BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

ÉLECTROTECHNIQUE

SESSION 2017

ÉPREUVE E.4.1

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

Durée : 4 heures – Coefficient : 3

Matériel autorisé :

Calculatrice à fonctionnement autonome autorisée conformément à la circulaire N°99-186 du 16/11/99.
L'usage de tout autre matériel ou document est interdit.

Le sujet comporte **18** pages numérotées de **1/18 à 18/18**

Les documents réponses (pages 16, 17 et 18) sont à remettre avec la copie.

Il sera tenu compte de la qualité de la rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul.
Le (la) correcteur (trice) attend des phrases construites respectant la syntaxe de la langue française. Chaque réponse sera clairement précédée du numéro de la question à laquelle elle se rapporte.

Les notations du texte seront scrupuleusement respectées.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Environnement du projet

La Société du Canal de Provence (SCP) est une société anonyme d'économie mixte avec une mission de service public, elle est concessionnaire pour l'aménagement et l'exploitation d'ouvrages hydrauliques dans une partie de la région Provence Alpes Côte d'Azur (PACA).

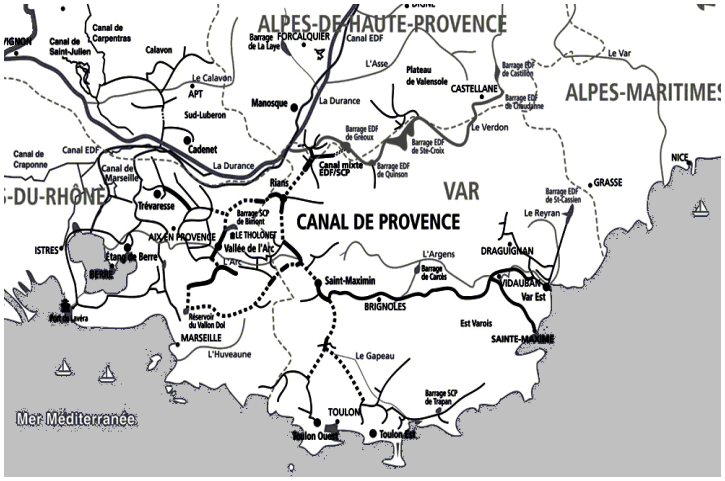

Figure 1 : Zone d'intervention

En quelques chiffres, la SCP alimente 40 % de la population de la région, ce qui représente plus de 2 millions d'habitants et 200 millions de m^3 d'eau transportés soit brute soit traitée. La SCP produit aussi de l'électricité, 13 millions de kWh par an, ce qui couvre 35 % de la consommation de la société. En plus de la mission de « service de l'eau », la SCP assure aussi la maîtrise d'ouvrage d'aménagements, l'ingénierie, le conseil.

Support de l'étude

Pour la livraison d'eau potable, le réseau se décompose en secteurs avec des réservoirs de distribution répartis sur le territoire et alimentés au travers de postes de livraison. L'alimentation des usagers sera ensuite gravitaire, c'est-à-dire que c'est la différence d'altitudes qui permettra cette opération. Les postes de livraison assurent le maintien des niveaux dans les réservoirs de distribution à partir des stockages en sortie des usines de « potabilisation ». Ces postes devront contrôler les pressions dans les liaisons les reliant aux réservoirs de distribution et cela quel que soit le débit. Pour cela, soit il faudra pomper si l'altitude du stockage est plus basse que celle de la distribution, soit il faudra limiter la pression dans le cas contraire.

L'étude porte sur l'alimentation du réservoir de distribution de Six-Fours-le-Fort (83) à partir du stockage de l'usine d'Hugueneuve.

