tension U aux bornes de la résistance de mesure.
3. L'automate mesure $I = 17,2\text{ mA}$. Quelle est la température mesurée ?
4. Quelle température correspond au milieu de la plage de courant ($I = 12\text{ mA}$) ?
5. L'automate mesure successivement $I = 0\text{ mA}$, puis, après réparation, $I = 21,3\text{ mA}$. Interprétez chacune de ces valeurs.

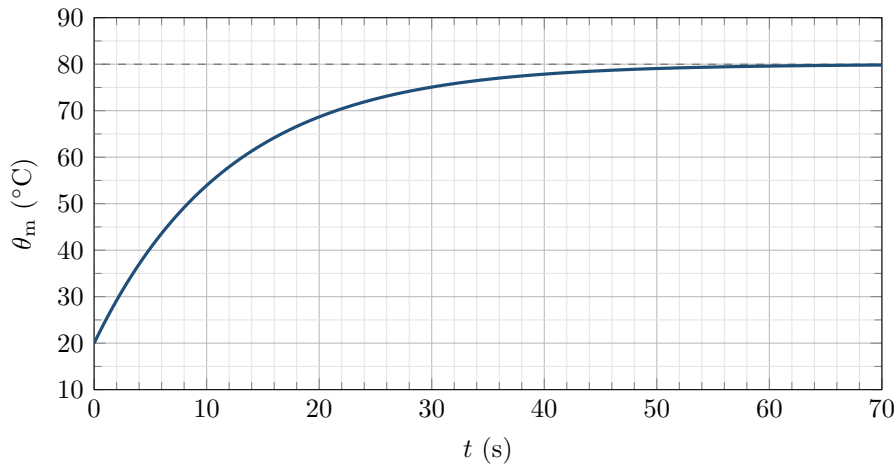
★ Exercice 14.2

La carte d'entrée analogique d'un automate possède un CAN de $n = 12$ bits, de pleine échelle $PE = 10\text{ V}$ (entrée 0 V à 10 V).

1. Combien de codes différents le CAN peut-il fournir ? Quelles sont la plus petite et la plus grande valeur du code ?
2. Calculez le quantum q du convertisseur.
3. Calculez le code N obtenu pour une tension d'entrée $U = 3,70\text{ V}$.
4. Le CAN fournit le code $N = 2867$. Dans quel intervalle de largeur q se trouve la tension d'entrée ?
5. Un transmetteur de température 0°C à 200°C délivre un signal 0 V à 10 V sur cette entrée. Quelle est la plus petite variation de température que l'automate peut détecter ?
6. Quel nombre de bits minimal faudrait-il pour obtenir un quantum inférieur à 1 mV sur la même pleine échelle ?

★ Exercice 14.3

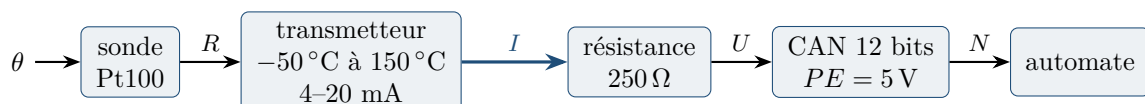
Pour contrôler la température d'un bain de traitement, on utilise une sonde Pt100 placée dans une gaine de protection en acier inoxydable. Pour déterminer son temps de réponse, on la sort d'une pièce à 20°C et on la plonge brusquement (à $t = 0$) dans de l'eau agitée à 80°C . La température indiquée θ_m est enregistrée :



1. Calculez la résistance de la sonde Pt100 à 20 °C et à 80 °C.
2. Quelle est la variation totale de la température indiquée ? Calculez la température atteinte à 63 % de cette variation, puis déterminez graphiquement la constante de temps τ de la sonde.
3. Calculez la température atteinte à 95 % de la variation. Déterminez graphiquement le temps de réponse $t_{5\%}$ et vérifiez la relation $t_{5\%} \approx 3\tau$.
4. Quelle température la sonde indique-t-elle 24 s après l'immersion ? Quelle est alors l'erreur de mesure ?
5. Sans gaine, la constante de temps de la sonde est $\tau' = 4$ s. Calculez son temps de réponse. Pourquoi la gaine ralentit-elle la mesure ? Pourquoi l'utilise-t-on malgré tout ?

★ Exercice 14.4

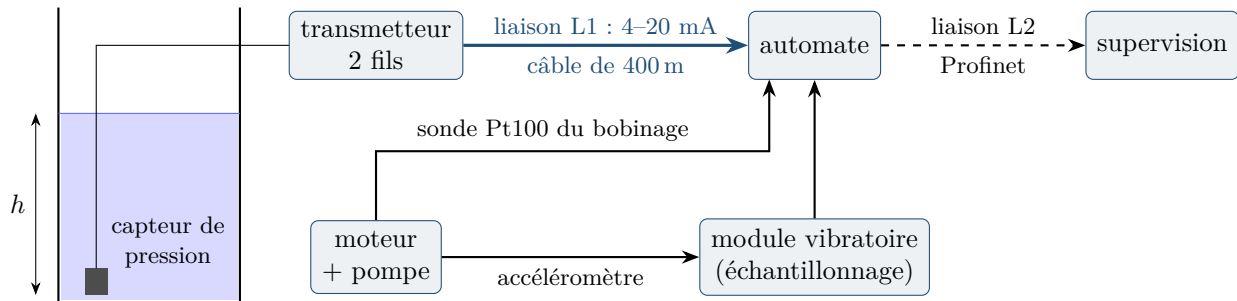
La température d'huile d'un transformateur est mesurée par la chaîne suivante :



1. L'huile est à $\theta = 85$ °C. Calculez la résistance R de la sonde.
2. Calculez le courant I délivré par le transmetteur, puis la tension U aux bornes de la résistance de mesure.
3. Calculez le quantum q du CAN, puis le code N transmis à l'automate.
4. L'automate reçoit maintenant le code $N = 1843$. Retrouvez successivement la tension U , le courant I et la température θ de l'huile.
5. Quel code correspond à 4 mA ? Combien de codes sont réellement utilisés pour décrire l'étendue de mesure ? En déduire la plus petite variation de température détectable par l'automate.
6. Que se passe-t-il pour un courant de 20,5 mA ? L'automate peut-il distinguer un dépassement d'échelle ?
7. Le transmetteur est installé près du transformateur, à 150 m de l'automate. Donnez deux avantages de la transmission en courant 4–20 mA par rapport à une transmission directe de la résistance de la sonde ou d'une tension 0 V à 10 V.

★ Exercice 14.5

Une station de relevage d'eaux pluviales est équipée d'une pompe entraînée par un moteur asynchrone (15 kW, 1 450 tr/min). Le niveau d'eau dans la cuve est mesuré par un capteur de pression immergé ; l'information est transmise à l'automate de la station, lui-même relié à la supervision du service des eaux.



Transmetteur de niveau : étendue de mesure 0 m à 4 m d'eau ; sortie 4–20 mA, 2 fils ; tension minimale nécessaire à ses bornes : 12 V.

Boucle : alimentation 24 V continue dans l'automate ; résistance de mesure $250\ \Omega$; câble 2 conducteurs de $1\ \text{mm}^2$, de résistance linéique $18,1\ \Omega/\text{km}$ par conducteur, longueur 400 m.

Carte d'entrée de l'automate : CAN 12 bits, pleine échelle $PE = 5\ \text{V}$, appliqué à la tension aux bornes de la résistance de $250\ \Omega$.

Surveillance de la pompe : sonde Pt100 dans le bobinage du moteur, constante de temps $\tau = 40\ \text{s}$; constante de temps thermique du moteur : environ 30 min. Le spectre du signal de l'accéléromètre (balourd, défauts de roulements) s'étend jusqu'à $f_{\text{max}} = 1\ \text{kHz}$; le module vibratoire échantillonne actuellement à $f_e = 1,5\ \text{kHz}$.

Partie A – Architecture de la chaîne de mesure

1. Précisez le rôle du capteur de pression et celui du transmetteur. Pourquoi un capteur de pression permet-il de mesurer un niveau d'eau ?
2. Les liaisons L1 et L2 transmettent-elles un signal analogique ou numérique ? Justifiez. Pourquoi utilise-t-on une boucle 4–20 mA plutôt qu'un signal 0 V à 10 V pour la liaison L1 ?

Partie B – Boucle de courant

3. Calculez le courant dans la boucle lorsque le niveau d'eau est $h = 2,6\ \text{m}$.
4. L'alarme « niveau très haut » doit se déclencher à $h = 3,5\ \text{m}$. Quel seuil de courant faut-il programmer ?
5. La supervision affiche un courant de 3,2 mA. Le niveau est-il négatif ? Interprétez.
6. Représentez le schéma électrique de la boucle (alimentation, transmetteur, résistance de mesure, résistance du câble). Calculez la tension aux bornes du transmetteur pour le courant maximal de 20,5 mA et concluez. Quelle longueur de câble maximale pourrait-on utiliser ?

Partie C – Numérisation du niveau

7. Calculez la tension appliquée au CAN et le code obtenu pour $h = 2,6\ \text{m}$.
8. Calculez le quantum du CAN. À quelle variation de courant, puis de niveau d'eau, correspond-il ? Conclure.

Partie D – Surveillance de la pompe

9. Calculez le temps de réponse de la sonde Pt100 du bobinage. Est-elle assez rapide pour surveiller l'échauffement du moteur ?
10. Le module vibratoire respecte-t-il le critère de Shannon ? À quelle fréquence apparaît, après échantillonnage, la composante à 1 kHz du signal ? Quelle conséquence pour le diagnostic de la pompe ? Proposez deux remèdes.

