BREVET DE TECHNICIEN SUPERIEUR

ELECTROTECHNIQUE

SESSION 2009

EPREUVE E 4.1

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

Durée : 4 h - coefficient : 3

Equipement d'un forage d'eau potable



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.

Les 4 parties A, B, C, D peuvent être traitées indépendamment les unes des autres.
Le sujet comporte 15 pages
dont 3 pages de documents-réponses à remettre avec la copie.

- Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.

- Utiliser les notations indiquées dans le texte, justifier toutes les réponses, présenter clairement les calculs et les résultats.

Equipement d'un forage d'eau potable

Mise en situation

La Société des Sources de Soultzmatt est une Société d'Economie Mixte (SEM) dont l'activité est l'extraction et l'embouteillage d'eau de source en vue de sa commercialisation.

Résumé de l'historique du projet et enjeux:

La production annuelle d'eau de source de la SEM des eaux de Soultzmatt s'élève aux environs de 22 millions de cols (bouteilles). En tenant compte de l'eau de rinçage, cette production correspond à une consommation globale de 40 000 m^3/an.

La société envisage d'amener sa production annuelle à 36 millions de cols, soit un besoin total en eau de source de 60 000 m^3. Elle doit donc augmenter ses capacités d'extraction et pour cela mettre en exploitation un nouveau forage (L4) assurant un débit maximum de 10 m^3/h (donnée du cahier des charges défini par la société).

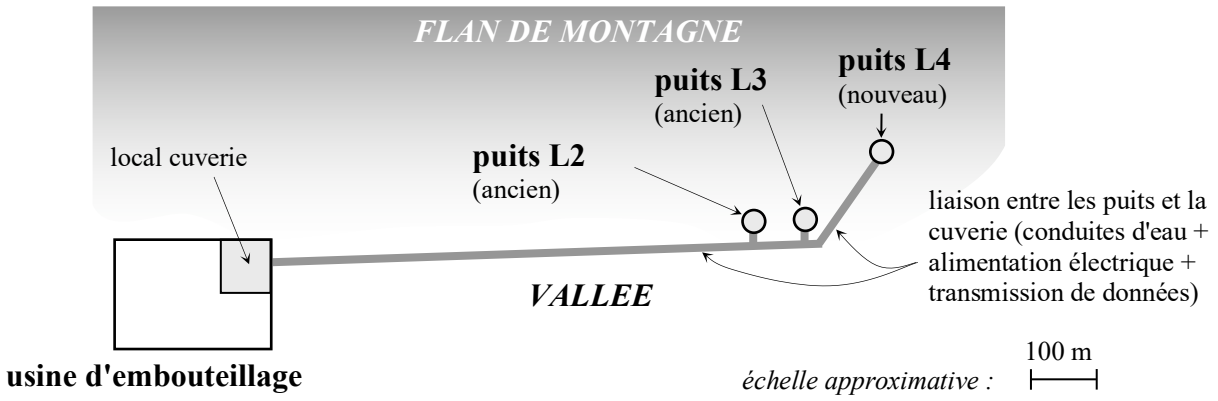
L'enjeux est donc d'obtenir **en quantité suffisante** une eau de **qualité contrôlée**.

Description de l'installation :

L'eau est pompée à partir de 3 puits (L2 et L3 sont les plus anciens, L4 a été installé en 2007 et fera l'objet de cette étude), jour et nuit, vers un local « cuverie », qui sert de stock tampon en entrée du cycle de production.

L'eau est ensuite embouteillée sur 2 chaînes (une chaîne bouteilles plastique et une chaîne bouteilles verre) avant palettisation et stockage. Cette partie sera hors étude.

Le puits L4 est à environ un kilomètre de l'usine et **le suivi devra se faire à distance**.



plan schématique du site : puits et usine d'embouteillage

Problématiques abordées :

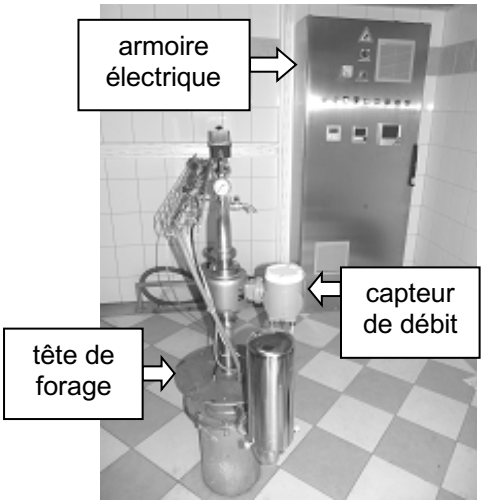
Pour répondre à la commande de production de cols, il est nécessaire de contrôler le débit et la qualité de l'eau. Cela conduira à dimensionner la pompe immergée et à déterminer les outils de contrôle indispensables.

Les parties abordées seront donc les suivantes :

- dimensionner et choisir la pompe immergée et réguler le débit.
- alimenter le puits en énergie électrique : déterminer la section de câble, choisir les protections.
- obtenir une qualité contrôlée : choisir les capteurs et l'instrumentation associée.
- contrôler cette qualité à distance : choisir et étudier partiellement le support de communication.

Présentation du puits L4

Le puits L4, sujet de cette étude, est constitué d'un forage et d'un local technique abritant la tête de forage et les équipements, comme le montre la photo de droite.



La pompe et son moteur d'entraînement sont immergés au fond du forage. Le moteur est piloté par un variateur de vitesse ATV 61 lui-même commandé par un automate qui assure à la fois la régulation du débit d'eau dans la conduite de refoulement et le dialogue entre les équipements du puits et la cuverie, celle-ci étant distante de presque 1 km. Un ensemble de capteurs permettent de maîtriser le pompage et de surveiller la qualité de l'eau.

La *figure 1* présente, d'un point de vue fonctionnel, les équipements du puits.

