

SESSION 2012

**AGRÉGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE
Option B : ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

ÉPREUVE PRENANT APPUI SUR UN SYSTÈME INDUSTRIEL

Durée : 8 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

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

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

Rénovation d'une ligne d'électrozingage

Ce sujet comporte 3 dossiers distincts :

📁 Questionnement (texte du sujet avec le travail demandé)	30 pages
📁 Dossier technique (DTA à DTE)	20 pages
📁 Dossier réponses (DRB et DRC)	8 pages

Ce sujet comporte cinq parties indépendantes :

- Partie A : Principe du procédé d'électrozingage
- Partie B : Étude de la régulation du courant d'électrolyse d'une cellule de la ligne
- Partie C : Rénovation de la régulation de débit d'une cellule d'électrozingage
- Partie D : Influence des variateurs dans le dimensionnement de la ligne d'alimentation
- Partie E : Distribution électrique du site

Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.

Il sera tenu compte de la cohérence avec laquelle les candidats traiteront chaque partie, le jury préférant une réflexion d'ensemble de la partie abordée à un éparpillement des réponses.

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les différentes parties du problème sur feuilles séparées et clairement repérées. Chaque question est identifiée par une police **gras** et repérées par un numéro.

Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur 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.

Pour la présentation des applications numériques, il est rappelé que lors du passage d'une forme littérale à son application numérique, il est recommandé aux candidats de procéder comme suit :

- après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

Si le texte du sujet, de ses questions ou de ses annexes, vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement dans votre copie.

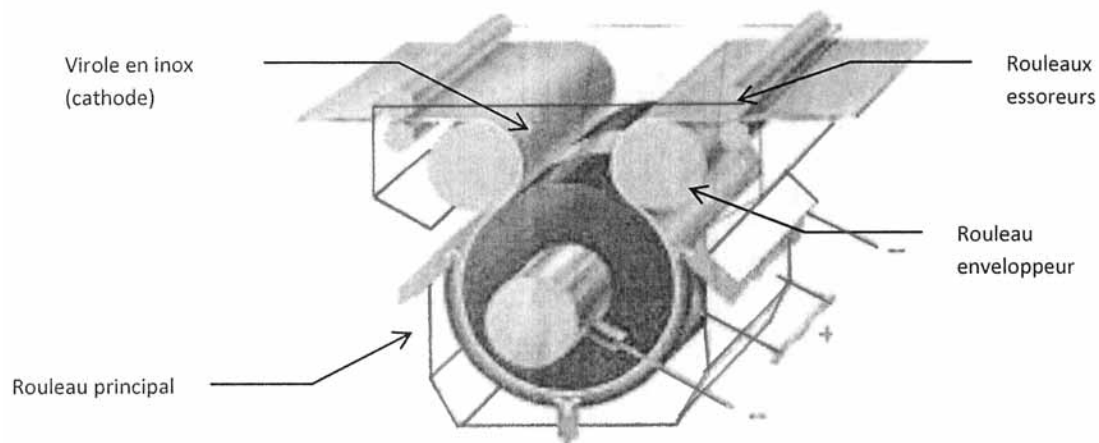
Partie A : Principe du procédé d'électrozingage

1 Le principe de l'électrolyse :

L'électrolyte est un mélange de zinc (Zn) en solution dans un bain d'acide sulfurique (H_2SO_4) dilué.

La cellule d'électrozingage constitue un circuit électrique ouvert avec deux électrodes ou pôles :

- L'électrode négative (-), la cathode, est la virole métallique du rouleau principal de la cellule d'électrozingage.
- L'électrode positive (+), l'anode, est constituée par la carcasse de la cellule et des jeux d'intercalaires permettant de rattraper l'usure et maintenir une distance constante entre les pôles. Les intercalaires sont en titane recouvert d'oxyde d'iridium.



Dans la cellule d'électrozingage, la tôle à revêtir est plaquée contre la partie en inox du rouleau principal qui constitue la cathode. La partie en hypalon (élastomère synthétique remarquable surtout par son excellente tenue aux produits chimiques oxydants) assure l'étanchéité entre la tôle et le rouleau et empêche l'électrolyte acide de pénétrer dans les parties tournantes du tambour.

Dans le bain d'électrolyte, l'élément zinc est sous forme d'ions positifs (Zn^{2+}).

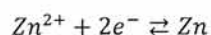
Lorsque l'on fait passer un courant électrique de forte intensité dans le bain d'électrolyte, les ions Zn^{2+} sont attirés par le pôle négatif (la cathode), et viennent se fixer sur la tôle.

Les bains acides sont bien adaptés aux traitements en continu. Ils se distinguent par une concentration en ions métalliques élevées ($C_{Zn^{2+}} \geq 1 \text{ mol.L}^{-1}$) justifiée par les valeurs élevées des densités de courant cathodique de 20 à 150 $A.dm^{-2}$. La température doit être comprise entre 50 et 60°C. La composition type de l'électrolyte est 65 à 100 $g.L^{-1}$ d'ions Zn^{2+} et de 5 à 30 $g.L^{-1}$ de H_2SO_4 .

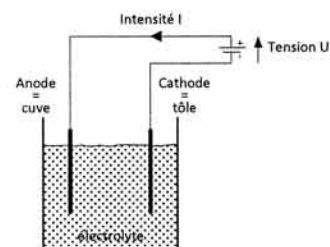
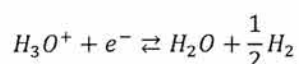
La tôle va être ainsi recouverte uniformément d'une couche de zinc, celle-ci est électrozinguée.