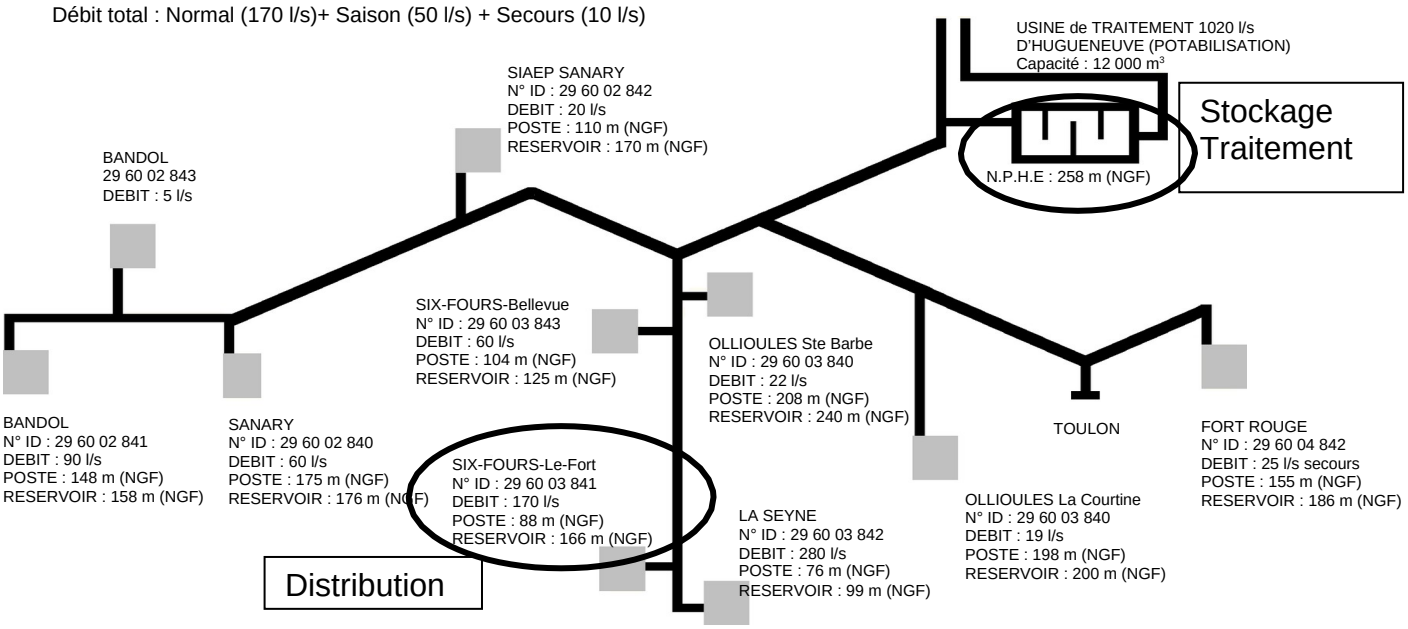

Figure 2 : situation sur le réseau



Figure 3 : réservoir de Six-Fours-le-Fort et poste de livraison

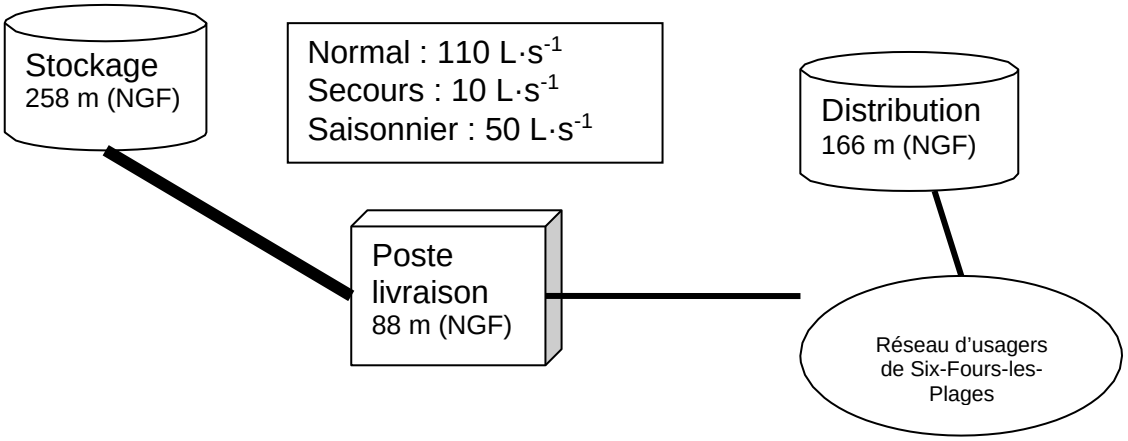

Figure 4 : répartition altimétrique

Vue la configuration du terrain (altimétrie), il y a un potentiel d'énergie hydraulique exploitable dans le poste de livraison.

La commune, propriétaire de cette installation, et la SCP ayant pour ambition de développer les énergies renouvelables, il est envisagé de transformer cette énergie hydraulique en énergie électrique. Cette conversion peut être effectuée de deux manières, soit avec une turbine de type Pelton à contre pression soit avec une pompe inversée. Cette dernière solution consiste à utiliser une pompe standard et à la faire fonctionner en turbine (on utilise l'acronyme anglais PaT : Pump as Turbine).

La SCP s'engage, dans le cadre du patrimoine concédé, à réaliser des investissements, à créer une « vitrine » accessible sur la commune de Six-Fours, à mener une campagne de sensibilisation et de communication.

Enjeux

L'épreuve E4.1 permettra de déterminer la puissance mise en jeu dans le poste de livraison puis de déterminer le fonctionnement de la machine asynchrone en génératrice et enfin de dimensionner l'installation secourue.

Le sujet E4.1 est composé de trois parties indépendantes notées A, B, C.

- Partie A : Étude hydraulique du fonctionnement du réseau d'alimentation et dimensionnement de la pompe inversée (PaT) ;
- Partie B : Étude de la génératrice asynchrone ;
- Partie C : Validation du mode secouru.

Partie A. ÉTUDE HYDRAULIQUE

L'objectif de cette partie est d'étudier le dimensionnement d'une pompe inversée (PaT) proposée comme une des solutions à la Société du Canal de Provence.

Le poste de livraison d'eau de Six-Fours-le-Fort est alimenté en gravitaire depuis la station de traitement d'eau potable d'Hugueneuve. Ce poste de livraison alimente le réservoir de Six-Fours-le-Fort situé à côté du poste de livraison.
Ce dernier alimente la commune de Six-Fours-Les-Plages en eau potable.

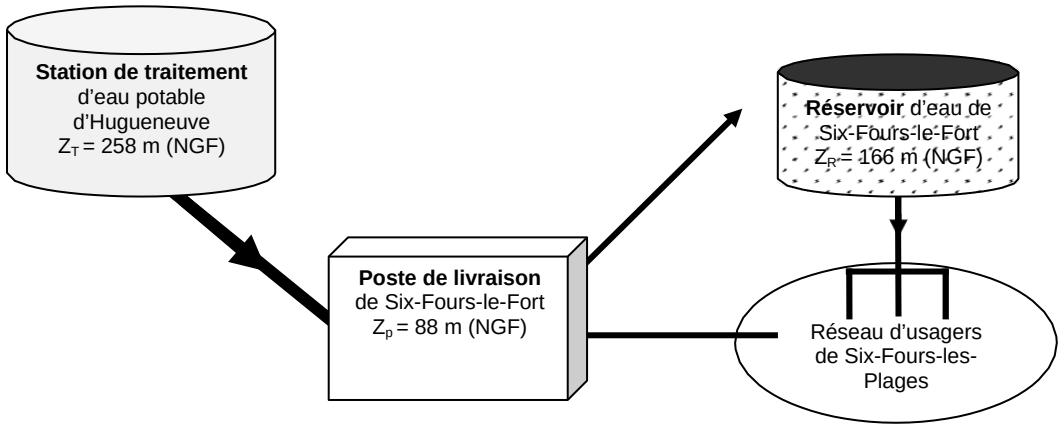

Figure 5 : synoptique du réseau hydraulique global du poste de livraison d'eau potable

Pour les altitudes, on prend comme référence le NGF (Niveau Général Français) exprimé en mètres comme mentionné sur la figure 5.
La pression atmosphérique notée P_{atm} sera prise comme référence des pressions. Toutes les pressions utilisées seront donc des **pressions relatives** mesurées par rapport à cette référence.
La conduite est sous pression atmosphérique au départ de la station de traitement d'eau.

On rappelle les données suivantes :

- $\rho = 10^3\ \mathrm{kg.\ m^{-3}}$: masse volumique de l'eau ;
- $g = 9{,}81\ \mathrm{m.\ s^{-2}}$: accélération de la pesanteur ;
- $P_{atm} = 10^5\ \mathrm{Pa} = 1\ \mathrm{bar}$: pression atmosphérique.

Le débit alimentant le poste de livraison est considéré comme constant et égal à 110 $L{\cdot}s^{-1}$.
Le réservoir de Six-Fours-le-Fort est alimenté par le haut.

A.1. Pression en sortie du poste de livraison

A.1.1. Calculer la différence ΔZ d'altitudes entre le poste de livraison et le réservoir.

A.1.2. À l'aide du principe fondamental de la statique des fluides, en déduire la pression relative aval P_{PS} en sortie du poste de livraison.

A.1.3. Quel est l'intérêt de régler la pression aval P_{PS} de sortie du poste de livraison à 7,8 bar pour la Société du Canal de Provence ?

La pression aval P_{PS} en sortie du poste de livraison est maintenue à 8,3 bar par une vanne de régulation de pression automatisée implantée dans le poste de livraison. Les 0,5 bar de pression supplémentaire permettent d'assurer le débit de remplissage du réservoir.

A.2. Étude de l'alimentation du poste de livraison depuis la station de traitement d'eau potable d'Hugueneuve

A.2.1. Calculer la pression P_{PE} en amont du poste de livraison.

A.2.2. Calculer la différence de pression ΔP de part et d'autre de la vanne de régulation de pression automatisée.

Le projet de la Société du Canal de Provence est de valoriser cet écart de pression pour produire de l'énergie électrique à l'aide d'une pompe inversée (PaT).

Une pompe inversée présente la particularité de devoir fonctionner à débit constant.

A.2.3. Au vu de la courbe annuelle des débits classés de sortie du poste de livraison (figure 6 ci-dessous), justifier le choix de la Société du Canal de Provence d'utiliser la PaT pour un débit de 50 $L \cdot s^{-1}$.

