

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

ÉLECTROTECHNIQUE

SESSION 2020

ÉPREUVE E.4.1

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

Durée : 4 heures – Coefficient : 3

Matériel autorisé

« L'usage de calculatrice avec mode examen actif est autorisé,
L'usage de calculatrice sans mémoire « type collègue » est autorisé. ».

Le sujet comporte **19** pages numérotées de **1/19 à 19/19**.
Les documents réponses (pages 17 et 18 et 19) sont à remettre avec la copie.

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

Les notations du texte seront scrupuleusement respectées.

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION 2020
Épreuve E.4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 20 - EQPEM	Page 1 sur 19

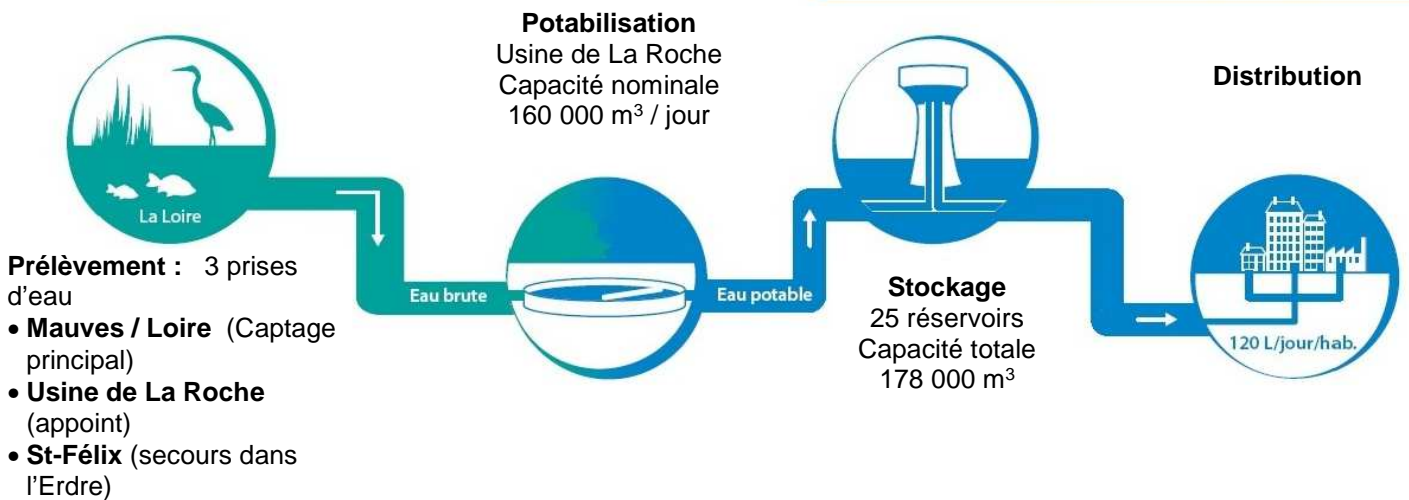
PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Nantes Métropole regroupe 24 communes dans le but de faciliter la coopération intercommunale. Autorité organisatrice des services publics de l'eau potable et de l'assainissement, opérateur direct de certaines infrastructures, la métropole intervient à toutes les étapes du grand cycle de l'eau.



Le système d'approvisionnement en eau potable de Nantes Métropole est constitué d'une ressource protégée et surveillée (la Loire et sa nappe alluviale) et d'une possibilité de secours par importation pour une partie de son territoire.

Schéma de la chaîne d'approvisionnement en eau potable



La première étape de la chaîne d’approvisionnement consiste à prélever de l’eau dans le milieu naturel (Loire ou Erdre) via des prises d’eau constituées d’ouvrages de génie-civil abritant des pompes de captage, dont la station de Mauves-sur-Loire.

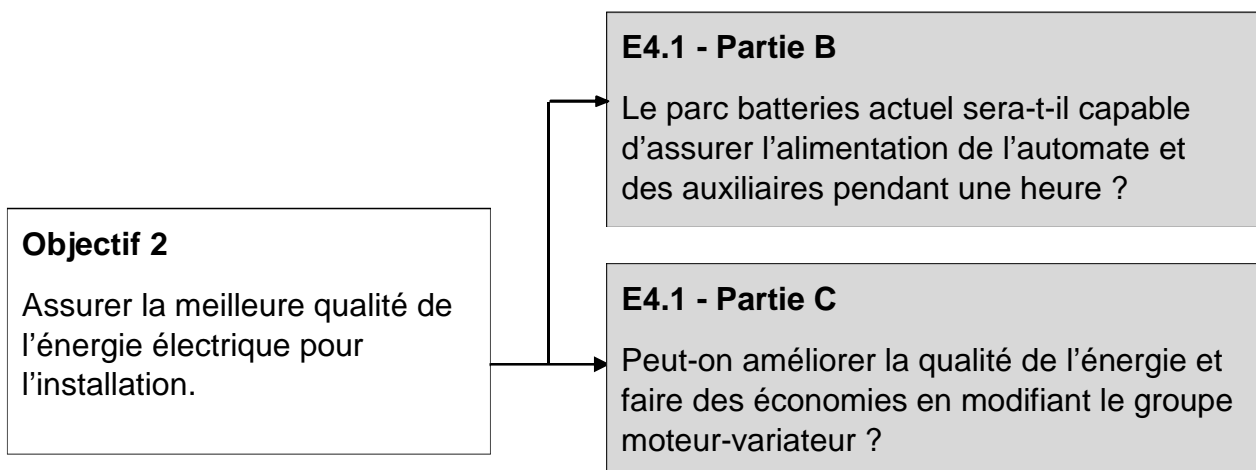
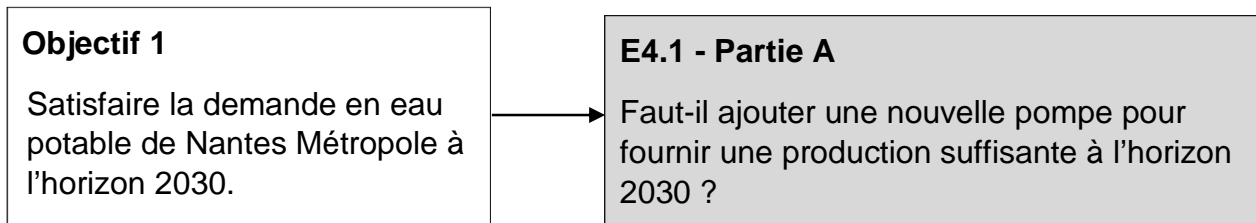
Ces pompes ont pour rôle d’amener l’eau dite brute vers l’usine de La Roche, où elle est traitée et rendue potable. Celle-ci permet en régime nominal la potabilisation de 160 000 m³ d’eau par jour avant stockage dans 25 réservoirs d’une capacité totale de 178 000 m³. La distribution vers les habitants est ensuite effectuée à travers un réseau fortement maillé de 3 199 km permettant à l’exploitant de multiples solutions alternatives pour garantir la continuité du service.