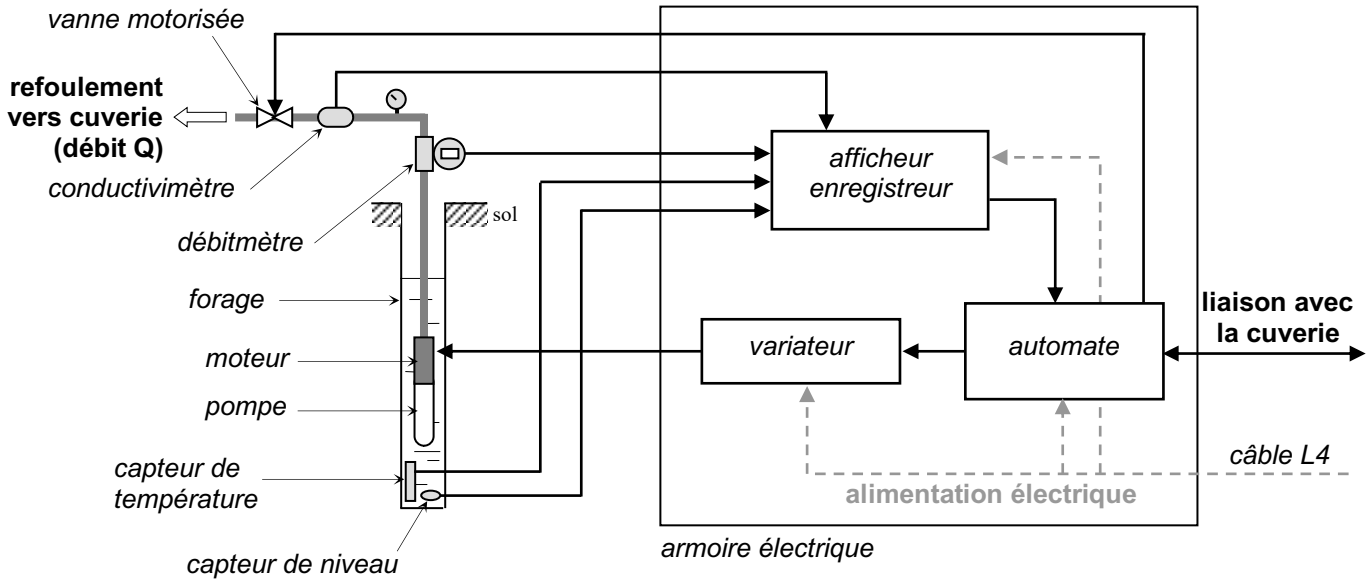


figure 1 : schéma des équipements du puits L4

La valeur moyenne du débit Q de la pompe, fixée par les besoins en eau de l'usine, est de **7 $m^3.h^{-1}$**. Pour s'adapter aux variations de niveau du puits L4, il peut varier entre **Q_{min} = 4 $m^3.h^{-1}$** et **Q_{max} = 10 $m^3.h^{-1}$**.

A. Choix de la pompe

*La **figure 2** présente le profil de la conduite hydraulique reliant la pompe immergée du puits L4 à la cuve 1R de la cuverie, destinée à recevoir l'eau de ce puits.*

*Il s'agit d'une conduite en PVC de diamètre intérieur **D = 50 mm** et de longueur totale **L = 920 m**.*

Les pertes de charge linéiques le long de cette conduite dépendent du débit volumique Q et sont données par :

$J = 0{,}076.Q^2 + 0{,}26.Q$ *où J sont les pertes de charge POUR 100 m DE CONDUITE (elles sont exprimées en **m** de colonne d'eau). Q est le débit (exprimé en **$m^3.h^{-1}$**).*

Vu la grande longueur et la forme de la conduite, on négligera les pertes de charge singulières devant les pertes de charge régulières.

Une prise d'air en haut du forage permet de maintenir la pression de la surface de l'eau dans le puits à la pression atmosphérique. Côté refoulement dans la cuve 1R, l'eau débouche également à la pression atmosphérique.

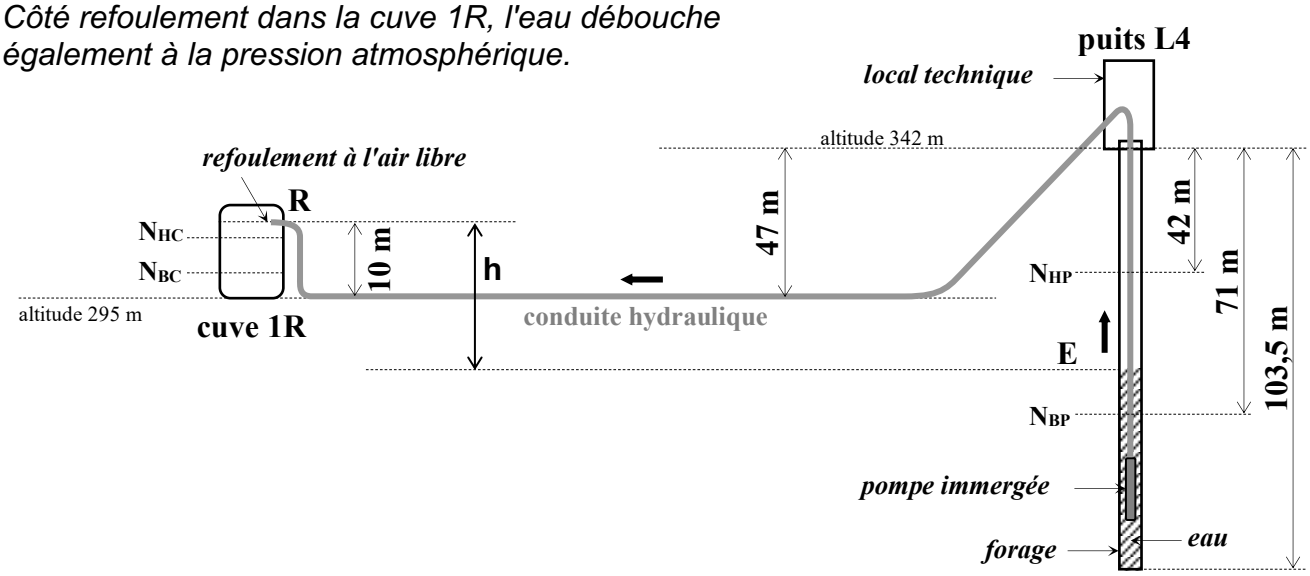


figure 2 : profil de l'installation hydraulique

*Au cours d'une l'année, le niveau d'eau dans le puits peut varier entre une valeur minimale **N_{BP}** et maximale **N_{HP}**.*

*Données : masse volumique de l'eau : ρ **= 1000 kg.m^{-3}***
*accélération du champ de pesanteur : **g = 9,81 m.s^{-2}***

A.1. caractéristiques hydrauliques de l'installation en vue du choix de la pompe et du moteur

On rappelle l'expression de la puissance hydraulique P d'une pompe :

$$P = Q.\ \rho.g.H_{pompe}$$

où Q est le débit de fluide traversant la pompe (exprimé en $m^3.s^{-1}$) et H_{pompe} sa hauteur manométrique totale.