Réaction chimique

Réaction principale



Réaction parasite



L'électrolyte est acheminé aux cellules d'électrozingage par le biais de huit motopompes réparties en deux ensembles. Les pompes n°1 à n°4 (Zn1 à Zn4) relèvent l'électrolyte de la cave n°1 et le distribuent respectivement aux cellules n°1 à n°4 tandis que les pompes n°5 à n°8 (Zn5 à Zn8) relèvent l'électrolyte de la cave n°2 et le distribuent respectivement aux cellules n°5 à n°8.

Le rendement est très bon, de l'ordre de 95%, du fait du renouvellement rapide de l'électrolyte.

Un système avec un réacteur assure la régulation de la concentration de l'électrolyte dans les caves.

Le principe d'injection de l'électrolyte à contre-courant de la tôle permet de diminuer le phénomène d'appauvrissement en zinc de la solution d'électrolyte aux alentours de la cathode.

Le processus d'électrozingage demande un débit constant ainsi qu'une vitesse de défilement constante de la tôle afin d'effectuer un dépôt régulier de zinc (d'une épaisseur de 2,5 à 10 μm).

Le débit d'électrolyte dans la cellule doit être compris entre 70 et 120 m^3/h , soit une vitesse d'écoulement de 1,5 m/s. Afin de maintenir une vitesse régulière de l'électrolyte sur la longueur de la tôle, le débit d'électrolyte doit être ajusté en fonction de la vitesse de défilement.

La vitesse maximale de défilement de la tôle est de 90 m/min ; ce qui représente une vitesse de 1,5 m/s. Cette vitesse est ajustable en fonction de l'épaisseur de dépôt de zinc recherchée.

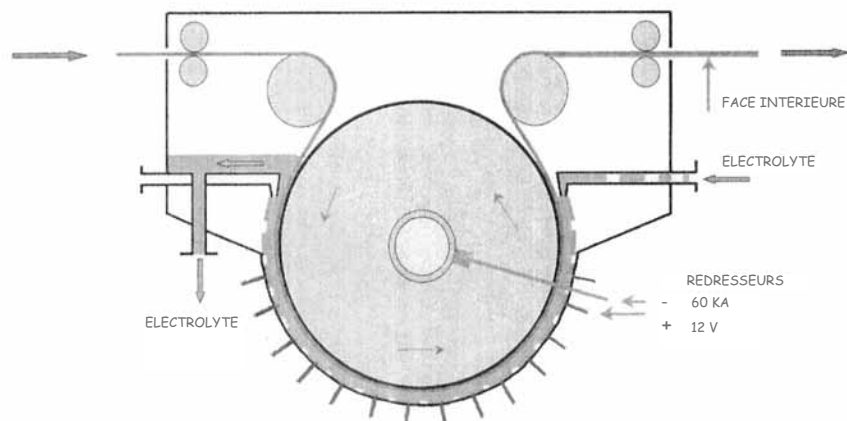


Fig. A1 – Circulation de l'électrolyte dans une cellule

Le cylindre cathodique est entraîné en rotation par un moteur à courant continu de 25 kW et un réducteur (rapport de réduction $R=51,72$ – $PV=29$ tr/min), il faut fournir le couple nécessaire pour accompagner le mouvement et éviter à la tôle des ondulations, c'est ce qu'on appelle la compensation du bending de la tôle (to bend = courber).

L'alimentation électrique de la cathode est assurée par un ensemble bague balais.

1.1 Caractéristique de la cellule

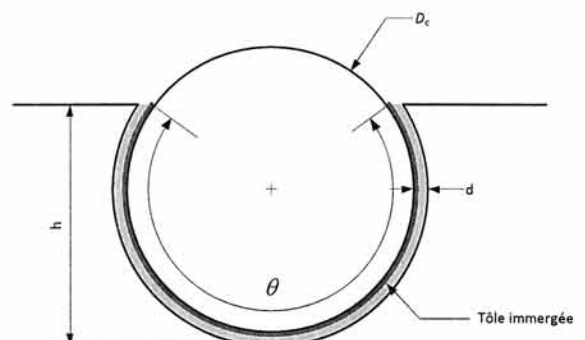
Le cylindre cathodique de la cellule n'est pas complètement immergé, h représente le niveau d'électrolyte par rapport au fond de la cellule.

Rouleau principal (cylindre cathodique) :

- Longueur l_c : 1830 mm
- Diamètre D_c : 1830 à 1820 mm (en fonction de l'usure)
- Distance intercalaire - rouleau principal d : 9,5 mm (maintenu en permanence avec les réglages)
- Hauteur d'électrolyte dans la cellule h : 1600 mm

Tôle à traiter

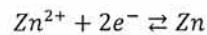
- Largeur L_t : 700 à 1520 mm
- Epaisseur e_t : 0,4 à 3 mm
- Vitesse de défilement v_t : 85 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$



- QA 1-1) Déterminer la longueur immergée l_{i_t} de tôle dans une cellule en fonction de h et des caractéristiques de la cellule.
- QA 1-2) Déterminer la surface immergée S_{i_t} d'une tôle dans une cellule en fonction de sa largeur L_t .
- QA 1-3) Déterminer le temps de passage (ou d'immersion) t_i de la tôle dans une cellule en fonction de la vitesse de défilement de la tôle v_t .
- QA 1-4) Calculer les valeurs de l_i , S_i et t_i pour les valeurs extrêmes des dimensions de tôle et la vitesse maximale de défilement.

