

SESSION 2023

**AGREGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR
ET INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE**

**ÉTUDE D'UN SYSTÈME, D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE
ORGANISATION**

Durée : 4 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire.

Tournez la page S.V.P.

A

Ce sujet se décompose de la façon suivante :

- Texte du sujet, pages 2 à 27 ;
- Documents techniques DT1 à DT11, pages 28 à 39 ;
- Documents réponses DR1 à DR6, pages 40 à 45, à rendre avec la copie.

Il est demandé aux candidats :

- de rédiger les réponses aux différentes parties sur des feuilles de copie séparées et clairement repérées ;
- de numéroter chaque feuille de copie et indiquer le numéro de la question traitée ;
- d'utiliser exclusivement les notations indiquées dans le sujet lors de la rédaction des réponses ;
- de justifier clairement les réponses ;
- d'encadrer ou souligner les résultats ;
- de présenter lisiblement les applications numériques, sans omettre les unités, après avoir explicité les expressions littérales des calculs ;
- de formuler les hypothèses nécessaires à la résolution des problèmes posés si celles-ci ne sont pas indiquées dans le sujet.

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

| Concours | Section/option | Epreuve | Matière |
|----------|----------------|---------|---------|
| EAI | 1415A | 102 | 7048 |

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

| Concours | Section/option | Epreuve | Matière |
|----------|----------------|---------|---------|
| EAH | 1415A | 102 | 7048 |

Station d'épuration pour les petites collectivités

Présentation de la station d'épuration

Le support de cette étude est une station d'épuration adaptée aux petites collectivités. Si pour les grandes collectivités, le premier équipement en station d'épuration est dans la plupart des cas réalisé, ce n'est pas nécessairement le cas de nombreux villages.

La communauté d'agglomération Beaune Côte et Sud (CABCS) a projeté de construire une nouvelle station d'épuration sur la commune de Sainte-Marie La Blanche en remplacement de l'actuelle devenue obsolète. Le projet consiste en la construction d'une station d'épuration de type boues activées avec traitement des boues par épaissement pour une capacité nominale de traitement en pointe de 1 930 EH¹ à l'horizon 2040.

Au démarrage de la station, la charge effectivement raccordée atteindra une capacité de 960 EH.

Fonctionnement d'une station d'épuration classique à boues activées

Une station d'épuration est installée généralement à l'extrémité d'un réseau de collecte, juste en amont de la sortie des eaux vers le milieu naturel. Elle rassemble une succession de dispositifs, empruntés tour à tour par les eaux usées. Chaque dispositif est conçu pour extraire au fur et à mesure les différents polluants contenus dans les eaux. Le diagramme simplifié des cas d'utilisations figure 1 montre également que les eaux pluviales sont collectées et traitées.

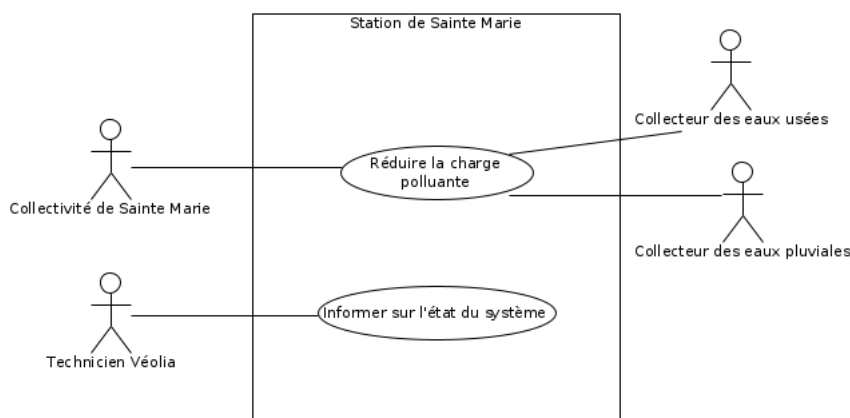


figure 1. Diagramme simplifié des cas d'utilisations

Le traitement ou l'épuration des eaux usées a donc pour objectif de réduire la charge polluante qu'elles véhiculent afin de rendre au milieu aquatique une eau de qualité, respectueuse des équilibres naturels et de ses usages futurs (pêche, loisir, alimentation, utilisation agricole ou industrielle, etc.).

¹ Équivalent Habitant (EH) : il exprime la charge polluante contenue dans 180 litres d'eau usée c'est-à-dire la production d'un habitant et pour un jour.

La figure 2 présente le schéma de fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées classique. La figure 3 montre l'implantation réelle de la station étudiée.



figure 2. Station d'épuration à boues activées (source ADEME)

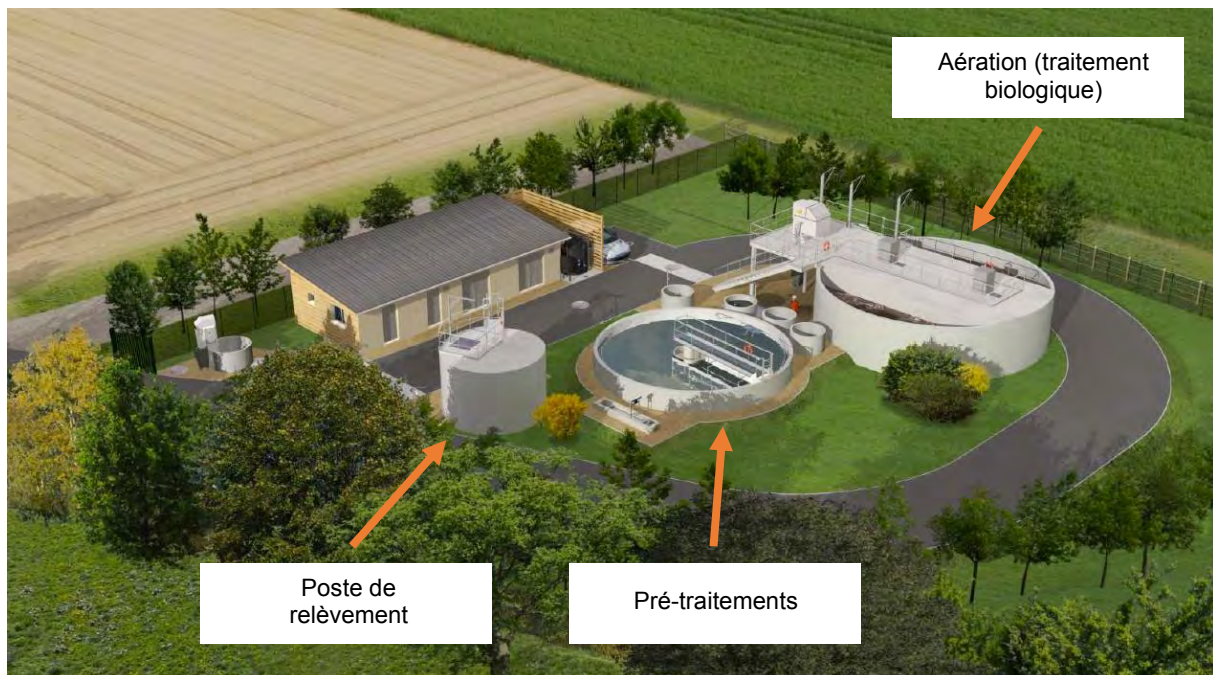


figure 3. Implantation du site

Les traitements dans une station d'épuration

Deux phases sont nécessaires pour le fonctionnement de la station d'épuration :

- les prétraitements consistent en un traitement physique des effluents afin de protéger les organes électromécaniques et les ouvrages situés en aval. Ils se composent de trois étapes distinctes installées en série : un dégrillage, un dessablage et un dégraissage qui fournissent chacun un sous-produit spécifique appelé refus de dégrillage, sables et graisses. Le procédé est basé uniquement sur le tamisage fin des eaux usées brutes (séparation solide/liquide) ;
- les traitements biologiques (azote, phosphore) réalisent l'épuration biologique des eaux et provoquent le développement d'une culture bactérienne libre. Elle prend la forme de flocons dans un bassin brassé, aéré et alimenté en eau à épurer. L'aération réalisée à partir de l'oxygène de l'air a pour but de dissoudre cet oxygène dans l'eau et de répondre ainsi aux besoins des bactéries épuratrices aérobies (terme qui s'applique à un organisme vivant qui a besoin d'oxygène pour vivre). La figure 4 résume le traitement.

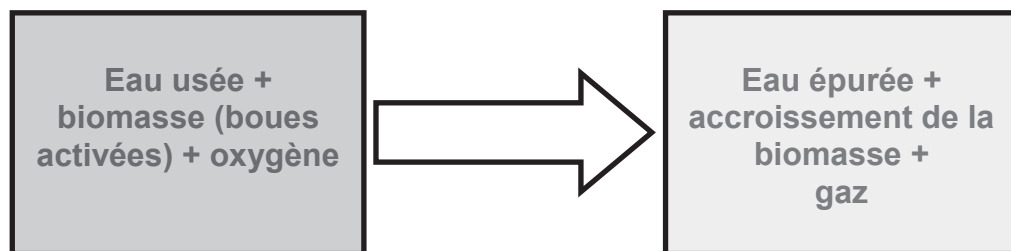


figure 4. Transformations des éléments après les traitements

Ce système est une reconstitution "industrielle" du phénomène d'autoépuration naturelle. Elle en diffère par une plus grande vitesse de réaction due à une forte concentration en micro-organisme.

Les boues activées constituent la référence des traitements biologiques aérobies en cultures libres. Une concentration déterminée de bactéries est maintenue (l'âge de la boue est fixé) grâce à la recirculation des boues (figure 5). Elles sont séparées de l'eau traitée par décantation dans le clarificateur, puis réintroduites dans les bassins de traitement c'est-à-dire, dans le cas le plus simple, le bassin d'aération. L'aération est assurée mécaniquement, soit par des aérateurs de surface, soit par insufflation d'air. Les deux principes connaissent de nombreuses variantes. Les boues activées en aération prolongée sont capables d'assurer une excellente qualité d'effluents épurés.

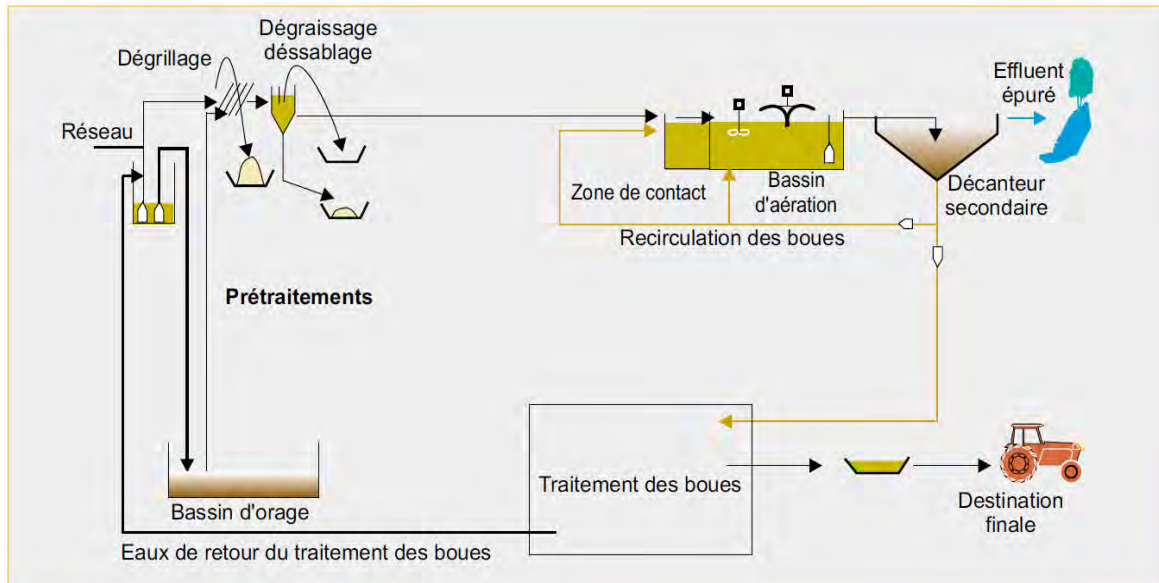


figure 5. Schéma de la filière à boues activées

Étude proposée

Pour garantir la qualité des eaux rejetées, il est impératif de s'assurer du bon déroulement du procédé d'épuration biologique de la station ; ceci implique en premier lieu un dimensionnement correct du processus d'aération et un suivi des différents paramètres physico-chimiques. Ce suivi est mis en place à l'aide d'une supervision qui permet in-situ le contrôle de la station et la transmission de données à un opérateur de contrôle extérieur. Il s'agit donc également de sécuriser ces données pour prévenir toute malveillance et par souci de protection des brevets et des méthodes industrielles développées propres à chaque entreprise.

L'étude est décomposée en cinq parties :

- Partie A : Vérification du dimensionnement hydraulique de la station
- Partie B : Étude de l'apport d'oxygène nécessaire au bassin d'aération
- Partie C : Recirculation des boues dans la station
- Partie D : Système de communication
- Partie E : Synthèse

Partie A : Vérification du dimensionnement hydraulique de la station

Objectifs :

- vérifier le dimensionnement du poste de relèvement permettant d'acheminer les eaux usées vers la station d'épuration ;
- valider les dimensions du bassin d'aération, cœur du système à boues activées.

Les performances attendues pour la station d'épuration en 2040 sont données sur la figure 6.

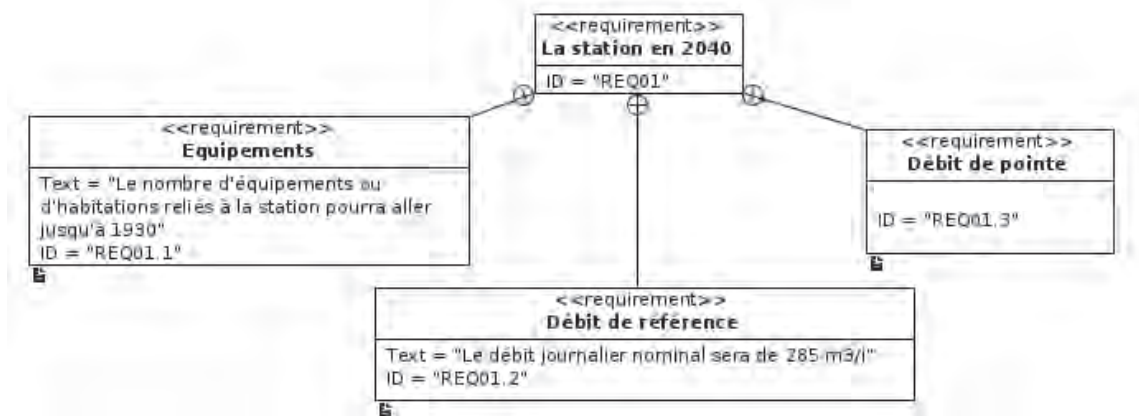


figure 6. Diagramme des exigences pour la station en 2040 (REQ01)

A-1 : Poste de relèvement des eaux

Le poste de relèvement est nécessaire quand la pente du terrain ne permet pas un écoulement des eaux usées par gravité dans tous les dispositifs de la station. Il est défini par un volume utile V_u également appelé volume de marnage. Ce volume est limité par le niveau Haut d'enclenchement de la pompe de relevage et le niveau Bas d'arrêt. La différence de niveau correspond à H_u (figure 7). La station étudiée possède 2 pompes de relèvement.

Les différents débits et notations utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

| | |
|---------------------------|---|
| Q_{pr} | débit unitaire par pompe : $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ |
| Q_{jn} | débit d'entrée journalier nominal en 2040 en $\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ (volume total d'effluents) |
| Q_{hn} | débit d'entrée horaire nominal en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ |
| $Q_{hn \text{ l.s}^{-1}}$ | débit d'entrée nominal en $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| Q_{po} | débit de pointe $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ |

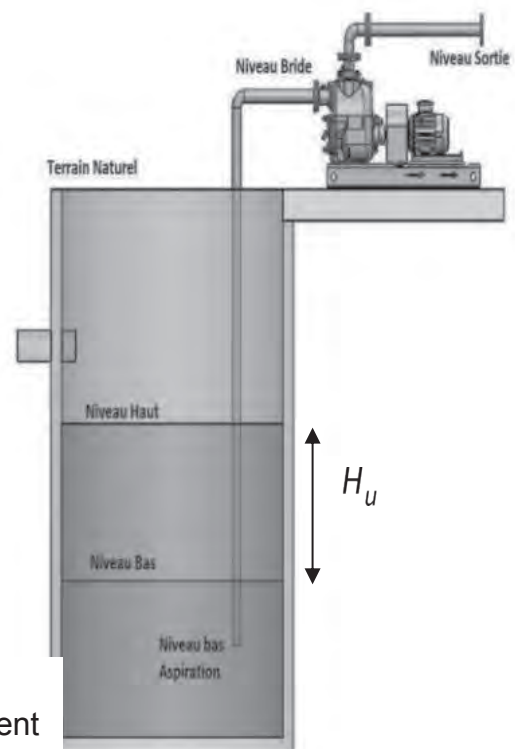


figure 7.
Poste de relèvement

L'expression du volume V_u (en m^3) est donnée par la relation préconisée par le fascicule 81 du bulletin officiel relatif à la construction d'installations de pompage :

$$V_u = \frac{Q_{po} \times \frac{1}{n}}{4 \times (N - 1)}$$

avec :

- n : nombre de démarrages par heure de la pompe ;
- N : nombre de pompes actives présentes.