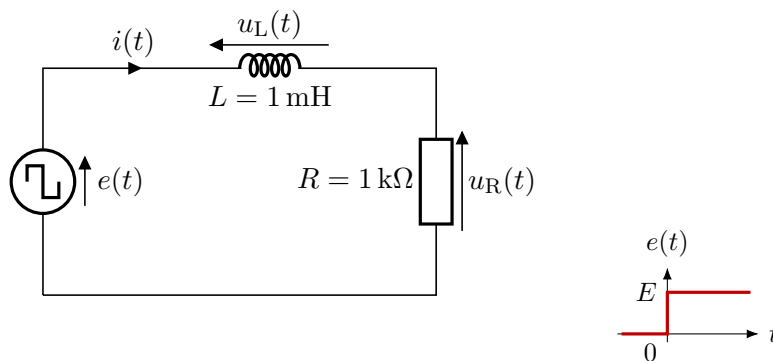
15

Systèmes linéaires du 1er et du 2e ordre

Exercices – Cours de 2^e année en BTS électrotechnique

★ Exercice 15.1

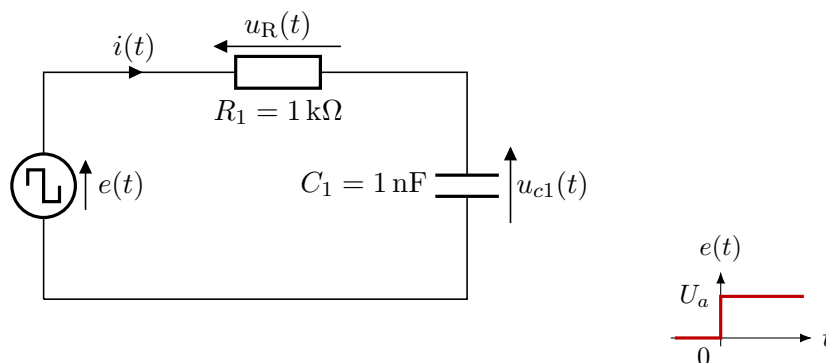
On souhaite étudier le comportement du courant $i(t)$ d'un circuit RL série alimenté par un générateur délivrant un échelon de tension : $e(t) = 0$ pour $t < 0$ et $e(t) = E = 10 \text{ V}$ pour $t > 0$.



1. Écrivez la loi des mailles relative au circuit ci-dessus.
2. Montrez que, pour $t > 0$, le courant $i(t)$ vérifie l'équation différentielle du premier ordre : $R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} = E$.
3. Exprimez la constante de temps τ en fonction de L et R et calculez sa valeur.

★ Exercice 15.2

On souhaite étudier la charge et la décharge d'un condensateur en étudiant le comportement de la tension $u_c(t)$ en réponse à un échelon de tension : $e(t) = 0$ pour $t < 0$ et $e(t) = U_a = 10 \text{ V}$ pour $t > 0$.

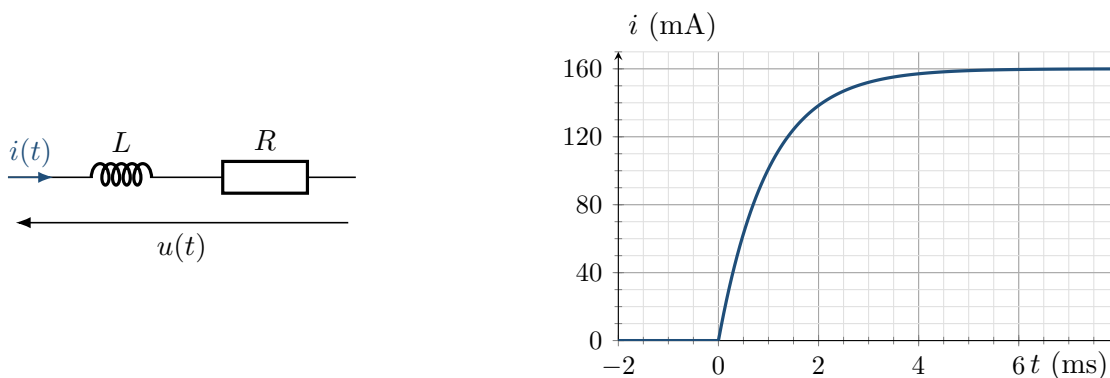


1. Établissez l'équation différentielle du premier ordre que vérifie $u_{c1}(t)$ pour $t > 0$.
2. Identifiez la constante de temps τ du circuit. Calculez sa valeur numérique.
3. Quelle valeur atteint la tension $u_{c1}(t)$ en régime permanent ?

4. Le condensateur est initialement chargé sous 5 V. Représentez l'évolution de la tension $u_{c1}(t)$.
5. Le condensateur est maintenant entièrement chargé. La tension $e(t)$ du générateur repasse à 0 V (on prend ce nouvel instant comme origine des temps) et on analyse le comportement de la tension $u_{c2}(t)$ lors d'une décharge complète du condensateur. Établissez l'équation différentielle du premier ordre que vérifie $u_{c2}(t)$.
6. Résolvez cette équation et tracez l'allure de $u_{c2}(t)$ sur le même graphique que celui de $u_{c1}(t)$.

★ Exercice 15.3

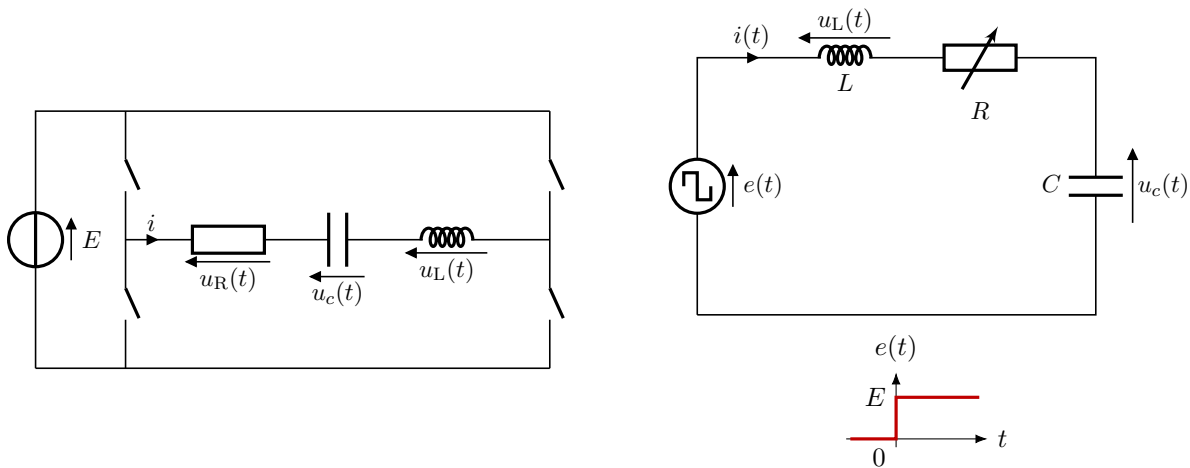
On étudie le régime transitoire du courant dans une bobine de moteur pas-à-pas modélisée par un circuit RL série représenté ci-dessous :



1. Rotor immobilisé, on a relevé l'évolution du courant circulant dans une phase du moteur au moment où sa tension d'alimentation $u(t)$ passe de 0 à $E = 10$ V. En déduire la valeur numérique de la résistance R d'une phase du moteur.
2. À partir de ce même graphique et en détaillant la méthode utilisée, déterminez la valeur numérique de la constante de temps τ d'une phase.
3. Montrez que l'intensité du courant dans les phases vérifie une équation différentielle du premier ordre. Exprimez de manière littérale la constante de temps τ .
4. Donnez l'expression de l'inductance L en fonction de τ et de R , puis calculez sa valeur numérique.
5. Donnez l'expression de la transmittance isomorphe $T(p) = \frac{I(p)}{U(p)}$ permettant de modéliser cet enroulement de moteur pas-à-pas.

★ Exercice 15.4

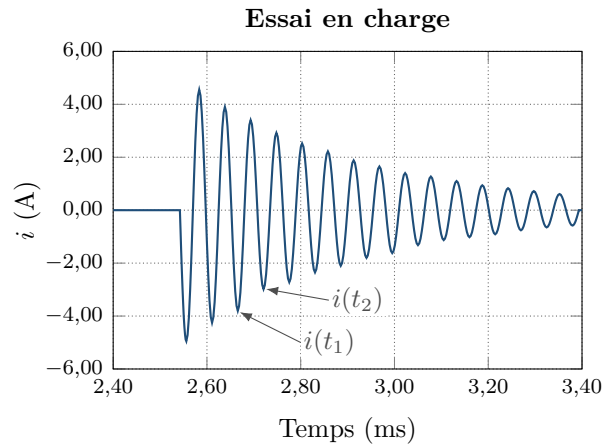
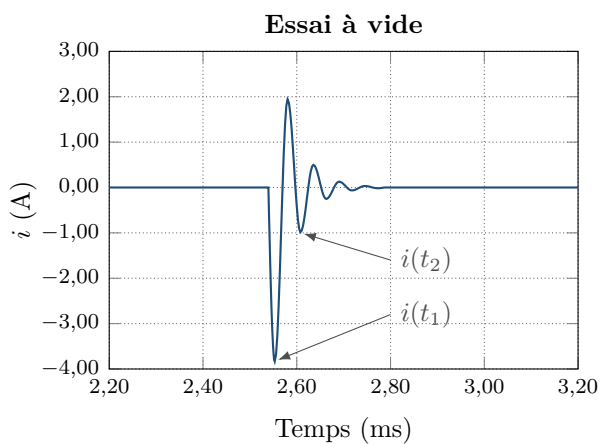
On donne le schéma de principe d'une table de cuisson à induction, basée sur un onduleur de tension travaillant sur une charge résonnante RLC à la fréquence de 25 kHz. On propose d'identifier la charge résonnante à vide puis en charge par un essai. On place en série avec l'inducteur (c'est-à-dire le circuit RL) un condensateur de capacité $C = 1 \mu\text{F}$.



Pour l'essai, le circuit RLC est alimenté par un échelon de tension : $e(t) = 0$ pour $t < 0$ et $e(t) = E$ pour $t > 0$.