La station de captage de Mauves sur Loire date de 1989. Un renouvellement de certains équipements de l’installation est envisagé pour adapter la capacité de production à l’augmentation du nombre d’usagers de la métropole nantaise à l’horizon 2030. L’amélioration de la disponibilité des équipements ainsi que l’optimisation des consommations énergétiques sont des objectifs importants pour réaliser ce projet.



Enjeux et objectifs du sujet E4.1

L'enjeu pour l'autorité organisatrice des services publics de l'eau potable est d'augmenter la capacité d'approvisionnement en eau des 24 communes de Nantes Métropole pour assurer le fonctionnement à l'horizon 2030.



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 $2\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ à $12\,500\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 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^{ème} 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 $15\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$** .

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 m** et **+4,0 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 :

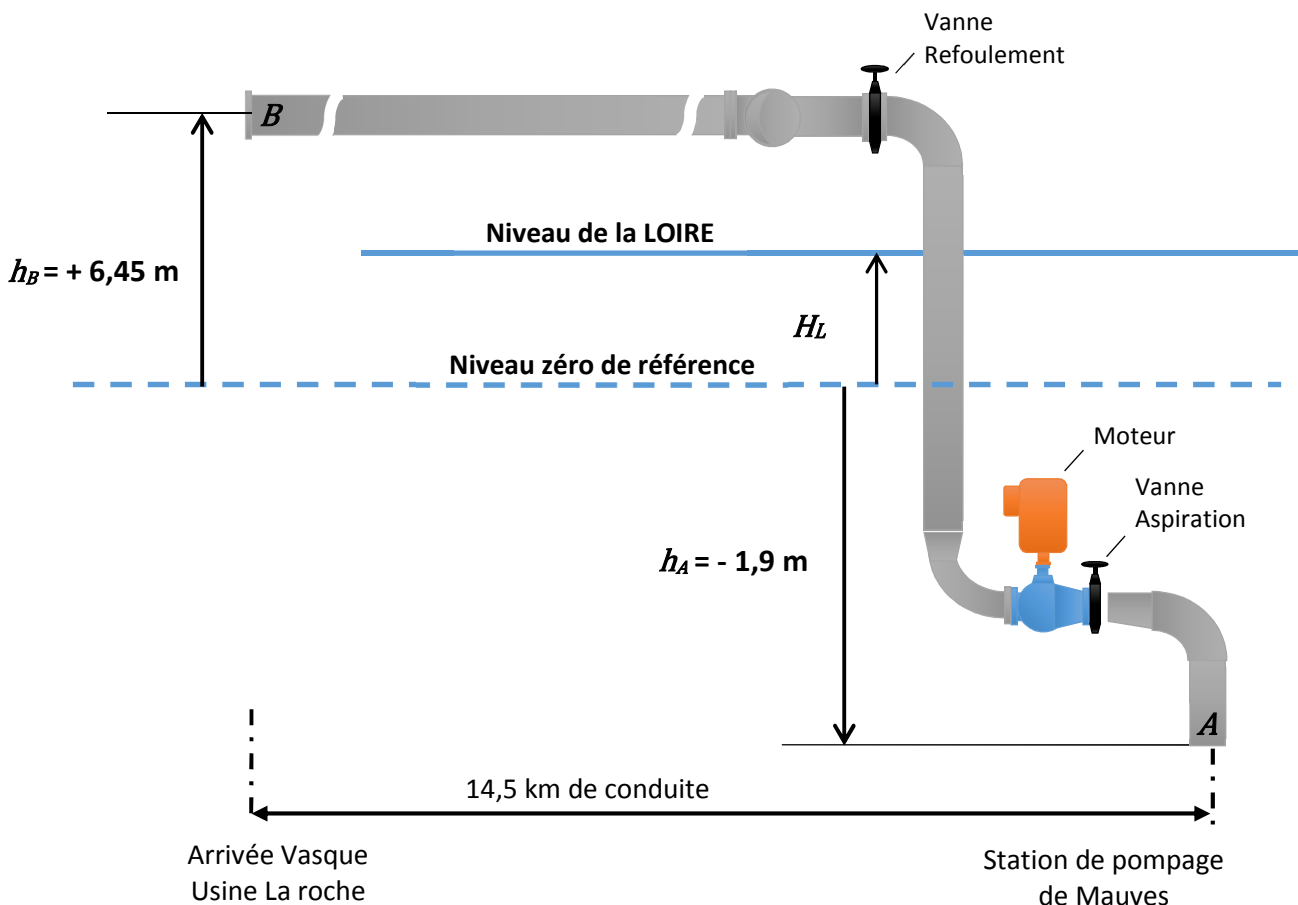


Figure 1 : profil de la conduite hydraulique

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 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

g : accélération de la pesanteur en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$;

h : altitude en mètres ;

v : vitesse d'écoulement en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

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 :

$$\Delta H = 2,4 \cdot Q_0^2$$

ΔH : pertes de charge en mètres ;

Q_0 : débit en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

- Q1.** La section de la canalisation aux extrémités A et B de la conduite étant la même, comparer les vitesses du fluide en ces points.
- Q2.** Pour un débit Q_0 de $4,0 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, calculer les vitesses v_A et v_B de l'eau pour les points A et B placés à chaque extrémité de la conduite.
- Q3.** En exploitant la relation de l'hydrostatique et à partir du profil de la conduite hydraulique (**figure 1**), exprimer la pression p_A au point A en fonction de H_L , ρ , g , h_A et de la pression atmosphérique p_{atm} .
- Q4.** Montrer que si la pression au point B est égale à la pression atmosphérique, le théorème de Bernoulli peut s'écrire : $H_{mt} = \Delta H + (h_B - H_L)$.
- Q5.** A partir du document 2, et dans le cas le plus défavorable correspondant à une hauteur de la Loire la plus basse, démontrer que la relation qui donne la hauteur manométrique totale H_{mt} en fonction du débit Q (**en $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$**), correspondant à Q_0 , s'exprime :

$$H_{mt} = 6,8 + 1,9 \cdot 10^{-7} \cdot Q^2$$

- Q6.** Calculer la hauteur manométrique totale H_{mt} que doit vaincre la pompe pour un débit de $15\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 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 réponse n°1** 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 fonctionnant en parallèle est égal à n fois le débit d'une pompe.