Ainsi que l'expression du théorème de Bernoulli généralisé :

$$p_B + \rho.g.z_B + \tfrac{1}{2}.\rho.v_B^2 = p_A + \rho.g.z_A + \tfrac{1}{2}.\rho.v_A^2 + \rho.g.H_{pompe} - \rho.g.\Delta H$$

où - *p_B, z_B et v_B sont respectivement la pression, l'altitude et la vitesse du fluide en un point B situé en aval de l'écoulement*
- *p_A, z_A et v_A sont respectivement la pression, l'altitude et la vitesse du fluide en un point A situé en amont de l'écoulement*
- *H_{pompe} et ΔH la hauteur manométrique de la pompe et les pertes de charges exprimées en m de colonne de fluide*

A.1.1. Déterminer les valeurs h_{min} et h_{max} du dénivelé h entre le point de refoulement dans la cuve 1R et la surface de l'eau dans le puits (voir *figure 2*) :
- h_{min} : valeur de h lorsque l'eau dans le puits est au niveau haut N_{HP}
- h_{max} : valeur de h lorsque l'eau dans le puits est au niveau bas N_{BP}.

Indiquer les valeurs trouvées dans la colonne de gauche du tableau du *document-réponse A.1*.

A.1.2. En appliquant le théorème de Bernoulli généralisé, entre les points E et R, établir une relation entre :
- H_{pompe} : hauteur manométrique totale de la pompe (nécessaire à faire circuler l'eau dans l'installation) exprimée en m de colonne d'eau
- h : le dénivelé défini à la question précédente
- ΔH : les pertes de charges totales dans la conduite exprimées également en m de colonne d'eau.

On admettra que les termes correspondant à l'énergie cinétique volumique sont négligeables devant les autres termes de la relation.

A.1.3. En déduire que H_{pompe} peut s'exprimer en fonction du débit Q dans la conduite par la relation : $\mathbf{H_{pompe} = 0{,}7.Q^2 + 2{,}4.Q + h}$ avec H_{pompe} en **m** et Q en $\mathbf{m^3.h^{-1}}$.

A.1.4. Compte tenu des caractéristiques de l'installation et des variations possibles du débit, calculer la valeur maximale de H_{pompe}.

A.1.5. Calculer la puissance hydraulique P_{hydrau} que doit fournir la pompe pour assurer un débit Q = 10 $m^3.h^{-1}$ avec un dénivelé h = h_{max}.

A.1.6. En s'aidant des questions précédentes, compléter le tableau du *document-réponse A.1* en indiquant pour chaque cas :
- la hauteur manométrique totale nécessaire apportée par la pompe H_{pompe}
- la puissance hydraulique fournie par la pompe P_{hydrau}.

A.2. validation du choix de la pompe et du moteur

*La pompe choisie est un modèle centrifuge immergé, destiné à ce type d'application. Sa vitesse maximale de rotation est de **3000 tr.min^{-1}**.*

*Son réseau de caractéristiques hydrauliques (en traits pleins) est fourni sur le **document-réponse A.2**, c'est-à-dire les courbes représentant la hauteur manométrique totale de la pompe en fonction de son débit pour différentes vitesses de rotation (données du constructeur).*

Sur ce même document-réponse figurent également les caractéristiques (en traits pointillés) de l'installation (hauteur manométrique totale nécessaire en fonction du débit)

pour les 2 cas extrêmes correspondant respectivement à h = h_{min} (l'eau dans le forage est au niveau haut) et à h = h_{max} (l'eau dans le forage est au niveau bas).

*Le moteur d'entraînement est de type asynchrone triphasé, de puissance **7,5 kW** et de vitesse nominale **2870 tr.min^{-1}**.*

A.2.1. On rappelle que la plage de variation de débit souhaitée s'étend de 4 à 10 $m^3.h^{-1}$. Compléter le *document-réponse A.2* en hachurant la surface correspondant à l'ensemble des points de fonctionnement possibles de la pompe. Conclure quant à la validité du choix de cette pompe.

A.2.2. En déduire n_{min} et n_{max}, respectivement valeur minimale et valeur maximale de la vitesse de rotation de la pompe lors de son fonctionnement sur le site.

A.2.3. Pour un débit Q = 10 $m^3.h^{-1}$, la pompe choisie a un rendement mécanique η_{pompe} **= 65%**. Déterminer la puissance utile P_u que devra délivrer le moteur d'entraînement dans les conditions de la question A.1.5.

A.2.4. A l'aide des résultats des 2 questions précédentes, valider le choix du moteur.

B. Solution pour obtenir un débit variable

On rappelle que le moteur d'entraînement de la pompe est une machine asynchrone triphasée de 7,5 kW. L'ensemble moteur-pompe est immergé au fond du puits.

Les caractéristiques nominales de ce moteur sont les suivantes :

puissance utile : **P_{uN} = 7,5 kW**
vitesse de rotation : **n_N = 2870 tr.min^{-1}**
fréquence : **f_N = 50 Hz**
tension : **U_N = 400 V**
intensité : **I_N = 17 A**
facteur de puissance : **cos φ_N = 0,84**

La pompe est reliée mécaniquement au moteur par un accouplement direct, si bien que les deux ont même vitesse de rotation.