Question 1

Exprimer Q_{hn} puis $Q_{hn \text{ l.s}^{-1}}$ en fonction de Q_{jn} .

Le débit de pointe est exprimé par $Q_{po} = C_p \cdot Q_{hn}$ avec C_p coefficient de pointe.

$$C_p = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{Q_{hn \text{ l.s}^{-1}}}}$$

Question 2

À partir du document technique DT1, calculer le coefficient de pointe C_p . En déduire le débit de pointe Q_{po} .

Question 3

À partir du document technique DT1, relever n et N et calculer alors V_u . Sachant que le poste de relevage a un diamètre intérieur de 1,9 m déterminer alors la hauteur H_u minimale permettant de recevoir les eaux usées en débit de pointe. Conclure sur la capacité du poste à recevoir et relever les eaux usées.

A-2 : Bassin d'aération

Deux paramètres sont importants :

- la demande biochimique en oxygène (DBO) qui correspond à la quantité de dioxygène nécessaire aux micro-organismes aérobies de l'eau pour oxyder les matières organiques, dissoutes ou en suspension dans l'eau. Il s'agit donc d'une consommation potentielle de dioxygène par voie biologique. Ce paramètre constitue un bon indicateur de la teneur en matières organiques biodégradables d'une eau (en $kg \cdot j^{-1}$) ;
- les matières volatiles en suspension (MVS) qui représentent la fraction organique des matières en suspension dans le bassin d'aération en $g \cdot l^{-1}$.

Le bassin d'aération est le réacteur biologique dans lequel s'effectue la transformation de la matière organique par les micro-organismes aérobies. Pour que les bactéries nitrifiantes puissent se développer et se maintenir dans la biomasse, il est nécessaire de travailler à faible charge de manière à assurer un accroissement de la masse des bactéries nitrifiantes. Cette charge s'exprime par le paramètre C_m , charge massique en kg de DBO par kg journalier de MVS.

Le volume du bassin d'aération V_{ba} doit donc être suffisant pour permettre une charge de matière peu élevée.

Il est donné par la formule : $V_{ba} = \frac{DBO}{C_m \times MVS}$

DBO en $\text{kg}\cdot\text{j}^{-1}$, C_m en $\text{kg (DBO)}\cdot\text{kg}^{-1} (\text{MVS})\cdot\text{j}^{-1}$ et MVS en $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, V_{ba} en m^3 .

Question 4

En utilisant les équations aux dimensions, vérifier l'homogénéité de la formule exprimant V_{ba} .

Question 5

À l'aide du document technique DT2, calculer le volume V_{ba} et le comparer au volume calculé prévu par le génie civil permettant de respecter la charge massique. Conclure sur le dimensionnement du bassin permettant de respecter la charge massique.

Partie B : Étude de l'apport d'oxygène nécessaire au bassin d'aération

Objectif : déterminer l'apport nécessaire en oxygène permettant une épuration biologique répondant aux normes de rejets et s'assurer que le procédé d'aération choisi est correctement dimensionné.

Question 6

À partir des données biochimiques du DT1, compléter la notice de calcul jointe sur le document réponse DR1 et déterminer la demande horaire en oxygène pour assurer le bon fonctionnement de l'épuration (en $\text{kg O}_2\cdot\text{h}^{-1}$).

L'apport d'oxygène est réalisé à l'aide de deux turbines d'aération présentées figure 8 et 9. La durée de l'aération est de 14 heures par jour. L'apport spécifique brut des turbines est de 1,7 kg de O_2 par kWh.

Question 7

Calculer la puissance électrique du moteur asynchrone associé à la turbine sachant que l'aération utilisera deux turbines et qu'une seule turbine doit être capable de fournir 70 % de la demande (notamment en cas de maintenance).



figure 8. Turbine



figure 9. Moto-réducteur

Les caractéristiques du moteur qui entraîne la turbine sont données dans le document technique DT3. Le modèle équivalent simplifié du moteur asynchrone à cage pour une phase est donné figure 10. Le moteur est couplé en étoile au réseau 230/400 V.

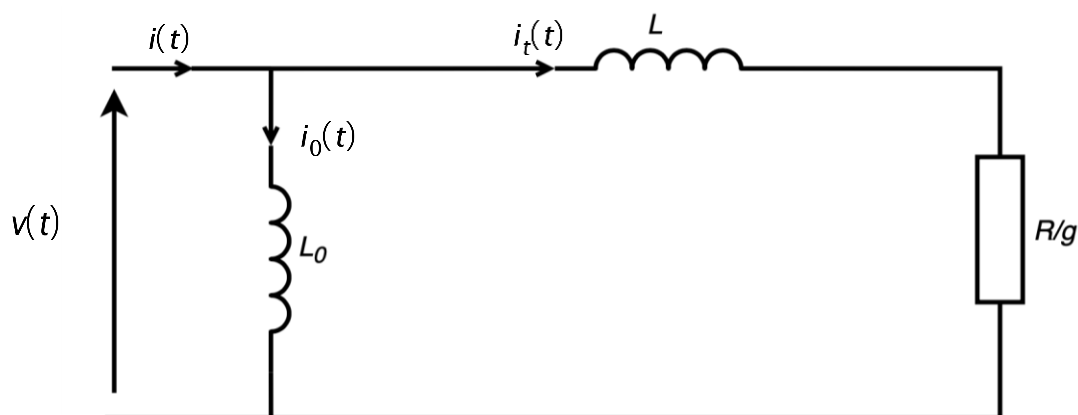


figure 10. Modèle équivalent du moteur asynchrone pour une phase

La tension $v(t)$ sera prise comme référence de phase $v(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$. φ exprime le déphasage de $i(t)$ par rapport à $v(t)$ et V est la tension simple efficace du réseau. $V = 230 \text{ V}$ et $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ avec $f = 50 \text{ Hz}$.

Question 8

Indiquer ce que représentent les différents éléments du modèle équivalent présenté figure 10. Tracer le diagramme de Fresnel associé à $v(t)$, $i(t)$, $i_0(t)$, $i_t(t)$ et donner l'expression de I (valeur efficace de $i(t)$) en fonction des valeurs efficaces I_0 et I_t .

Question 9

En déduire l'expression de I_t en fonction de I , I_0 , $\cos(\varphi)$, $\sin(\varphi)$ et calculer sa valeur numérique.

Question 10

Les pertes mécaniques dans le moteur sont négligées.

À l'aide du schéma équivalent par phase du moteur, exprimer puis calculer les éléments R , L et L_0 en fonction de P_a (puissance absorbée), g (glissement), I_0 , I et I_t .

Question 11

En considérant la valeur de g au démarrage, exprimer le déphasage de $i_t(t)$ nommé φ_t en fonction de $L \cdot \omega$ et R .

Montrer alors qu'il est possible de simplifier le schéma équivalent au démarrage en négligeant R et en déduire la valeur de l'inductance équivalente L_{eq} .

Question 12

En déduire le courant de démarrage théorique du moteur.

Expérimentalement, le courant de démarrage absorbé par un motoréducteur est de 119 A.

Question 13

Citer un inconvénient que peut engendrer le démarrage direct d'une turbine.

Afin de limiter le courant de démarrage, un démarreur progressif Altistart 22 de marque Schneider Electric est installé. Le circuit de puissance est basé sur un gradateur triphasé (figure 11).

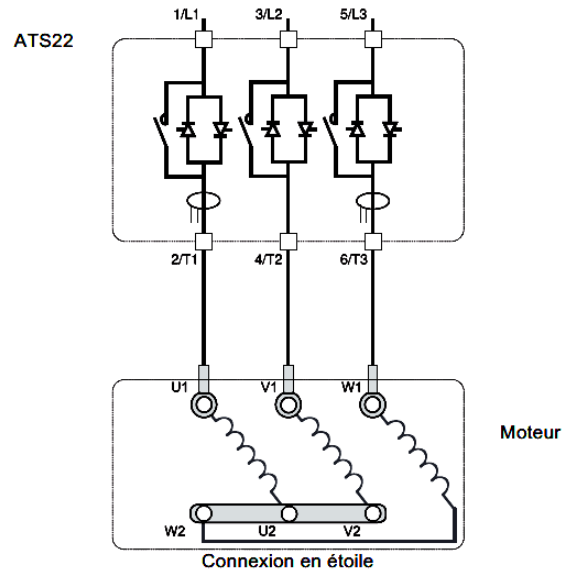


figure 11 . Circuit de puissance du gradateur

Le modèle pour une phase est donné figure 12.

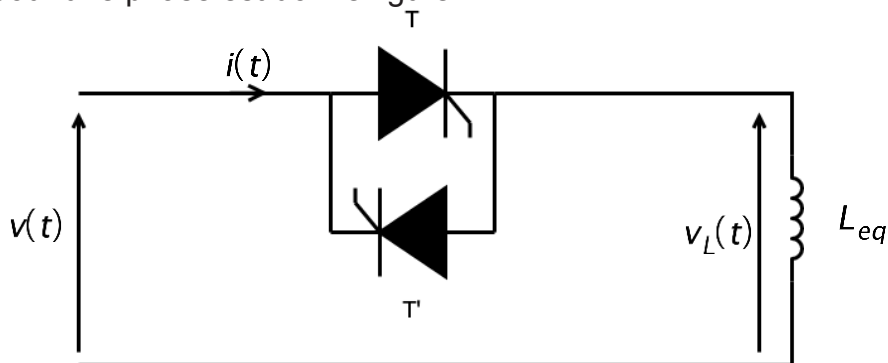


figure 12. Schéma du gradateur pour un enroulement

$v(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$ et α est l'angle de retard à l'amorçage de l'ensemble T et T' par rapport à la tension de chaque enroulement.
 $V = 230 \text{ V}$ et $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ avec $f = 50 \text{ Hz}$.

Question 14

Écrire puis résoudre l'équation différentielle de $i(t)$ lorsque T est passant en considérant qu'à l'instant $t = \frac{\alpha}{\omega}$ la valeur de $i(t)$ est $i\left(\frac{\alpha}{\omega}\right) = 0$.

Question 15

Tracer l'allure de la tension $v_L(t)$ et du courant $i(t)$ sur le document réponse DR2 pour un angle α de $\frac{2\pi}{3}$. Déterminer alors la limite de α pour un fonctionnement en gradateur.

Question 16

Exprimer la valeur efficace I_{eff} du courant i en fonction de V , α et L_{eq} . Pour $\alpha = \frac{3\pi}{4}$, calculer la valeur efficace de l'intensité au démarrage. Conclure.

Partie C : Recirculation des boues dans la station

Objectif : étudier deux solutions technologiques permettant de faire varier le débit de recirculation des boues (par commande de vanne ou pompe à débit variable).

La recirculation des boues

La recirculation des boues du clarificateur est nécessaire pour :

- maintenir une concentration de la biomasse suffisante dans le réacteur biologique en y ramenant des boues plus concentrées ;
- optimiser le temps de séjour des boues dans le clarificateur ;
- gérer la hauteur du lit de boues présent dans le clarificateur afin de ne pas gêner la clarification libre des matières en suspension (MES), minimisant ainsi les fuites en MES dans l'effluent rejeté.

Dans un premier temps il est envisagé une régulation du débit massique des boues. Le principe de la régulation mise en place est représenté par la figure 13.

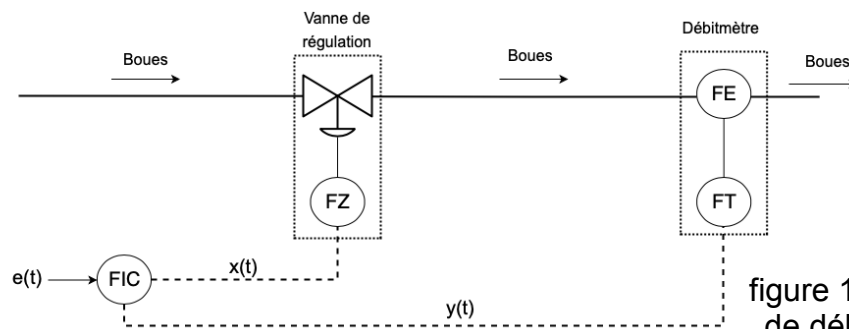


figure 13. Régulation de débit par vanne

FIC : régulateur indicateur de débit
 FT : transmetteur de débit
 FZ : commande actionneur vanne
 FE : élément primaire de débit
 e(t) : tension de consigne
 x(t) : tension de commande
 y(t) : tension en sortie du débitmètre

Un extrait du diagramme d'exigences de la régulation de débit par vanne est donné figure 14.

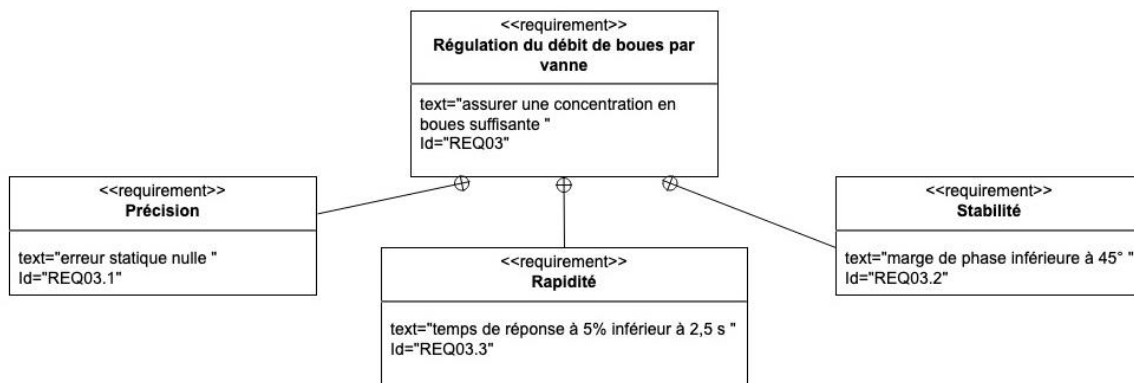


figure 14. Diagramme des exigences pour la régulation de débit par vanne

Un essai indiciel (réponse à un échelon unitaire de $x(t)$) a permis d'enregistrer la réponse de $y(t)$ donnée sur le document réponse DR3 (1/2).

L'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte $F(p)$ est de la forme :

$$F(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K_{BO}}{1 + \tau \cdot p} \cdot e^{-T_r \cdot p}$$

avec $X(p)$ et $Y(p)$ les transformées de Laplace respectives de $x(t)$ et $y(t)$.

Question 17

À partir du tracé du document réponse DR3 (1/2) justifier la modélisation proposée de $F(p)$ et déterminer à l'aide de constructions graphiques adéquates les valeurs numériques de K_{BO} , τ et T_r .

Question 18

Indiquer l'élément de cette régulation responsable du retard pur T_r .

Afin d'améliorer la rapidité du système, une correction proportionnelle est mise en œuvre en introduisant un correcteur $C(p)$ de gain K_p ($C(p) = K_p$) conformément à la figure 15.

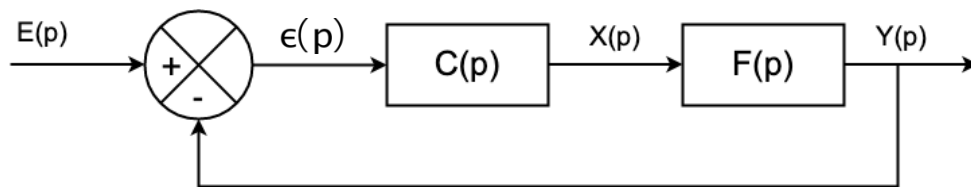


figure 15. Schéma bloc de la régulation de débit

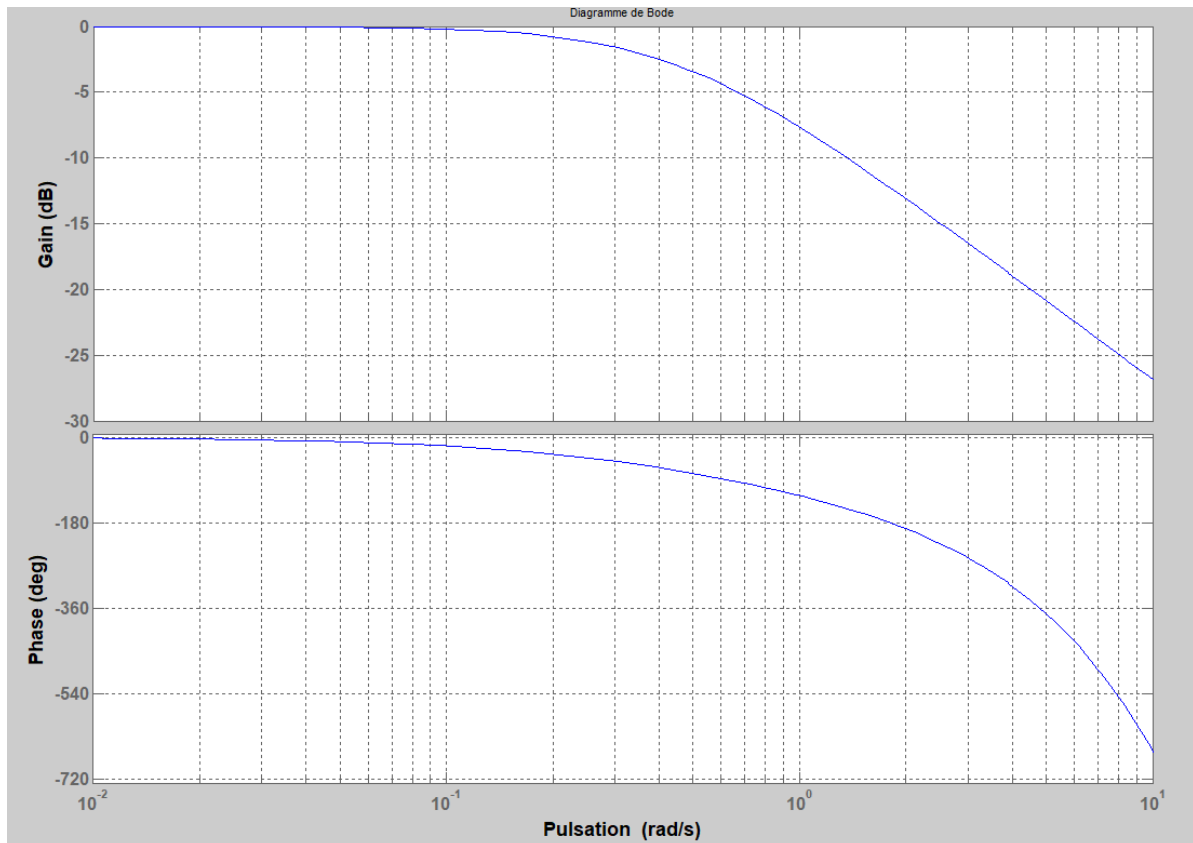


figure 16. Diagramme de Bode (gain et phase) du système corrigé en boucle ouverte

Le diagramme de Bode en boucle ouverte du système pour $K_p = 1$, de fonction de transfert notée $F_1(p) = C(p) \cdot F(p)$, est donné en figure 16.