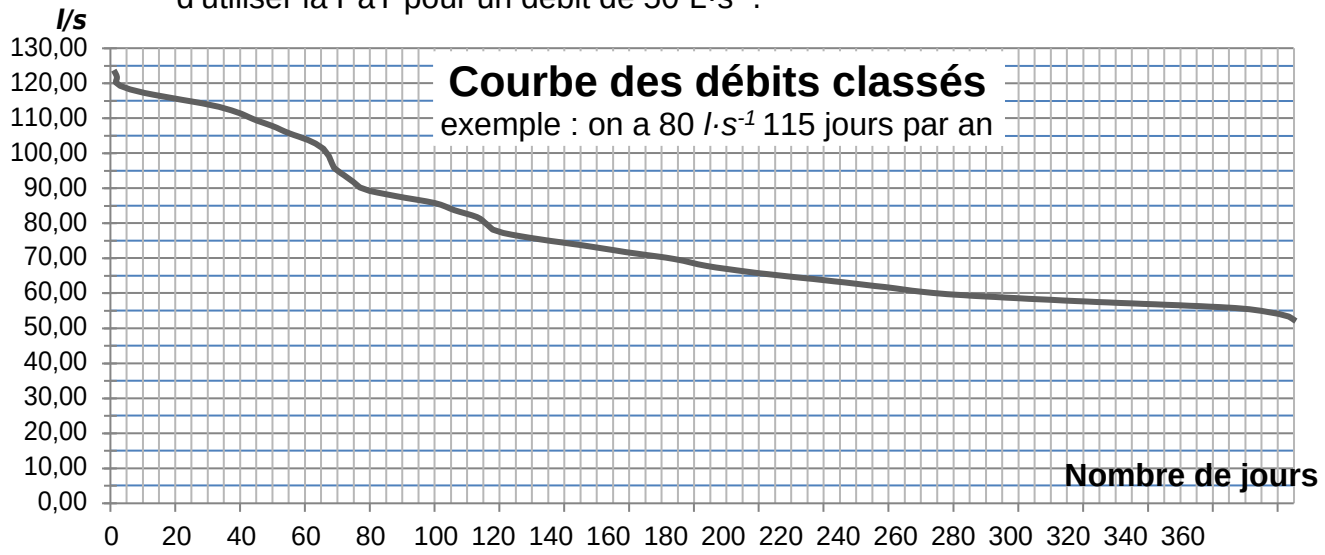

Figure 6 : débits classés de sortie du poste de livraison de Six-Fours-le-Fort

En tenant compte de l'ensemble des imperfections du réseau hydraulique, la différence réelle de pression ΔP mesurée de part et d'autre de la vanne de régulation de pression automatisée est égale à 7 bar. On prendra cette valeur dans la suite du problème.

On rappelle l'expression de la puissance hydraulique P_h d'une pompe à partir de la hauteur manométrique H :

$P_h = Q\rho gH$ avec

Q : débit volumique en $m^3 \cdot s^{-1}$;
H : hauteur manométrique en mètre de colonne d'eau mCE ;
P_h : puissance hydraulique en W.

A.3. Puissance hydraulique disponible pour un débit de 50 L·s^{-1}

A.3.1. Calculer la hauteur manométrique H équivalente à la différence de pression réelle ΔP.

A.3.2. Calculer la puissance hydraulique P_h disponible pour la pompe inversée.

A.4. Choix de la pompe en fonction de la puissance hydraulique et de la vitesse de rotation

Pour choisir la pompe adaptée au projet, on utilise les abaques du document réponse 1. Il est alors nécessaire de calculer la vitesse spécifique qui est définie par la relation ci-dessous.

$$n_q = n \times \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{H}{I}\right)^{\frac{3}{4}}} \text{ avec}$$

n_q : vitesse spécifique en *tr·min $^{-1}$* ;
n : vitesse de rotation de l'axe de la pompe en *tr·min $^{-1}$* ;
Q : débit volumique en *m^3·s^{-1}* ;
H : hauteur de chute nette exprimée en mCE et équivalent à la différence de pression ΔP précédente ;
I : nombre d'étages pour les pompes ou les turbines multiétages.

La Société du Canal de Provence a choisi :

- une vitesse de rotation de la turbine proche de 1 500 tr·min^{-1}.
- un débit volumique Q =0,05 m^3.s^{-1}.
- une hauteur de chute nette $H = 71{,}4$ mCE

La valeur du rendement en turbinage est très proche du rendement en pompage.

A.4.1. Placer le point de fonctionnement associé au débit Q et à la hauteur H sur l'abaque donné en figure 12 du document réponse 1. En déduire deux types de pompes permettant de respecter le cahier des charges imposé par la Société du Canal de Provence.

A.4.2. Calculer pour les deux types de pompes la vitesse spécifique n_{Q1} et n_{Q2}.

A.4.3. Placer les points de fonctionnement associés aux deux types de pompes sur l'abaque donné en figure 13 du document réponse 1. En déduire les rendements η_1 et η_2 pour les deux types de pompes.

A.4.4. Quel type de pompe est-il alors préférable de choisir ?

Partie B. ÉTUDE DE LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE

L'objectif de cette partie est d'étudier le fonctionnement en génératrice de la machine asynchrone associée à la pompe inversée (PaT).
On souhaite déterminer la puissance électrique produite par l'installation dans les conditions imposées par la Société du Canal de Provence.
On dimensionnera le besoin en puissance réactive pour prévoir, si nécessaire, de modifier l'installation.

Les données constructeurs fournies par le fabricant de la pompe inversée PEM Gourdin sont regroupées dans l'annexe 1.

B.1. Point de fonctionnement en génératrice

B.1.1. Déterminer la vitesse de synchronisme n_s en tr·min^{-1}.

B.1.2. Calculer le glissement nominal en mode générateur g_n.

B.1.3. Positionner le point de fonctionnement sur la caractéristique mécanique de la machine asynchrone (figure 14, document réponse 2).

B.1.4. Justifier que la machine fonctionne en génératrice « hypersynchrone ».

On rappelle les différents types de pertes qui dégradent le rendement de la machine asynchrone :

- pertes joules statoriques P_{js} ;
- pertes fer statoriques P_{fs} ;
- pertes joules rotoriques P_{jr} ;
- pertes fer rotoriques P_{fr} ;
- pertes mécaniques P_{pmec}.

Pour la machine utilisée, on a :

pertes fer statoriques	pertes mécaniques	pertes fer rotoriques
$P_{fs} = 530\ W$;	$P_{pmec} = 330\ W$	*négligeables*

Le point de fonctionnement étudié est caractérisé par les valeurs suivantes :

- la puissance hydraulique disponible pour la pompe inversée : $P_h = 35\ \text{kW}$;
- la vitesse de rotation de la machine asynchrone en mode turbinage : n = 1 513 tr·min^{-1} ;
- le rendement de la pompe inversée en mode turbinage : 73 %.

B.2. Bilan de puissance et rendement en fonctionnement génératrice

B.2.1. Déterminer la puissance mécanique P_{md} disponible sur l'axe de la génératrice asynchrone.

B.2.2. Calculer la valeur des pertes joules rotoriques sachant que :

$$P_{jr} = \frac{-g}{1-g} \times \left(P_{md} - P_{pmec} \right)$$

B.2.3. Donner l'expression littérale des pertes par effet joule au stator P_{js} en fonction de la résistance statorique entre phases R et de l'intensité du courant I. Sachant que le point de fonctionnement correspond à une charge de 80 %, calculer la valeur des pertes joules statoriques P_{js}.

B.2.4. Indiquer sur la figure 15 du document réponse 2 les noms des différentes puissances et leurs valeurs numériques.