B.1. motorisation de la pompe

On a réalisé une série de mesures sur la pompe en place dans le puits pour un niveau d'eau moyen dans le forage, qu'on supposera constant. Ces mesures ont permis de tracer :

- *la caractéristique mécanique de la pompe, c'est à dire le couple d'entraînement en fonction de sa vitesse de rotation. Cette courbe est donnée sur le **document-réponse B.1**.*
- *le débit de la pompe en fonction de sa vitesse de rotation. Cette courbe est représentée sur la **figure 3** (page suivante).*

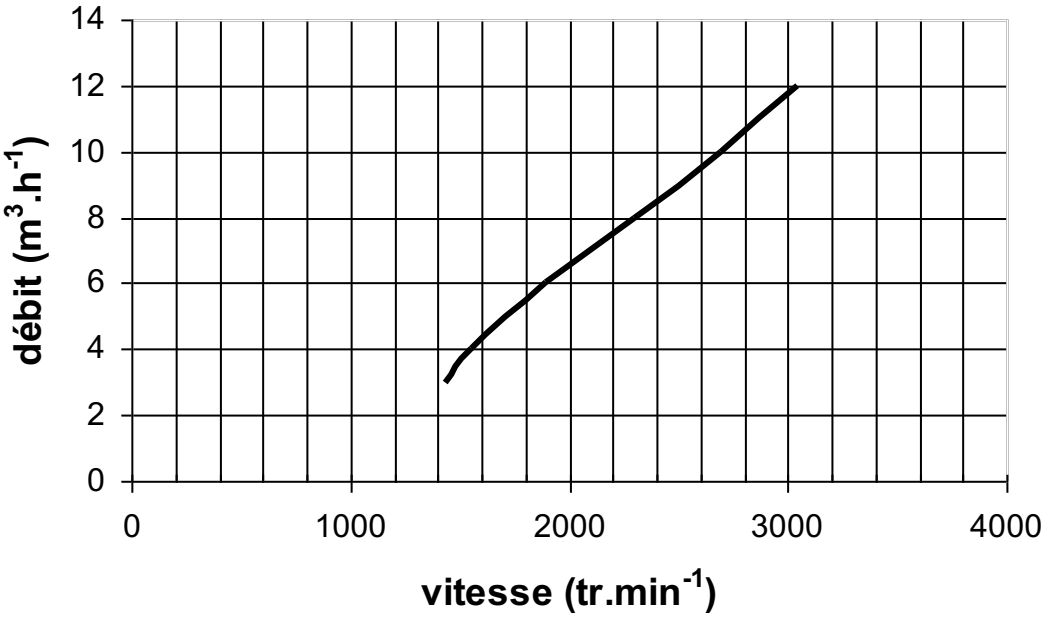


figure 3 : débit de la pompe dans l'installation en fonction de sa vitesse de rotation pour un niveau d'eau moyen dans le forage

B.1.1. Déterminer la vitesse de synchronisme nominale n_S et le nombre de paires de pôles p de ce moteur.

B.1.2. En déduire la valeur du glissement nominal g_N.

B.1.3. Calculer son rendement nominal η_N.

B.1.4. Calculer son couple utile nominal T_{uN}.

B.1.5. Rajouter sur le *document-réponse B.1* la caractéristique mécanique du moteur dont seule la partie utile sera tracée (entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement nominal), pour une fréquence d'alimentation de 50 Hz. Cette caractéristique sera clairement nommée "C_0".

B.1.6. En déduire la valeur Q_N du débit obtenu lorsque le moteur de pompe est alimenté sous tension et fréquence nominales. Montrer alors que le débit maximum attendu de 10 $m^3.h^{-1}$ est envisageable.

B.2. entraînement à vitesse variable

Le moteur de la pompe est piloté par un variateur de vitesse ATV61.

*Ce variateur de vitesse fonctionne selon le principe représenté sur le schéma du **document-réponse B.2** (schéma donné par le constructeur). Il est possible de connecter une résistance de freinage entre les bornes PA et PB, non utilisées dans notre application. La résistance CR est court-circuitée en fonctionnement normal (elle ne sert que durant la mise sous tension du variateur).*

*Le variateur ATV61 gère la vitesse du moteur asynchrone avec une commande dite à **U/f constant**.*

B.2.1. Sur le *document-réponse B.2*, identifier clairement les 3 parties fonctionnelles suivantes du variateur : redresseur ; filtrage de la tension ; onduleur.

B.2.2. En analysant la réversibilité de l'application, expliquer pourquoi on n'a pas utilisé ici de résistance de freinage?

B.2.3. Lors du raccordement du moteur de pompe au variateur, est-il important de respecter l'ordre des phases ? Pourquoi ?

B.2.4. Le variateur permet de modifier la fréquence des tensions d'alimentation du moteur. Comment évolue alors la partie utile de la caractéristique mécanique du moteur sachant que la commande est de type U/f constant ?

B.2.5. Donner n, vitesse de rotation de la pompe permettant d'obtenir le débit moyen attendu Q = 7 $m^3.h^{-1}$.

B.2.6. Tracer sur le *document-réponse B.1* la caractéristique mécanique du moteur correspondant à Q = 7 $m^3.h^{-1}$, qui devra être clairement nommée "C_1".

B.2.7. En déduire le couple utile T_u délivré par le moteur et la fréquence f des tensions de sortie du variateur pour ce fonctionnement.

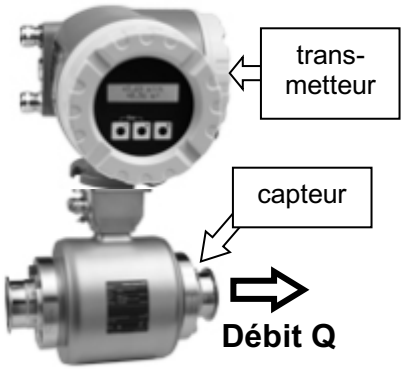
B.2.8. Quel est le débit Q' obtenu pour une fréquence f' = 26,3 Hz en sortie du variateur ?

B.2.9. La commande du moteur de pompe par le variateur répond-elle, en terme de débit, aux exigences de notre installation ? Justifier.

C. Régulation du débit

C.1. mise en œuvre du capteur de débit

La mesure du débit est confiée à un débitmètre électro-magnétique Promag 50H Endress+Hauser (photo ci-contre).