Question 19

Déterminer la valeur du gain K_p permettant de respecter le critère de stabilité.

La réponse indicielle du système ainsi corrigé en boucle fermée est donnée figure 17.

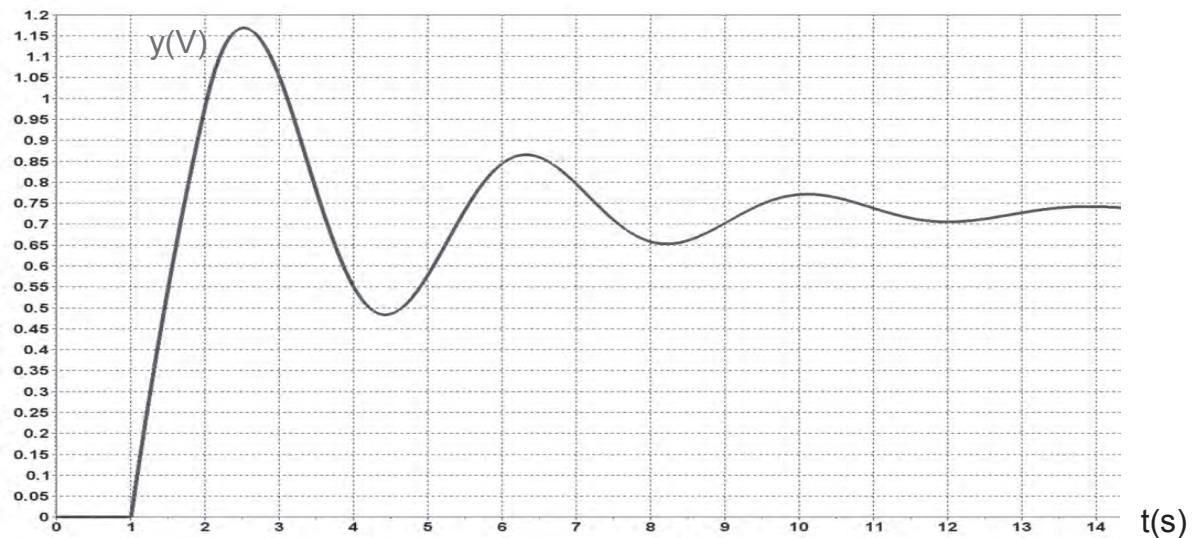


figure 17. Réponse indicielle de l'asservissement avec un correcteur proportionnel de gain K_p

Question 20

Expliquer pourquoi ce type de correcteur ne permet pas de répondre aux exigences de l'asservissement étudié.

Un nouveau correcteur de fonction de transfert $C(p) = K_i \cdot \frac{1 + T_i \cdot p}{T_i \cdot p}$ est implanté.

Question 21

Définir le nom de ce correcteur et justifier l'intérêt de ce choix. Déterminer l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte, notée $F_2(p)$, avec ce nouveau correcteur. Proposer une valeur pertinente de T_i permettant d'obtenir une fonction de transfert d'ordre 1 avec un retard pur pour $F_2(p)$.

La réponse indicielle du système ainsi corrigé est présentée sur le document réponse DR3 (2/2).

Question 22

Évaluer à partir de constructions graphiques adéquates sur le document réponse DR3 (2/2), le temps de réponse ainsi que l'erreur statique du système corrigé. Conclure quant au respect du cahier des charges.

L'autre choix possible est d'équiper le puit à boues de deux pompes (dont une de secours) pour la recirculation des boues vers la zone de contact et le bassin d'aération. Les pompes sont équipées de variateurs de vitesse afin de pouvoir moduler et adapter le débit de recirculation par rapport au débit entrant sur la station (figure 18).



figure 18. Poste de recirculation

La zone de contact

Le principe de la zone de contact consiste à mélanger une partie des boues de recirculation (30 % soit environ $34 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) avec la totalité des eaux prétraitées dans un ouvrage de faible volume située à l'amont du réacteur biologique. Ce mode d'alimentation accroît artificiellement la teneur en substrat disponible pour les micro-organismes. Ce procédé limite l'éventuelle formation de bactéries filamenteuses pouvant entraver la décantation des boues et donc le bon fonctionnement de la station.

La masse volumique des boues de recirculation est notée ρ_{b_I} , Δp représente la pression nécessaire à la recirculation des boues et g l'accélération de la pesanteur.

Question 23

Exprimer la hauteur manométrique h_{MT} de la pompe en fonction de ρ_{b_I} , Δp et g . ρ_{b_I} est estimée à $1005 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et la pression préconisée est $\Delta p = 0,4 \text{ bars}$. Calculer la hauteur h_{MT} maximale et choisir la pompe nécessaire à la recirculation à l'aide du document technique DT4 (alimentation triphasée 400 V).

Des variateurs de vitesse alimentent les pompes de recirculation. Ces variateurs doivent être choisis pour répondre à différents critères sur la pollution harmonique. La structure interne de la partie puissance des variateurs est donnée figure 19.

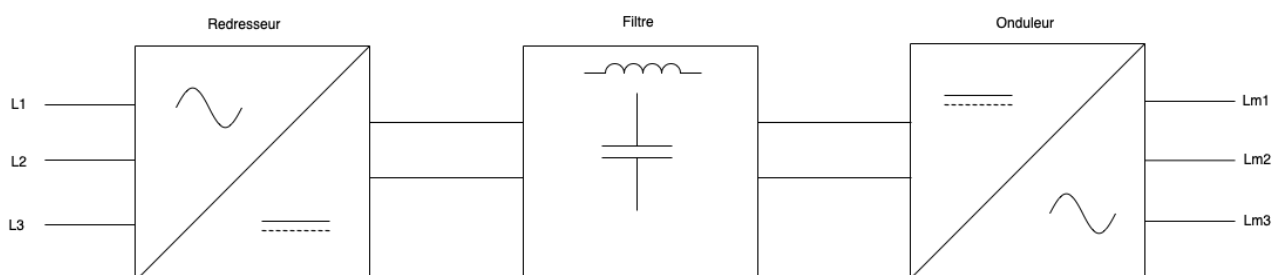


figure 19. Structure interne de la partie puissance du variateur

Le schéma simplifié du redresseur en entrée du variateur est donné figure 20. L est l'inductance additionnelle livrée avec le variateur et $L_{rés}$ l'inductance du réseau amont. L'inductance $L + L_{rés}$ est supposée suffisamment élevée pour considérer l'ondulation de $i_{red}(t)$ négligeable. La tension composée entre les phases 1 et 2 s'exprime par $u_{12}(t) = 400 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$.

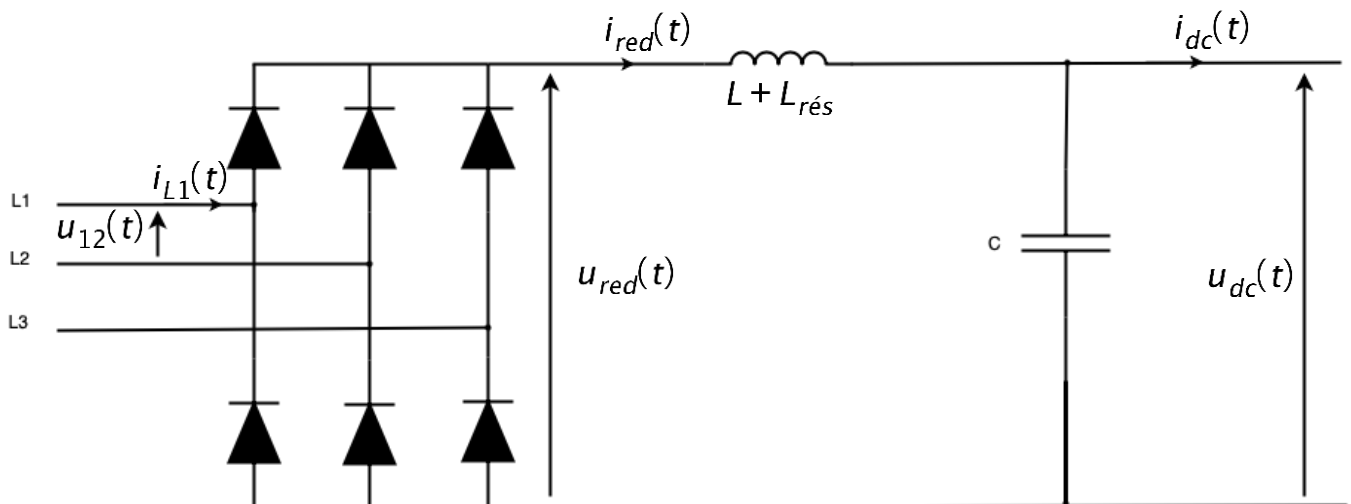


figure 20. Ensemble redresseur en entrée du variateur

Question 24

Tracer sur le document réponse DR4 les formes de signaux de $u_{red}(t)$ et $i_{L1}(t)$. Déterminer U_{red} , la valeur moyenne de la tension $u_{red}(t)$ et I_{L1max} , la valeur maximale du courant $i_{L1}(t)$ sachant que la puissance $P_{cont} = U_{DC} \cdot I_{DC}$ sera estimée à 1,5 kW. (u_{dc} et i_{dc} sont considérés sensiblement égaux à leurs valeurs moyennes soit $u_{dc} \approx U_{dc}$ et $i_{dc} \approx I_{dc}$).

La décomposition en série de Fourier du signal figure 21 peut être exprimée par :

$$i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{4 \cdot I}{(2k+1) \cdot \pi} \cdot \cos((2k+1) \cdot \alpha) \cdot \sin((2k+1) \cdot \omega \cdot t)$$

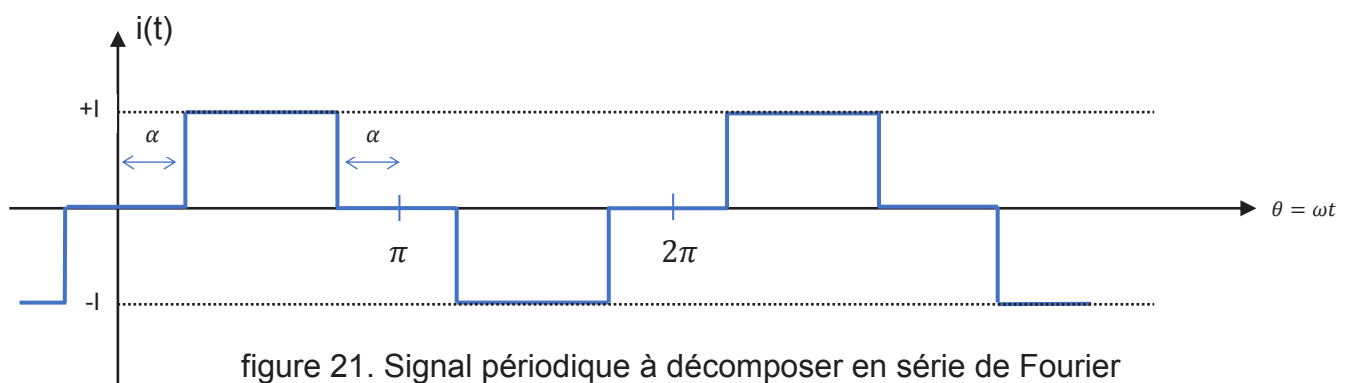


figure 21. Signal périodique à décomposer en série de Fourier

Question 25

Déterminer les valeurs efficaces du fondamental et des harmoniques du courant $i_{L1}(t)$ jusqu'à $k=4$ et compléter le tableau document réponse DR5 (1/2) (le fondamental I_1 est obtenu pour $k=0$).

Le THD_i (Total Harmonic Distorsion) du courant est défini par : $THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$
et I_{L1RMS} est la valeur efficace du courant en ligne i_{L1} .

Question 26

Donner l'expression du courant I_{L1RMS} en fonction des différents harmoniques I_n puis déterminer le THD_i en fonction de I_{L1RMS} et du fondamental I_1 .

En cas d'absence d'inductance L , la conduction du pont redresseur est discontinue. Compléter sur le document réponse DR5 (2/2) la forme du signal de $i_{red}(t)$ et $i_{L1}(t)$.

Deux références de variateur sont susceptibles de répondre au besoin de variation de débit des pompes à boues. Il convient de vérifier que ces variateurs respectent la norme CEI/IEC 61000-3-2 et génère un THD_i le plus faible possible.

La norme CEI/IEC 61000-3-2 fixe le niveau d'émission en BT des appareils consommant un courant d'intensité inférieure à 16 A et une puissance supérieure à 75 W.

Les pompes retenues ont une puissance de 1,3 kW et absorbent un courant par phase de 3,6 A sous 400 V avec un $\cos(\varphi) = 0,68$.

Afin de choisir le variateur le plus adapté, deux essais ont été effectués avec :

- un variateur ATV212 1,5 kW Schneider Electric ;
- un variateur FC301 1,5 kW Danfoss.

Ces essais ont permis de visualiser les signaux réels en ligne.

Question 27

À partir des deux essais disponibles dans le dossier technique DT5-1 et DT5-2, vérifier s'ils satisfont aux exigences de la norme donnée sur le document technique DT6. Déterminer pour chacun des variateurs le THD_i et citer les inconvénients d'un THD_i trop élevé.

En déduire le variateur le plus approprié au regard de la pollution harmonique.

Partie D : Système de communication

Objectifs :

- vérifier que la communication des données soit assurée pour récupérer les valeurs des capteurs et les traiter et assurer une supervision du système, y compris à distance ;
- valider les choix faits pour assurer la sécurité du réseau informatique et des données qui vont y circuler.

D-1 : Infrastructure du réseau

La préoccupation de tout exploitant ou maître d'ouvrage est fondée sur deux objectifs :

- optimiser les coûts d'exploitation ;
- préserver la qualité et la continuité du service.

L'évolution des techniques de traitement des eaux répond à cette préoccupation par des procédés sophistiqués ne nécessitant, grâce à une automatisation poussée, qu'un personnel d'exploitation réduit.

Il convient cependant de disposer, dans les délais les plus brefs, de toutes les informations permettant de juger de l'urgence et des moyens nécessaires au rétablissement rapide des conditions normales de fonctionnement.

Les exigences concernant cette partie sont présentées sur la figure 22.

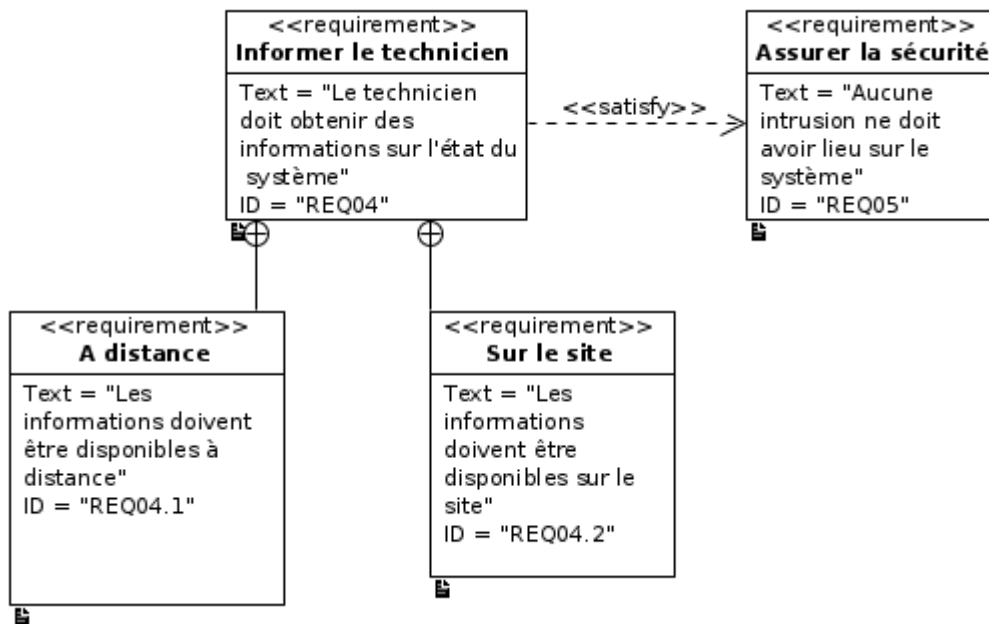


figure 22. Diagramme des exigences de la communication réseau

Pour répondre à ces exigences, la gamme de matériels de télésurveillance est spécifiquement adaptée au domaine de l'eau.