1. Montrez que la tension $u_c(t)$ vérifie l'équation différentielle : $u_c(t) + RC \frac{du_c(t)}{dt} + LC \frac{d^2u_c(t)}{dt^2} = E$.
2. En identifiant à la forme canonique suivante : $u_c(t) + \frac{2m}{\omega_0} \frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2u_c(t)}{dt^2} = E$, déterminez l'expression littérale de ω_0 et m .
3. En dérivant l'équation différentielle obtenue à la question 1, déterminez celle vérifiée par $i(t)$.

On a relevé l'allure du courant $i(t)$ lorsque le système est à vide puis en charge (casserole de 1 kg contenant 0,65 L d'eau) :



4. D'après les courbes, quelle est la valeur atteinte par le courant en régime permanent ? Était-ce prévisible d'après les calculs précédents ?
5. Comment appelle-t-on le type de réponse auquel correspondent les courbes précédentes ?
6. Dans quel cas le coefficient d'amortissement m est-il le plus élevé ? Justifiez.
7. Dans quel cas la résistance R de l'inducteur est-elle la plus élevée ? Justifiez.
8. Mesurez pour les deux cas la pseudo-période T_p et en déduire la pseudo-pulsation $\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$.
9. En faisant, pour les deux cas, l'approximation $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx \omega_p$, en déduire les inductances L_{vide} et L_{charge} modélisant l'inducteur.

10. On donne la relation permettant de calculer à l'aide des relevés la valeur du coefficient d'amortissement :

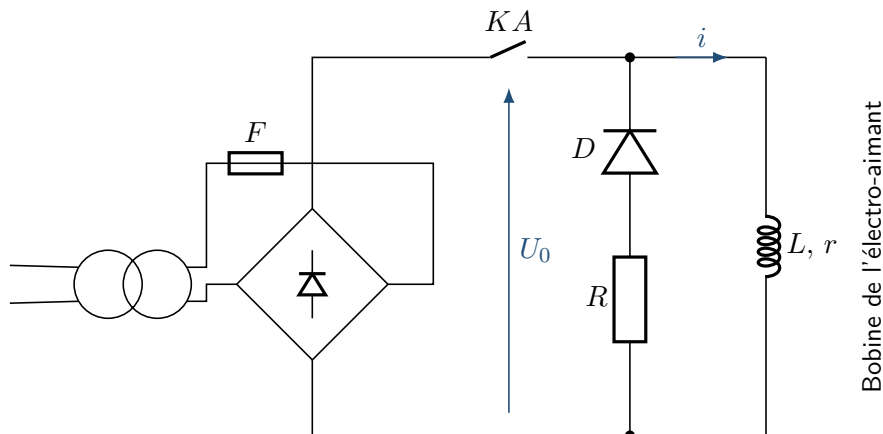
$$m = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{i(t_1)}{i(t_2)} \right).$$

Calculez pour chaque cas le coefficient d'amortissement et en déduire les résistances R_{vide} et R_{charge} de l'inducteur.

★ Exercice 15.5

On étudie un motoréducteur muni d'un dispositif d'embrayage-frein. Le motoréducteur utilisé est constitué d'un moteur asynchrone triphasé à cage alimenté par un réseau $3 \times 400 \text{ V}$ et d'un réducteur à engrenages cylindriques. La partie électrique de l'embrayage-frein (schéma ci-dessous) comprend un électro-aimant commandant l'embrayage et un circuit de décharge monté en parallèle sur la bobine de l'électro-aimant.

La bobine de l'électro-aimant possède une inductance $L = 1 \text{ H}$ et une résistance interne $r = 10 \Omega$. Le circuit de décharge est constitué d'une diode D et d'une résistance $R = 50 \Omega$. L'embrayage est alimenté en énergie par l'intermédiaire d'un transformateur et d'un pont de Graëtz à travers un contacteur KA . La tension moyenne délivrée par le pont est $U_0 = \frac{24\sqrt{2}}{\pi} \text{ V}$.



I- Étude de l'embrayage :

Pour commander l'embrayage, on ferme le contacteur KA à l'instant $t = 0 \text{ s}$. Le système embraye, après fermeture de KA , quand l'intensité du courant $i(t)$ traversant l'électro-aimant atteint 95 % de sa valeur nominale, notée I_0 . On peut montrer que dans cette phase la diode de roue libre D est bloquée et donc équivalente à un interrupteur ouvert.

1. Représentez le schéma électrique simplifié du circuit correspondant.
2. Donnez l'expression de l'intensité I_0 du courant circulant dans la bobine de l'électro-aimant en régime permanent. Calculez sa valeur numérique.
3. Montrez que le courant traversant la bobine de l'électro-aimant vérifie l'équation :

$$i(t) + \frac{L}{r} \frac{di(t)}{dt} = I_0.$$

4. Représentez l'allure des variations de $i(t)$ en fonction du temps. En déduire la durée d'embrayage du système, notée t_e .

II- Étude du débrayage (frein) :

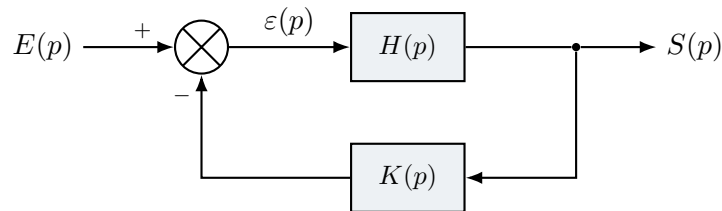
Le système débraye, après ouverture du contacteur KA , quand l'intensité du courant $i(t)$ atteint 15 % de sa valeur nominale I_0 . L'instant d'ouverture du contacteur KA sera pris comme nouvelle origine des temps ($t = 0$ s).

1. La diode de roue libre D devient passante et sera assimilée à un fil conducteur (on néglige la tension de seuil de la diode). Représentez le schéma équivalent du circuit.
2. Montrez que le courant $i(t)$ traversant la bobine de l'électro-aimant vérifie l'équation différentielle :

$$i(t) + \frac{L}{r + R} \frac{di(t)}{dt} = 0.$$

3. Exprimez puis calculez la valeur numérique de la constante de temps τ du système.
4. Quelle est la valeur initiale du courant, juste avant l'ouverture de KA ? Vers quelle valeur finale tend-il ensuite?

★ Exercice 16.1

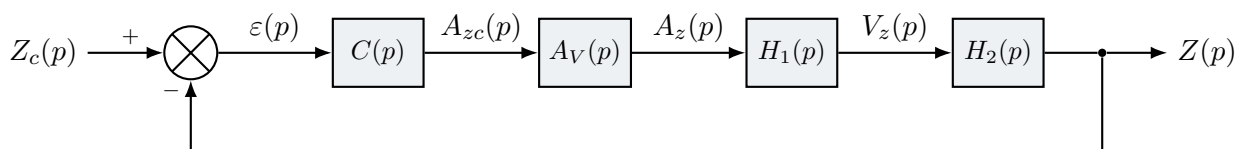


Le système asservi est défini par $H(p) = \frac{1}{1+5p}$ et $K(p) = \frac{1}{1+p}$.

1. Exprimez la transmittance en boucle ouverte $T_{BO}(p)$.
2. Exprimez $S(p)$ en fonction de $E(p)$ en vous aidant de la fonction de transfert en boucle fermée.

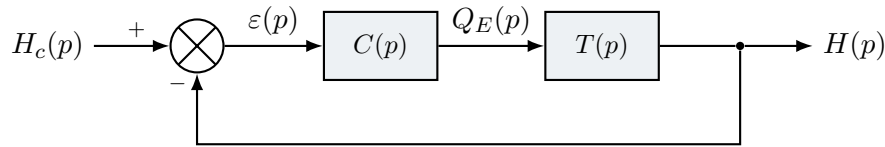
★ Exercice 16.2

Le schéma-bloc ci-dessous représente la modélisation de l'asservissement de l'altitude $z(t)$ d'un avion moyen-courrier.



1. On donne la fonction de transfert $A_V(p)$ modélisant le comportement dynamique de l'avion : $A_V(p) = \frac{1}{0,444p^2 + 1,066p + 1}$. En déduire l'équation différentielle liant les grandeurs $a_z(t)$ et $a_{zc}(t)$.
2. En utilisant les relations définissant la vitesse $v_z(t) = \frac{dz(t)}{dt}$ et l'accélération $a_z(t) = \frac{dv_z(t)}{dt}$, déterminez les fonctions de transfert $H_1(p)$ et $H_2(p)$.
3. Le correcteur est de la forme $C(p) = k(1 + T_d \times p)$ avec $k = 0,01$ et $T_d = 10$ s. En déduire l'équation différentielle reliant les grandeurs $\varepsilon(t)$ et $a_{zc}(t)$.
4. Déterminez la fonction de transfert en boucle ouverte $T_{BO}(p) = \frac{Z(p)}{\varepsilon(p)}$.
5. Exprimez la fonction de transfert en boucle fermée $T_{BF}(p) = \frac{Z(p)}{Z_c(p)}$.

★ Exercice 16.3

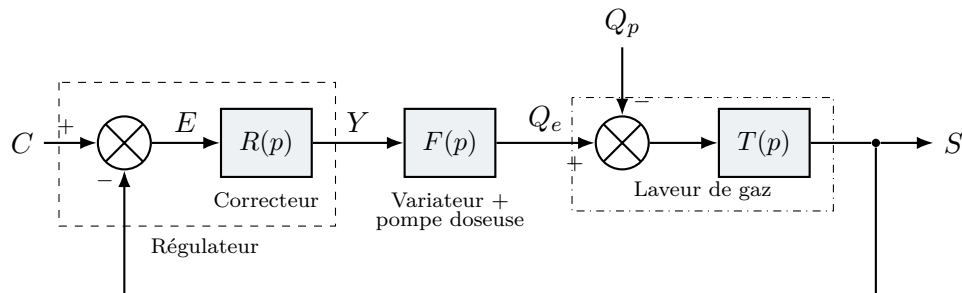


On a représenté ci-dessus le schéma bloc de régulation d'un réservoir dans lequel le correcteur a pour transmittance $C(p) = C_0$ et $T(p) = \frac{T_0}{1 + \tau_f p}$.