1.2 Détermination du courant d'électrolyse

L'épaisseur du dépôt dépend directement du courant continu d'électrolyse selon la loi de Faraday.



Pour qu'une mole d'ion Zn^{2+} soit réduite en 1 mole de Zn, 2 moles d'électrons sont nécessaires.

Les électrons qui sont transportés par les conducteurs alimentant les électrodes sont les mêmes que les électrons qui participent aux demi-réactions d'électrolyse. La relation fondamentale est :

$$Q = F \times n_{e^-}$$

Dans cette équation Q est la charge transportée (en Coulomb), n_{e^-} est la quantité d'électrons qui participent à la demi-réaction (en mol), et F est la constante de Faraday, qui a établi cette relation. La constante de Faraday est $F = 96485 \text{ C.mol}^{-1}$ et cette valeur correspond à la charge d'une mole d'électrons exprimée en Coulomb.

$$F = N_A \times |e|$$

La masse de zinc à déposer $m(\text{Zn})$ s'exprime en fonction de la masse molaire $M(\text{Zn})$ de la quantité d'ions zinc $n(\text{Zn}^{2+})$ par la relation :

$$m(\text{Zn}) = n(\text{Zn}^{2+}) \times M(\text{Zn})$$

On considère que la répartition du courant dans l'électrolyse est homogène (Fig. A2).

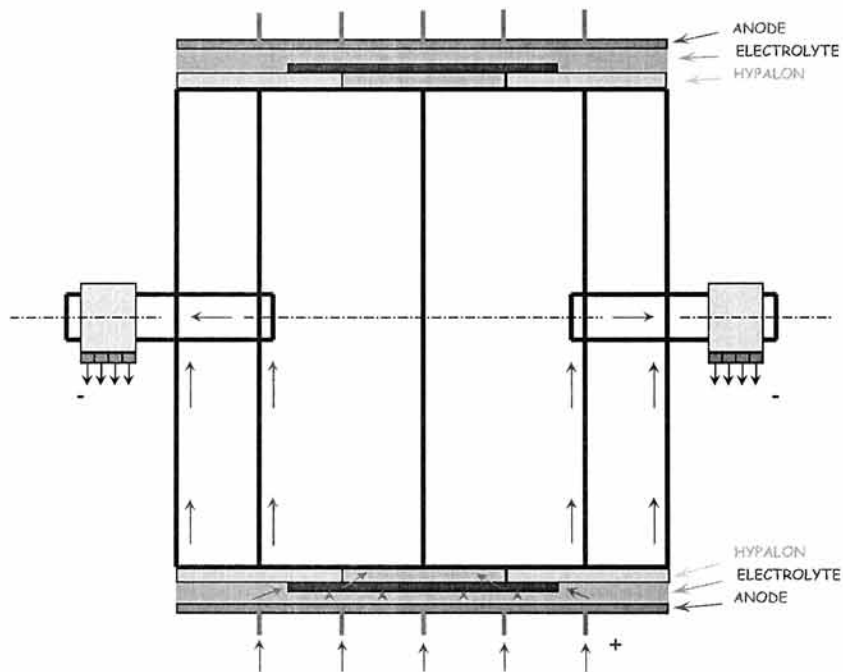


Fig. A2 – Répartition des lignes de courant dans une cellule

Données :

- masse volumique de l'eau (H₂O) : $\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ à 4°C
- masse volumique de l'acide sulfurique (H₂SO₄) : $\rho_{H_2SO_4} = 1830,2 \text{ kg.m}^{-3}$ à 25°C
- masse volumique du Zinc (Zn) : $\rho_{Zn} = 7,14 \text{ g.cm}^{-3}$
- masse molaire du Zinc (Zn) : $M(Zn) = 65,4 \text{ g.mol}^{-1}$
- charge d'un électron : $e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- constante d'Avogadro : $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- rendement cathodique (réaction électrochimique) : $\eta = 95\%$

QA 1-5) Déterminer l'épaisseur de dépôt e_d en fonction du volume de zinc mis en jeu dans la réaction $V(Zn)$ et des caractéristiques de longueur de la tôle à traiter.

QA 1-6) Exprimer la masse de zinc $m(Zn)$ en fonction du volume de zinc $V(Zn)$ et en déduire une relation entre la masse et l'épaisseur de dépôt e_d .

QA 1-7) A partir de la loi de Faraday, exprimer l'épaisseur du dépôt e_d en fonction de l'intensité I de l'électrolyse et de la vitesse de défilement v_t de la tôle dans la cellule.

QA 1-8) Montrer que l'épaisseur du dépôt e_d peut se mettre sous la forme

$$e_d = K \times \frac{1}{L_t \cdot v_t} \times I \text{ avec } K = 2,71 \text{ (} I \text{ en A, } L_t \text{ en mm et } v_t \text{ en m.s}^{-1}\text{)}$$

QA 1-9) La ligne possède 8 cellules apportant chacune une épaisseur identique. Calculer l'intensité I nécessaire et l'intensité I_c par cellule pour un dépôt total de 10 μm en configuration n°1 et pour la valeur extrême de largeur de tôle L_t .