La télégestion est assurée par un équipement Sofrel S550, une centrale de mesure permet de connaître les données de consommation énergétiques, des pupitres sont

présents pour que les techniciens puissent contrôler le bon fonctionnement de l'ensemble. Un automate est chargé de récupérer les données venant des bassins ainsi que de piloter les actionneurs qui aèrent les boues.

L'ensemble est interconnecté par un commutateur Ethernet comme le montre la figure 23.

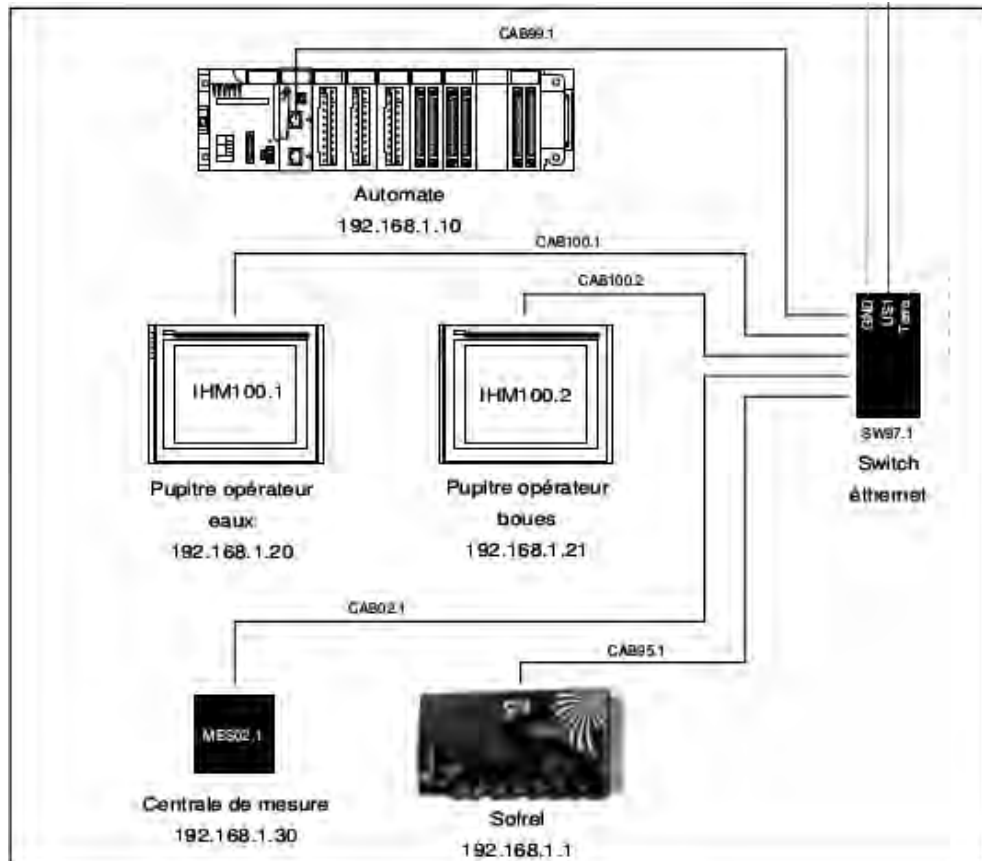


figure 23. Extrait de la topologie du réseau

Le Sofrel S550 est lui-même paramétré via un navigateur web, depuis un PC de supervision local (non présent sur la figure 23).

Le masque de sous réseau utilisé est 255.255.255.0

Question 28

Déterminer si les équipements présentés sur la figure 23 sont tous dans le même sous-réseau et l'adresse que pourrait avoir ce sous-réseau. Proposer un couple « adresse IP/masque de sous réseau » possible pour intégrer le poste de supervision à ce sous réseau.

Pour vérifier la bonne connexion du PC de supervision avec le Sofrel S550, une requête ping est effectuée depuis le PC vers l'adresse IP du Sofrel S550.

Une trame présente cet échange capturé par le logiciel wireshark en figure 24.

Frame 96: 98 bytes on wire (784 bits), 98 bytes captured (784 bits) on interface eth0, id 0

Ethernet II, Src: 80:c5:f2:05:de:f9, Dst: 00:0B:48:16:33:77

Destination: 00:0B:48:16:33:77

Source: 80:c5:f2:05:de:f9

Type: IPv4 (0x0800)

Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.1.2, Dst: 192.168.1.1

0100 = Version: 4

.... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)

Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)

Total Length: 84

Identification: 0x3109 (12553)

Flags: 0x4000, Don't fragment

Fragment offset: 0

Time to live: 64

Protocol: ICMP (1)

Header checksum: 0x8646 [validation disabled]

[Header checksum status: Unverified]

Source: 192.168.1.2

Destination: 192.168.1.1

Internet Control Message Protocol

Type: 8 (Echo (ping) request)

Code: 0

Checksum: 0x58f6 [correct]

[Checksum Status: Good]

Identifier (BE): 1 (0x0001)

Identifier (LE): 256 (0x0100)

Sequence number (BE): 5 (0x0005)

Sequence number (LE): 1280 (0x0500)

[Response frame: 97]

figure 24. Capture de trame sur le réseau Ethernet

Suite à cette requête, le PC reçoit une réponse de la part du destinataire ayant l'adresse IP 192.168.1.1.

Question 29

Définir ce que représente une adresse MAC. À l'aide de la trame proposée en figure 24, retrouver l'adresse MAC du destinataire.

En vous appuyant sur le document technique DT7, liste OUI-IEEE, expliquer pourquoi le destinataire est bien le Sofrel S550 puis conclure sur sa capacité à communiquer avec le PC.

La sécurité est essentielle pour le traitement de l'eau et le réseau informatique fait partie des composantes qui peuvent être améliorées.

La mise en place de VLAN est étudiée pour avoir :

- un sous-réseau administratif qui contiendra le PC de supervision local ;
- un sous-réseau technique qui contient les autres éléments nécessaires au pilotage de la station.

Ces VLANs seront configurés sur le commutateur, lui-même paramétrable depuis le VLAN administratif.

Question 30

Dans cette configuration, déterminer si le PC de supervision peut garder son adresse IP. Si nécessaire, proposer une nouvelle adresse IP et son masque associé le plus efficient possible pour ce sous-réseau administratif qui contiendra au maximum 10 éléments.

Question 31

Déterminer pourquoi le commutateur de niveau 2 n'est plus suffisant pour cette nouvelle organisation.

Suite à l'ajout d'un routeur, réaliser un schéma simplifié de la nouvelle topologie permettant une connexion sur le Sofrel S550 depuis le PC de supervision.

Comme le montre la figure 25, une surveillance à distance est possible grâce à un réseau GPRS privé de la société Véolia sur lequel est connecté le Sofrel S550 et qui est accessible depuis internet via un VPN (Réseau Privé Virtuel). L'ensemble est en IPV4.

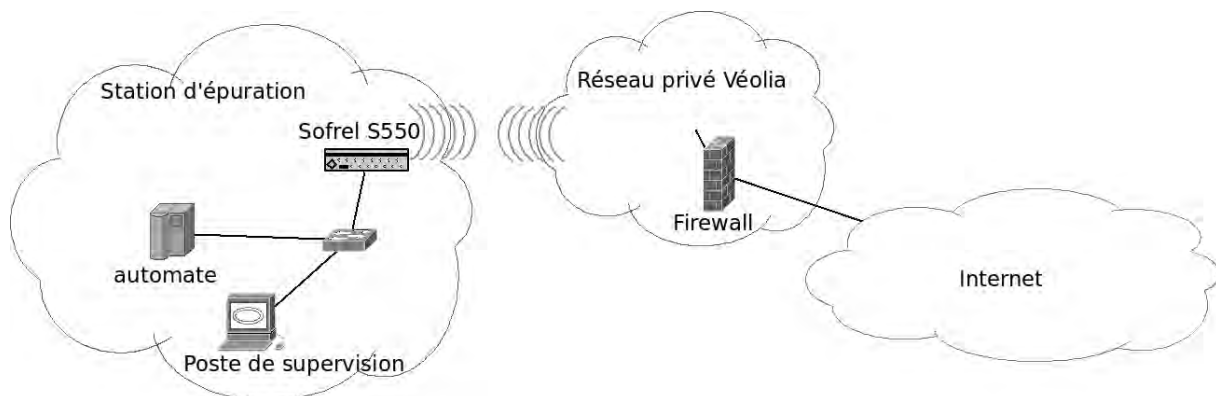


figure 25. Topologie du réseau avec accès distant

Question 32

Sachant que le firewall utilisé en entrée du VPN permet l'accès à plusieurs serveurs, déterminer comment permettre une connexion au Sofrel S550 de la station de Sainte Marie via une URL publique. Montrer que l'adresse IP utilisée par le firewall pour se connecter au Sofrel S550 doit être différente de celle utilisée par le PC de supervision.

Le protocole utilisé pour réaliser le VPN est IPSEC ; sa description est présentée dans le document technique DT8.

Question 33

Rappeler le rôle d'un VPN puis donner l'intérêt d'en utiliser un pour se connecter au superviseur de la station.

Question 34

D'après la documentation de IPSEC (DT8), déterminer le meilleur choix possible entre le mode transport et le mode tunnel pour sécuriser de la façon la plus fiable possible les échanges.

Question 35

Conclure sur la partie infrastructure réseau et sur des failles potentielles qui pourraient subsister.

D-2 : Gestion des données

Dans cette partie, l'objectif est de vérifier que le potentiel redox est correctement assuré et conforme au diagramme des exigences présenté en figure 26.

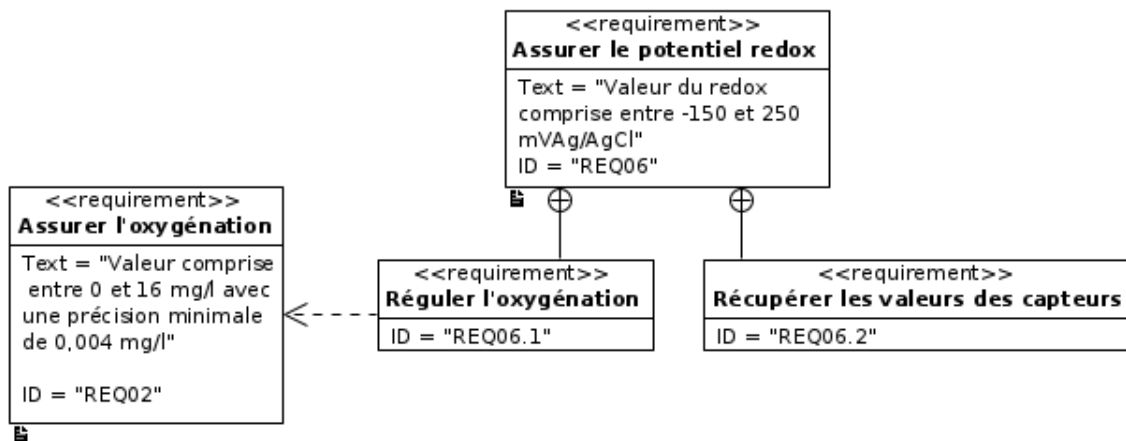


figure 26. Diagramme des exigences de l'oxygénation et potentiel redox

La communication avec l'automate se fait par Ethernet en modbus TCP. Les données échangées portent sur :

- les mesures analogiques acquises en permanence :
 - débitmètres de la station d'épuration,
 - mesure de l'oxygène dissous et du potentiel redox dans le bassin d'aération,
 - mesure de consommation électrique de l'aération.
- les entrées manuelles saisies au clavier du PC :
 - seuils de consigne de mesure (redox, O₂, etc.),
 - temporisations paramétrables (temps de marche, etc.).
- les données relatives à la maintenance et aux caractéristiques des équipements des fournisseurs ;
- les entrées TOR ainsi que les mesures acquises par le ou les automate(s) de la station et transmises au superviseur en temps réel.

Récupération des données d'oxygénation

La récupération des valeurs de l'oxygénation est obtenue via la chaîne d'acquisition présentée en figure 27.

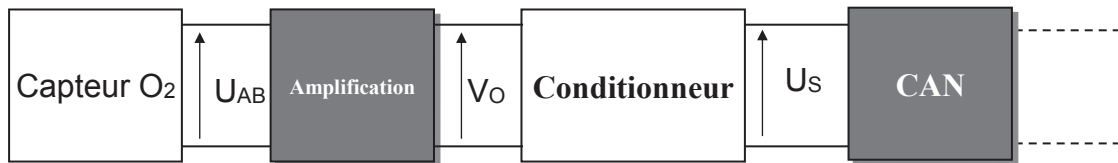


figure 27. Chaîne d'acquisition du capteur d'oxygénation
(U_{AB} , V_O et U_S sont ici considérées comme des constantes)

Selon les mesures effectuées en sortie du capteur linéaire, U_{AB} évolue entre 18 mV et 22 mV selon la plage de valeurs de l'oxygénation désirée dans l'exigence REQ02.

Pour obtenir un signal U_S compatible avec le convertisseur analogique numérique (CAN), plusieurs opérations vont être appliquées sur la tension U_{AB} .

Dans un premier temps, une amplification différentielle est effectuée par le composant INA122 dont le schéma interne représenté par des amplificateurs linéaires intégrés (ALI) et des résistances est donné en figure 28.

Au cours de cette étude, les ALI sont considérés comme idéaux.

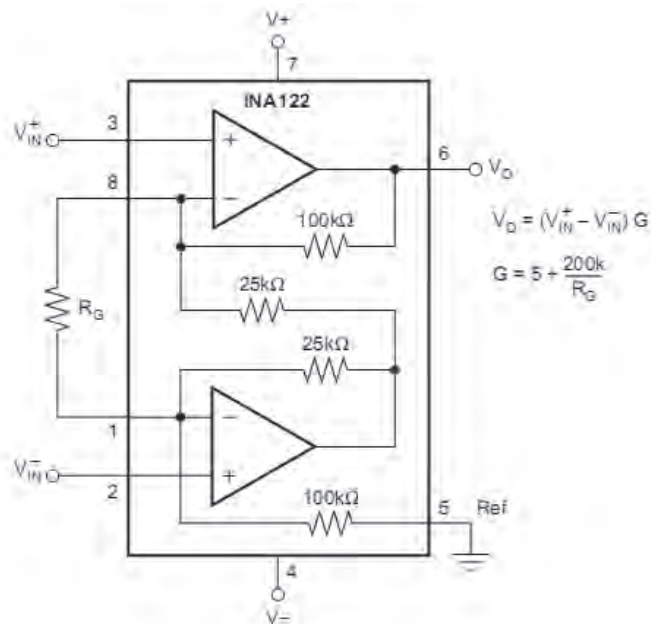


figure 28. Schéma interne de l'amplificateur INA122

Question 36

En sachant que l'amplification G définie sur la figure 28 est d'environ 100, que $V_{in+} = U_A$ et que $V_{in-} = U_B$, montrer que le choix de prendre $R_G = 2,2k\Omega$ est cohérent. Donner les nouvelles valeurs de tensions en sortie V_O associées à la plage de mesure considérée.

Le constructeur a choisi un CAN unipolaire dont la pleine échelle est de 10 V.

Le rôle du conditionneur est donc d'adapter les variations de la tension V_O pour utiliser pleinement les capacités de conversion du CAN.

Dans un premier temps, une soustraction permettant de ramener le signal minimum à une tension nulle est effectuée. Le schéma de principe d'un soustracteur est proposé en figure 29.

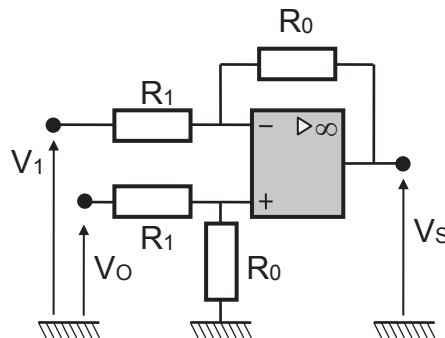


figure 29. Schéma de principe d'un soustracteur

V_O représente la tension de sortie du montage de la figure 28.

Question 37

Exprimer la tension de sortie V_S en fonction de V_1 , V_O , R_1 et R_0 .

Donner les valeurs nécessaires de V_1 , R_1 et R_0 pour obtenir une tension minimale à 0 sans effectuer d'amplification.

Donner la nouvelle plage de tension du signal V_S .

La dernière opération consiste à rééchelonner le signal U_S entre 0 et 10 V avec une amplification proposée en figure 30.

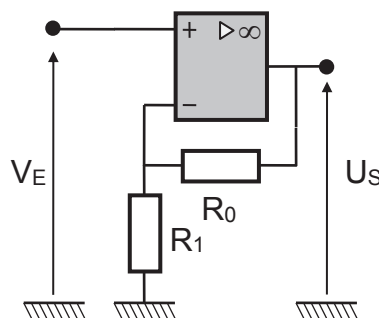


figure 30. Schéma de principe d'un amplificateur

Les valeurs des résistances sont $R_1 = 24 \text{ k}\Omega$ et $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$.

Question 38

Exprimer la tension de sortie U_S en fonction de V_E , R_1 et R_0 .