B.2.5. À partir des données de l'annexe 1, calculer la puissance électrique P_{uelec} fournie par la génératrice asynchrone. Comparer cette valeur à celle obtenue à la question précédente.

B.2.6. À l'aide de l'annexe 2, déterminer la classe d'efficacité énergétique de la machine asynchrone.

B.3. Facteur de puissance et dimensionnement du besoin en puissance réactive de la machine

La norme imposée par ERDF pour la puissance restituée impose un facteur de puissance égal à 0,93.
On considère que la puissance active délivrée par la génératrice asynchrone machine est de 24,1 kW et que le point de fonctionnement correspond à une charge de 80 %.

B.3.1. À l'aide de l'annexe 1, donner la valeur du facteur de puissance f_p pour le point de fonctionnement choisi.

B.3.2. Calculer la puissance réactive Q mise en jeu par la génératrice asynchrone pour le point de fonctionnement choisi.

B.3.3. Calculer la puissance réactive Q_{ERDF} permettant de respecter les contraintes d'ERDF.

B.3.4. Proposer une solution technique permettant de respecter cette contrainte. Quel est l'intérêt pour ERDF de relever le facteur de puissance ?

Partie C. VALIDATION DU MODE SECOURU

L'objectif de cette partie est de valider le dimensionnement du mode secouru imposé par la continuité de service pour la distribution d'eau potable à la commune de Six-Fours-Les-Plages. En cas de coupure du réseau électrique d'alimentation, la régulation du circuit hydraulique du poste de livraison doit être assurée. Il faut donc estimer le besoin en alimentation électrique pour dimensionner les batteries de secours.
Pour simplifier et optimiser la maintenance de ses sites, la SCP a uniformisé le schéma du secouru. Le schéma ainsi que les constituants électriques sont donc identiques quel que soit la taille et les besoins des postes de livraison.

Le schéma hydraulique du poste de livraison est le suivant :

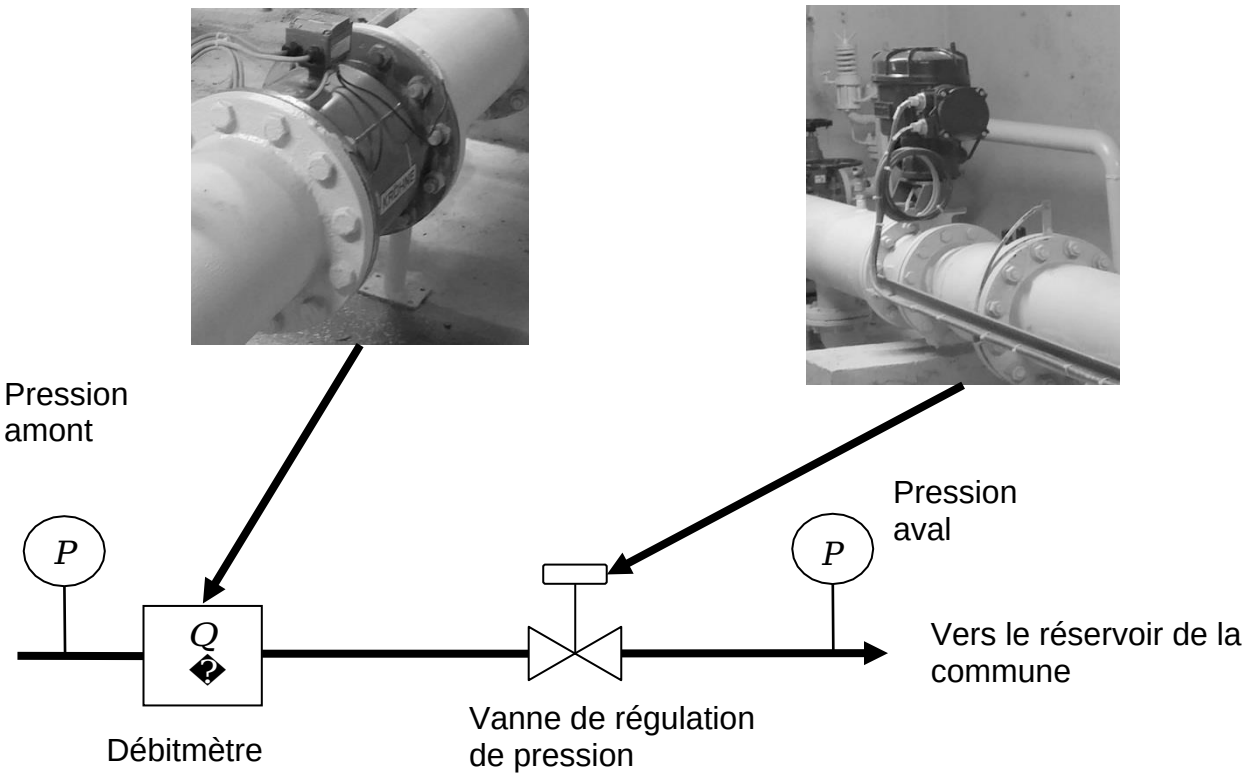

Figure 7 : schéma hydraulique du poste de livraison

- La vanne de régulation de pression automatisée est motorisée et se positionne par pas de 5 % de l'amplitude maximale à l'ouverture comme à la fermeture.
- Le servomoteur de la vanne de régulation de pression est alimenté en 230 V_{AC} et sa puissance est de 200 W.
- Il faut 39 secondes au servomoteur pour réaliser les 32 tours nécessaires à la fermeture ou l'ouverture complète de la vanne, avec une vitesse de rotation de 49 tours·min^{-1}.

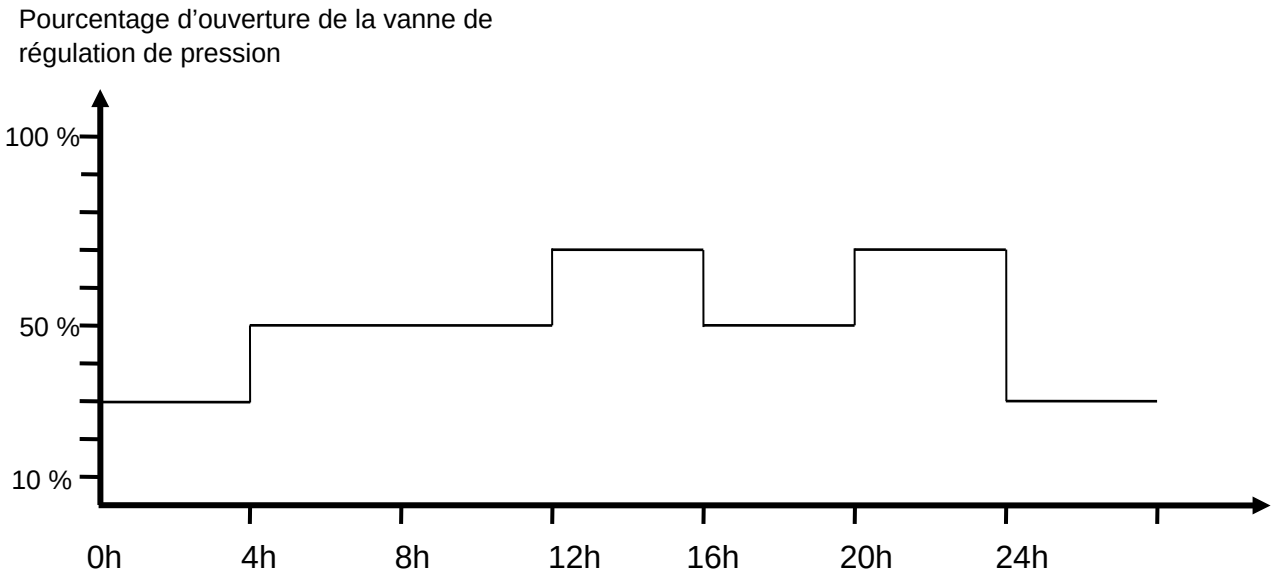

Figure 8 : Chronogramme type pour la commande de la vanne de régulation

C.1. Dimensionnement du mode secouru

C.1.1. Indiquer sur le tableau de la figure 16 du document réponse 3 le nombre de pas nécessaire pour les séquences d'ouvertures ou de fermetures de la vanne suivant les différentes transitions horaires.