QA 1-10) Déterminer la densité de courant J de l'électrolyse en fonction de la largeur de tôle et de l'intensité I .

QA 1-11) Calculer la densité dans ce cas extrême. Vérifier que la densité J est compatible avec ce type de traitement.

QA 1-12) L'écran de la supervision DTA-2 donne les réglages d'un traitement d'une tôle en double face (configuration n°2). A partir des données de masse de dépôt en g.m^{-2} et du courant d'électrolyse, calculer l'épaisseur de dépôts sur chaque face et en déduire la consigne vitesse de défilement de la tôle v_t .

2 Optimisation de l'électrolyse :

Dans cette partie, tous les calculs seront faits dans les conditions les plus critiques de l'électrolyse, qui correspond à l'intensité maximale de l'électrolyse (480 kA) c'est-à-dire pour :

- largeur de tôle : $L_t = 1520 \text{ mm}$
- épaisseur de dépôt : $e_d = 10 \mu\text{m}$
- vitesse de défilement de la tôle : $v_t = 85 \text{ m.min}^{-1}$
- intensité totale de l'électrolyse : $I = 480 \text{ kA}$

2.1 Concentration de l'électrolyte

Lors de l'électrolyse la concentration en zinc et en acide sulfurique de l'électrolyte diminue en fonction de l'intensité I_c et du temps de passage de la tôle dans la cellule.

Il faut donc renouveler constamment l'électrolyte dans le cellule, c'est le rôle des pompes Zn1 à Zn8 qui puisent l'électrolyte dans 2 caves pour l'envoyer à un débit compris entre 70 et 120 m³.h⁻¹ et une pression de 3 bars dans les cellules 1 à 8 respectivement.

Les caves d'une capacité de 24 m³ contiennent environ 20 m³ d'électrolyte ; 4 pompes sont affectées à chaque cave. La concentration en zinc et le dosage d'acide de la solution sont maintenus constants par 12 réacteurs (cet ensemble ne sera pas étudié).

Les valeurs typiques sont les suivantes :

- H₂SO₄ : 85 g.l⁻¹
- Zn : 60 g.l⁻¹

- QA 2-1) Déterminer la masse de zinc déposée par cellule et en déduire le débit massique de Zinc q_m en g.s⁻¹. Calculer sa valeur dans les conditions extrêmes ($L_t = 1520$ mm et $e_d = 10$ μm).
- QA 2-2) Calculer la diminution de la concentration ΔC entre l'entrée et la sortie de l'électrolyte de la cellule sachant que l'on tolère une diminution de 1% au maximum.
- QA 2-3) Déterminer le débit volumique d'électrolyte q_{Ve} qui correspond au débit volumique de la solution d'ions zinc Zn²⁺ pour maintenir cet écart de concentration.
- QA 2-4) Calculer la vitesse d'écoulement v_e dans une cellule sachant que les canalisations en sortie des pompes sont de type DN150 en inox (diamètre intérieur).
- QA 2-5) Proposer une explication présentant l'intérêt de l'injection de l'électrolyte dans la cellule à contre-courant du défilement de la tôle.

2.2 Echauffement de l'électrolyte

Le passage du courant dans le bain provoque aussi un échauffement de la solution. Or, pour garantir un fonctionnement optimum de l'électrozingage et une qualité visuelle de la tôle, la température idéale du bain est de 50°C.

- chaleur massique de l'acide sulfurique (H₂SO₄) : $c_{H_2SO_4} = 1,42$ J.K⁻¹.kg⁻¹

- QA 2-6) Déterminer le débit massique $q_m(H_2SO_4)$ de l'électrolyte en fonction du débit volumique d'électrolyte q_{Ve} déterminé à la question QA 2-3.
- QA 2-7) Déterminer la puissance pour passer de la température ambiante 20°C à la température idéale de fonctionnement. On néglige l'influence des ions Zn²⁺ dans l'électrolyte.
- QA 2-8) Déterminer le volume d'électrolyte dans une cellule V_c en fonction des caractéristiques mécaniques de la cellule.
- QA 2-9) Comparer le volume d'électrolyte dans 4 cellules par rapport au volume d'électrolyte d'une cave.
- QA 2-10) Déterminer les pertes par effet Joule dans l'électrolyte d'une cellule sachant que la tension d'alimentation continue de l'électrolyse est de 10 V.
- QA 2-11) Comparer les pertes à la puissance calculée précédemment. Préciser la conséquence d'un tel résultat.

Partie B : Étude de la régulation du courant d'électrolyse d'une cellule de la ligne

1 Fonctionnement de l'alimentation de l'électrolyse

Les électrodes d'une cellule d'électrolyse sont alimentées en pleine puissance par une tension d'environ 12 V et un courant de 2×30 kA.

Cette partie porte sur l'étude de l'alimentation d'une cellule d'électrolyse. Le principe de cette alimentation est représenté sur le synoptique suivant (Fig. B1). Les 2 groupements de gradateur-transformateur-redresseur (Fig. B2) sont alimentés par un transformateur HTA/BT de 2×625 kVA à 2 enroulements secondaires. Les 2 redresseurs en sortie, alimentant les électrodes, sont mis en parallèle. En cas de défaillance d'un redresseur, le système de régulation répartit les courants sur les autres cellules afin de garantir sur l'ensemble de la chaîne la même épaisseur de dépôt.