En considérant que V_E représente la tension V_S du montage de la figure 29, justifier que les choix effectués pour les résistances R_1 et R_2 vont permettre d'obtenir la plage de valeurs souhaitées pour le signal U_S .

Le CAN possède une conversion sur 16 bits.

Question 39

Après avoir rappelé la plage attendue des mesures de l'oxygénation et le niveau de précision des mesures en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (REQ02 de la figure 26), conclure sur la validité du choix de représenter cette information sur 2 octets vis à vis de l'exigence initiale et de la conversion possible du CAN.

D-3 : Transmission vers l'automate

La récupération des valeurs par la supervision s'opère en deux temps :

- lecture dans l'automate des différentes valeurs ;
- remise à 0 de ces valeurs.

Un intérêt est porté plus particulièrement aux mesures analogiques (15 au total) et à l'aération des boues. Chaque donnée occupe 2 octets sur la table Analog Output Holding Registers de modbus TCP. Les données sont consécutives.

Un extrait de la table Analog Output Holding Registers est présenté en figure 31.

| | Adresses modbus (4XXXX) |
|---------------------|-------------------------|
| Oxygène | 0000 |
| Redox | 0004 |
| Débit eaux traitées | 0008 |
| Débit pompe à boues | 0012 |
| ... | ... |

figure 31. Extrait de la table Analog Output Holding Registers

La capture d'une trame modbus TCP lorsque la supervision remet à 0 une donnée de l'automate est donnée figure 32.

```
▶ Frame 353: 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface wlp2s0, id 0
▶ Ethernet II, Src: AzureWav_05:de:f9 (80:c5:f2:05:de:f9), Dst: Shenzhen_0d:2a:90 (84:39:be:6d:2a:90)
▶ Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.1.1, Dst: 192.168.1.1
▶ Transmission Control Protocol, Src Port: 45686, Dst Port: 502, Seq: 1, Ack: 1, Len: 12
- Modbus/TCP
  Transaction Identifier: 1
  Protocol Identifier: 0
  Length: 6
  Unit Identifier: 1
- Modbus
  .000 0110 = Function Code: Write Single Register (6)
  Reference Number: 40004
  Data: 0000
```

figure 32. Capture d'une trame modbus TCP

Une documentation sur modbus est présentée sur le document technique DT9.

Question 40

À l'aide de la documentation technique DT9, préciser le code fonction modbus TCP utilisé lors de la capture de trame de la figure 32, ainsi que la ou les données mise(s) à jour.

Donner le rendement de la transmission en calculant le rapport entre le nombre d'octets total de la trame émise et le nombre d'octets utiles de la donnée transmise.

Dans le cadre de la station d'épuration, il faudra mettre à jour 15 valeurs de sondes.

Question 41

Montrer que le code fonction de la trame proposée en figure 32 n'est pas adapté et proposer un autre code fonction.

Ce nouveau code fonction permet de transmettre les 15 valeurs dans une trame de 97 octets au total. Sachant qu'un compteur de données d'une taille de 1 octet est présent, justifier la différence de taille de trame entre les deux codes fonction puis conclure sur le gain en débit sur le réseau.

Un extrait du diagramme de classe de l'application permettant de communiquer depuis la supervision est donné figure 33.

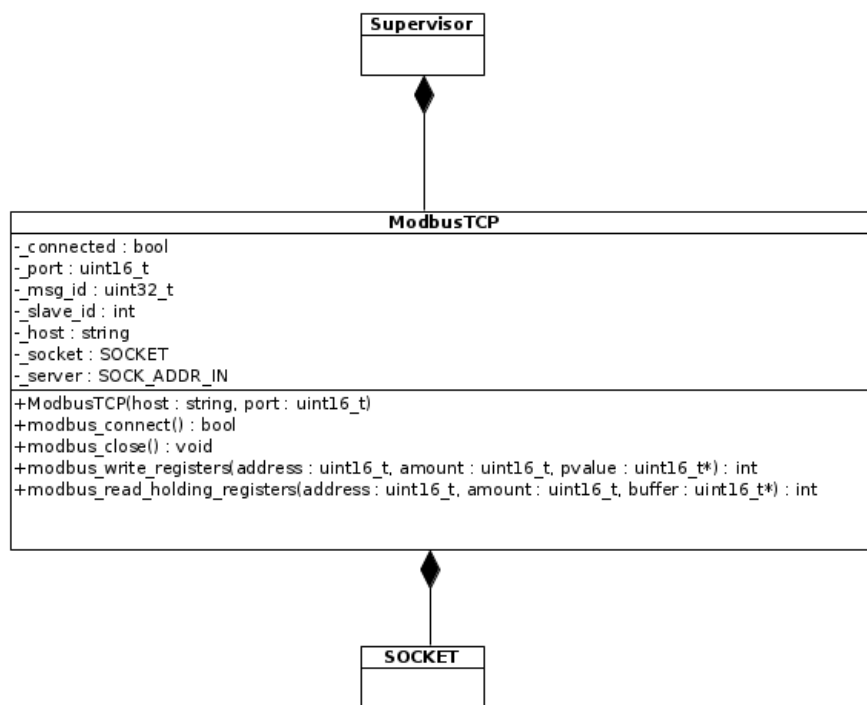


figure 33. Extrait du diagramme de classe de l'application de communication

Question 42

Déterminer la relation entre la classe ModbusTCP et Supervisor et donner les conséquences pour les objets issus de ces classes.

Le document technique DT10 rappelle le codage et l'instanciation d'une classe en C++.

Extrait du fichier d'en-tête de la classe Supervisor :

```
class Supervisor
{
    public :
        Supervisor(string, uint16_t) ;

        // ...
    private :
        ModbusTCP * modbus ;
        // ...
};
```

Question 43

Compléter, sur le document réponse DR6, le constructeur de cette même classe.

Pour permettre l'initialisation du système, le superviseur doit envoyer la trame permettant de remettre à 0 les 15 valeurs analogiques de l'automate.

Question 44

Selon le diagramme fourni en figure 33, donner les instructions en C++ ou pseudo code qui permettent d'initialiser les valeurs analogiques de l'automate à 0.

Les données de l'automate peuvent ensuite être lues de façon cyclique par le superviseur sur l'automate.

La première ligne du document réponse DR6 donne le nom des champs de la trame, la deuxième ligne donne leur contenu. L'identifiant de transaction choisi pour l'échange est 10 (noté ici en décimal) et le numéro d'esclave est fixé à 1.

Question 45

À partir du document technique DT10, compléter le document réponse DR6 en définissant la trame hexadécimale modbus TCP à envoyer pour obtenir l'information « Redox bassin d'aération ».

Après avoir récupéré les valeurs nécessaires au contrôle de l'oxygénation, le système de temporisation proposé sur le document technique DT11 assurant le bon fonctionnement de la station est mis en place.

Quatre états sont considérés :

- marche (pour une aération normale, et tant que T2 n'est pas atteint) ;
- marche forcée (tant que T1 n'est pas atteint) ;
- arrêt (pour un arrêt normal, et tant que T4 n'est pas atteint) ;
- arrêt forcé (tant que T3 n'est pas atteint).

Question 46

Écrire sur le document réponse DR6 un algorithme à base de machines à états permettant de gérer l'aération avec ces temporisations et ainsi permettre un contrôle correct de l'oxygénation.

| |
|----------------------------|
| Partie E : Synthèse |
|----------------------------|

L'objectif de cette partie est de vérifier que l'ensemble des choix technologiques permet une bonne gestion de la station d'épuration.

Question 47

À partir des diagrammes des exigences présentés lors des différentes parties et en s'appuyant sur les résultats obtenus précédemment, justifier que les exigences « REQ01 », « REQ02 », « REQ03 », « REQ04 », « REQ05 » et « REQ06 » sont correctement réalisées.

Documents techniques

| | |
|--------------|--|
| DT1 | caractéristiques en entrée de la station |
| DT2 | caractéristiques du bassin d'aération |
| DT3 | caractéristiques du moto-réducteur de la turbine |
| DT4 | données et courbes des pompes de circulation des boues |
| DT5-1 | variateur ATV212 |
| DT5-2 | variateur FC301 |
| DT6 | extrait de la norme 61000-3-2 |
| DT7 | extrait de la liste OUI – IEEE |
| DT8 | modes Transport et Tunnel dans IPsec |
| DT9-1 | protocole modbus |
| DT9-2 | protocole modbus TCP |
| DT10 | coder et instancier une classe en C++ |
| DT11 | régulation de l'aération par l'automate |

DT1 caractéristiques en entrée de la station

Le tableau suivant récapitule les charges de pollutions à traiter à l'horizon 2040.

| | Valeurs nominales Horizon 2040 |
|---|-----------------------------------|
| Nombre d'équivalent habitants raccordés à la station | 1 930 |
| Débit journalier nominal en $m^3 \cdot j^{-1}$ | 285,00 |
| Volume d'eaux usées strictes journalières par temps sec en $m^3 \cdot j^{-1}$ | 185 |
| Volume d'eaux claires parasites permanentes en $m^3 \cdot j^{-1}$ | 100 |
| DBO ($kg \cdot j^{-1}$) | 115,8 |
| DCO ($kg \cdot j^{-1}$) | 231,5 |
| MEST ($kg \cdot j^{-1}$) | 117,3 |
| NTK ($kg \cdot j^{-1}$) | 24,65 |
| Pt ($kg \cdot j^{-1}$) | 2,63 |

Poste de relèvement

Le relèvement des eaux brutes s'effectue par 2 pompes immergées de $30 m^3 \cdot h^{-1}$. Le nombre de démarrage par heure pour une pompe est fixé à 6. Les pompes de relevage sont asservies par sonde radar. Une sonde radar est préférable à une sonde ultrasonique, car sa mesure est insensible aux mousses et flottants pouvant être présents à la surface du poste. La conception retenue pour le poste permet une gestion aisée de la maintenance et de la manutention des pompes et du dégrilleur vertical. Le poste de relèvement est prévu en béton XA3.

| Caractéristiques dimensionnelles bache de pompage | |
|---|--------------|
| Diamètre intérieur | 1,90 m |
| Hauteur totale des voiles | 4,30 m |
| Fil d'eau (Fe) : arrivée effluents | 190,10 m NGF |
| Hauteur de bache sous Fe | 1,10 m |
| Hauteur utile de bache sous Fe | 0,87 m |

DT2 caractéristiques du bassin d'aération

Le diamètre de l'ouvrage est de 9 mètres pour une hauteur d'eau de 6 mètres. Les caractéristiques du bassin d'aération suivant la charge de pollution admise sont présentées ci-dessous.

| | 960 EH démarrage station | 1930 EH capacité nominale en 2040 |
|--|-----------------------------|--------------------------------------|
| charge massique $kg (DBO) \cdot kg^{-1} (MVS) \cdot j^{-1}$ | 0,07 | 0,10 |
| concentration en MES ($g \cdot l^{-1}$) | 3,60 | 4,95 |
| concentration en MVS ($g \cdot l^{-1}$) | 2,16 | 3,04 |

DT3 caractéristiques du moto-réducteur de la turbine

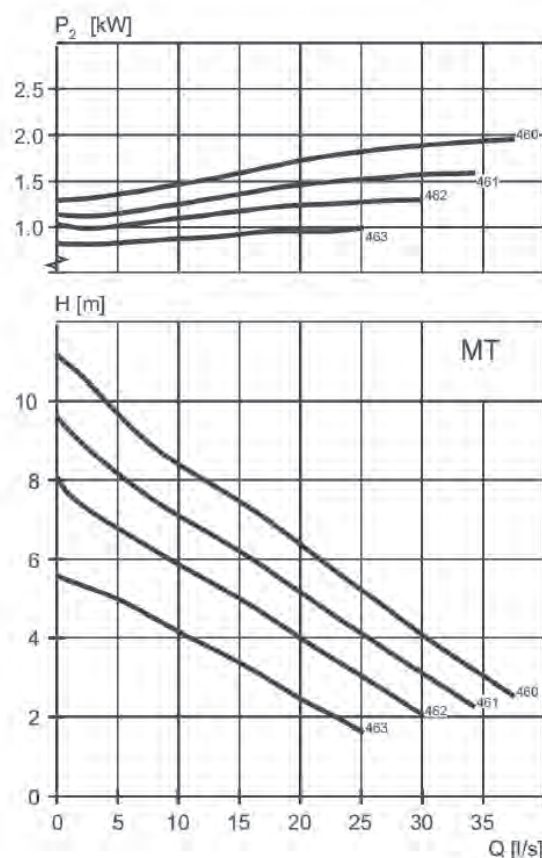
| | | | | | |
|--|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| Pu (kW) | Tension d'utilisation (V) | Fréquence (Hz) | cos φ | Vitesse sortie réducteur (tr/mn) | Rapport de réduction |
| 7,5 | 230/400 | 50 | 0,78 | 59 | 24,8 |
| Intensité nominale I_n à 230 V (A) | Id/In | Rendement à pleine charge | Intensité par phase à vide I_0 (A) | Vitesse sortie moteur (tr/mn) | Facteur de Service |
| 15,2 | 7,8 | 90,4 | 6,7 | 1468 | 2,3 |

DT4 données et courbes des pompes de circulation des boues

Puissance du moteur MT et courbe de performances

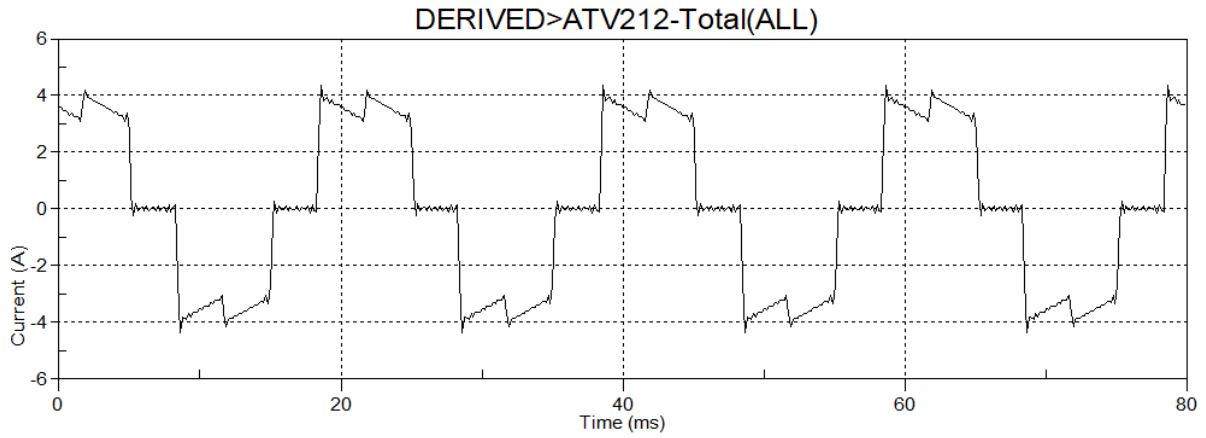
| N° de Courbe/Roue | Puissance nominale, KW | Intensité nominale, A | Intensité au démarrage, A | Facteur de puissance, cos φ | Version anti-déflagrante (Ex) disponible | Installation | | | | |
|--|------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|--|--------------|---|---|---|---|
| | | | | | | P | S | T | Z | |
| Alimentation triphasée 400 V, 50 Hz, 1 425 t/min | | | | | | | | | | |
| 460 | 2,0 | 4,8 | 23 | 0,8 | • | • | • | | | • |
| 461 | 2,0 | 4,8 | 23 | 0,8 | • | • | • | | | • |
| 462 | 1,3 | 3,6 | 23 | 0,68 | • | • | • | • | • | • |
| 463 | 1,3 | 3,6 | 23 | 0,68 | • | • | • | • | • | • |
| Alimentation monophasée 230 V, 50 Hz, 1 440 t/min | | | | | | | | | | |
| 462 | 1,5 | 9,4 | 43 | 0,9 | • | • | • | | | • |
| 463 | 1,5 | 9,4 | 43 | 0,9 | • | • | • | | | • |

Le courant de démarrage Y/D est d'environ 1/3 du courant de démarrage D.