C.1.2. Justifier que l'énergie nécessaire pour un pas de 5 % à l'ouverture comme à la fermeture est de 390 J.

C.1.3. Calculer l'énergie nécessaire à la totalité des manœuvres de la vanne de régulation de pression sur une plage de 24 h.

La solution retenue pour l'alimentation secourue du servomoteur est schématisée sur la figure 17 du document réponse 3.

C.2. Étude de la structure implantée pour le mode secouru

C.2.1. Compléter les indications manquantes signalées par des pointillés sur la figure 17 du document réponse 3.

C.2.2. À l'aide de l'annexe 2 (figure 11), indiquer la nature et le niveau de la tension de sortie du convertisseur 1.

C.2.3. Sachant que l'on utilise des batteries de tension nominale 12V, déterminer le nombre minimal de batteries pour le mode secouru et dessiner le schéma de câblage associé.

C.2.4. Proposer une structure électrique possible pour les convertisseurs 1 et 2.

C.2.5. Sachant que l'énergie nécessaire pour assurer une autonomie du mode secours de 24 h est de 9,36 kJ, calculer la capacité minimale C_{min} en A.h de la batterie de secours.

C.2.6. Justifier, d'après les données précédentes, la nécessité d'un étage d'adaptation de tension entre le stockage et l'entrée du convertisseur 2.

Pour réaliser l'étage d'adaptation de tension, on utilise un hacheur élévateur dont la structure simplifiée est donnée ci-dessous.

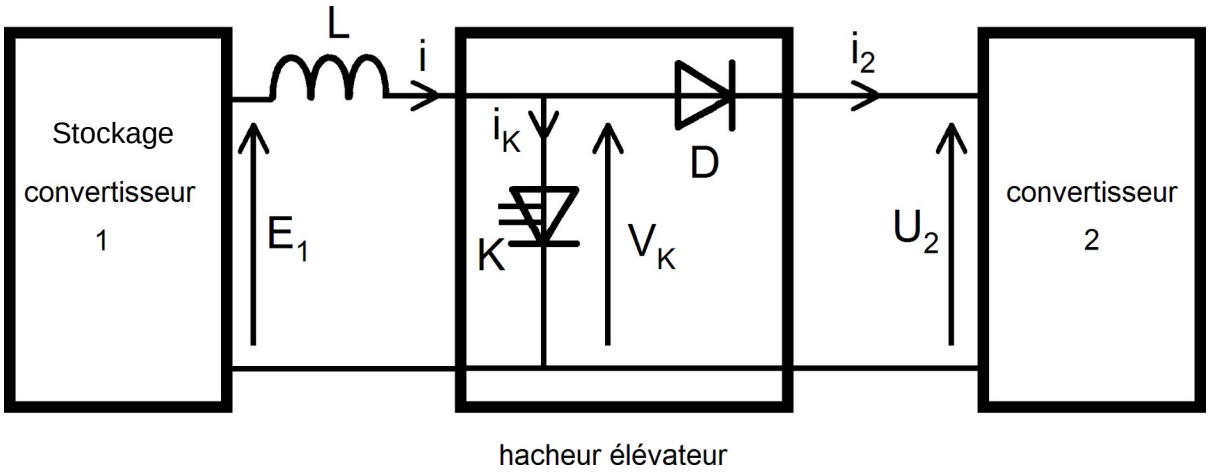

Figure 9 : schéma structurel du hacheur élévateur

Dans l'étude suivante, on considère que la tension E_1 est constante et que l'inductance L est suffisante pour que la conduction du courant dans le hacheur soit ininterrompue. On suppose que tous les composants sont considérés comme parfaits.
Dans le montage de la figure 9, l'interrupteur K est commandé périodiquement à la fermeture de 0 à αT et à l'ouverture de αT à T.

C.3. Étude de l'étage intermédiaire pour le mode secouru

C.3.1. Indiquer les intervalles de conduction de la diode et de l'interrupteur sur la figure 18.
Tracer l'allure de la tension $V(t)$ du hacheur élévateur sur la figure 18 du document réponse 3 en fonction de la commande.

C.3.2. Justifier que $< V_K > = E_1$.
En déduire que <V_K> la valeur moyenne est donnée par l'expression suivante :

$$< V_K > = U_2(1 - \alpha) = E_1$$

C.3.3. Nommer le composant que l'on doit placer entre la sortie du hacheur et l'entrée du convertisseur 2 pour que la tension d'entrée du convertisseur 2 soit pratiquement constante.

ANNEXE 1

Peme Gourdin La maîtrise de l'eau	Offre : Projet : PDL SIX FOURS Date :	**OFFRE TECHNIQUE** **ECOGENERATRICE**	Certifié ISO-9001 ISO-14001
Référence		ECO 125-275 / 2 étages	

Liquide pompé				
Type	Eau	Tension de Vapeur	0,02 bar	
Densité	1			
Teneur en corps solide	Max 20 ppm	Température	Mini	Maxi
Viscosité	1,00 $mm^2 \cdot s^{-1}$		5 °C	25 °C

Génératrice asynchrone		
ABB Oy Motors & Generators	Données Génératrice	ABB
Génératrice : M3BP 200MLA 4L		
Génératrice	Rotor à cage d'écureuil	
Indice de protection	IP 55	
Méthode de refroidissement	IC 411	
Rendement	IE3	
Température ambiante max	40 °C	

Puissance utile	30 kW	
Tension	400 V	
Fréquence	50 Hz	
Vitesse nominale	1 516 $tr \cdot min^{-1}$ (Génératrice)	1 479 $tr \cdot min^{-1}$ (Moteur)
Courant nominal	53,4 A	
Couple nominal	201 N·m	

Courant démarrage / courant nominal	7,8
Courant à vide	18,5 A
Résistance statorique mesurée entre phases	105 mΩ

Couple démarrage / couple nominal	2,8
Couple maximal / couple nominal	3,8

Caractéristiques en charge			
Charge %	Courant A	Rendement %	Facteur puissance
100	53,4	94,3	0,81
80	46,2	94,5	0,75
50	33,3	93,9	0,65