1. Donnez l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée $T_{BF}(p)$ en fonction de $C(p)$ et $T(p)$.
2. Montrez qu'elle peut se mettre sous la forme $T_{BF}(p) = \frac{T_{0f}}{1 + \tau_f p}$ et donnez les expressions de T_{0f} et τ_f en fonction de C_0 , T_0 et τ .
3. Indiquez l'influence de C_0 sur la rapidité du système asservi.
4. Montrez que l'erreur $\varepsilon(p) = \frac{H_c(p)}{1 + C(p)T(p)}$.
5. En régime permanent, pour une consigne H_{c0} appliquée à l'entrée du système, exprimez l'erreur statique ε_0 en fonction de la consigne H_{c0} , de C_0 et de T_0 .
6. Comment choisir C_0 pour avoir l'asservissement le plus précis possible ?

★ Exercice 16.4

On cherche à réguler le pH d'un dispositif laveur de gaz autour de 5. Le schéma fonctionnel de cette régulation de pH est donné ci-dessous :



La grandeur C représente la consigne de pH, E l'erreur issue du soustracteur, Y la grandeur réglante, Q_e le débit du réactif, Q_p le débit équivalent d'acide apporté par les vapeurs d'acide et S la sortie du système en valeur de pH.

Les fonctions de transfert sont les suivantes :

- ▷ $R(p)$: fonction de transfert du correcteur du régulateur ;
- ▷ $F(p)$: fonction de transfert de l'injection de réactif ;
- ▷ $T(p)$: fonction de transfert du laveur de gaz.

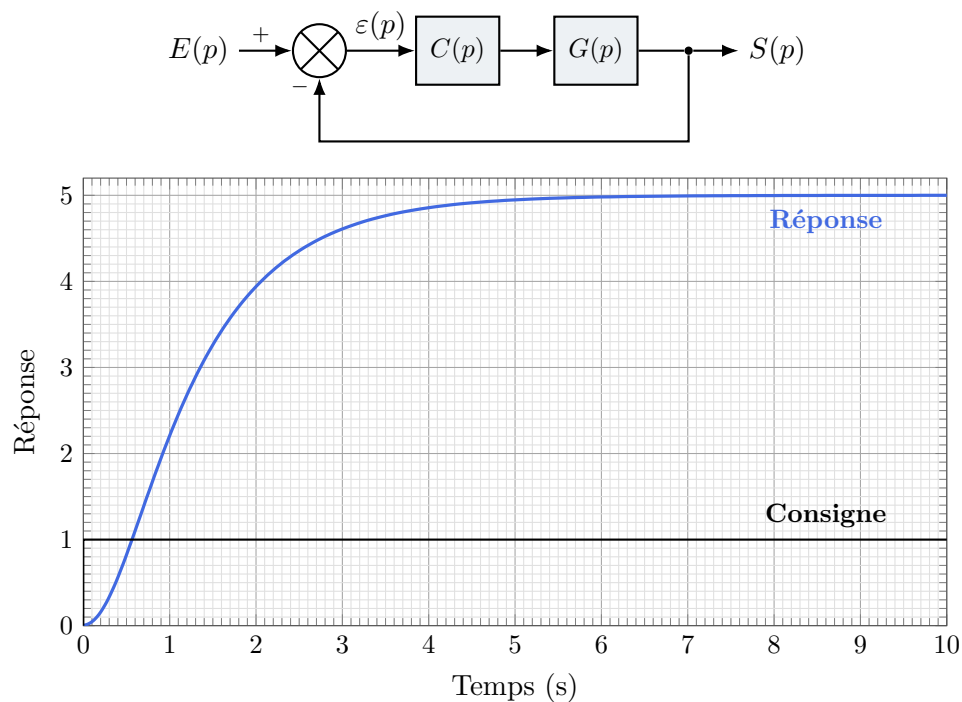
- ▷ $F(p) = A = 2 \times 10^{-3}$ et $T(p) = \frac{B}{p(1 + \tau p)}$ avec $B = 500$ et $\tau = 7,0$ s ;
- ▷ correcteur PI de fonction de transfert $R(p) = K \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right)$ avec $K = 0,5$ et $T_i = 40$ s ;
- ▷ on considère que le débit Q_p est constant, alors $Q_p(p) = 0$.

1. Déterminez la FTBO de cet asservissement.
2. Exprimez la FTBF du système asservi et la mettre sous la forme

$$T_{BF}(p) = \frac{1 + 40p}{1 + 40p + 80p^2 + 560p^3}.$$

3. Déterminez la valeur finale de la sortie obtenue pour une consigne $C_0 = 1$ et concluez sur la précision du système corrigé.

★ Exercice 16.5



On considère un processus $G(p)$ inséré dans une structure d'asservissement munie d'un correcteur PID. Le processus est modélisé par la fonction de transfert $G(p) = \frac{100}{(p+1)(p+4)(p+5)}$. Un essai indiciel pour une consigne $E_0 = 1$ a été relevé ci-dessus.

1. Montrez que l'on obtient les valeurs : $t_2 = 0,95$ s ; $t_1 = 0,7$ s et $K = 5$.
2. Déterminez les valeurs numériques des constantes K , T et τ du modèle de Broïda.

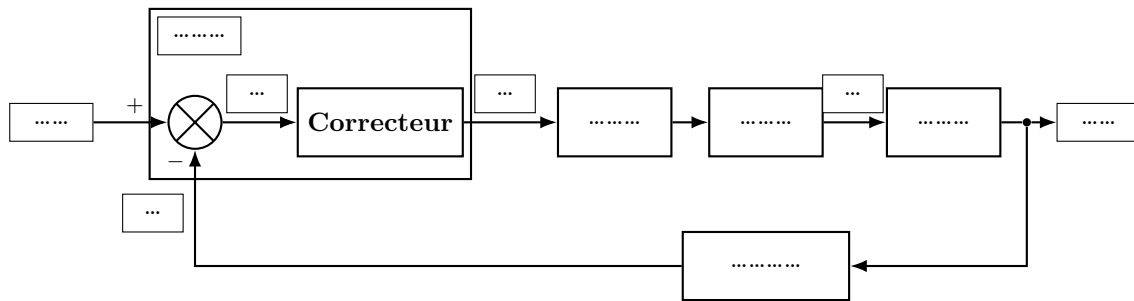
★ Exercice 16.6

On souhaite dans un dispositif de forage pouvoir imposer et contrôler la valeur du débit Q . On met donc en place un dispositif de régulation de débit dont on n'attend pas de performance dynamique particulière mais simplement une précision statique donnée.

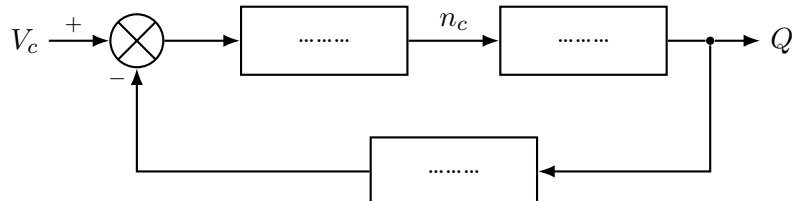
Ce dispositif est construit autour d'un automate programmable industriel de la manière suivante :

- ▷ la tension V_Q , image du débit Q , est renvoyée sur une entrée analogique de l'automate ;
- ▷ la consigne de débit est fournie à l'automate sous la forme d'une tension 0 V à 10 V notée V_c ;
- ▷ elle est comparée par l'automate à V_Q pour élaborer le signal d'erreur ε ;
- ▷ l'automate comporte également une fonction correcteur qui va élaborer, à partir de ε , la consigne de vitesse n_c envoyée au variateur. Ce dernier pilote le moteur qui entraîne la pompe. On notera n sa vitesse de rotation. Le correcteur (logiciel) mis en place dans l'automate a pour fonction de transfert $\frac{K}{p}$ où p est la variable de Laplace et K une constante.

Document réponse 1 – structure de la boucle de régulation :



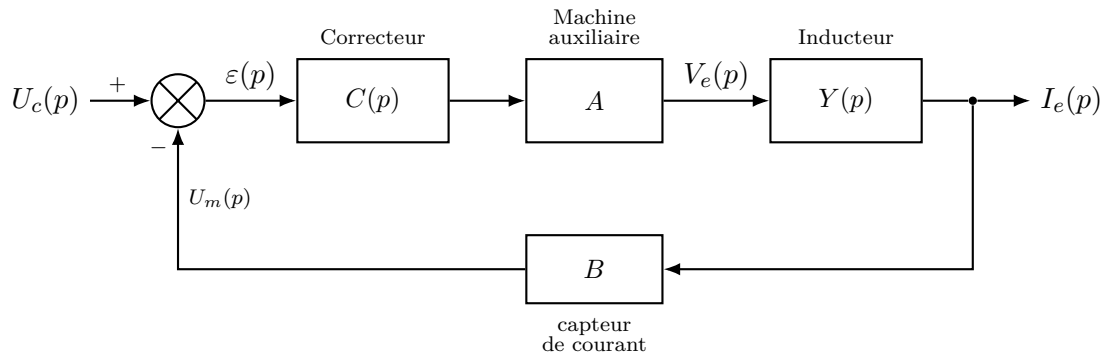
Document réponse 2 – fonctions de transfert :



1. Parmi les trois types de correction P, I et D, quelle est celle réalisée par le correcteur mis en place ?
2. Complétez le premier document réponse (structure de la boucle de régulation) en notant dans les zones prévues les éléments : *débitmètre*, *variateur*, *pompe*, *moteur*, *automate*, ainsi que les signaux Q , V_c , n_c , V_Q , n et ε . On donne pour le débitmètre $V_Q(p) = \frac{a}{1 + \tau p} n_c(p)$.
3. Sur le deuxième document réponse, indiquez dans chaque bloc sa fonction de transfert dans le formalisme de Laplace.
4. En déduire l'expression de la fonction de transfert globale de la boucle fermée $T_{BF}(p)$ telle que $Q(p) = T_{BF}(p) V_c(p)$.