- Q7.** Pour la vitesse maximale de rotation, effectuer sur le **document réponse n°1 à rendre avec la copie**, le tracé qui permet de déterminer la hauteur manométrique maximale H_{mtmax} que peuvent vaincre les 2 pompes pour un débit total de **$15\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$** . Conclure.
- Q8.** Sur le **document réponse n°1**, effectuer le tracé qui permet de déterminer le débit maximal Q_{max} des 2 pompes pour une hauteur manométrique de **50 m**.
- Q9.** Vérifier que l'ajout d'une troisième pompe permettrait d'obtenir un débit de $15\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ dans la conduite.

Partie B : le parc batteries actuel est-il en capacité d'assurer l'alimentation des automates et des auxiliaires pendant 1 heure ?

Un dispositif d'alimentation de secours doit permettre d'alimenter les équipements auxiliaires de la station de captage en cas de coupure de l'alimentation réseau **pendant 1 heure**. Il est constitué d'un onduleur alimenté par un parc de batteries.

La puissance P consommée par les auxiliaires des deux unités de pompage en activité est de **3,1 kW** avec une tension monophasée de 230 V de fréquence 50 Hz et avec un facteur de puissance proche de 1.

Le parc de batteries est constitué de 32 modules branchés en parallèle. Chaque module est constitué de 4 batteries « **12 V - 5 Ah** » branchées en série.

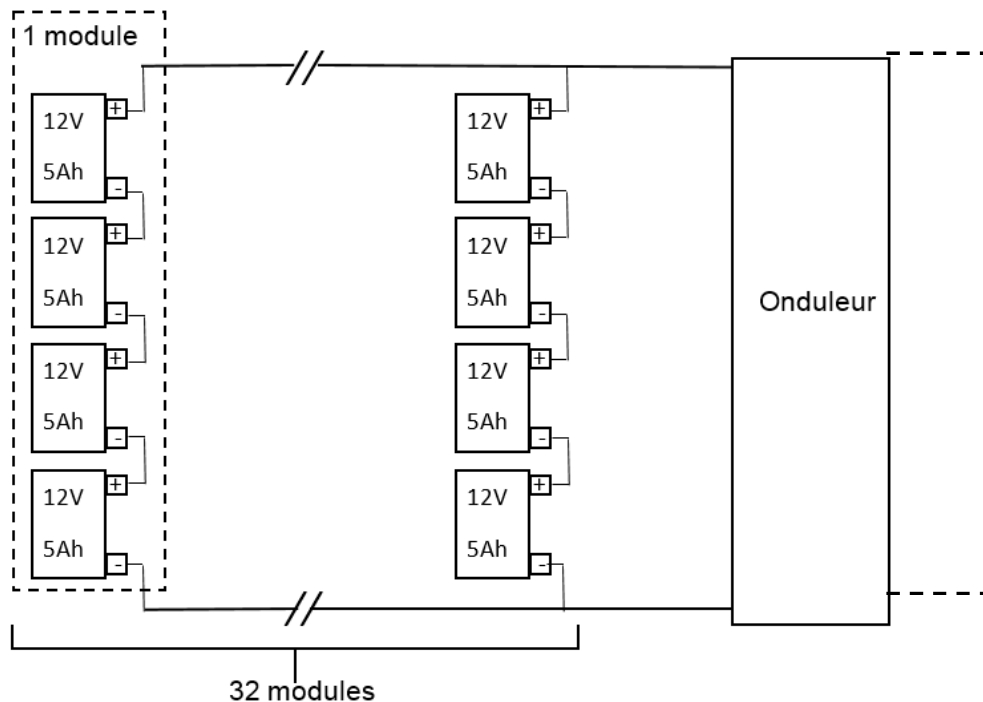


Figure 2 : parc de batteries et onduleur

- Q10.** Sachant que le rendement en puissance η de l'onduleur est de 95%, montrer en détaillant les étapes du calcul que le courant fourni par chaque module en cas de coupure réseau vaut $I = 2,1$ A.

Le modèle équivalent pour une batterie est donné dans l'**annexe 1**.

- Q11.** À partir du modèle équivalent d'une batterie, donner l'expression de la tension U_b aux bornes d'une batterie en fonction de la force électromotrice E (tension à vide), de la résistance interne R_b et du courant I_b .
- Q12.** La caractéristique $U_b = f(I_b)$ donnée à l'**annexe 1** a été réalisée lors d'un essai avec une batterie. Relever la force électromotrice E de la batterie lors de cet essai.

Q13. En déduire à partir du tableau d'état de charge donné **annexe 1**, le niveau de charge correspondant de cette batterie.

La résistance interne R_b d'une batterie évolue en fonction du niveau de décharge.

Q14. En vous servant de la courbe d'évolution de la résistance interne donnée dans **l'annexe 1**, vérifier que lorsque le niveau de charge est de **20%**, la tension à ses bornes U_b est de **10,3 V** pour un courant de décharge de **2,1 A**.

Un fusible de 40 A assure la protection d'un module constitué de 4 batteries en série.

Q15. Vérifier que le fusible assure la protection du module en cas de court-circuit d'un module chargé à 20%.

La capacité disponible Q d'un module est variable en fonction du temps de décharge (donc du courant) et correspond à un pourcentage de la capacité nominale. Par exemple, pour une décharge en 5 h (courbe C5 de la figure 3), la capacité disponible n'est que de 80% de la capacité nominale.

Afin de ne pas détériorer les batteries, il y a arrêt de l'onduleur lorsque le niveau de charge des modules devient critique comme le montre la courbe figure 3.