ANNEXE 2

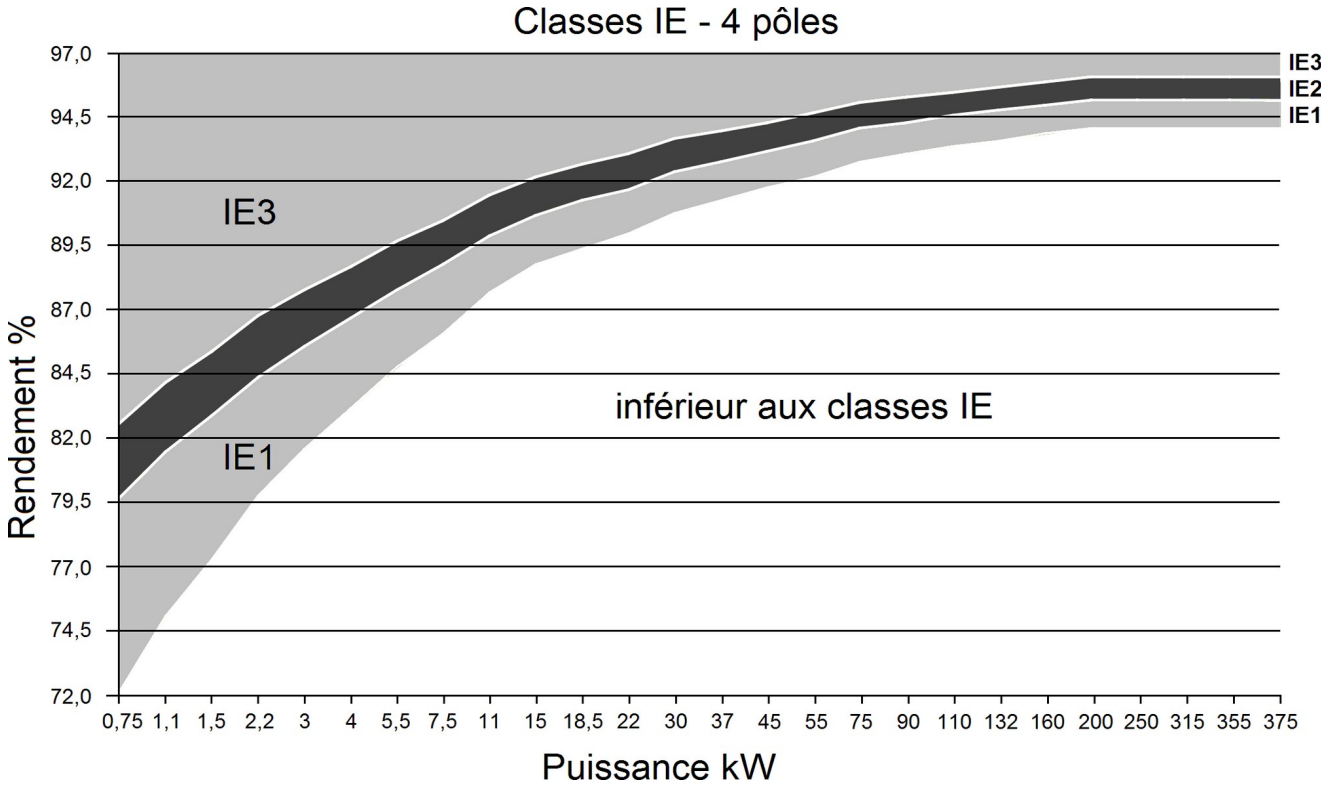

Figure 10 : classes de rendement.

Tension d'entrée	230 Vca ± 15 %	50/60 Hz (47/63 Hz)
Tension de sortie nominale : 48 V		Calibre Chargeur 30 A
Sortie batterie :	flottante 52,8 Vcc ou 54 Vcc (sélection)	
	Charge rapide 55,2 Vcc – 58,8 Vcc (ajustable)	
Régulation tension batterie	< 1 %	
Limitation courant batterie	10 % à 100 % (ajustable)	
Courant maximal utilisation	24 A	
Rendement	85 %	