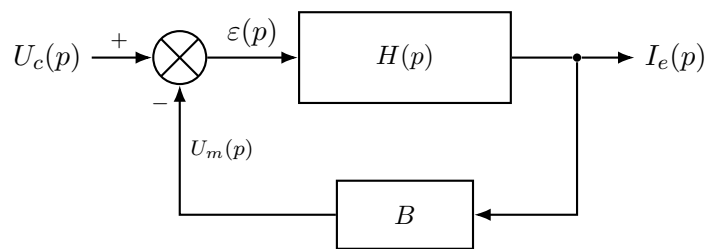
★ Exercice 16.7 : BTS 2011

Le courant d'excitation est réglé par action sur la tension de consigne U_c afin de maintenir une valeur donnée du facteur de puissance. Pour s'affranchir d'éventuelles perturbations, on met en œuvre la boucle d'asservissement décrite à la figure 17.

**Fig. 17** – Boucle d'asservissement du courant d'excitation.

La fonction de transfert de la machine auxiliaire est assimilée à une constante dont la valeur est $A = 22$. U_m est la mesure de I_e fournie par un capteur de courant de sensibilité $B = 10 \text{ mV/A}$. Le correcteur choisi est de type proportionnel intégral. Sa fonction de transfert s'écrit :

$$C(p) = \frac{K_p (1 + T_i p)}{T_i p}.$$

**Fig. 18** – Schéma bloc simplifié.

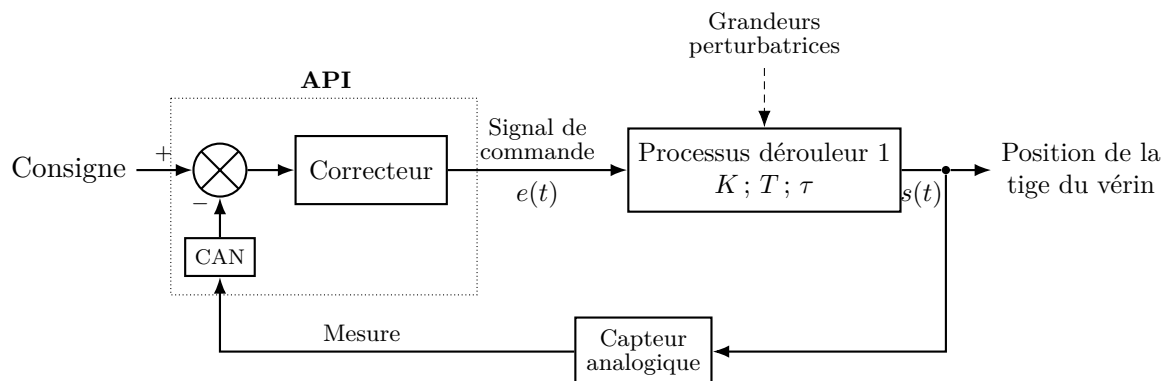
1. L'inducteur est modélisé par la fonction de transfert $Y(p) = \frac{1}{R_e + L_e p}$.

Mettez $Y(p)$ sous la forme $Y(p) = \frac{K_e}{1 + T_e p}$ en donnant les expressions de K_e et de T_e en fonction de R_e et L_e . Précisez les unités de K_e et de T_e .

2. Justifiez que l'erreur en régime établi (appelée également erreur statique) de cet asservissement est nulle. En déduire la valeur du courant I_e en régime établi, pour une tension de consigne $U_c = 3,92 \text{ V}$.
3. On souhaite ramener le schéma bloc de la figure 17 au schéma simplifié de la figure 18. Déterminez l'expression de la fonction de transfert $H(p)$ en fonction de K_p , T_i , T_e , K_e et A .
4. Montrez que si on choisit $T_i = T_e$, $H(p)$ peut se mettre sous la forme $H(p) = \frac{K}{p}$. Donnez alors l'expression de K en fonction de K_p , K_e , A et T_e .
5. À partir du schéma bloc réduit, montrez que la fonction de transfert en boucle fermée peut être mise sous la forme : $T_{BF}(p) = \frac{1}{B} \frac{1}{1 + T p}$ avec $T = \frac{T_e}{K_p A B K_e}$.
6. On souhaite obtenir un temps de réponse à un échelon à 95 % de 20 ms. Calculez la valeur de la constante de temps T .
7. Avec les valeurs $T_e = 2,75 \text{ s}$ et $K_e = 8,33$, calculez le gain K_p du correcteur.

★ Exercice 16.8 : BTS 2024

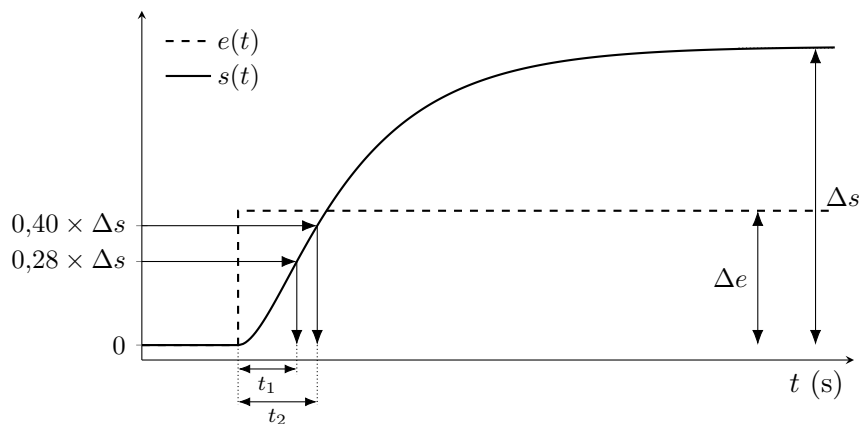
L'API gère la régulation de la position de la tige du vérin en agissant sur le signal de commande qui pilote le variateur du moteur dérouleur 1. La figure ci-dessous représente le schéma bloc simplifié de cette régulation.



Détermination du modèle. La méthode de Broïda permet de modéliser un système sous la forme d'un système du premier ordre avec un retard. Ce modèle a pour paramètres :

- ▷ K : gain statique ;
- ▷ T_r : retard en secondes ;
- ▷ τ : constante de temps en secondes.

À partir des relevés, réalisés en boucle ouverte, de l'évolution temporelle de la grandeur d'entrée $e(t)$ du système et de la grandeur de sortie $s(t)$, la construction graphique ci-dessous permet de déterminer Δe , Δs , t_1 et t_2 .



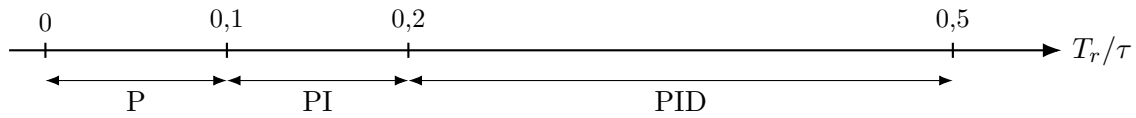
La méthode d'identification s'effectue sur le graphique :

- ▷ relever les valeurs de Δe et Δs (valeur obtenue en régime établi) ;
- ▷ tracer $0,28 \times \Delta s$ et relever le temps t_1 correspondant ;
- ▷ tracer $0,40 \times \Delta s$ et relever le temps t_2 correspondant.

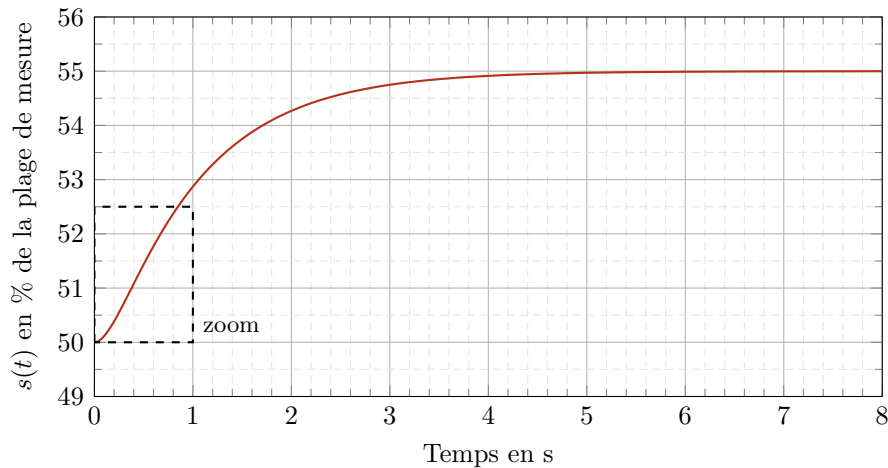
Calcul des paramètres du modèle :

- ▷ le gain statique : $K = \frac{\Delta s}{\Delta e}$ avec Δe en pourcentage de l'échelle de commande et Δs en pourcentage de la plage de mesure ;
- ▷ le retard : $T_r = 2,8 \times t_1 - 1,8 \times t_2$;
- ▷ la constante de temps : $\tau = 5,5 \times (t_2 - t_1)$.