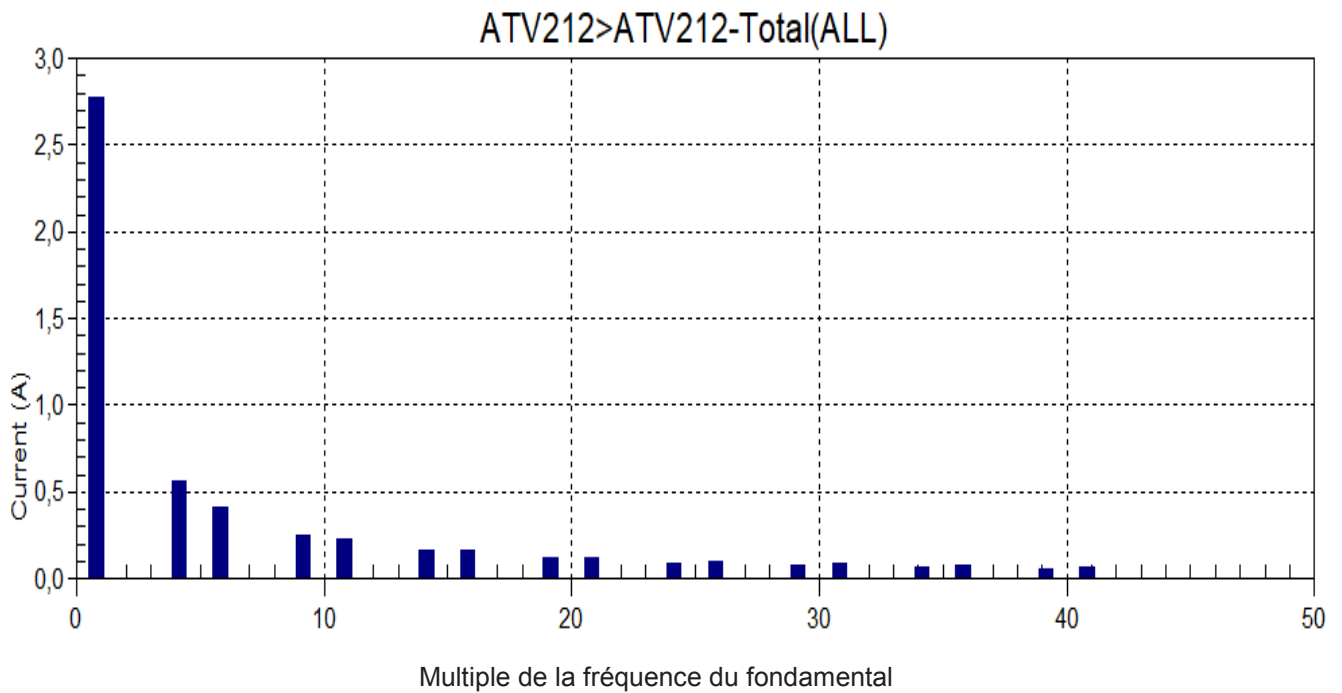


DT5-1 variateur ATV212

Courant en entrée du variateur par phase



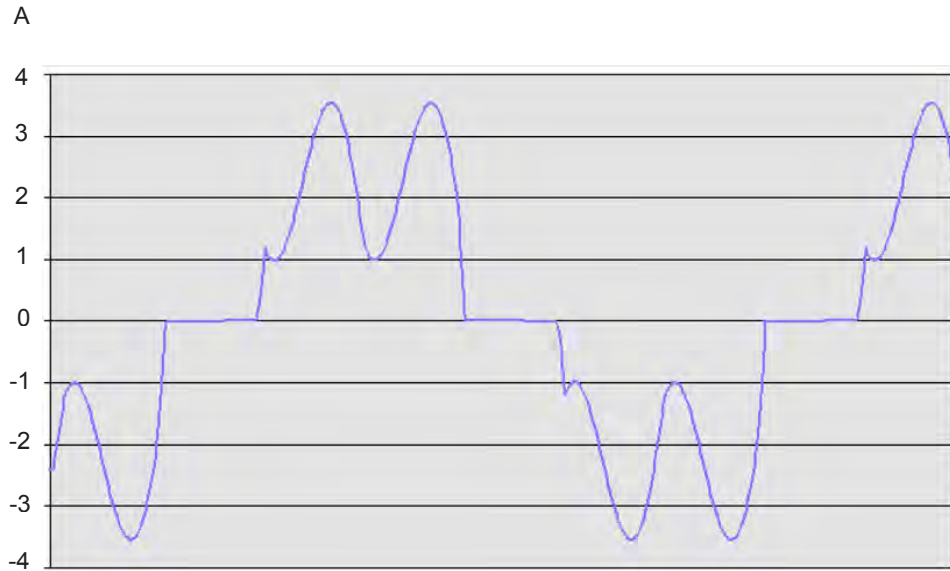
Analyse des harmoniques en entrée du variateur par phase



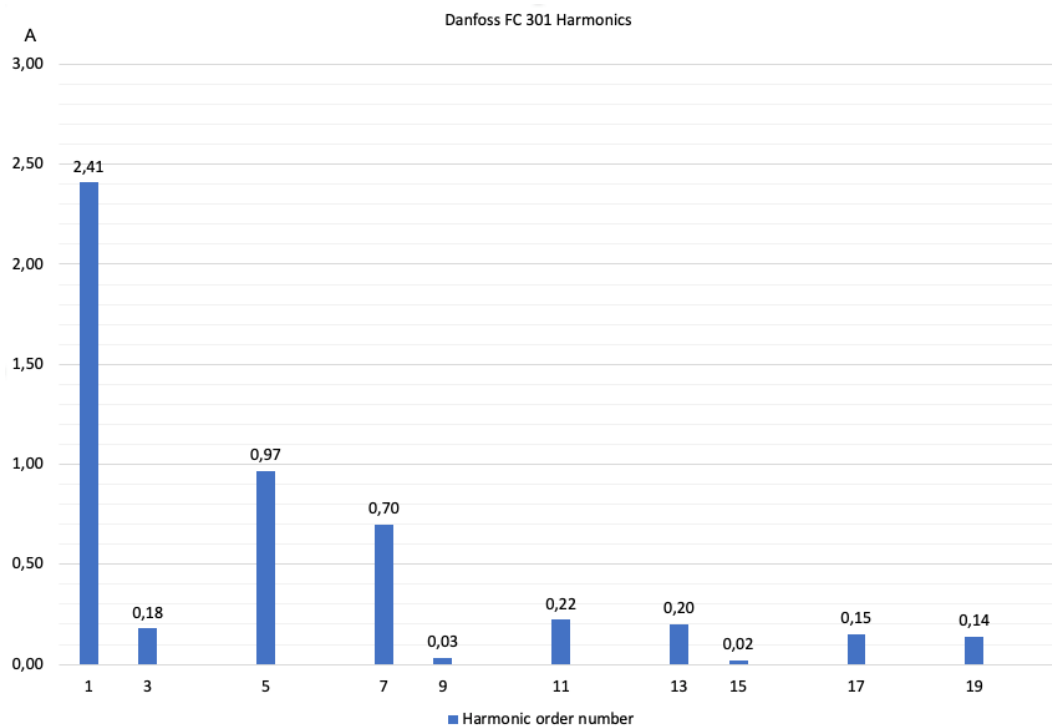
| Rang harmonique | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-----------------|------|---|-------|---|--------|---|--------|---|-------|----|--------|----|-------|
| Valeur (A) | 2,78 | 0 | 0,006 | 0 | 0,5624 | 0 | 0,4153 | 0 | 0,006 | 0 | 0,2477 | 0 | 0,204 |

DT5-2 variateur FC301

Courant en entrée du variateur par phase



Analyse des harmoniques en entrée du variateur par phase



| Rang harmonique | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Valeur (A) | 2,41 | 0,18 | 0,97 | 0,70 | 0,03 | 0,22 | 0,20 |

DT6 extrait de la norme 61000-3-2

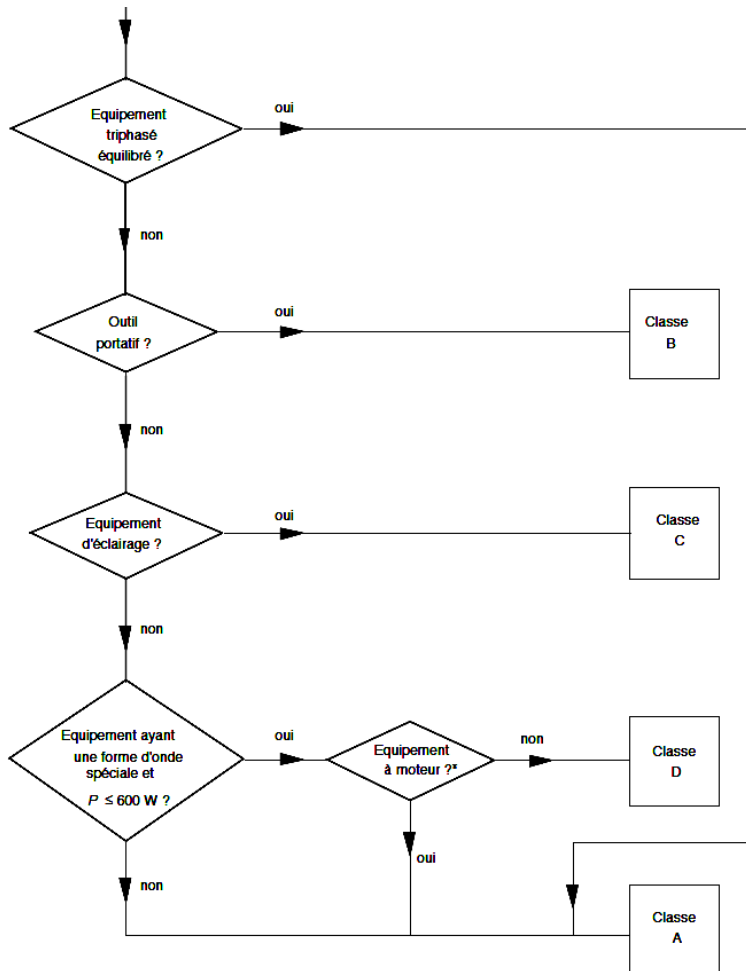


Tableau 1 – Limites pour les appareils de classe A

| Rang harmonique n | Courant harmonique maximal autorisé A |
|----------------------------|--|
| Harmoniques impairs | |
| 3 | 2,30 |
| 5 | 1,14 |
| 7 | 0,77 |
| 9 | 0,40 |
| 11 | 0,33 |
| 13 | 0,21 |
| $15 \leq n \leq 39$ | $0,15 \frac{15}{n}$ |
| Harmoniques pairs | |
| 2 | 1,08 |
| 4 | 0,43 |
| 6 | 0,30 |
| $8 \leq n \leq 40$ | $0,23 \frac{8}{n}$ |

Tableau 2 – Limites pour les appareils de classe C

| Rang harmonique n | Courant harmonique maximal exprimé en pourcentage du courant fondamental d'entrée des luminaires % |
|--|---|
| 2 | 2 |
| 3 | $30 \cdot \lambda^*$ |
| 5 | 10 |
| 7 | 7 |
| 9 | 5 |
| $11 \leq n \leq 39$ (harmoniques impairs seulement) | 3 |

* λ est le facteur de puissance du circuit

Tableau 3 – Limites pour les appareils de classe D

| Rang harmonique n | Courant harmonique maximal autorisé par watt mA/W | Courant harmonique maximal autorisé A |
|--|--|--|
| 3 | 3,4 | 2,30 |
| 5 | 1,9 | 1,14 |
| 7 | 1,0 | 0,77 |
| 9 | 0,5 | 0,40 |
| 11 | 0,35 | 0,33 |
| $13 \leq n \leq 39$ (harmoniques impairs seulement) | $\frac{3,85}{n}$ | Voir tableau 1 |

DT7 extrait de la liste OUI – IEEE

<http://standards-oui.ieee.org/oui/oui.txt>

...

| | | |
|----------|-----------|---|
| 00-0B-C4 | (hex) | BIOTRONIK GmbH & Co |
| 000BC4 | (base 16) | BIOTRONIK GmbH & Co Woermannkehre 1 Berlin 12359 DE |
| 00-0B-57 | (hex) | Silicon Laboratories |
| 000B57 | (base 16) | Silicon Laboratories 7000 W. William Cannon Dr. Austin TX 78735 US |
| 00-0B-51 | (hex) | Micetek International Inc. |
| 000B51 | (base 16) | Micetek International Inc. 7F-1, #237, Sec. 1, wu Chuan W. Rd. Taichung 403 TW |
| 00-0B-53 | (hex) | INITIUM Co., Ltd. |
| 000B53 | (base 16) | INITIUM Co., Ltd. 8F. Gongduck Bldg. 272-6 Seohyun Bundang Sunghnam Kyunggi 463-824 KR |
| 00-0A-FB | (hex) | Ambri Limited |
| 000AFB | (base 16) | Ambri Limited 126 Greville Street Chatswood NSW 2067 AU |
| 00-0A-FF | (hex) | Kilchherr Elektronik AG |
| 000AFF | (base 16) | Kilchherr Elektronik AG Aeschistrasse 25 Muensingen BE 3110 CH |
| 00-0B-4A | (hex) | Visimetrics (UK) Ltd |
| 000B4A | (base 16) | Visimetrics (UK) Ltd Skye House Prestwick Ayrshire KA9 2TA GB |
| 00-0B-48 | (hex) | sofrel |
| 000B48 | (base 16) | sofrel 2 rue du plessis vern sur seiche ille et vilaine 35770 FR |
| 00-0B-1E | (hex) | KAPPA opto-electronics GmbH |
| 000B1E | (base 16) | KAPPA opto-electronics GmbH Kleines Feld 6 Gleichen Niedersachsen DE |
| 00-0B-1C | (hex) | SIBCO bv |
| 000B1C | (base 16) | SIBCO bv Schoonhout 46 Etten-Leur NB 4872 ME NL |
| 00-0B-37 | (hex) | MANUFACTURE DES MONTRES ROLEX SA |
| 000B37 | (base 16) | MANUFACTURE DES MONTRES ROLEX SA LA HAUTE-ROUTE 82 BIEL-BIENNE BE 2502 CH |
| 00-0A-F8 | (hex) | American Telecare Inc. |
| 000AF8 | (base 16) | American Telecare Inc. 7640 Golden Triangle Drive Eden Prairie MN 55344 US |

DT8 modes Transport et Tunnel dans IPsec

Les normes IPsec définissent deux modes distincts d'opération IPsec : le *mode Transport* et le *mode Tunnel*. Ces modes n'ont aucune incidence sur le codage des paquets. Les paquets sont protégés par AH, ESP ou ces deux protocoles dans chaque mode. L'application de la stratégie des modes est différente lorsque le paquet interne est un paquet IP :

- En mode Transport, l'en-tête extérieur détermine la stratégie IPsec qui protège le paquet IP interne.
- En mode Tunnel, le paquet IP interne détermine la stratégie IPsec qui protège son contenu.

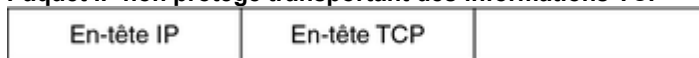
En mode Transport, l'en-tête extérieur ainsi que l'en-tête suivant et tout port pris en charge par celui-ci permettent de déterminer la stratégie IPsec. En fait, IPsec peut mettre en œuvre différentes stratégies en mode Transport entre deux adresses IP au niveau d'un seul port. Par exemple, si l'en-tête suivant est un en-tête TCP, qui prend en charge les ports, la stratégie IPsec peut alors être définie pour un port TCP de l'adresse IP externe. De même, si l'en-tête suivant est IP, l'en-tête extérieur et l'en-tête IP intérieur permettent de déterminer la stratégie IPsec.

Le mode Tunnel ne fonctionne que pour les datagrammes IP-in-IP. La mise sous tunnel en mode Tunnel peut s'avérer utile lorsque des personnes travaillant à domicile se connectent à un emplacement central. En mode Tunnel, la stratégie IPsec est mise en œuvre sur le contenu du datagramme IP interne. Différentes stratégies IPsec peuvent être mises en œuvre pour différentes adresses IP internes. En d'autres termes, l'en-tête IP interne, ainsi que son en-tête suivant et les ports que ce dernier prend en charge, peuvent mettre en œuvre une stratégie. Contrairement au mode Transport, le mode Tunnel ne permet pas à l'en-tête IP extérieur de dicter la stratégie de son datagramme IP interne.

En mode Transport, ESP et/ou AH peuvent protéger le datagramme.

La figure suivante illustre un en-tête IP avec un paquet TCP non protégé.

Paquet IP non protégé transportant des informations TCP



En mode Transport, ESP protège les données, comme illustré ci-dessous. La zone ombrée indique la partie chiffrée du paquet.

Paquet IP protégé transportant des informations TCP



Chiffré

En mode Transport, AH protège les données comme illustré ci-dessous.

Paquet protégé par un en-tête d'authentification



AH couvre en fait les données avant leur apparition dans le datagramme. Par conséquent, la protection assurée par AH, même en mode Transport, couvre en partie l'en-tête IP.

En mode Tunnel, l'intégralité du datagramme figure à l'intérieur de la protection d'un en-tête IPsec. Le datagramme est protégé en mode Tunnel par un en-tête IPsec externe, ESP dans ce cas, comme indiqué sur l'illustration suivante.

Paquet IPsec protégé en mode Tunnel



Chiffré

DT9-1 protocole modbus

Extrait de <https://www.simplymodbus.ca/FAQ.htm>

How is data stored in Standard Modbus?

Information is stored in the Slave device in four different tables.

Two tables store on/off discrete values (coils) and two store numerical values (registers). The coils and registers each have a read-only table and read-write table.

Each table has 9999 values.

Each coil or contact is 1 bit and assigned a data address between 0000 and 270E.

Each register is 1 word = 16 bits = 2 bytes and also has data address between 0000 and 270E.

| Coil/Register Numbers | Data Addresses | Type | Table Name |
|-----------------------|----------------|------------|---------------------------------|
| 1-9999 | 0000 to 270E | Read-Write | Discrete Output Coils |
| 10001-19999 | 0000 to 270E | Read-Only | Discrete Input Contacts |
| 30001-39999 | 0000 to 270E | Read-Only | Analog Input Registers |
| 40001-49999 | 0000 to 270E | Read-Write | Analog Output Holding Registers |

Coil/Register Numbers can be thought of as location names since they do not appear in the actual messages. The Data Addresses are used in the messages.

For example, the first Holding Register, number 40001, has the Data Address 0000.

The difference between these two values is the **offset**.