Figure 11 : données du constructeur pour le chargeur de batterie

DOCUMENT RÉPONSE 1

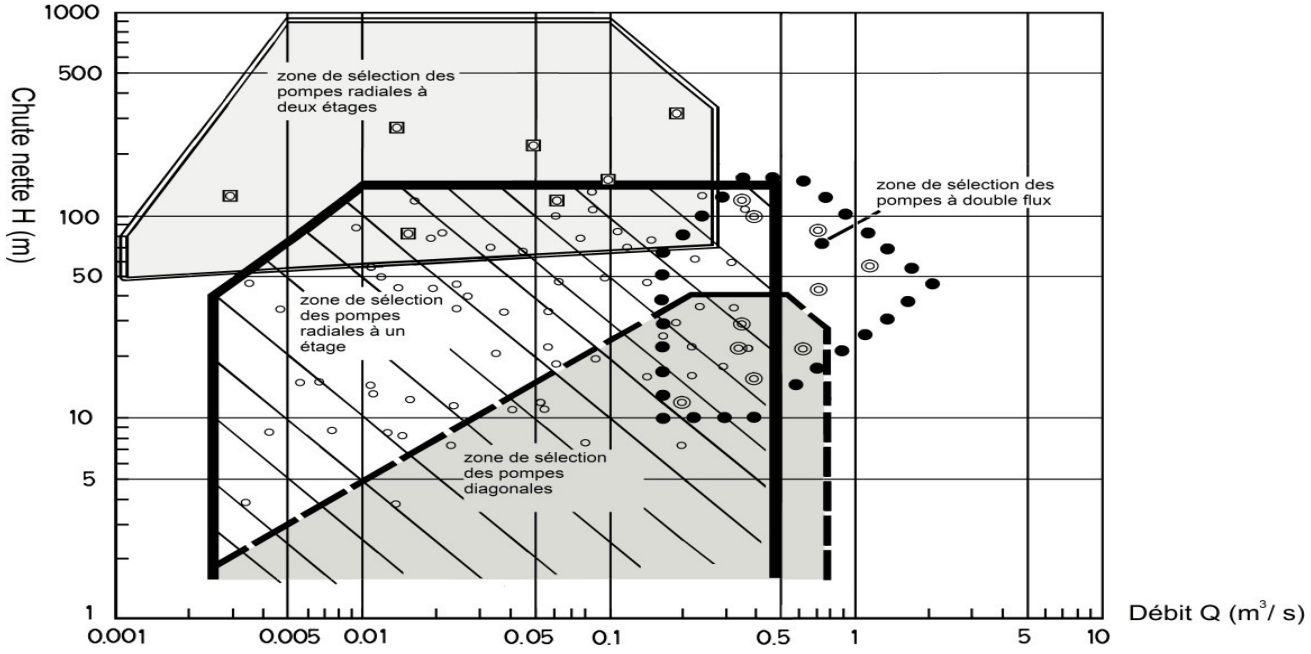

Figure 12 : domaine d'utilisation (chute nette, débit, puissance) des PaT

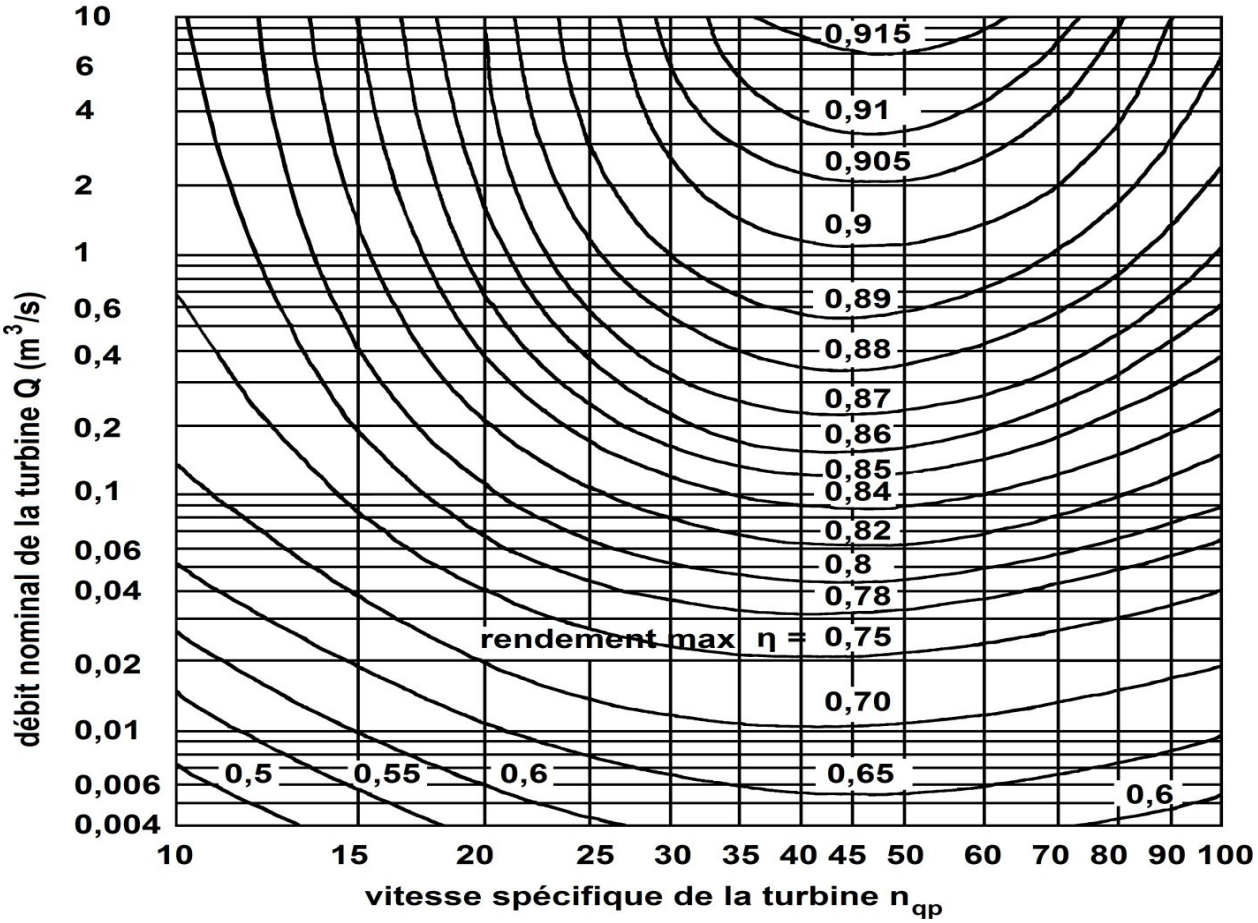

Figure 13 : rendements des turbines en fonction du débit et de la vitesse spécifique