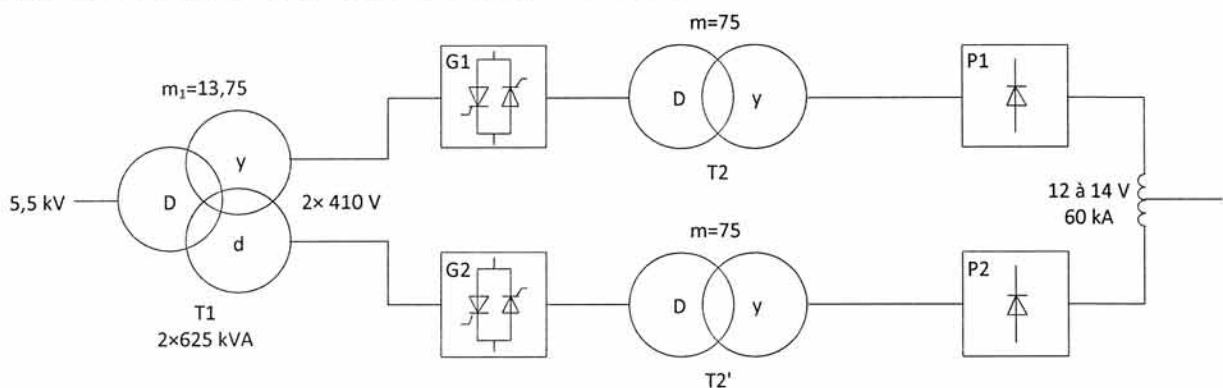


Fig. B1 – Synoptique de l'alimentation d'une cellule

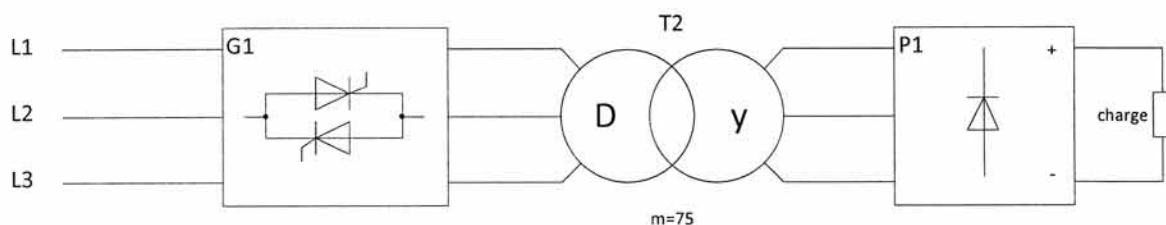


Fig. B2 – Synoptique de l'association gradateur-transformateur-redresseur

Pour obtenir des tensions continues variables, il est intéressant de substituer aux montages redresseurs à thyristors usuels, l'association d'un gradateur, d'un transformateur et de simples diodes.

Cette association est nécessaire dans le cas de l'obtention de très basses tensions continues variables. Placés au secondaire du transformateur, les thyristors travaillent dans de mauvaises conditions, ils doivent écouler des courants importants. En les plaçant au primaire du transformateur, il est possible d'adapter leur calibre à la puissance à transiter.

1.1 Étude de l'association gradateur-transformateur-redresseur

L'association utilisée est celle qui présente le plus d'intérêt au niveau des courants harmoniques pris au réseau et des pertes dans le transformateur. Le gradateur est installé en ligne devant le transformateur et le primaire de celui-ci est couplé en triangle.

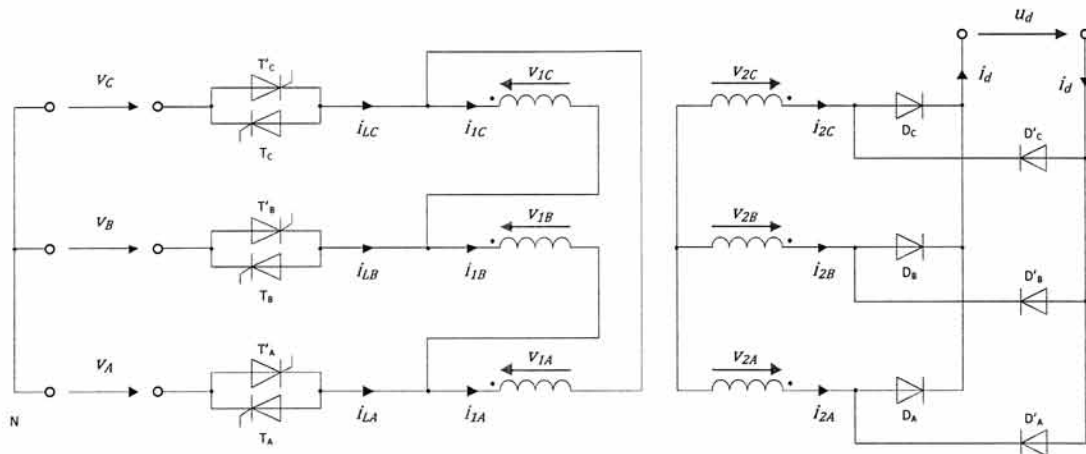


Fig. B3 – Structure interne de l'association gradateur-transformateur-redresseur

L'angle ψ représente l'angle de retard à l'amorçage des thyristors.