Le constructeur du débitmètre donne les caractéristiques suivantes :

- *grandeur de mesure : vitesse d'écoulement* ***v***
- *gamme de mesure :* ***v = 0,01 … 10 m.s^{-1}***
- *sortie courant :* ***4 - 20 mA*** *; résistance de charge* ***< 700 Ω***.

Le capteur est inséré le long de la conduite PVC de refoulement, son orifice est de section égale à celle de la conduite, à savoir qu'il a un diamètre intérieur ***D = 50 mm***.

Le débitmètre renvoie l'information "débit Q" sur une sortie 4 - 20 mA.

Cette information sera ensuite récupérée par une entrée analogique de l'automate après conversion en une tension ***V_Q*** *comprise entre* ***0 et 10 V****, conformément à la* ***figure 4***.

Le convertisseur 4 - 20 mA / 0 - 10 V a une impédance d'entrée ***Z_e = 500 Ω***.

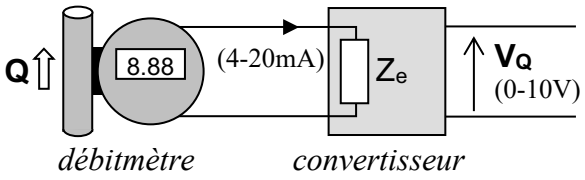


figure 4

C.1.1. Déterminer la plage de débit mesurable par l'appareil et justifier son choix.

C.1.2. Calculer la tension maximale fournie par la sortie 4 - 20 mA du débitmètre. Cette valeur est-elle compatible avec les spécifications du constructeur du débitmètre données ci-dessus ?

C.1.3. Calculer le facteur K_D tel que $V_Q = K_D.Q$, sachant que le débitmètre peut renvoyer une valeur de Q au maximum égale à 70 $m^3.h^{-1}$. Préciser son unité.

C.2. mise en place d'une boucle de régulation

Pour s'adapter d'une part aux exigences de la production et d'autre part au niveau d'eau dans le forage, on souhaite pourvoir 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 définie en C.1, 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 - 10 V qu'on notera V_C. Elle est comparée par l'automate à V_Q pour fabriquer 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 **K/p** où p est la variable de Laplace et K une constante.*

C.2.1. Parmi les trois types de correction P, I et D, quelles sont celles réalisées par le correcteur mis en place ?

C.2.2. Le *document-réponse C.1* donne la structure de la boucle de régulation. Compléter ce document en notant dans les zones prévues les éléments "débitmètre", "variateur", "moteur", "pompe" et "automate", ainsi que les signaux Q, V_C, n_C, V_Q, n et ε.

On donne pour le débitmètre : $\mathbf{V_Q(p) = K_D.Q(p)}$

et pour l'ensemble variateur-moteur-pompe : $\mathbf{Q(p) = \frac{a}{1 + \tau p}\, n_C(p)}$

C.2.3. Sur le *document-réponse C.2*, indiquer dans chaque bloc sa fonction de transfert dans le formalisme de Laplace.

C.2.4. En déduire la fonction de transfert globale de la boucle fermée $T_F(p)$ telle que $Q(p) = T_F(p).V_C(p)$.

On rappelle le théorème de la valeur finale : $\mathbf{\lim_{t \to +\infty} f(t) = \lim_{p \to 0} p.F(p)}$

C.2.5. On impose à l'entrée du système un échelon de consigne de 0 à V_E, dont la transformée de Laplace s'écrit V_E / p. Calculer l'erreur statique ε_S du système en boucle fermée définie comme étant la limite à l'infini de $Q(t) – V_E / K_D$ (différence entre le débit réel en $m^3.h^{-1}$ et la consigne de débit ramenée en $m^3.h^{-1}$).
Cette valeur était-elle prévisible et pourquoi ?

D. Alimentation en énergie du puits L4

Le puits L4 est alimenté en énergie électrique par un câble provenant directement d'un départ 3 × 400 V du puits L3. Ce câble, désigné par "câble L4", a pour caractéristiques :

- longueur : L_C **= 200 m** *- nature des conducteurs :* ***cuivre***
- nombre de conducteurs : ***5, dont 1 PE*** *-* ***nature des isolants :*** ***polyéthylène***

Il doit permettre le passage d'un courant d'emploi I_b **= 15 A** *(courant de ligne).*

D.1. détermination du critère de choix du câble

Dans un premier temps, on va chercher la section des conducteurs admettant un courant d'intensité I_b **= 15 A** *selon un critère d'échauffement.*

La température à l'extérieur du câble sera prise égale à θ_a **= 30°C** *et la température maximale du cuivre devra être* θ_C **= 65°C** *(pour ne pas dégrader l'isolant).*

La résistivité électrique du cuivre augmente avec la température et est donnée par :

$$\rho = 1{,}6.10^{-8}.(1 + 4{,}2.10^{-3}.\theta) \quad \text{avec } \rho \text{ en } \Omega.m \text{ et } \theta \text{ en } °C.$$

Pour une portion d'un mètre de câble, la résistance thermique totale des isolants (entre l'ensemble des conducteurs en cuivre et l'extérieur du câble) vaut R_{th} **= 1,2 °C.W^{-1}**.

On rappelle la relation qui lie la puissance thermique, la résistance thermique et les températures : $P_{th} = (\theta_C - \theta_a)/ R_{th}$

D.1.1. Calculer la puissance thermique maximum P_{th} que peut dissiper un mètre de câble (pour l'ensemble des conducteurs) pour répondre aux contraintes de températures données.

D.1.2. On suppose que les 4 conducteurs actifs du câble sont parcourus par un courant d'intensité efficace I_b. Exprimer alors P_{th} en fonction de I_b, ρ et S, section d'un conducteur. On rappelle qu'on travaille sur une portion d'un mètre de câble.

D.1.3. Calculer la résistivité ρ du cuivre à 65°C.

D.1.4. À partir des questions précédentes, calculer la valeur minimale S de la section des conducteurs.

D.1.5. La valeur de S trouvée précédemment dépend-elle de la longueur du câble ? Expliquer pourquoi ?