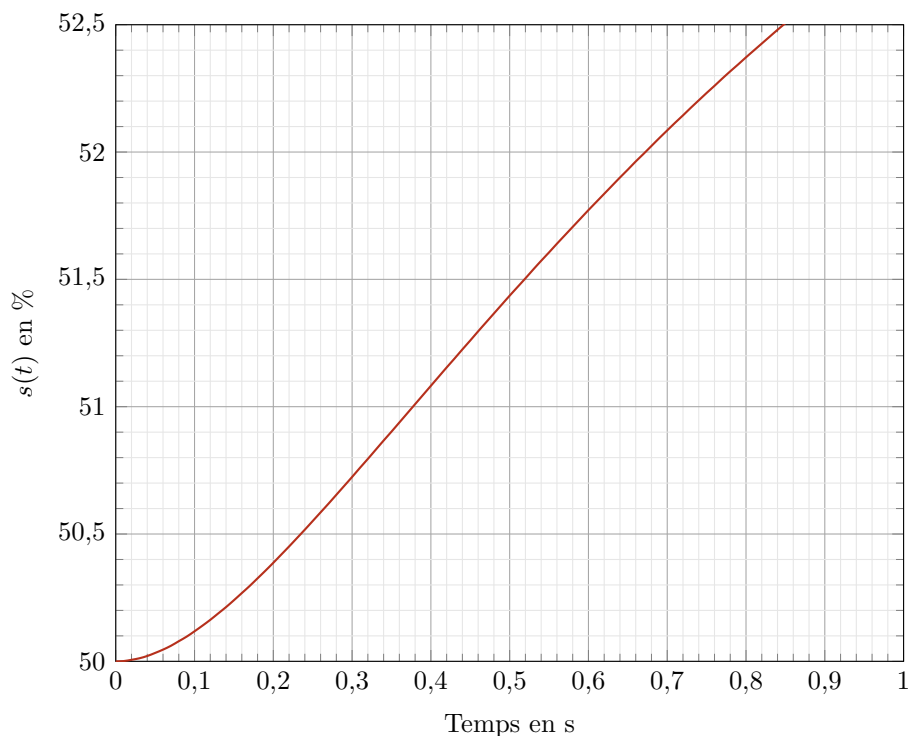
Détermination du type de correcteur :



On souhaite déterminer les paramètres de la régulation afin de satisfaire les performances définies par le cahier des charges. Le système à réguler peut être assimilé à un système du 1^{er} ordre avec retard. Le relevé de la sortie $s(t)$ du système pour un échelon d'entrée Δe de 10 % de l'échelle de commande est donné ci-dessous (relevé complet, puis zoom sur la zone encadrée).



ZOOM



1. Sur la partie zoomée du relevé de $s(t)$, réalisez, à l'aide de la méthode de Broïda, la construction graphique permettant de déterminer t_1 et t_2 . Déterminez alors Δs , t_1 et t_2 .
2. Montrez que les valeurs des paramètres du système sont les suivantes : gain statique $K = 0,5$, retard $T = 0,16$ s et constante de temps $\tau = 1$ s.
3. À partir des résultats précédents, justifiez que le correcteur choisi soit de type PI.

★ Exercice 16.9 : BTS 2017

Pour assurer un débit constant quelle que soit la position des clapets, on réalise une régulation de pression dans la gaine de ventilation de la CTA (Centrale de Traitement de l'Air). Cela entraîne aussi une augmentation de l'efficacité énergétique. Le schéma de principe de la régulation est donné figure 19. Dans un premier temps, on réalise un essai en boucle ouverte afin d'identifier le processus par la méthode de Broïda, puis dans un deuxième temps, on détermine les valeurs de réglage du régulateur.

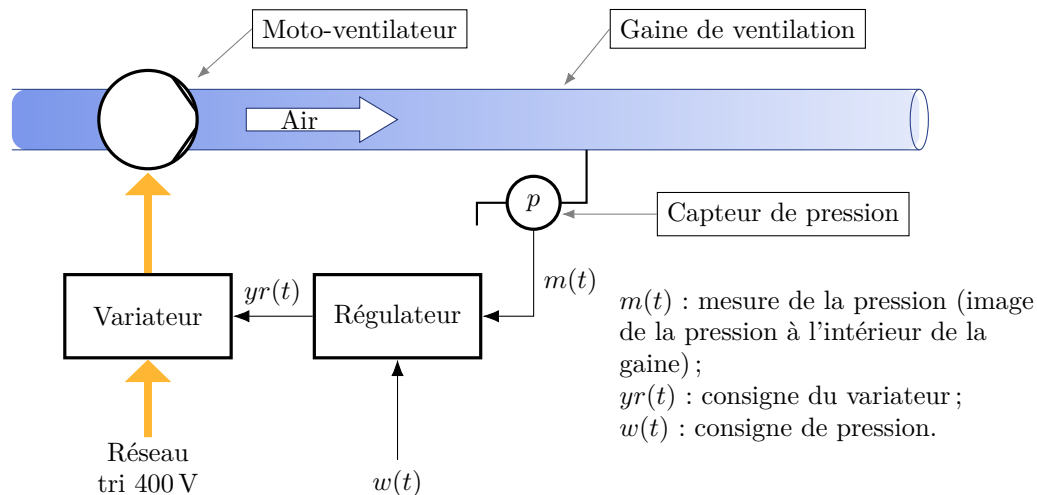


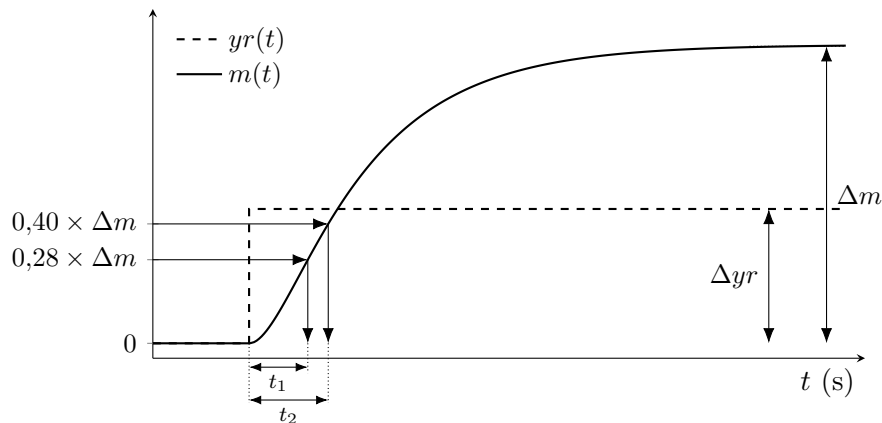
Fig. 19 – Schéma de principe de la régulation de pression.

D.1 – Structure de la boucle de régulation. Compléter le « schéma bloc » correspondant à la structure de la régulation de pression (voir document réponse, figure 26), à l'aide des éléments suivants : « régulateur », « correcteur », « variateur », « moto-ventilateur » et « capteur de pression », ainsi que des grandeurs suivantes : w (consigne de pression), m (mesure de la pression), yr (consigne du variateur) et p (pression).

D.2 – Identification du processus. La méthode de Broïda consiste à réaliser un essai en boucle ouverte (le régulateur est en mode manuel). On impose un échelon de commande (réponse indicielle). On obtient alors $m(t)$ (mesure de la pression) et $yr(t)$ (l'échelon de commande) sur le même graphique (voir document réponse, figure 22). La méthode de Broïda propose un modèle ayant une fonction $H(p)$ de la forme d'un premier ordre avec un retard :

$$H(p) = \frac{K}{1 + \tau p} e^{-T_r p} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} K : \text{gain statique;} \\ T_r : \text{retard en secondes (s);} \\ \tau : \text{constante de temps en secondes (s).} \end{cases}$$

À partir des relevés réalisés en boucle ouverte, la construction graphique ci-dessous permet de déterminer Δyr , Δm , t_1 et t_2 .



La méthode d'identification s'effectue sur le graphique :

- ▷ on relève les valeurs de Δy_r et Δm (valeur obtenue en régime établi) ;
- ▷ on trace $0,28 \times \Delta m$ et on relève le temps t_1 correspondant ;
- ▷ on trace $0,40 \times \Delta m$ et on relève le temps t_2 correspondant.

On détermine : le gain statique $K = \frac{\Delta m}{\Delta y_r}$; le retard $T_r = 2,8 t_1 - 1,8 t_2$; la constante de temps $\tau = 5,5 (t_2 - t_1)$.

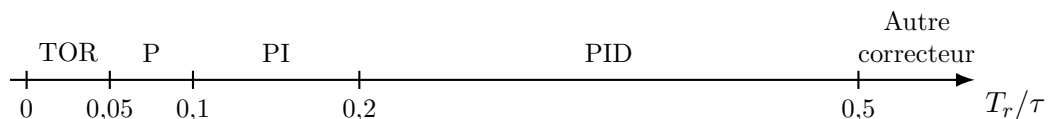


Fig. 20 – Type du correcteur.

	P	PI série	PI parallèle	PID série	PID parallèle	PID mixte
K_p	$\frac{0,8 \tau}{T_r K}$	$\frac{0,8 \tau}{T_r K}$	$\frac{0,8 \tau}{T_r K}$	$\frac{0,85 \tau}{T_r K}$	$\frac{\tau + 0,4 T_r}{1,2 T_r K}$	$\frac{\tau + 0,4 T_r}{1,2 T_r K}$
T_i	Max	τ	$\frac{T_r K}{0,8}$	τ	$\frac{T_r K}{0,75}$	$\tau + 0,4 T_r$
T_d	0	0	0	$0,4 T_r$	$\frac{0,35 \tau}{K}$	$\frac{T_r \tau}{T_r + 2,5 \tau}$

K_p : gain de l'action proportionnelle ; T_i : temps intégral correspondant au gain $K_i = \frac{1}{T_i}$; T_d : gain de l'action dérivée.

Fig. 21 – Paramètres du correcteur.