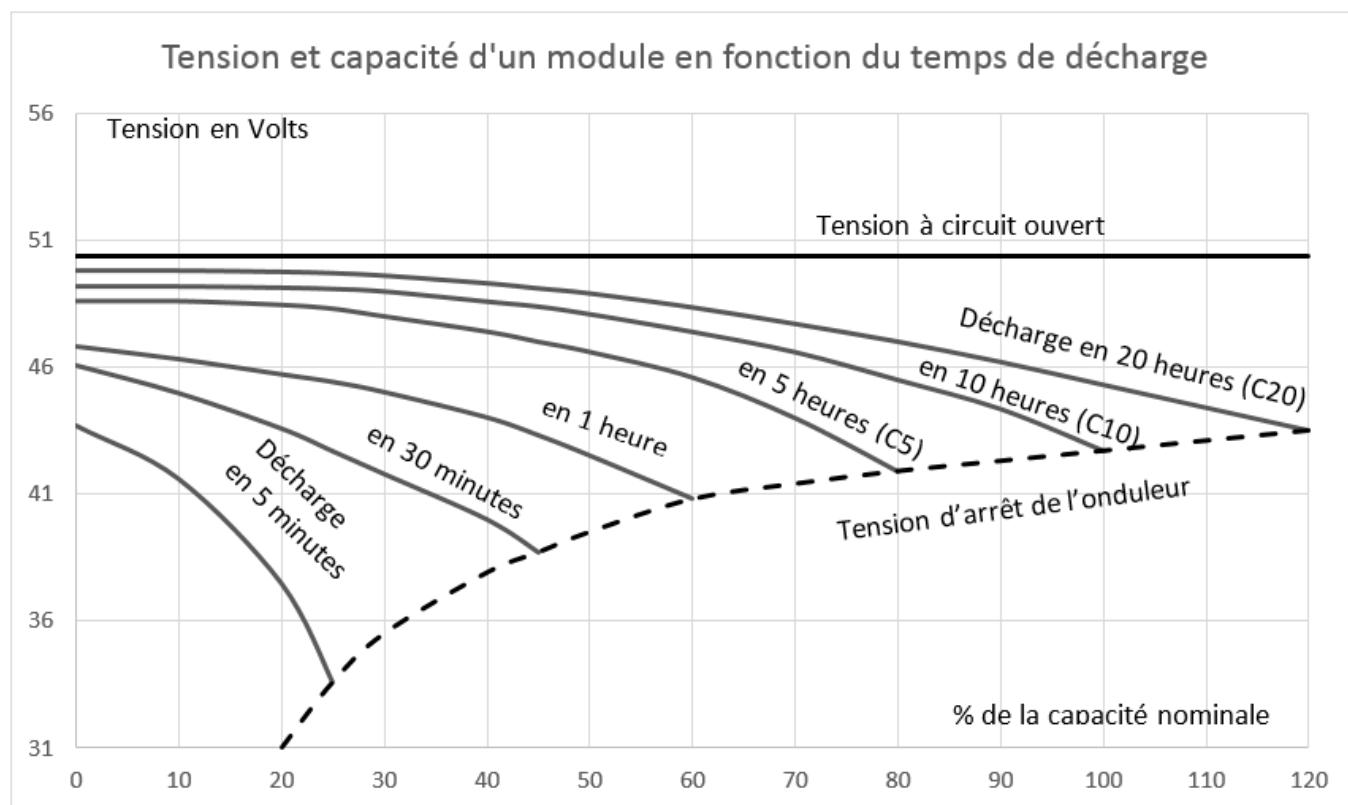


Figure 3 : tension et capacité d'un module en fonction du temps de décharge

Document 3 : relation donnant la capacité Q d'une batterie en A·h

$$Q = I \cdot t$$

- I : courant de décharge en ampères ;
- t : temps de décharge en heures.

Les batteries étant branchées en série, **chaque module a la même capacité que celle d'une batterie.**

- Q16.** À partir de la **figure 3**, déterminer le temps de décharge t_d permettant d'exploiter une capacité égale à 100% de la capacité nominale.
- Q17.** Un module ayant une capacité nominale de **5 A·h**, en déduire la valeur du courant de décharge I_d correspondant.
- Q18.** Toujours à partir de la **figure 3**, maintenant pour un fonctionnement en **1 heure**, déterminer en détaillant les étapes de vos calculs la valeur maximale I_{max} du courant de décharge d'un module.

On rappelle que pour alimenter les auxiliaires de deux unités de pompage, le courant que chaque module doit fournir en cas de coupure réseau est $I = 2,1$ A.

- Q19.** Conclure sur la durée pendant laquelle le parc de batteries pourra alimenter les auxiliaires de **trois** unités de pompage.

Partie C : peut-on améliorer la qualité de l'énergie et faire des économies en modifiant le groupe moteur-variateur ?

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.

Document 4 : calcul du taux de distorsion harmonique *THD*

$$THD = 100 \times \frac{\sqrt{S_{eff}^2 - S_1^2}}{S_1}$$
 où S_{eff} est la valeur efficace du signal $s(t)$ et S_1 la valeur efficace de son fondamental.

Étude du filtrage

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 (coté réseau) et en aval (coté variateur qui contient un autre filtre non étudié ici).

- Q20.** Calculer le taux de distorsion harmonique du courant de phase coté variateur $THDi_{var}$.
- Q21.** En utilisant les données de l'**annexe 2**, calculer la puissance active $P_{réseau}$ fournie par le réseau et en déduire la puissance active $P_{filtres}$ consommée par les filtres.
- Q22.** Parmi les problèmes listés ci-dessous, en citer deux liés à un *THD* trop important :
- Modification de la fréquence du réseau ;
 - Surdimensionnement de certains équipements ;
 - Vieillesse accélérée des éléments du réseau ;
 - Perturbation des appareils électroniques.

Le filtre anti-harmonique est composé de trois branches identiques couplées en **étoile** sur le réseau de tension efficace composée $U = 690$ V. Le modèle monophasé d'une branche est donné sur l'**annexe 3**.

- Q23.** En comparant les 2 spectres en courant de l'**annexe 2**, donner la fréquence de l'harmonique éliminé par le filtre.
- Q24.** À partir des caractéristiques du filtre données à l'**annexe 3**, calculer sa pulsation de résonance ω_0 et vérifier qu'il est bien accordé pour éliminer cet harmonique.

On étudie maintenant le comportement du filtre pour la composante fondamentale de fréquence $f = 50$ Hz.

- Q25.** En calculant pour cette fréquence l'impédance Z du filtre monophasé, montrer en détaillant les étapes du calcul que la valeur efficace de la composante fondamentale du courant qui traverse chaque branche du filtre vaut $I_f = 28$ A.
- Q26.** Citer le ou les élément(s) du filtre qui consomme(nt) de la puissance réactive.
- Q27.** Sur le **document réponse n°2**, faire le bilan de puissance de l'ensemble du filtre triphasé pour le fondamental.
- Q28.** Interpréter l'action des condensateurs du filtre sur le facteur de puissance de l'installation.