En tenant compte du mode de pose et des sections normalisées, il faudrait choisir en réalité une section de conducteur **S = 1,5 mm^2**.

Dans un second temps, on va maintenant déterminer la longueur maximale du câble afin que la chute de tension simple entre les deux extrémités n'excède pas ΔV **= 2,9 V** *(valeur maximale admissible dans l'installation compte tenu des chutes de tension en amont).*

On négligera la contribution de la réactance du câble dans la chute de tension.

D.1.6. Exprimer la chute de tension simple ΔV en fonction de I_b, ρ, S et L, longueur du câble.

D.1.7. Pour des conducteurs de 1,5 mm^2 et une température de cuivre de 65°C, calculer alors la longueur maximale L permettant de ne pas dépasser la chute de tension qu'on s'est fixée.

D.1.8. Conclusion : le critère de choix de la section de câble doit-il être ici l'échauffement ou la chute de tension ? Justifier.

D.2. qualité de l'énergie électrique distribuée au puits L4

*La **figure 5** récapitule les départs de puissance sur le jeu de barres de l'armoire électrique du puits L4.*

L'équipement demandant la plus grande puissance et produisant le plus d'harmoniques de courant est de loin le variateur.

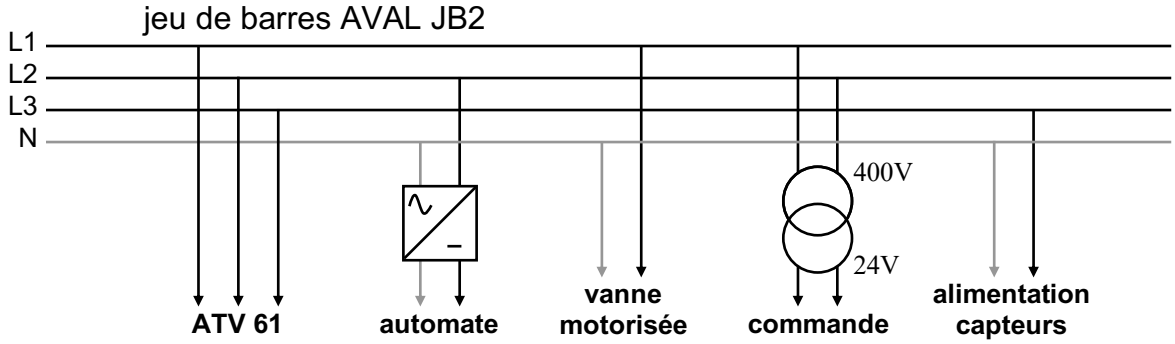
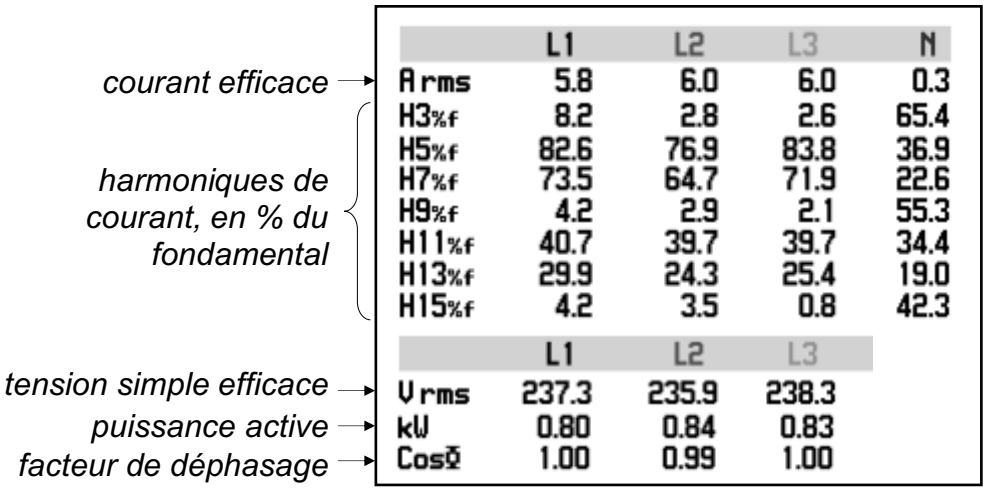


figure 5 : départs de puissance

Des mesures de tension, de courant et de puissance ont été réalisées sur les trois phases (et le neutre en ce qui concerne le courant) en amont du jeu de barres.
*Les résultats de ces mesures sont présentés **figure 6**.*

On précise que les tensions sont parfaitement sinusoïdales (ou considérées comme telles).



	L1	L2	L3	N
Arms	5.8	6.0	6.0	0.3
H3%f	8.2	2.8	2.6	65.4
H5%f	82.6	76.9	83.8	36.9
H7%f	73.5	64.7	71.9	22.6
H9%f	4.2	2.9	2.1	55.3
H11%f	40.7	39.7	39.7	34.4
H13%f	29.9	24.3	25.4	19.0
H15%f	4.2	3.5	0.8	42.3
	L1	L2	L3	
Vrms	237.3	235.9	238.3	
kW	0.80	0.84	0.83	
Cosφ	1.00	0.99	1.00	

figure 6 : mesures effectuées à l'analyseur de réseau

D.2.1. A l'aide du schéma du variateur figurant sur le *document-réponse B.2*, comment peut-on expliquer la présence des harmoniques de courant ? Pourquoi les harmoniques de rang multiple de 3 sont-ils d'amplitude très faible ?

D.2.2. Pourquoi le conducteur de neutre est-il nécessaire dans cette installation ? Quelle est l'origine du courant dans ce conducteur ?