1.1.1 Mode de fonctionnement

Les tensions $v_A(t)$, $v_B(t)$ et $v_C(t)$ représentent les tensions simples de la source d'alimentation.

$$\begin{aligned}
 v_A(t) &= V\sqrt{2} \sin \omega t & u_{AB}(t) &= v_A(t) - v_B(t) = U\sqrt{2} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \text{ avec } U = V\sqrt{3} \\
 v_B(t) &= V\sqrt{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & u_{BC}(t) &= v_B(t) - v_C(t) = U\sqrt{2} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\
 v_C(t) &= V\sqrt{2} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) & u_{CA}(t) &= v_C(t) - v_A(t) = U\sqrt{2} \sin \left(\omega t + \frac{5\pi}{6} \right)
 \end{aligned}$$

La tension $u_d(t)$ et le courant $i_d(t)$ représente respectivement la tension redressée et le courant continu débité par le groupement gradateur-transformateur-redresseur.

Les tensions primaires et secondaires sont liées par le rapport de transformation m .

Les valeurs moyennes des courants dans les bobinages étant nulles et aucune condition spéciale n'étant imposée aux courants alternatifs primaires, il y a compensation des Ampère-tours sur chaque noyau.

$$\begin{aligned}
 i_{2A}(t) &= m \cdot i_{1A}(t) & i_{LA}(t) &= i_{1A}(t) - i_{1B}(t) = \frac{i_{2A}(t) - i_{2B}(t)}{m} \\
 i_{2B}(t) &= m \cdot i_{1B}(t) & i_{LB}(t) &= i_{1B}(t) - i_{1C}(t) = \frac{i_{2B}(t) - i_{2C}(t)}{m} \\
 i_{2C}(t) &= m \cdot i_{1C}(t) & i_{LC}(t) &= i_{1C}(t) - i_{1A}(t) = \frac{i_{2C}(t) - i_{2A}(t)}{m}
 \end{aligned}$$

L'absence de conducteur neutre au secondaire implique :

$$i_{2A}(t) + i_{2B}(t) + i_{2C}(t) = 0$$

Compte-tenu des relations entre courant primaire et secondaire

$$i_{1A}(t) + i_{1B}(t) + i_{1C}(t) = 0$$

Comme pour tous les montages triphasés, les symétries du montage et la périodicité de la commande permettent de limiter l'étude du fonctionnement à celle d'un sixième de période.

$$\begin{aligned}
 i_{1A} \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) &= -i_{1B}(\theta) & i_{1A} \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) &= i_{1C}(\theta) & i_{1A}(\theta + \pi) &= -i_{1A}(\theta) \\
 i_{1A} \left(\theta + \frac{4\pi}{3} \right) &= i_{1B}(\theta) & i_{1A} \left(\theta + \frac{5\pi}{3} \right) &= -i_{1C}(\theta) & i_{1A}(\theta + 2\pi) &= i_{1A}(\theta)
 \end{aligned}$$

L'étude ne portera que sur l'intervalle $\left[\psi, \psi + \frac{\pi}{3}\right]$ qui va du déblocage de T_A à celui de T'_C .

1^{er} mode fonctionnement : $0 < \psi < \frac{\pi}{3}$

Ce 1^{er} mode est caractérisé par la conduction simultanée de 3 ou 2 thyristors et le débit du redresseur par 2 ou 3 diodes.

$$u_d(t) = -\frac{3 \cdot v_B(t)}{m} \text{ pour } \psi < \theta < \frac{\pi}{3}$$

$$u_d(t) = -\frac{3 \cdot u_{BA}(t)}{2 \cdot m} \text{ pour } \frac{\pi}{3} < \theta < \psi + \frac{\pi}{3}$$

2^{ème} mode fonctionnement : $\frac{\pi}{3} < \psi < \frac{\pi}{2}$

Dès que ψ devient supérieur à $\pi/3$, on passe à un régime à 2 thyristors et 3 diodes conducteurs.

$$u_d(t) = -\frac{3 \cdot u_{BA}(t)}{2 \cdot m} \text{ pour } \psi < \theta < \psi + \frac{\pi}{3}$$

3^{ème} mode fonctionnement : $\frac{\pi}{2} < \psi < \frac{5\pi}{6}$

Quand ψ devient supérieur à $\pi/2$, on passe à un régime à 2 ou 0 thyristors passants, le redresseur débite par 3 ou 6 diodes.

$$u_d(t) = -\frac{3 \cdot u_{BA}(t)}{2 \cdot m} > 0 \text{ pour } \psi < \theta < \frac{5\pi}{6}$$

$$u_d(t) = 0 \text{ pour } \frac{5\pi}{6} < \theta < \psi + \frac{\pi}{3}$$

1.1.1 Etude du fonctionnement en pleine onde

Pour le début de l'étude, on se place dans le cas où la commande du gradateur est en pleine onde ($\psi = 0$ voir document réponse DRB-1).