Étude de la motorisation

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

800 kW ; 990 tr·min⁻¹ ; 50 Hz ; 690 V ; 810 A ; cos φ = 0,87, couplage Y

- Q29.** Calculer la valeur du couple utile nominal du moteur T_{uN} .
- Q30.** Déterminer le nombre de paires de pôles p du moteur et le glissement g_N au régime nominal.
- Q31.** En assimilant la partie utile de la caractéristique mécanique $T_u(n)$ du moteur asynchrone à une droite, tracer cette caractéristique sur le graphique du **document réponse n°3** (le glissement est considéré comme nul pour un fonctionnement à vide du moteur).
- Q32.** Déterminer les caractéristiques du point de fonctionnement lorsque le moteur est couplé à la charge.

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION 2020
Épreuve E.4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 20 - EQPEM	Page 12 sur 19

La moyenne journalière du débit doit être portée à $7\,500\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Lorsque les pompes seront en fonctionnement, leur vitesse de rotation sera de $800\text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ 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.

- Q33.** Expliquer comment évolue la caractéristique mécanique du moteur lorsque la fréquence f change en maintenant le rapport U/f constant et tracer sur le graphique du **document réponse n°3** la nouvelle caractéristique mécanique du moteur permettant d'entraîner la pompe à $800\text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$.
- Q34.** Calculer la nouvelle valeur de la fréquence f' de la tension qui alimente le moteur et en déduire sa valeur efficace U' .
- Q35.** Sur le **document réponse n°3**, compléter le bilan de puissance du moteur asynchrone en précisant le nom des différentes pertes.

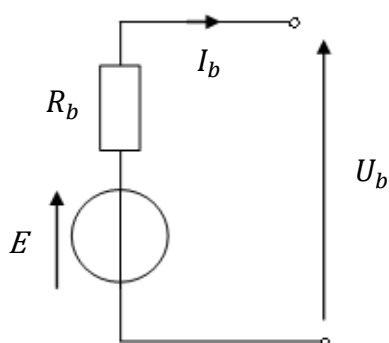
Pour une vitesse de rotation du moteur de $800\text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$, le glissement est de $0,5\%$ et la puissance utile de 260 kW . On néglige les pertes mécaniques.

- Q36.** Démontrer que dans ces conditions les pertes joules au rotor P_{jr} sont de $1,3\text{ kW}$.

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 joules 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.

- Q37.** En remplaçant un moteur asynchrone par un moteur synchrone, calculer (en $\text{kW}\cdot\text{h}$) l'énergie annuelle E_m qu'il est possible d'économiser.

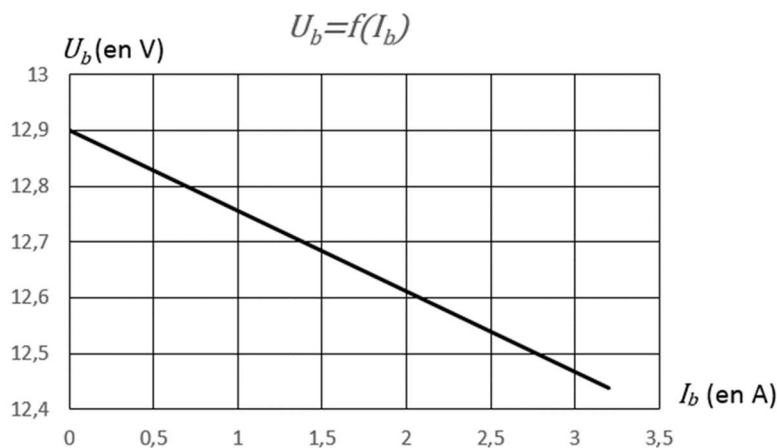
Annexe 1 : modèle équivalent pour une batterie



E : Force électromotrice de la batterie.

R_b : Résistance interne.

Un essai d'une batterie débitant dans une charge a permis d'obtenir la caractéristique suivante :

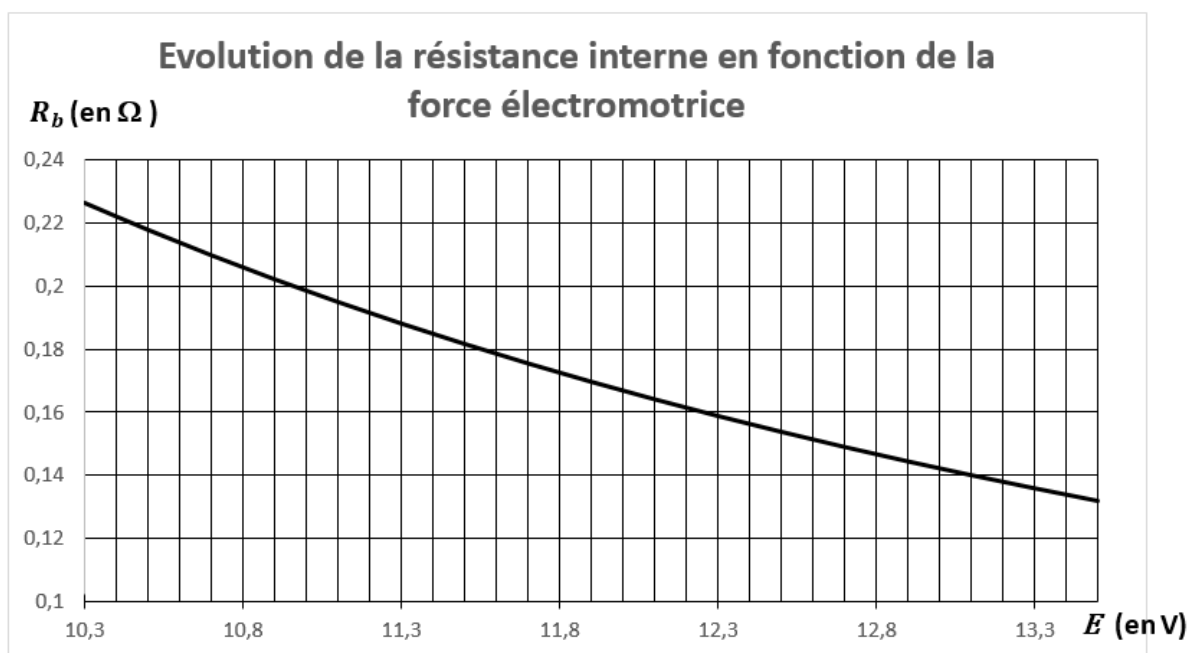


- **Tableau d'état de charge** : la force électromotrice E de la batterie dépend de son état de charge :