D.2.3. Pour chacune des trois phases, calculer :

D.2.3.1. la puissance réactive,

D.2.3.2. la puissance déformante,

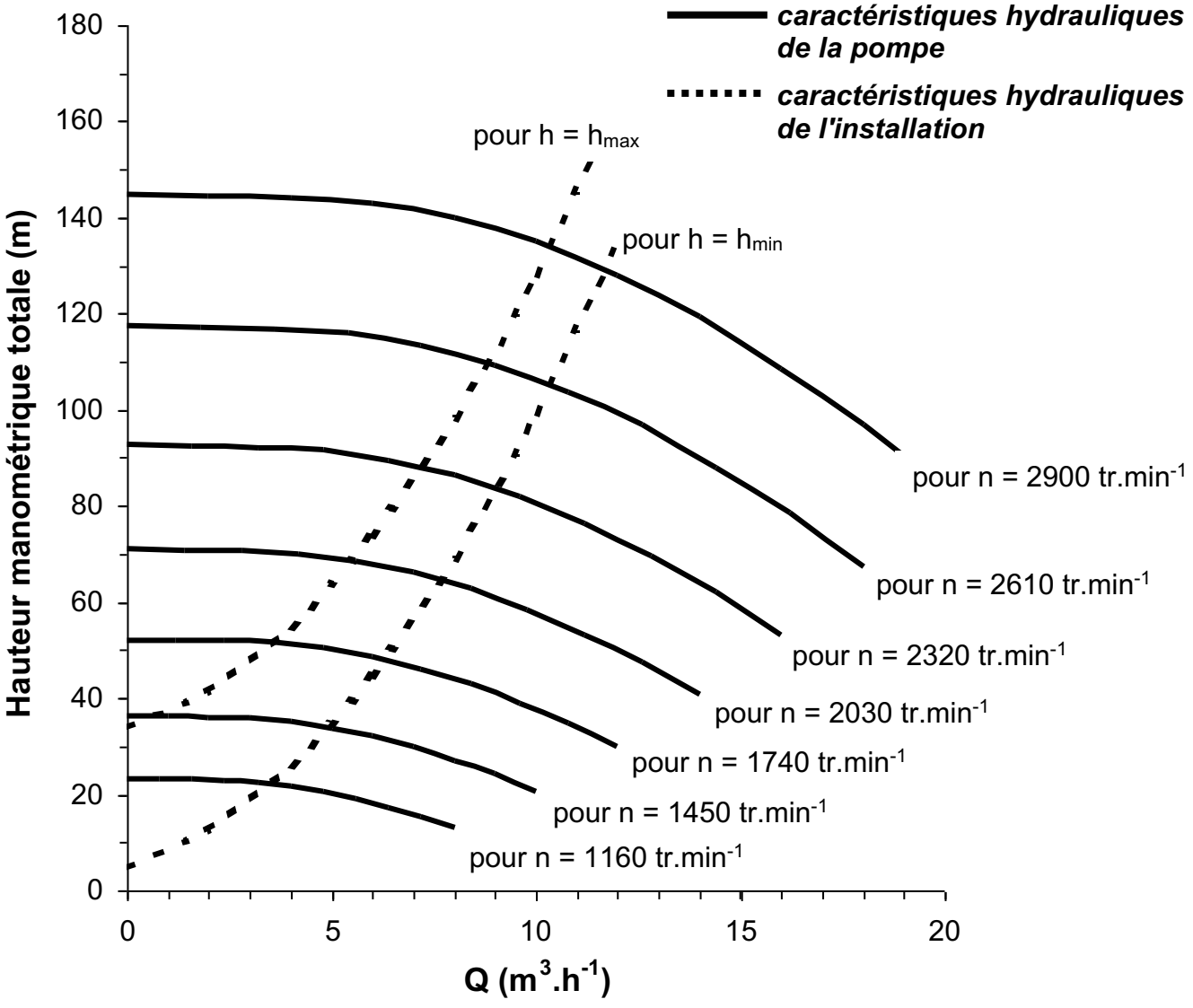
D.2.3.3. le facteur de puissance.

D.2.4. Proposer une solution pour réduire la valeur efficace du courant de ligne en amont du jeu de barres AVAL JB2.