Document réponse – essai en boucle ouverte (relevé complet puis zoom sur la zone grisée) :

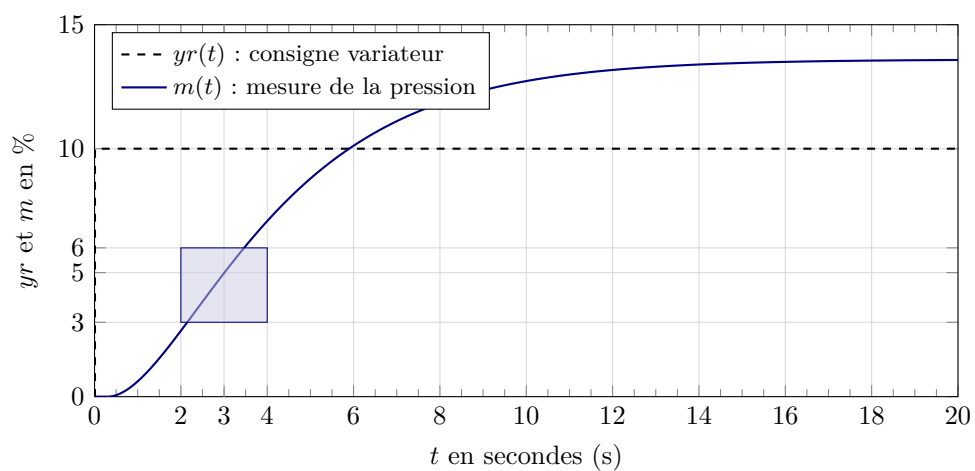


Fig. 22 – Essai en boucle ouverte : relevé complet.

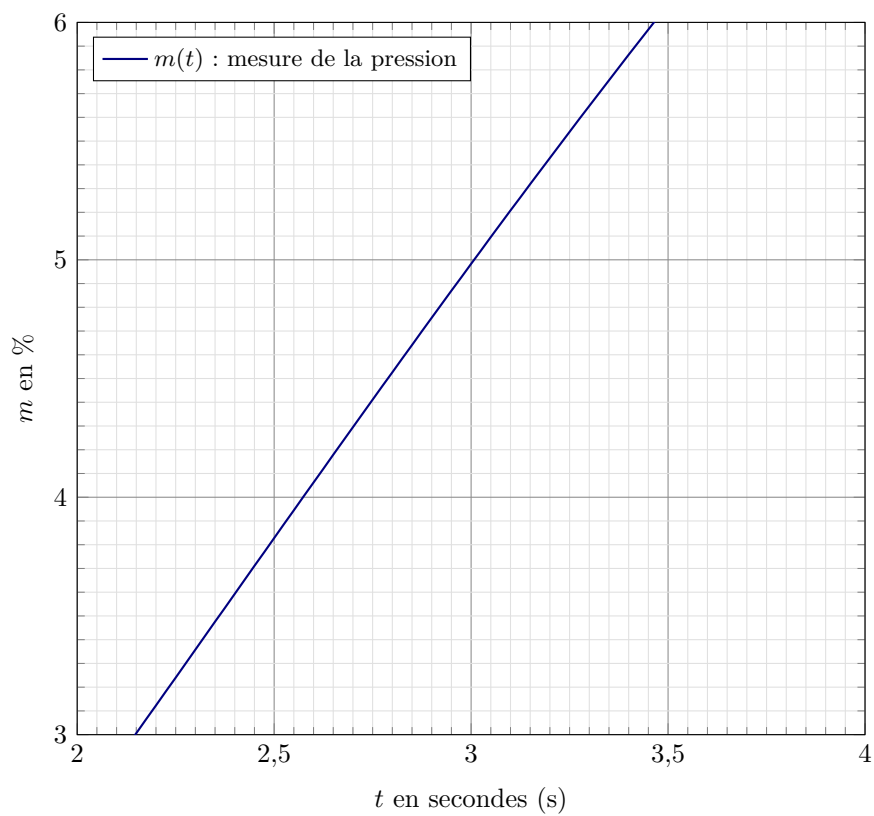


Fig. 23 – Essai en boucle ouverte : zoom sur la zone grisée.

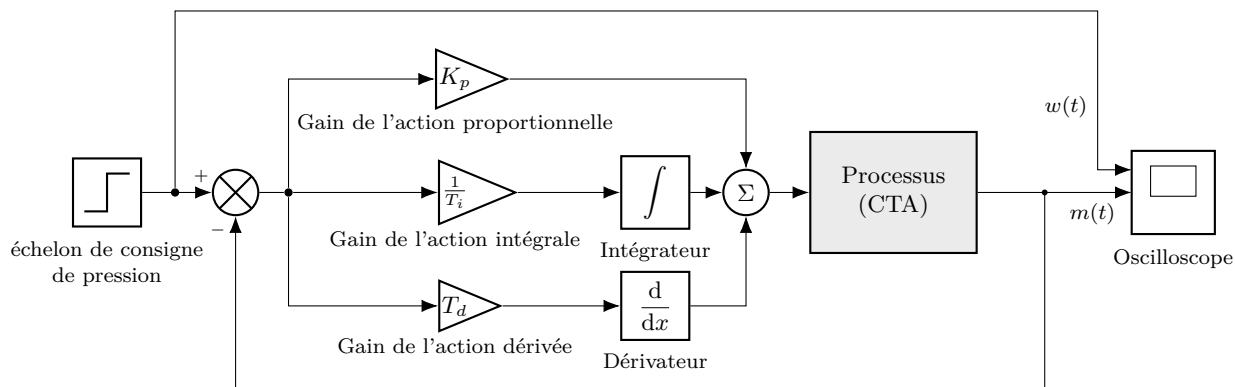


Fig. 24 – Schéma de simulation en boucle fermée.

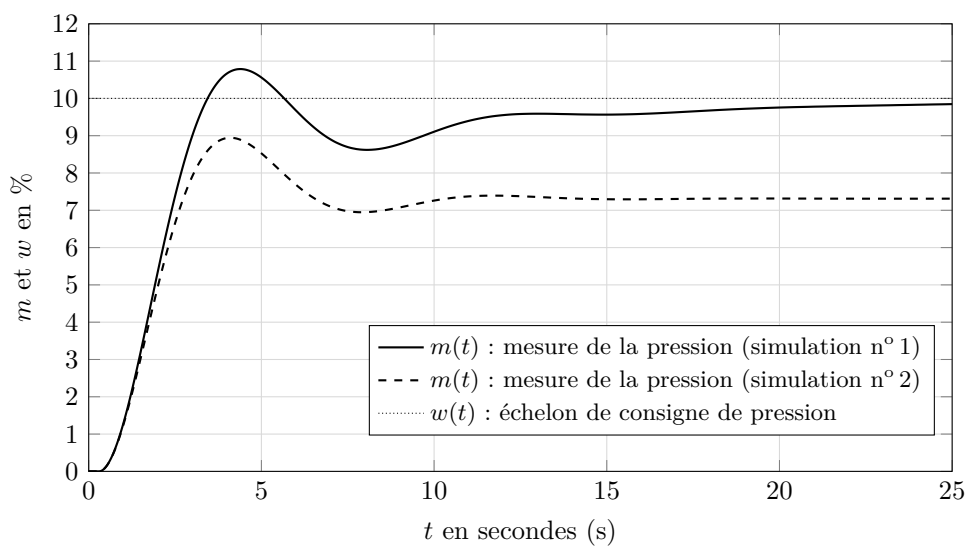


Fig. 25 – Simulations n° 1 et n° 2.

Documents réponses – schéma bloc, simulation n° 3 et tableau des résultats :

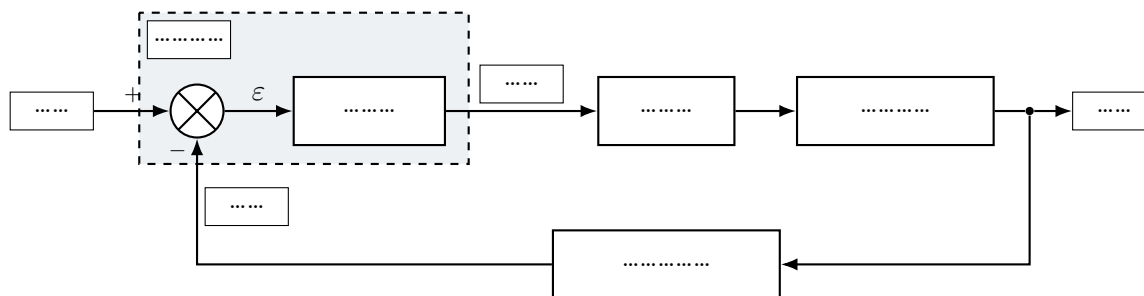


Fig. 26 – « Schéma bloc » de la régulation.

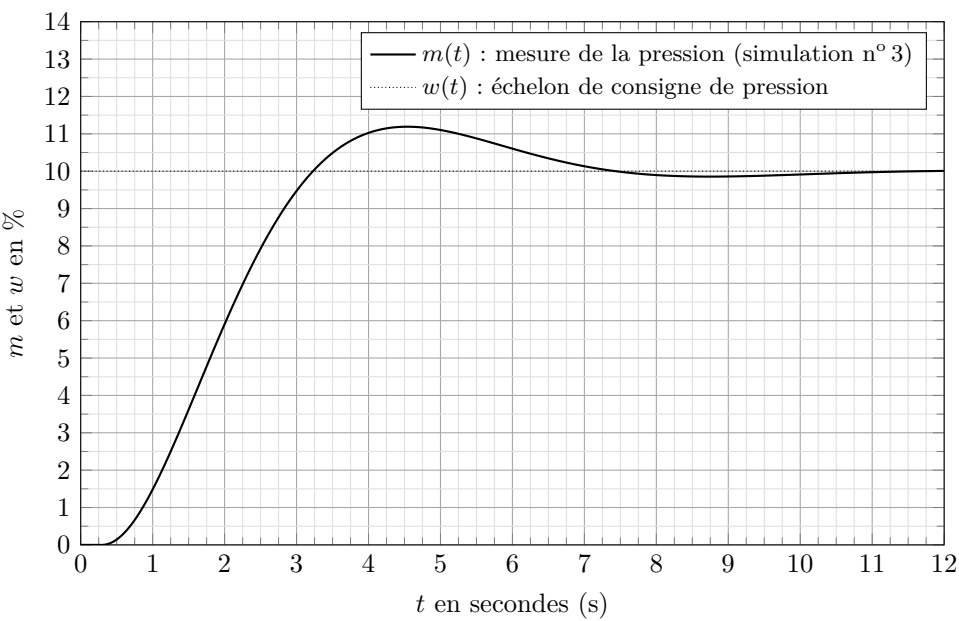


Fig. 27 – Simulation n° 3.