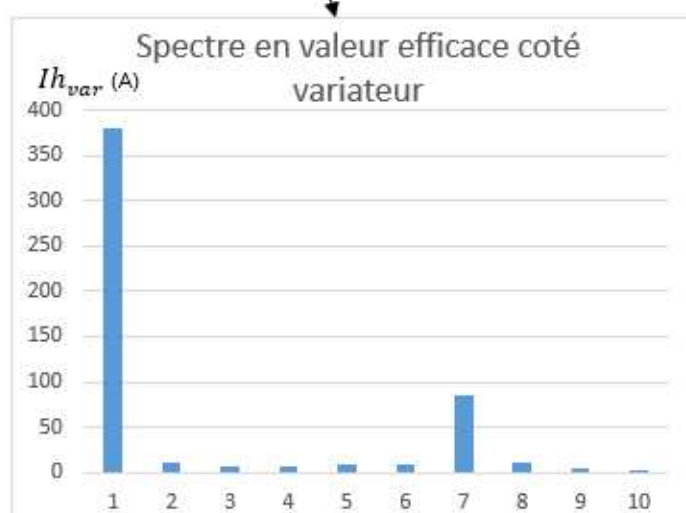
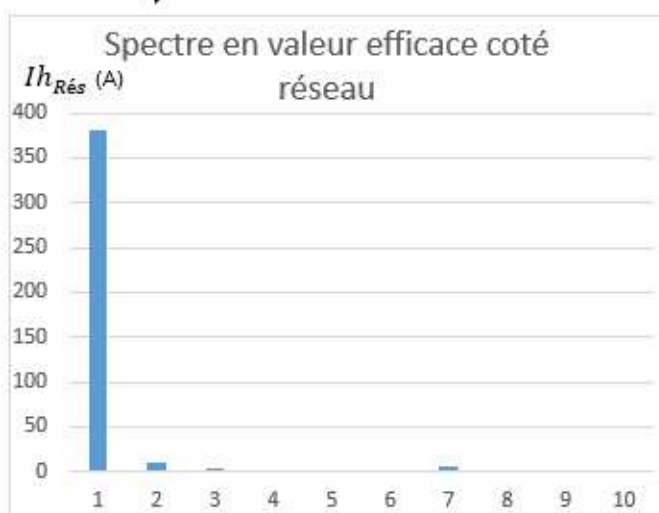
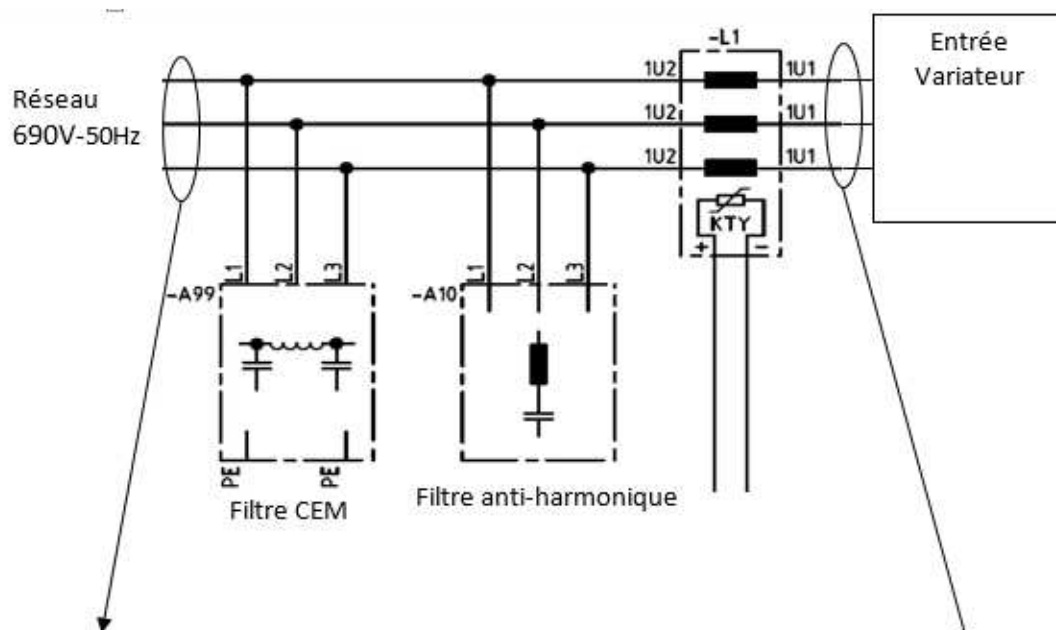
E (en V)	12,9	12,7	12,5	12,2	11,8	11,3	10,7	9,8
% de la charge	100	80	70	60	50	40	20	0

Etat de la charge d'un accumulateur « 12 V » suivant sa force électromotrice à 20°C

- Au cours de la décharge, la résistance interne de la batterie R_b augmente :



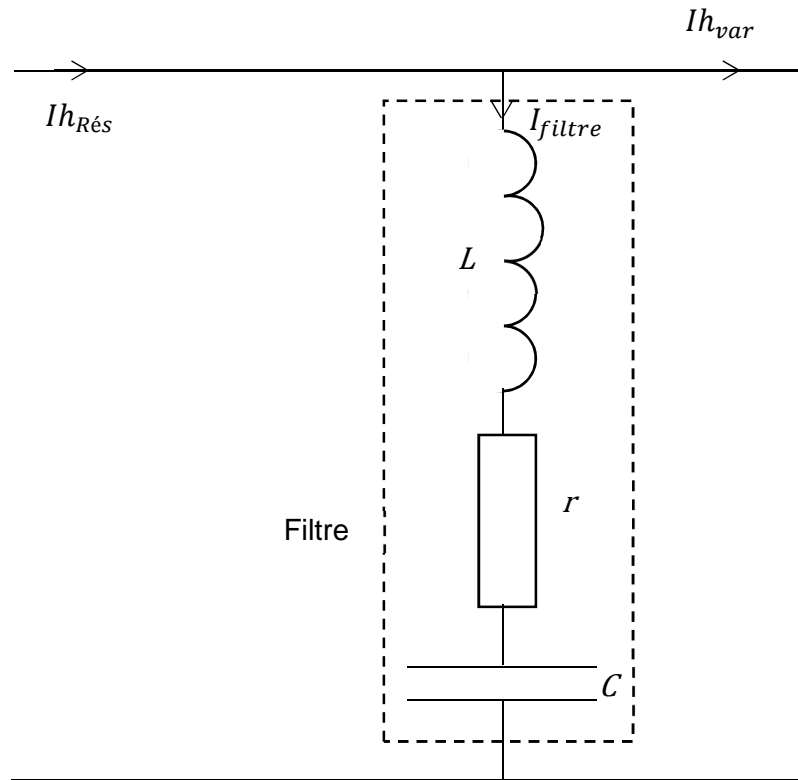
Annexe 2 : mesures réalisées sur le variateur