- QB 1-1) Rappeler l'expression de la valeur moyenne U_{d0} de la tension de sortie d'un pont de diodes de type PD3 en fonction de la valeur efficace V_2 de sa tension simple d'alimentation.
- QB 1-2) A partir du résultat précédent et du schéma de la structure (Fig. B3), déterminer l'expression de la valeur moyenne de la tension de sortie en fonction de la tension d'alimentation lorsque l'association est à pleine puissance (commande $\psi = 0$).
- On désigne respectivement par V_1 et V_2 la valeur efficaces des tensions simples primaires et secondaires.
- QB 1-3) Calculer la valeur de U_{d0} .
- QB 1-4) Donner l'expression du courant efficace secondaire I_{20} en fonction de I_d et m , en déduire l'expression du courant efficace primaire I_{10} et celle du courant efficace en ligne I_{L0} .
- QB 1-5) Calculer les valeurs efficaces de I_2 , I_1 et I_L .
- QB 1-6) Calculer le courant nominal secondaire du transformateur $I_{2n}(T)$. Comparer ce courant au courant en ligne I_L .

1.1.2 Etude de la tension au primaire du transformateur

La valeur efficace de V_1 de la tension $v_{1A}(t)$ lorsque ψ est non nul en fonction de V et ψ pour les 3 modes de fonctionnement est la suivante :

$$V_1^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} v_{1A}^2(\theta) \cdot d\theta$$

$$V_1 = V\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{3\psi}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin 2\psi} \text{ pour } 0 < \psi < \frac{\pi}{3}$$

$$V_1 = V\sqrt{3} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \sin\left(2\psi + \frac{\pi}{6}\right)} \text{ pour } \frac{\pi}{3} < \psi < \frac{\pi}{2}$$

$$V_1 = V\sqrt{3} \sqrt{\frac{5}{4} - \frac{3\psi}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin\left(2\psi + \frac{\pi}{3}\right)} \text{ pour } \frac{\pi}{2} < \psi < \frac{5\pi}{6}$$

1.1.3 Etude de la tension de sortie du redresseur (lorsque $\Psi \neq 0$)

QB 1-7) Exprimer la valeur moyenne U_d de la tension redressée $u_d(t)$ lorsque ψ est non nul en fonction de U_{d0} et ψ pour les 3 modes de fonctionnement.

QB 1-8) Tracer l'allure de U_d/U_{d0} en fonction de ψ pour $0 < \psi < \frac{5\pi}{6}$ sur le document réponse DRB-5 et comparer à l'allure de V_1/U .

1.1.4 Etude des courants

QB 1-9) A partir des allures de la tension redressée $u_d(t)$, de la tension $v_{T_A}(t)$ aux bornes du thyristor T_A et de la tension $v_{D_A}(t)$ aux bornes de la diode D_A , ainsi que les durées de conduction des interrupteurs, compléter l'allure du courant secondaire $i_{2A}(t)$ et du courant en ligne $i_{LA}(t)$ sur :

- le document réponse DRB-1 (pour $\psi = 0$) ;
- le document réponse DRB-2 (pour $\psi = \frac{\pi}{6}$) ;
- le document réponse DRB-3 (pour $\psi = \frac{5\pi}{12}$) ;
- Le document réponse DRB-4 (pour $\psi = \frac{2\pi}{3}$).

Lorsque ψ croît les valeurs efficaces des trois types de courant varient suivant les mêmes lois.

QB 1-10) Déterminer l'expression de $\frac{I_2}{I_{20}}$, $\frac{I_1}{I_{10}}$ et $\frac{I_L}{I_{L0}}$ pour les 3 modes de fonctionnement.

Les courants pris à la source ne comportent, outre le fondamental, que les harmoniques de rang h .

$$h = 6k \pm 1$$

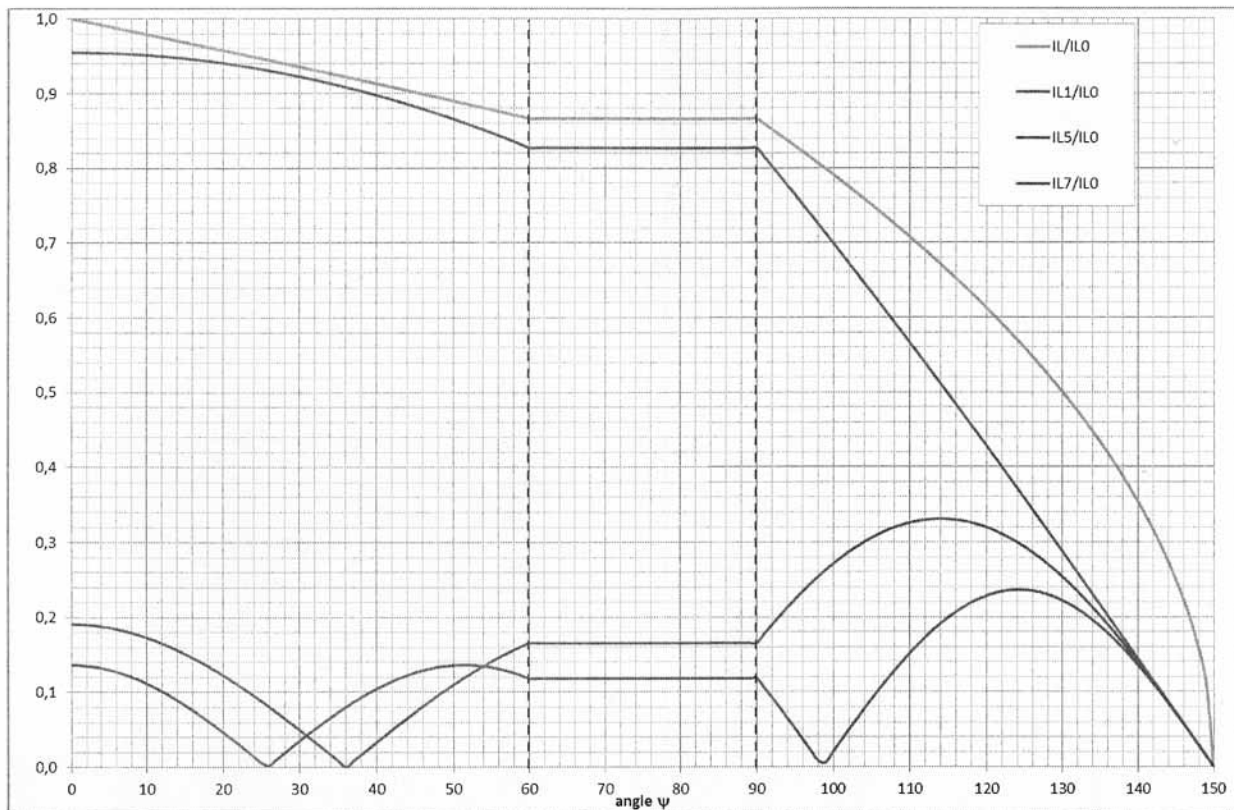
L'expression de la valeur efficace des courants harmoniques I_{Lh} pour les 3 modes de fonctionnement.