D_1 en %	Erreur statique ε_{S3}	$t_{r5\%}$ en secondes
.....		

Fig. 28 – Tableau des résultats.

- À l’aide du document de la méthode de Broïda, réalisez la construction graphique sur le document réponse ci-dessus et déterminez t_1 , t_2 , Δy_r et Δm .
- En déduire les valeurs du gain statique K , de la constante de temps τ et du retard T_r . En déduire l’expression numérique de $H(p)$.
- On admet que la fonction $H(p)$ a pour expression $H(p) = \frac{1,36}{1 + 3,96 p} e^{-1,17 p}$.
Par identification de $H(p)$, en déduire les valeurs de τ et T_r puis calculer le rapport $\frac{T_r}{\tau}$. Déterminez le type de correcteur qui convient.
- On choisit une structure parallèle. À partir du tableau donnant les paramètres du correcteur (figure 21), déterminez les valeurs de K_p , T_i , T_d du correcteur.
- À l’aide des figures 24 et 25, déterminez, pour le deuxième réglage, la valeur de l’erreur statique ε_{S2} exprimée en pourcentage de la valeur finale.
- D’après les simulations effectuées (simulation 1 : $K_p = 2$, $T_i = 4$ s, $T_d = 0$ s et simulation 2 : $K_p = 2$, $T_i = 0$ s, $T_d = 0$ s), expliquez le rôle de l’action intégrale du correcteur.
- On a effectué, sur la figure 27, une troisième simulation ($K_p = 2,31$, $T_i = 2,13$ s, $T_d = 1,02$ s). Effectuez, sur cette même figure, les constructions graphiques permettant de déterminer le premier dépassement D_1 en %, l’erreur statique ε_{S3} et le temps de réponse à 5 % noté $t_{r5\%}$ (temps au bout duquel la mesure de la pression $m(t)$ atteint le régime permanent à plus ou moins 5 % près et s’y maintient).

★ Exercice 17.1

- Un multimètre numérique, sur le calibre 20 V (1 UR = 0,01 V), affiche $U = 12,47$ V. La notice indique une précision de $\pm(0,5\% \text{ de la lecture} + 2 \text{ UR})$.
 - S'agit-il d'une évaluation de type A ou de type B ? Justifiez.
 - Calculez la précision Δ , puis l'incertitude-type $u(U)$.
 - Écrivez le résultat de la mesure avec une incertitude à un chiffre significatif, puis calculez l'incertitude relative.
- Un thermomètre à alcool est gradué tous les 0,5 °C. On lit $\theta = 21,5$ °C. Calculez l'incertitude-type de lecture et écrivez le résultat.
- On mesure la longueur d'une barre de cuivre avec une règle graduée en millimètres : l'extrémité gauche est placée devant la graduation 10 mm et l'extrémité droite est lue devant la graduation 135 mm. Calculez la longueur L et son incertitude-type (double lecture), puis écrivez le résultat.

★ Exercice 17.2

Pour vérifier le réglage d'un variateur de vitesse dont la consigne est 1 450 tr/min, dix étudiants mesurent la vitesse de rotation du moteur avec un tachymètre optique. Ils obtiennent (en tr/min) :

1452	1447	1455	1449	1451	1445	1453	1450	1448	1454
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

- Pourquoi les dix mesures sont-elles différentes ? S'agit-il d'une évaluation de type A ou de type B ?
- Décrivez la procédure permettant d'obtenir la moyenne et l'écart-type de cette série avec votre calculatrice en mode statistique.
- La calculatrice affiche notamment $\sigma_x = 3,0397$ et $s_x = 3,2042$. Laquelle de ces deux valeurs faut-il retenir ? Quelle est la différence entre les deux ?
- Calculez la moyenne $\bar{N}$ (vérifiez la valeur affichée), puis l'incertitude-type $u(\bar{N})$.
- Écrivez le résultat de la mesure (incertitude à deux chiffres significatifs).
- La vitesse de rotation est-elle compatible avec la consigne ? Justifiez par le calcul du z-score.
- Combien de mesures faudrait-il faire pour diviser l'incertitude-type par deux ?

★ Exercice 17.3

Pour vérifier la valeur d'une résistance de puissance marquée $22 \Omega (\pm 5\%)$, on réalise un montage voltampèremétrique et on relève :

- ▷ voltmètre : $U = 11,86 \text{ V}$, calibre 20 V (1 UR = 0,01 V), précision $\pm(0,5 \% + 2 \text{ UR})$;
 ▷ ampèremètre : $I = 0,532 \text{ A}$, calibre 2 A (1 UR = 0,001 A), précision $\pm(1,2 \% + 3 \text{ UR})$.

1. Calculez la valeur de la résistance R .
2. Calculez les incertitudes-types $u(U)$ et $u(I)$, puis les incertitudes relatives correspondantes.
3. Quelle formule de composition faut-il utiliser ? Calculez l'incertitude relative $\frac{u(R)}{R}$, puis $u(R)$.
4. Écrivez le résultat de la mesure de R .
5. Quelle mesure faut-il améliorer en priorité pour réduire l'incertitude sur R ? Justifiez.
6. La valeur mesurée est-elle compatible avec la valeur marquée de 22Ω ? Calculez le z-score.

★ Exercice 17.4

Avant un essai d'échauffement, on mesure à froid la résistance d'un enroulement statorique de moteur par deux méthodes.

Méthode 1 : six groupes mesurent la résistance avec un micro-ohmmètre ; ils obtiennent (en Ω) : 1,82 ; 1,85 ; 1,79 ; 1,84 ; 1,81 ; 1,86.

Méthode 2 : on fait passer un courant continu $I = 5,00 \text{ A}$ et on mesure la tension $U = 9,12 \text{ V}$ aux bornes de l'enroulement.

Voltmètre : calibre 20 V, 1 UR = 0,01 V, précision $\pm(0,5 \% + 2 \text{ UR})$. Ampèremètre : calibre 10 A, 1 UR = 0,01 A, précision $\pm(1,0 \% + 3 \text{ UR})$.

1. **Méthode 1.** Calculez la moyenne $\bar{R}_1$, l'écart-type expérimental s et l'incertitude-type $u(\bar{R}_1)$. Écrivez le résultat.
2. **Méthode 2.** Calculez R_2 , puis son incertitude-type $u(R_2)$. Écrivez le résultat.
3. Les deux méthodes donnent-elles des résultats compatibles ? Justifiez en calculant le z-score entre les deux mesures.
4. Quelle méthode est la plus précise ? Comparez les incertitudes relatives.
5. Après une heure de fonctionnement en charge, on reprend la méthode 2 avec les mêmes appareils : $I = 5,00 \text{ A}$ et $U = 10,74 \text{ V}$. Calculez la résistance à chaud R_c et son incertitude-type.
6. Calculez l'augmentation de résistance $\Delta R = R_c - R_2$ et son incertitude-type. Cette augmentation est-elle significative ? Justifiez par un z-score et interprétez physiquement.

★ Exercice 17.5

Un fabricant de tableaux de commande reçoit un lot de transformateurs monophasés de commande 230 V / 24 V. Le service qualité vérifie le rapport de transformation à vide $m = \frac{U_{20}}{U_1}$ d'un transformateur et le compare à la valeur annoncée par le constructeur.

Notice constructeur : sous $U_1 = 230 \text{ V}$, tension secondaire à vide $U_{20} = 24,5 \text{ V}$.

Multimètres utilisés (précision en valeur efficace, 50 Hz) :

Calibre	40 V	400 V
Unité de représentation (UR)	0,01 V	0,1 V
Précision	$\pm(0,8 \% + 3 \text{ UR})$	$\pm(0,8 \% + 3 \text{ UR})$

Partie A – Mesure unique (type B)

On mesure, sur le calibre 400 V, $U_1 = 231,4 \text{ V}$ et, sur le calibre 40 V, $U_{20} = 24,62 \text{ V}$.

1. Calculez la valeur annoncée $m_{\text{réf}}$ du rapport de transformation à vide (5 chiffres significatifs).
2. Calculez les incertitudes-types $u(U_1)$ et $u(U_{20})$.
3. Calculez le rapport de transformation m mesuré et son incertitude-type $u(m)$. Écrivez le résultat.
4. Le résultat est-il compatible avec la valeur annoncée par le constructeur ?

Partie B – Série de mesures (type A)

Huit techniciens refont la mesure indépendamment, avec des multimètres différents. Ils obtiennent pour m :

0,1063	0,1067	0,1061	0,1066	0,1064	0,1068	0,1062	0,1065
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

5. À l'aide de la calculatrice en mode statistique, déterminez la moyenne $\bar{m}$ et l'écart-type expérimental s de la série. Précisez la touche ou la ligne utilisée pour s .
6. Calculez l'incertitude-type $u(\bar{m})$ et écrivez le résultat.
7. Comparez l'incertitude obtenue à celle de la partie A. Le résultat est-il compatible avec la valeur du constructeur ?

Partie C – Vérification de la proportionnalité

Pour vérifier que le transformateur à vide se comporte de façon linéaire, on fait varier U_1 à l'aide d'un autotransformateur et on relève U_{20} :

U_1 (V)	40	80	120	160	200	240
U_{20} (V)	4,29	8,50	12,79	17,03	21,28	25,57

8. Avec la calculatrice, effectuez la régression linéaire $U_{20} = a U_1 + b$. Donnez a , b et le coefficient de détermination r^2 .
9. Le modèle $U_{20} = m U_1$ est-il validé ? Justifiez. Que représente le coefficient a ? Comparez-le au résultat de la partie B.
10. Rédigez en quelques lignes la conclusion du contrôle de réception.