Rang h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{h_{Rés}}$ (A)	380	10,6	3	0	0	0	6,8	0	0	0
$I_{h_{var}}$ (A)	380	10,8	6	6,6	8,2	9	85	10,5	5,7	3

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

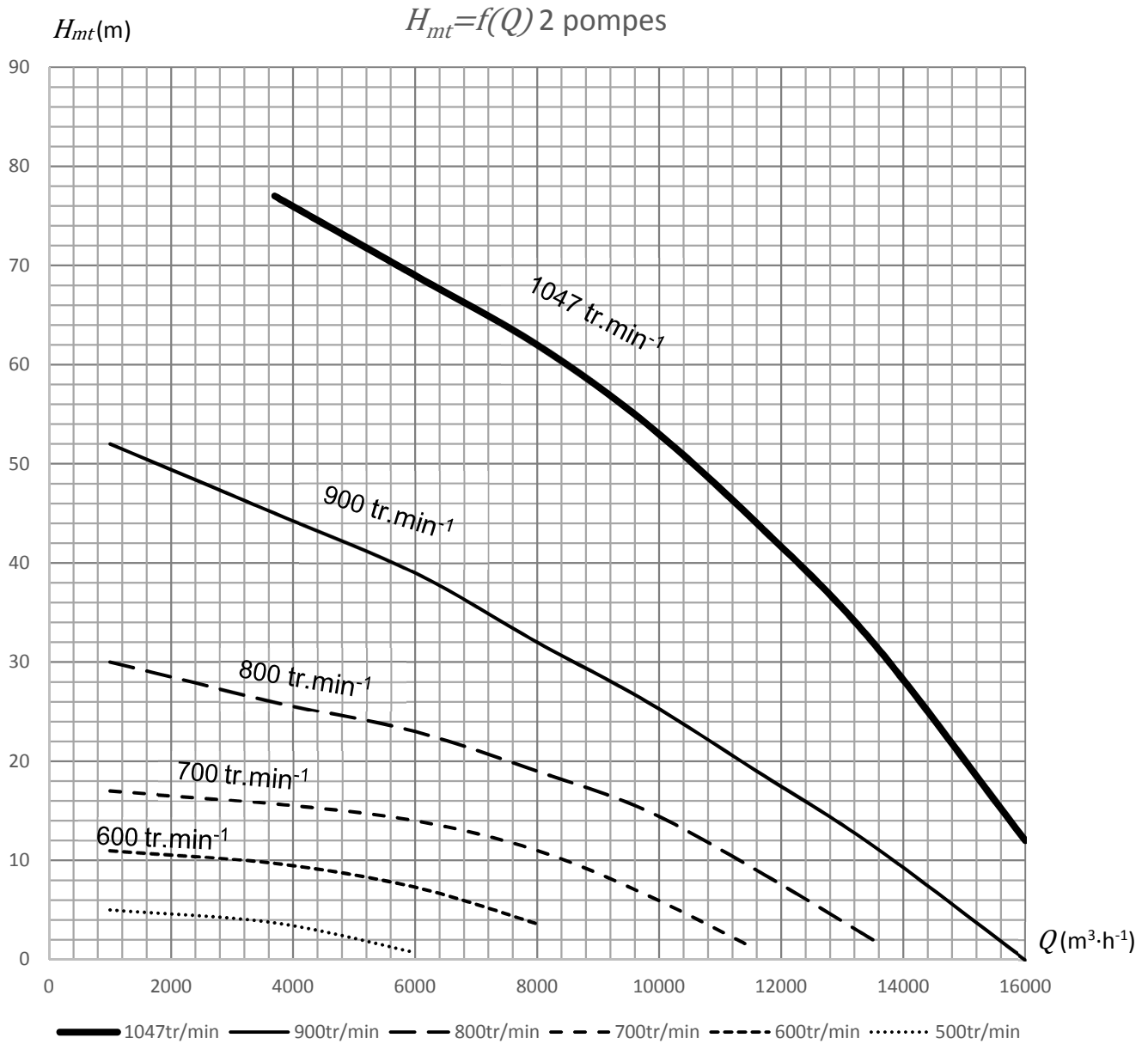
Expression de l'impédance du filtre : $Z = \sqrt{r^2 + \left(L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega}\right)^2}$

Pulsation de résonance : $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$

Rappel : $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

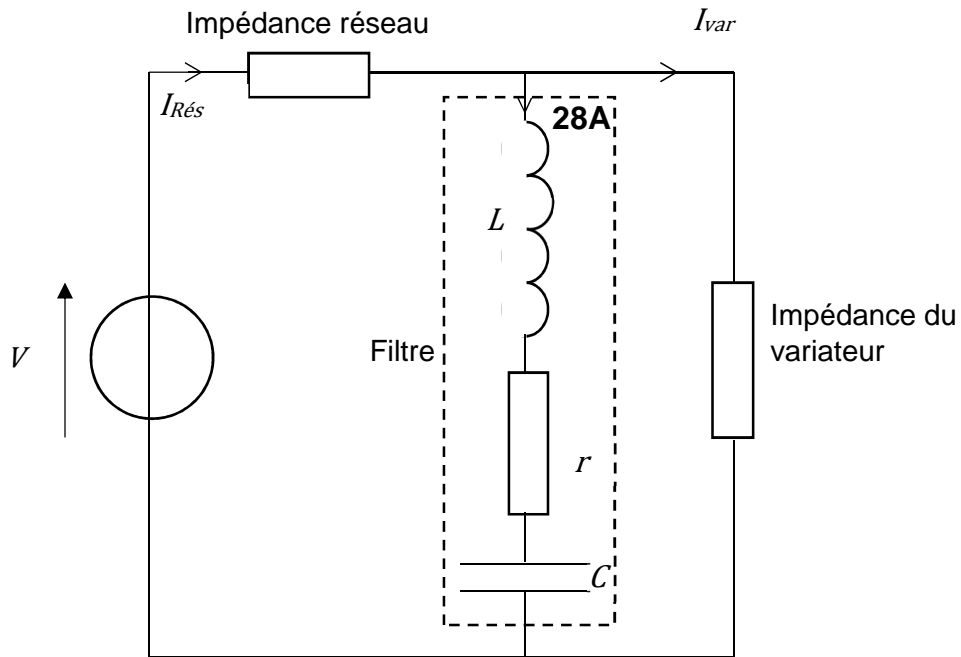
Document réponse n°1

Caractéristiques donnant la hauteur manométrique en fonction du débit pour 2 pompes et pour différentes vitesses de rotation