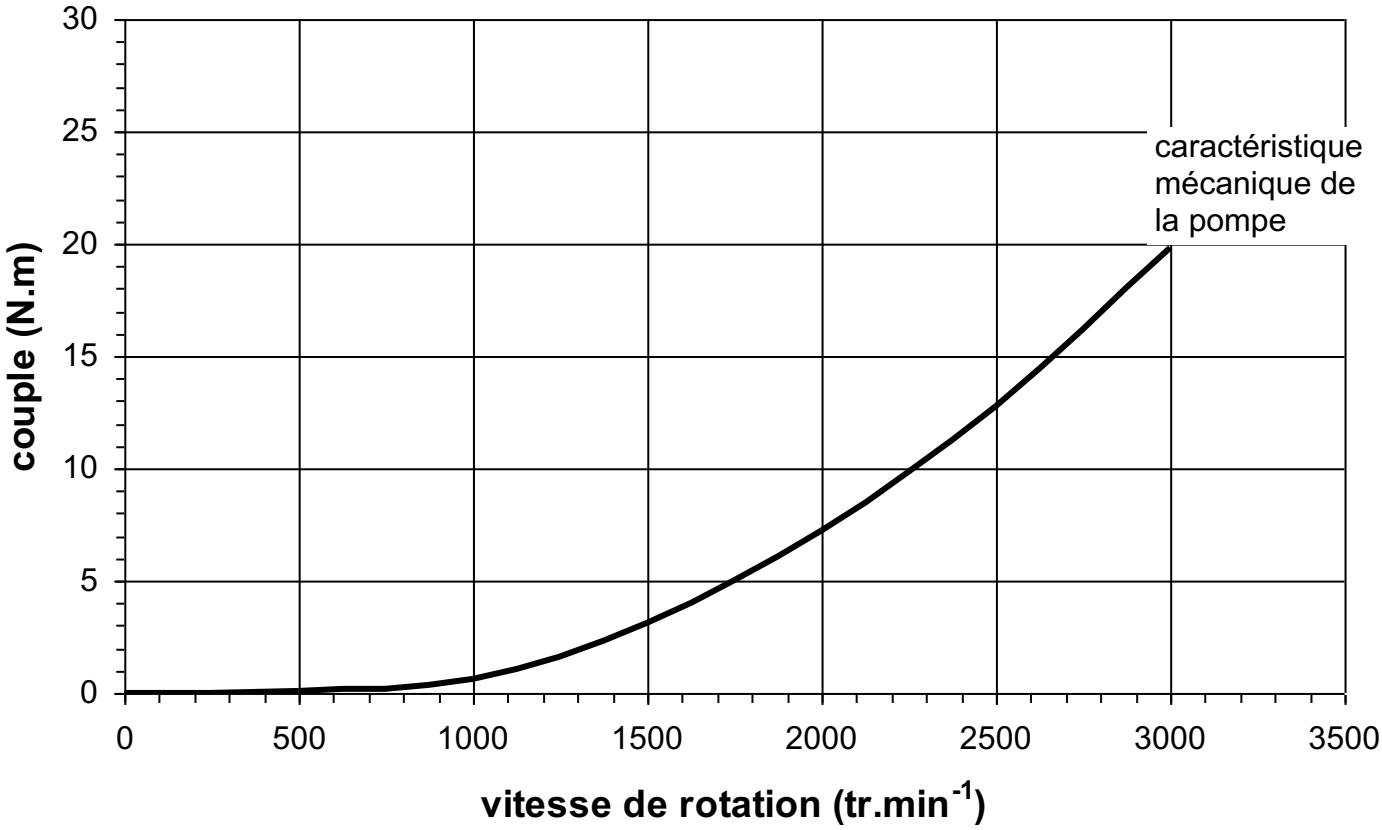
document-réponse A.1

	$Q = Q_{min} = 4\ m^3/h$	$Q = Q_{max} = 10\ m^3/h$
$h = h_{min} =$	$H_{pompe} =$ $P_{hydrau} =$	$H_{pompe} =$ $P_{hydrau} =$
$h = h_{max} =$	$H_{pompe} =$ $P_{hydrau} =$	$H_{pompe} =$ $P_{hydrau} =$

document-réponse A.2



document-réponse B.1



document-réponse B.2

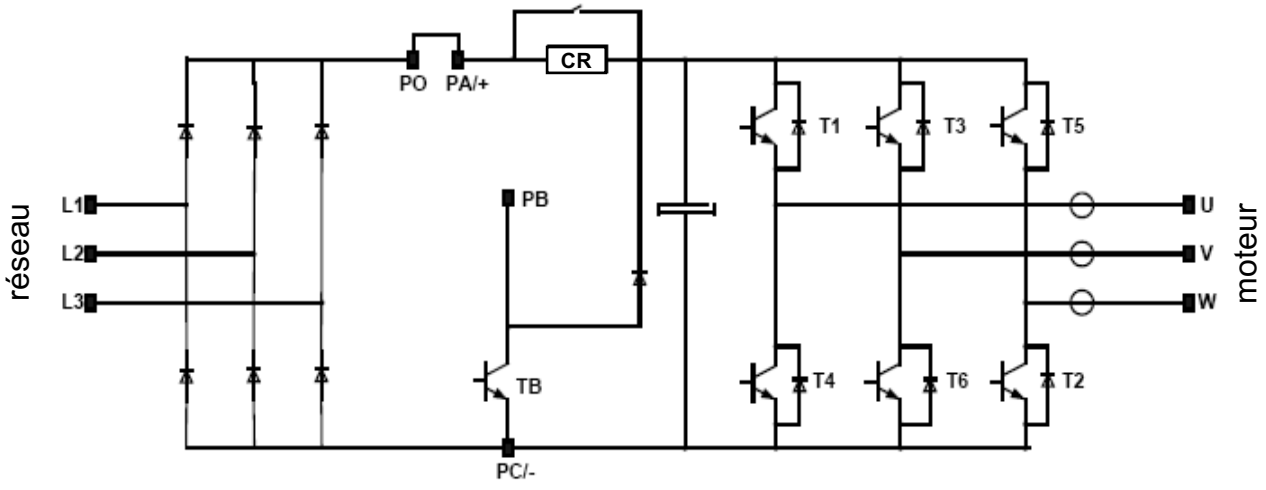
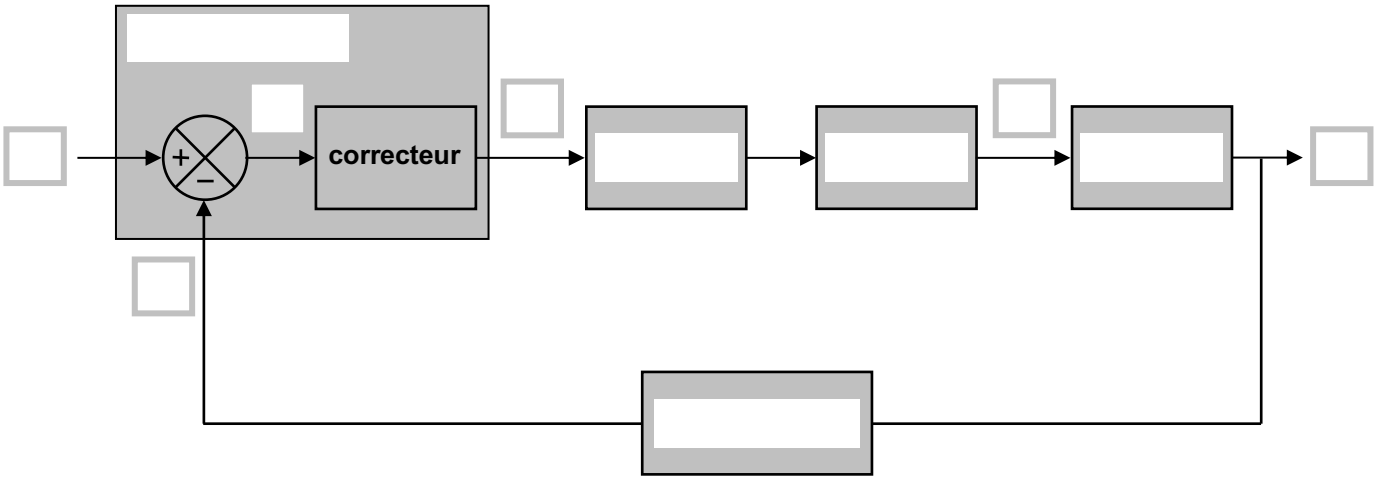


schéma de puissance du variateur ATV 61 donné par le constructeur

document-réponse C.1



document-réponse C.2