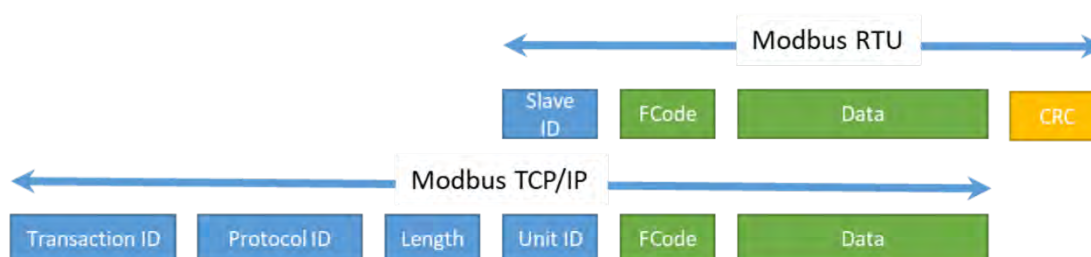
Each table has a different offset. 1, 10001, 30001 and 40001.

What is a function code?

The second byte sent by the Master is the Function code. This number tells the slave which table to access and whether to read from or write to the table.

| Function Code | Action | Table Name |
|---------------|----------------|---------------------------------|
| 01 (01 hex) | Read | Discrete Output Coils |
| 05 (05 hex) | Write single | Discrete Output Coil |
| 15 (0F hex) | Write multiple | Discrete Output Coils |
| 02 (02 hex) | Read | Discrete Input Contacts |
| 04 (04 hex) | Read | Analog Input Registers |
| 03 (03 hex) | Read | Analog Output Holding Registers |
| 06 (06 hex) | Write single | Analog Output Holding Register |
| 16 (10 hex) | Write multiple | Analog Output Holding Registers |

DT9-2 protocole modbus TCP



- **Transaction ID** (2 octets) : utilisé pour le pairage de transaction, le serveur Modbus copie l'identifiant de transaction de la requête dans la réponse.
- **Protocol ID** (2 octets) : utilisé pour le multiplexage de systèmes internes. Le protocole Modbus est identifié par la valeur 0.
- **Length** (2 octets) : le nombre d'octets des champs suivants, y compris les champs de l'identifiant de l'unité, du code fonction et des données.
- **Unit ID** (1 octet) : numéro d'esclave utilisé à des fins de routage du système interne. Il est généralement utilisé pour communiquer avec un Modbus ou une ligne série Modbus esclave via une passerelle entre un réseau TCP/IP Ethernet et une ligne série Modbus. Ce champ est défini par le client Modbus dans la requête et doit être renvoyé avec la même valeur dans la réponse par le serveur.
- **FCode** (1 octet) : le code fonction correspond à l'échange souhaité.

Remarque : Toutes les ADU Modbus/TCP sont envoyées via TCP sur le port enregistré 502.

Pour une demande de lecture de données avec les codes fonction 3 ou 4, le champ **Data** est composé de l'**adresse du premier mot** puis le **nombre de mots** comme le montre la figure suivante :

→ Demande :

| N° esclave | 3 ou 4 | Adresse premier mot | Nombre de mots | CRC |
|------------|---------|---------------------|----------------|----------|
| 1 octet | 1 octet | 2 octets | 2 octets | 2 octets |

→ Réponse :

| N° esclave | 3 ou 4 | Nombre d'octets lus | Valeur du premier mot | | Valeur du dernier mot | CRC |
|------------|---------|---------------------|-----------------------|--|-----------------------|----------|
| 1 octet | 1 octet | 2 octets | 2 octets | | 2 octets | 2 octets |

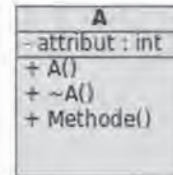
Rappel : Dans le cadre de modbus TCP, le CRC n'est pas nécessaire.

DT10 coder et instancier une classe en C++

//Déclaration de la classe A

```
class A
{
public:
    A(); // constructeur
    ~A(); // destructeur
    // Méthodes spécifiques à la classe
    void Methode(void);
    // getter/setter
    int get_attribut(void){ return _attribut; }
    void set_attribut(int attribut) { _attribut=attribut; }

private:
    // attributs
    int _attribut;
};
```



// Instanciation de la classe A

```
A *a = new A();
a->Methode();
```

DT11 régulation de l'aération par l'automate

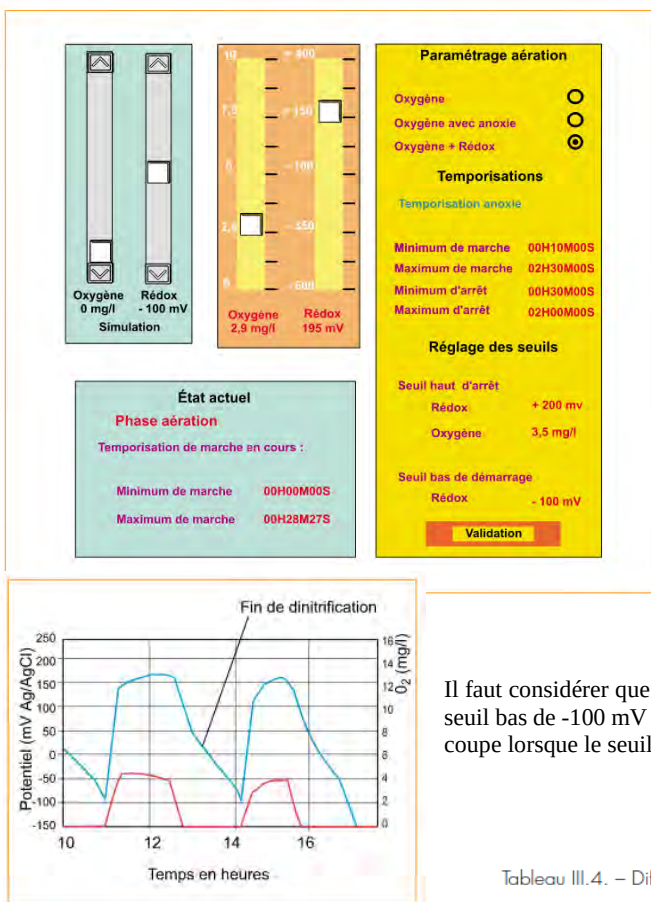
Extrait de la documentation permettant la régulation de l'aération.

Figure III.3. – Chaîne d'automatisation par asservissement ou régulation



Exemple de réglage possible pour gérer l'asservissement de l'aération :

Figure III.7. – Exemple de sélection du mode d'asservissement de l'aération. Réglages des temporisations de sécurité



> Temporisations

Quatre temporisations programmables dites « de sécurité » doivent impérativement être associées à un asservissement au potentiel redox :

- T1 : enclenchée à la mise en route de l'aérateur, assure une durée minimale de marche.
- T2 : enclenchée à la mise en route de l'aérateur, assure une durée maximale de marche.
- T3 : enclenchée lorsque l'aérateur s'arrête, assure une durée minimale d'arrêt.
- T4 : enclenchée lorsque l'aérateur s'arrête, assure une durée maximale d'arrêt.

Ces temporisations sont destinées à relayer le capteur en cas de dysfonctionnement (en garantissant une durée minimale et une durée maximale journalière de marche), à éviter des démarrages trop fréquents et à limiter la durée de marche de l'aération par cycle lorsqu'un seuil d'arrêt ne peut être atteint (cas des périodes de surcharges) afin de passer régulièrement en phase de dénitrification.

Le tableau III.4 présente différentes situations induisant le basculement partiel ou total du mode de fonctionnement du système d'aération par asservissement à un fonctionnement sur temporisation.

Il faut considérer que le potentiel redox va évoluer en fonction de l'aération entre son seuil bas de -100 mV et son seuil haut de +200 mV. **Hors temporisation**, l'aération se coupe lorsque le seuil est atteint et elle reprend lorsqu'elle atteint le seuil bas.

Tableau III.4. – Différentes situations conduisant à la mise en oeuvre des temporisations

| Situations | Temporisations mises en jeu |
|---|--|
| La tension du capteur atteint normalement le seuil haut, n'atteint pas le seuil bas | T4 : assurant une durée maximale d'arrêt |
| La tension du capteur n'atteint pas le seuil haut, atteint normalement le seuil bas | T2 : assurant une durée maximale de marche |
| La tension du capteur atteint rapidement le seuil haut et le seuil bas | T1 : assurant une durée minimale de marche T3 : assurant une durée minimale d'arrêt |
| La tension du capteur reste fixe au-dessus du seuil haut | T2 : assurant une durée minimale de marche T4 : assurant une durée maximale d'arrêt |
| La tension du capteur n'atteint ni le seuil haut, ni le seuil bas | T1 : assurant une durée maximale de marche T4 : assurant une durée maximale d'arrêt |
| La tension du capteur reste fixe au-dessous du seuil bas | T2 : assurant une durée maximale de marche T3 : assurant une durée minimale d'arrêt |

Nom de famille :

(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|



Prénom(s) :

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

Numéro
Inscription :

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

Né(e) le :

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

(Remplir cette partie à l'aide de la notice)

Concours / Examen : Section/Spécialité/Série :

Epreuve : Matière : Session :

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuille officielle, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) et placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuille officielle. Ne joindre aucun brouillon.

EAI SIE 2

DR1 - DR2 - DR3

**Tous les documents réponses sont à rendre,
même non complétés.**



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DR1 calcul de la demande en oxygène

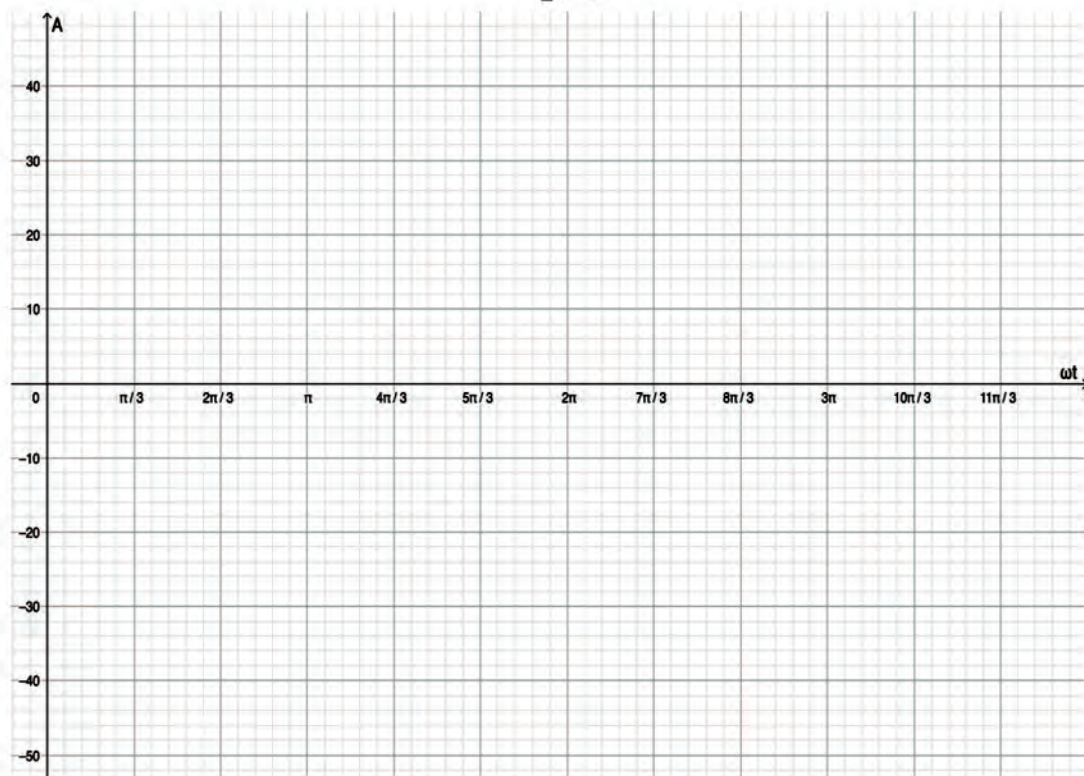
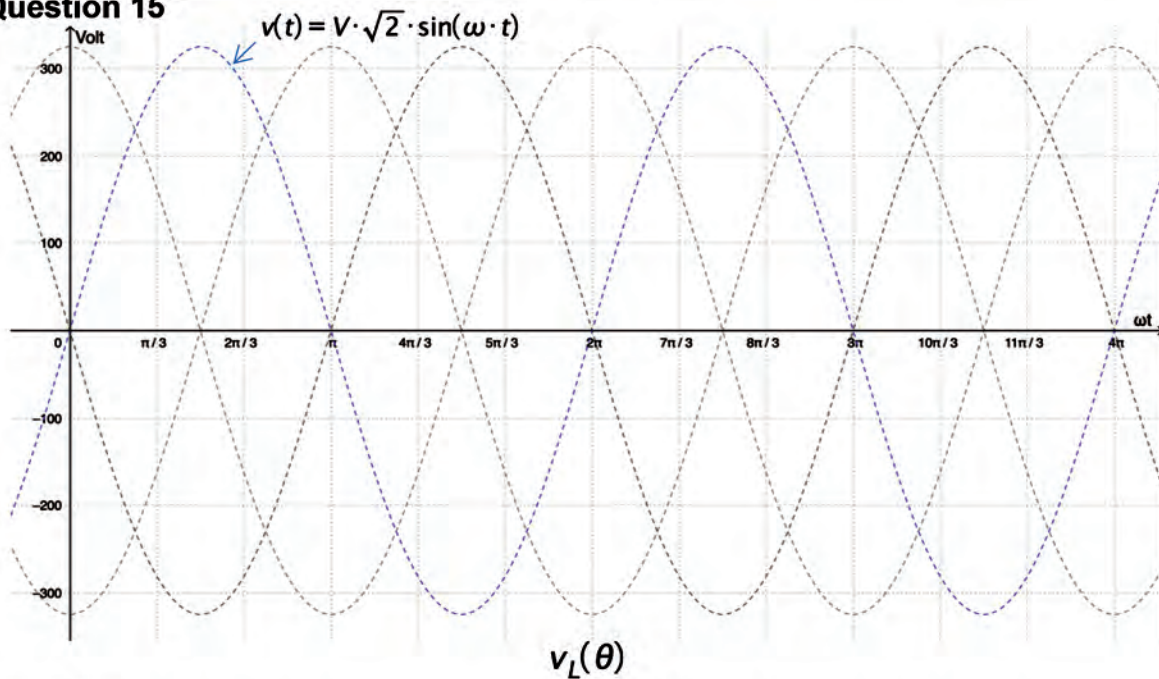
Question 6

Tableau d'aide au calcul de la demande en oxygène (source Cemagref et FNDAE)

| PARAMETRES | VALEURS |
|--|---------------------------------------|
| Azote NTK entrant | A1 : _____ kg N/j |
| A2 : Azote assimilé dans les boues (5% de la DBO5) | A2 : _____ kg N/j |
| Azote à nitrifier/dénitrifier A= A1-A2 | A : _____ kg N/j |
| Poids de MVS en aération = DBO5/0,1 | P _{MVS} : _____ kg MVS |
| | |
| PARAMETRES | VALEURS |
| Oxydation de la matière organique (0,65 kg O ₂ /kg DBO5) | O1 : _____ kg O ₂ /j |
| Respiration endogène des boues (0,07 kg O ₂ /kg P _{MVS}) | O2 : _____ kg O ₂ /j |
| Nitrification (4,3 kg O ₂ /kg Azote A) | O3 : _____ kg O ₂ /j |
| Besoins journaliers en oxygène | O1+O2+O3 : _____ kg O ₂ /j |
| Durée d'aération retenue | 14 h |
| Besoins horaires en oxygène en conditions réelles | _____ kg O ₂ /h |

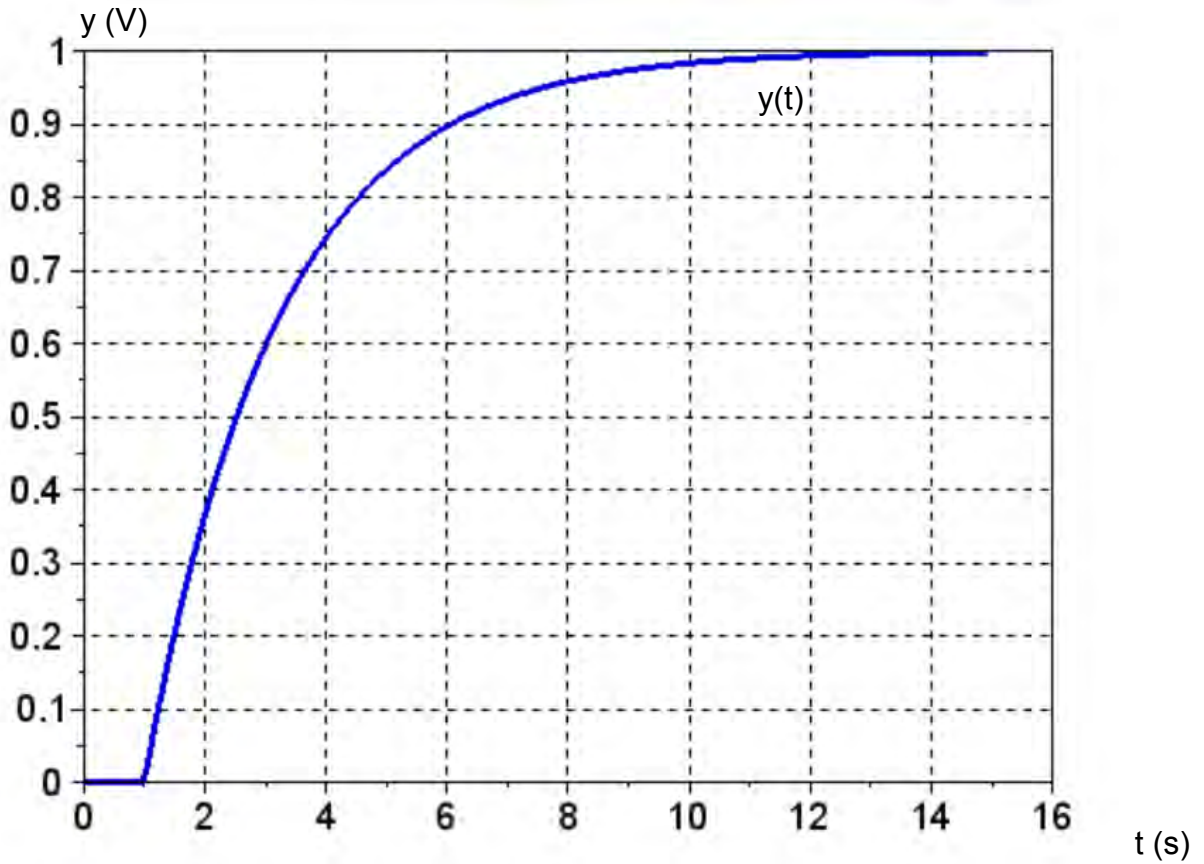
DR2 tracés de la tension $v_L(\theta)$ et du courant $i(\theta)$ avec $\theta = \omega \cdot t$