DOCUMENT RÉPONSE 2

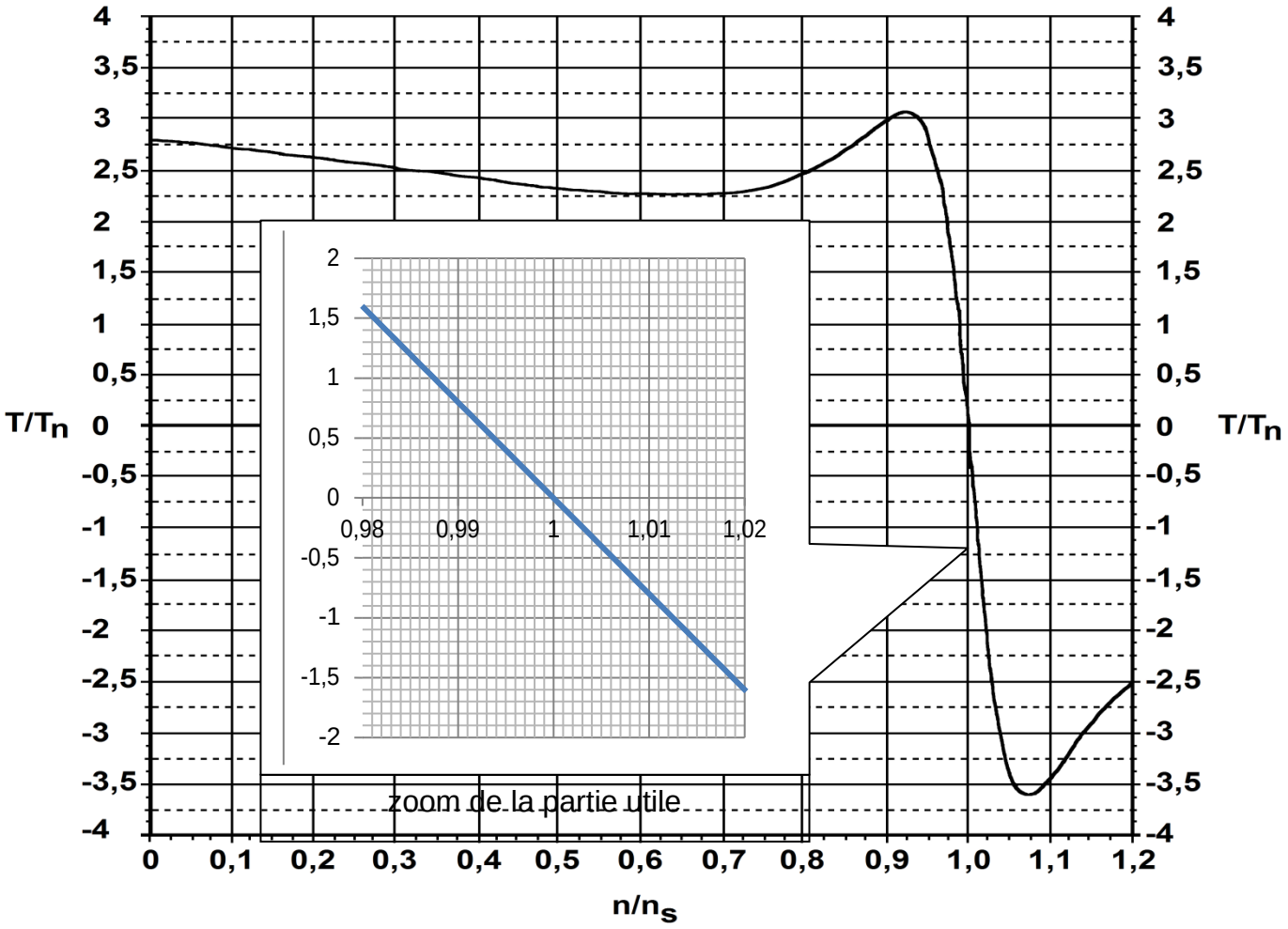

Figure 14 : caractéristique mécanique de la machine asynchrone

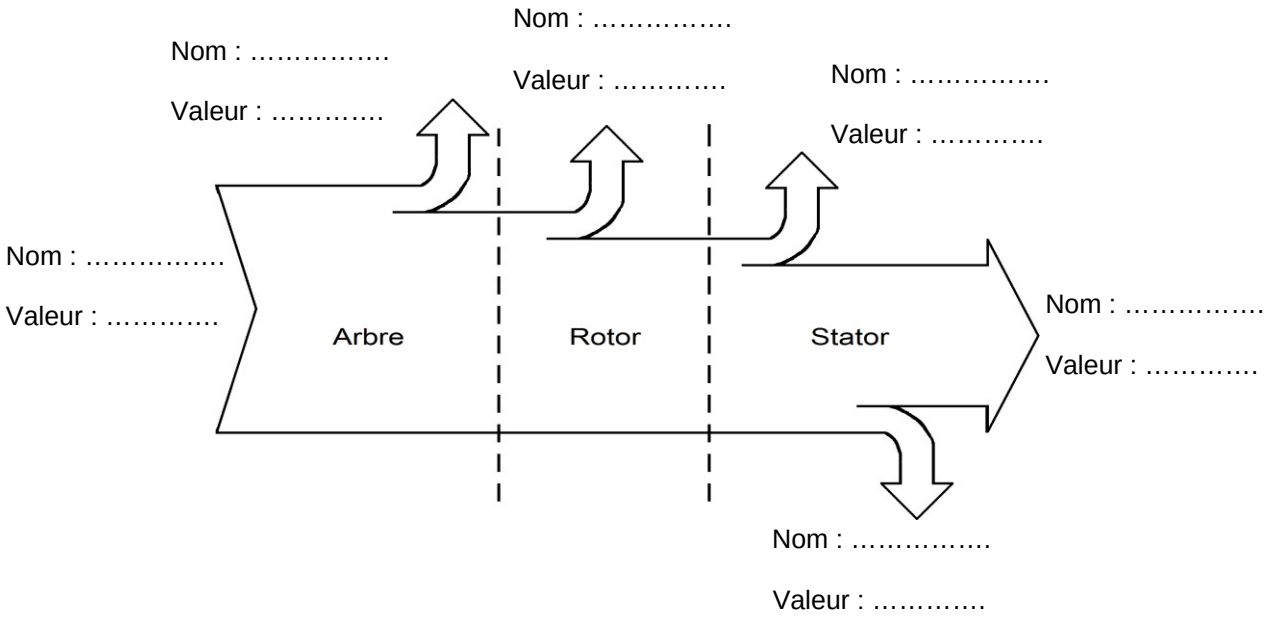

Figure 15 : diagramme de puissance de la MAS en fonctionnement génératrice

DOCUMENT RÉPONSE 3

Instant de commande	4h	8h	12h	16h	20h	24h
Nb de pas en fermeture						
Nb de pas en ouverture						

Figure 16 : récapitulatif des mouvements de la vanne de régulation de pression

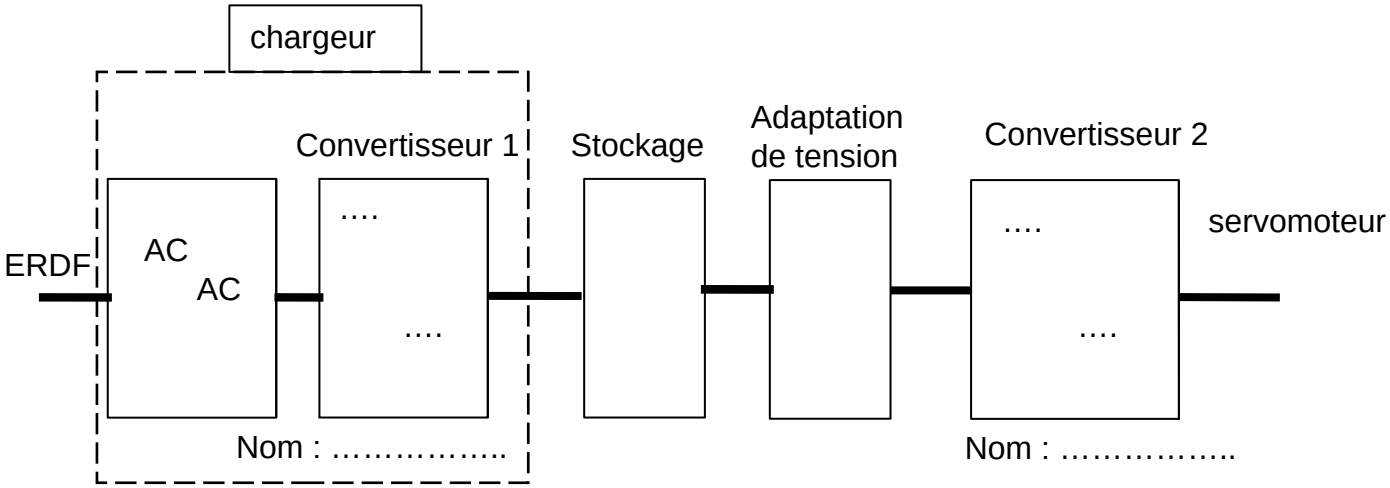

Figure 17 : synoptique de l'alimentation secourue

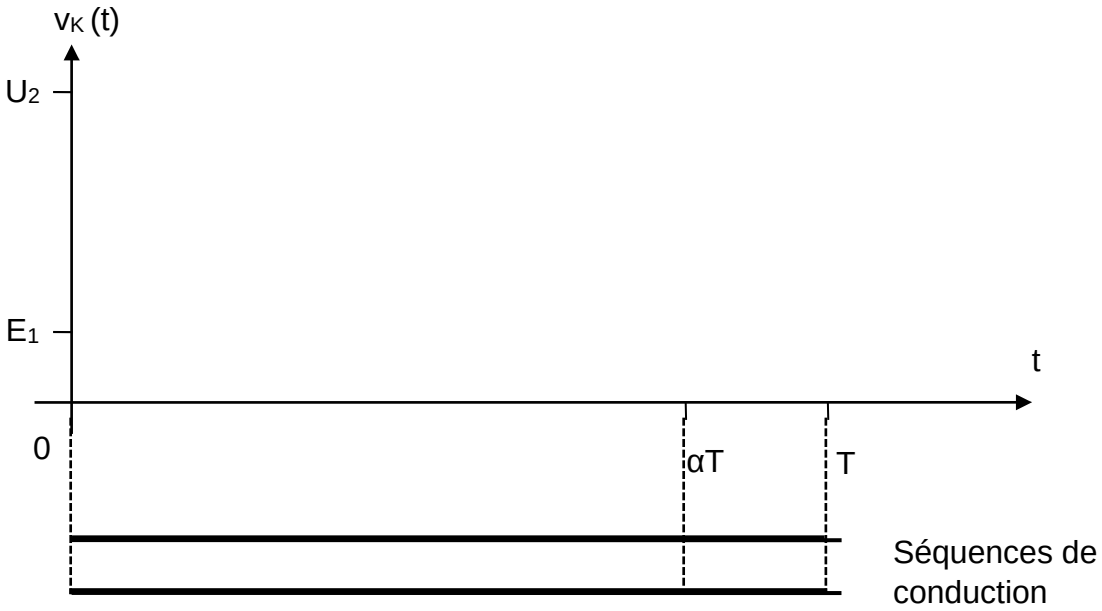

Figure 18 : chronogramme de la tension V_K dans un hacheur élévateur