Document réponse n°2

Modélisation monophasée du filtre anti-harmonique entre une phase et le neutre pour le fondamental :

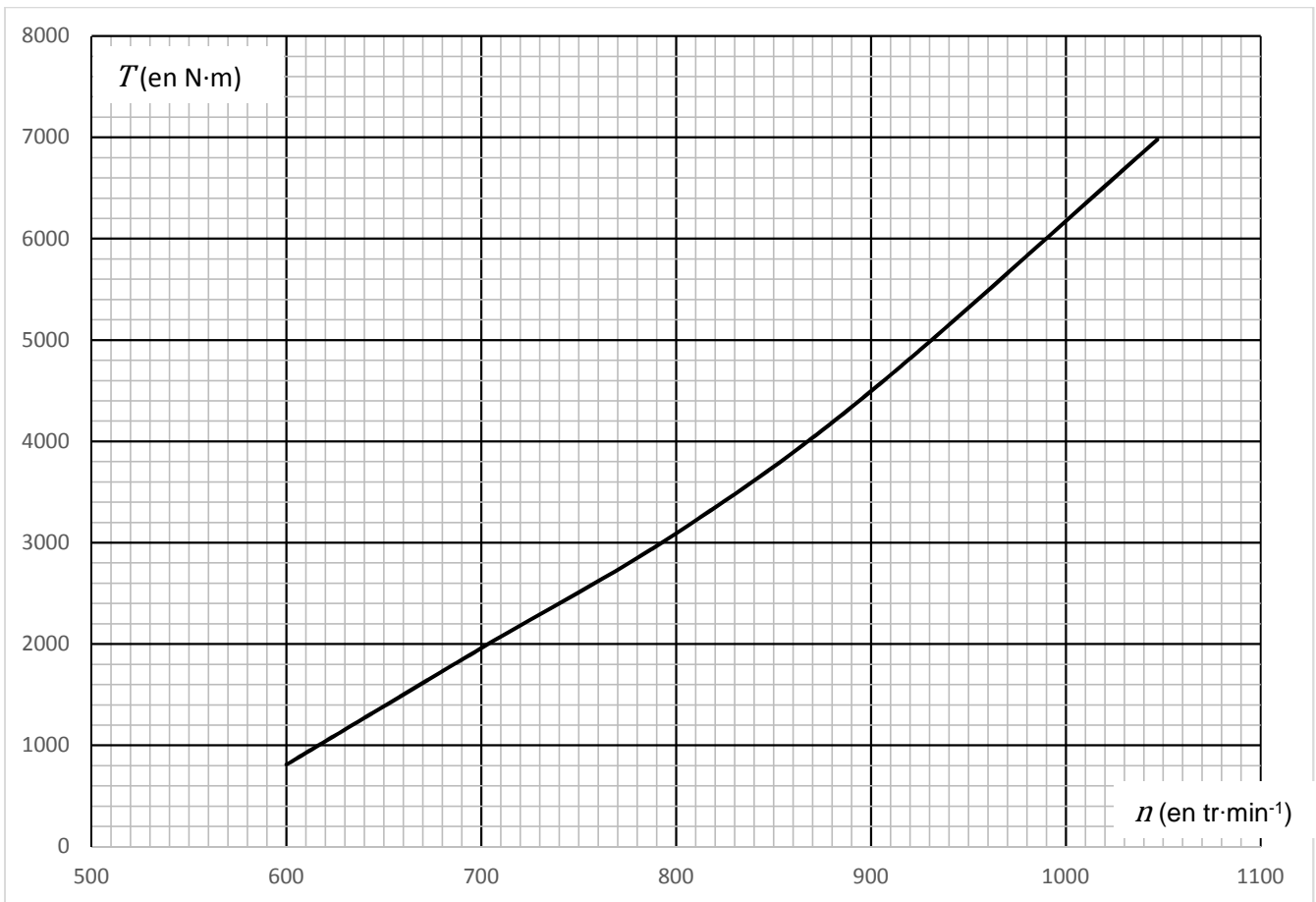


Bilan de puissance de l'ensemble du filtre triphasé pour le fondamental :

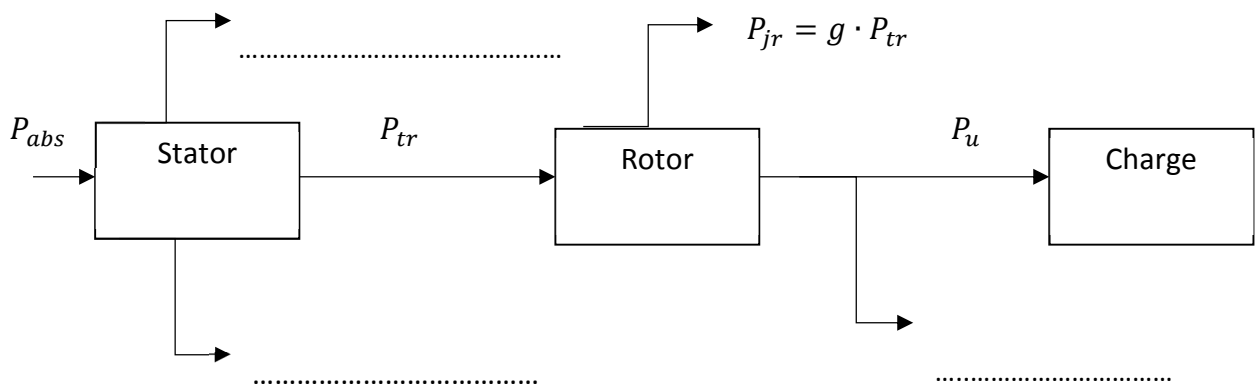
	Puissance active consommée (W)	Puissance réactive consommée (Var)
Inductances		
Résistances		
Condensateurs		
Total du filtre		

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 joules au rotor.