Question 15



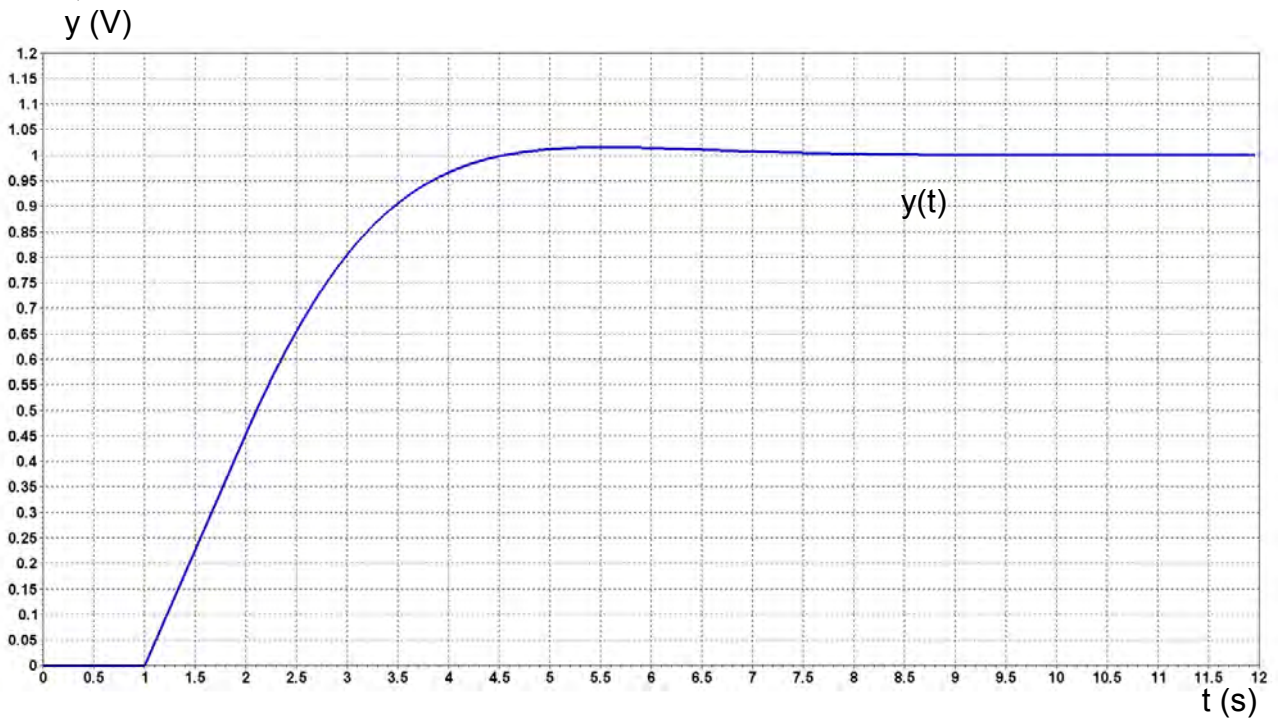
DR3 (1/2) réponse indicielle $y(t)$

Question 17



DR3 (2/2) réponse indicielle $y(t)$ en boucle fermée avec correction

Question 22



Nom de famille :
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)



Prénom(s) :

**Numéro
Inscription :**

Né(e) le :

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

(Remplir cette partie à l'aide de la notice)

Concours / Examen :

Section/Spécialité/Série :

Epreuve :

Matière :

Session :

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuille officielle, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) et placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuille officielle. Ne joindre aucun brouillon.

EAI SIE 2

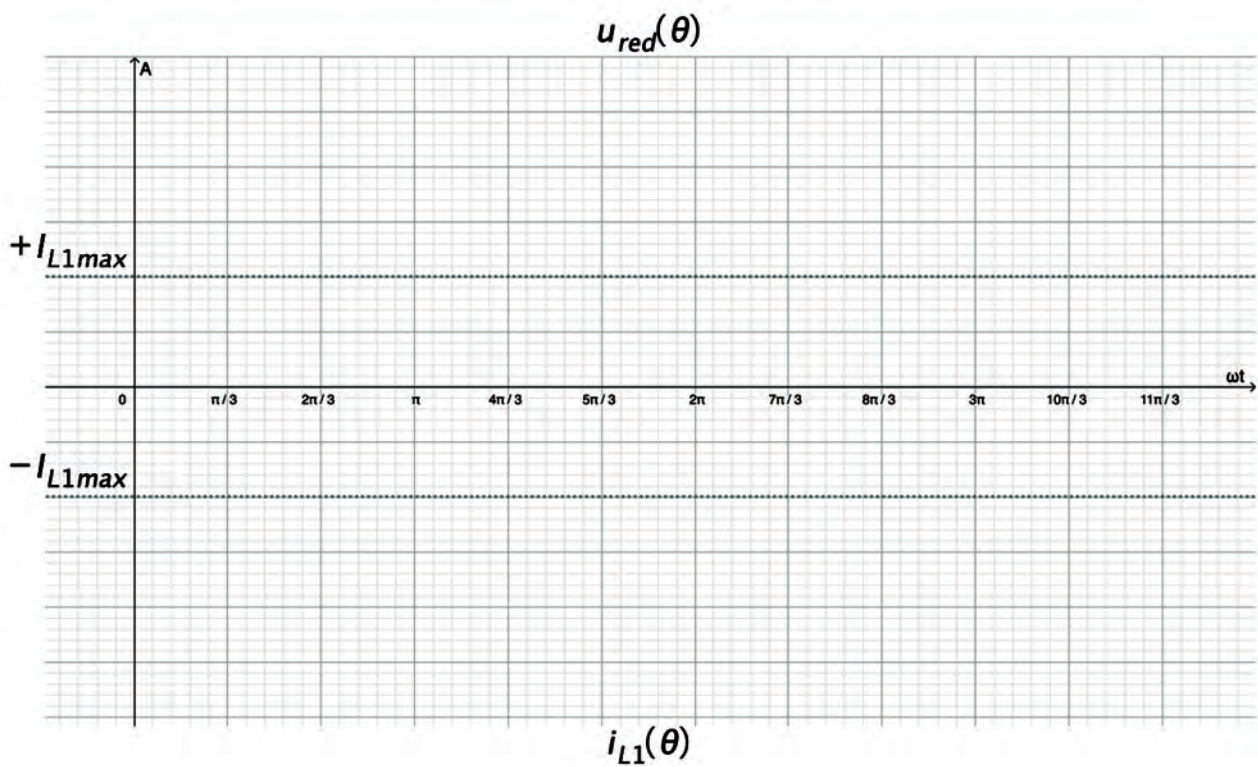
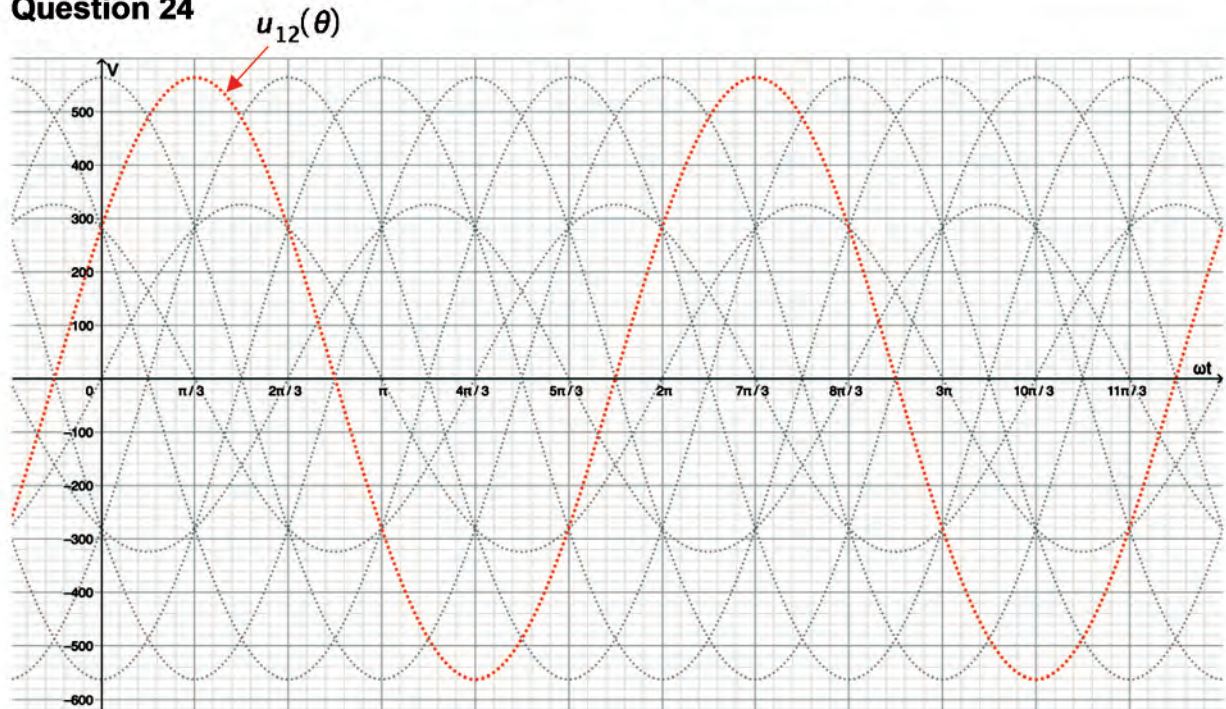
DR4 - DR5 - DR6

**Tous les documents réponses sont à rendre,
même non complétés.**

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DR4 allures de $u_{red}(\theta)$ et $i_{L1}(\theta)$ avec $\theta = \omega \cdot t$

Question 24



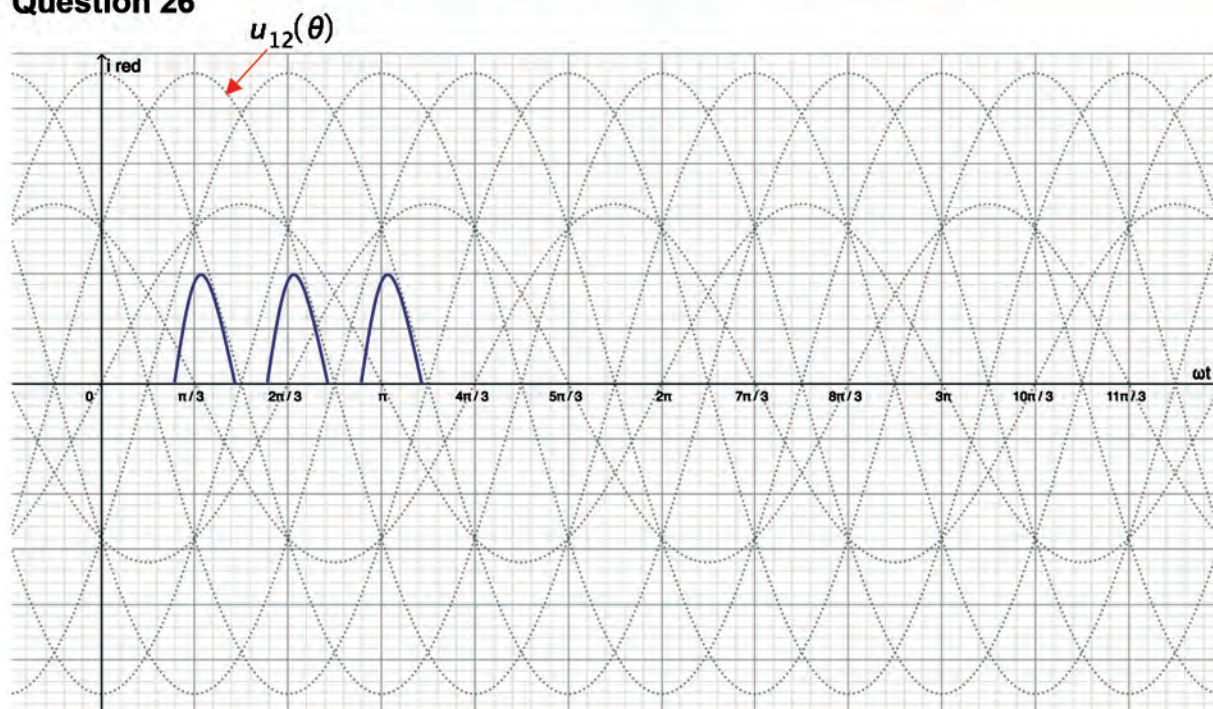
DR5 (1/2) harmoniques du courant i_{L1}

Question 25

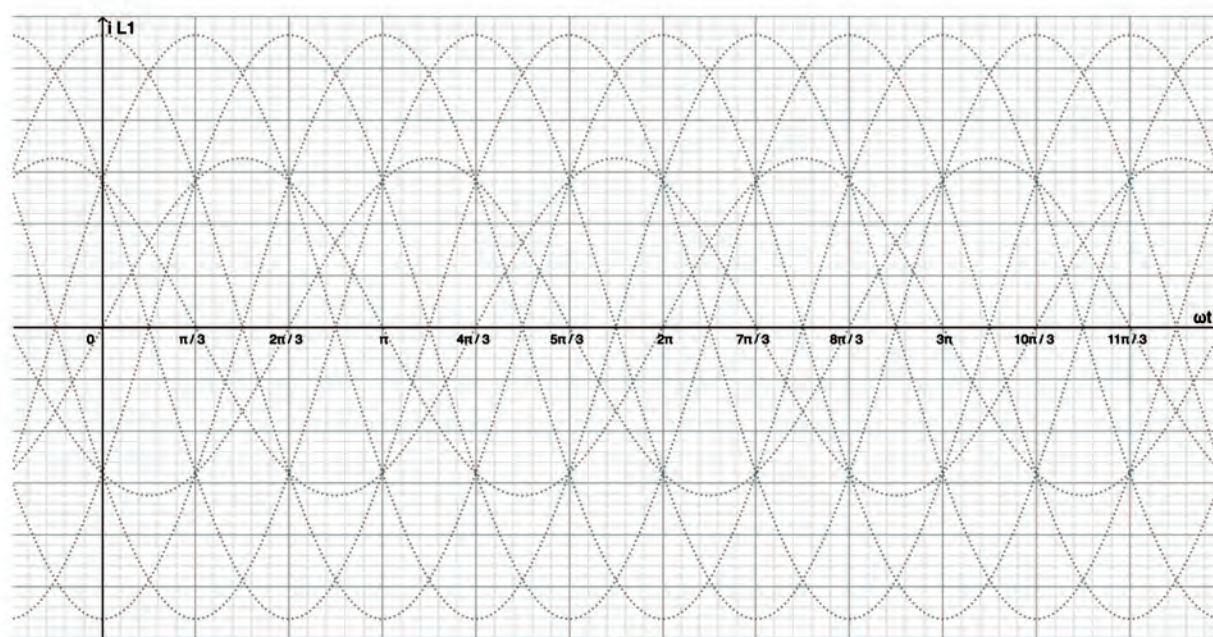
| Valeur de k | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| I_n | I_1 | I_2 | I_3 | I_4 | I_5 | I_6 | I_7 | I_8 | I_9 | I_{10} | I_{11} | I_{12} | I_{13} | I_{14} |
| Valeur en A | | | | | | 0,28 | 0,237 | 0 | 0,182 | 0,162 | 0 | 0,134 | 0,123 | 0 |

DR5 (2/2) forme des courants $i_{red}(\theta)$ et $i_{L1}(\theta)$

Question 26



$i_{red}(\theta)$



$i_{L1}(\theta)$

DR6 communication modbus

Question 43 : Constructeur de la classe Supervisor

```

Supervisor::Supervisor(string IPHote, uint16_t port)
{

}
    
```

Question 45 : Trame modbus

| | | | | | | | |
|-------------|--|--|--|--|--|--|--|
| Identifiant | | | | | | | |
| Transaction | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Question 46 : Machine à état

Début

```

T1 = 0, T2 = 0, T3 = 0, T4 = 0
redox = -100
etat = Marche
    
```

```

Tant que (1)
redox = RecupererValeurRedox()
    
```

Selon _____ Faire
Marche :

MarcheForcee :

Arret :

ArretForce :

Fin de selon
Fin de tant que
Fin