$$I_{Lh} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_d}{m} \cdot \frac{1}{h} \left| \cos h \frac{\psi}{2} \right| \text{ pour } 0 < \psi < \frac{\pi}{3}$$

$$I_{Lh} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_d}{m} \cdot \frac{1}{h} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ pour } \frac{\pi}{3} < \psi < \frac{\pi}{2}$$

$$I_{Lh} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_d}{m} \cdot \frac{1}{h} \left| \sin h \left(\frac{5\pi}{12} - \frac{\psi}{2} \right) \right| \text{ pour } \frac{\pi}{2} < \psi < \frac{5\pi}{6}$$

L'allure des courants harmoniques $\frac{I_L}{I_{L0}}$, $\frac{I_{L1}}{I_{L0}}$, $\frac{I_{L5}}{I_{L0}}$ et $\frac{I_{L7}}{I_{L0}}$ en fonction de ψ pour $0 < \psi < \frac{5\pi}{6}$ est la suivante :



- QB 1-11) Tracer l'allure du taux de distorsion harmonique du courant en ligne THD-I en fonction de ψ pour $0 < \psi < \frac{5\pi}{6}$. A partir de quelle valeur le taux devient-il critique ?
- QB 1-12) Proposer une stratégie de commande des 8 cellules pour éviter le problème évoqué précédemment lorsque l'on veut déposer une faible épaisseur de Zinc.

1.1.5 Etude des puissances et du facteur de puissance

Pour caractériser les répercussions du fonctionnement de l'association gradateur-transformateur-redresseur sur la source qui l'alimente, on calcule le facteur de puissance en ligne FP_p côté primaire.

- QB 1-13) Exprimer la valeur de la puissance active P et la puissance apparente S . En déduire le facteur de puissance FP_p pour les 3 modes de fonctionnement.
- On négligera les pertes des convertisseurs.
- QB 1-14) Tracer l'allure de FP_p en fonction ψ sur le document réponse DRB-5.
- QB 1-15) Présenter l'intérêt de ce montage par rapport aux perturbations engendrées sur le réseau. En déduire la plage optimale de fonctionnement des gradateurs.
- QB 1-16) Analyser les mesures (DTB-1) pour vérifier le point de fonctionnement par rapport à l'étude théorique.

1.2 Etude du transformateurs HTA/BT

Un transformateur à deux enroulements secondaires est chargé d'alimenter les deux ensembles gradateur-transformateur-redresseur. Le schéma est équivalent au schéma ci-dessous, le transformateur à deux enroulements est séparé en deux transformateurs T1 et T1' pour les soucis de l'étude afin de faciliter les calculs.

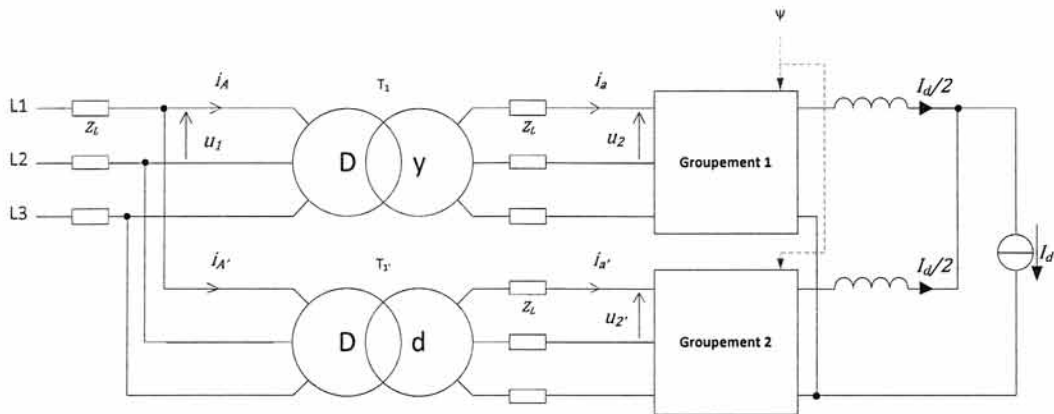


Fig. B4 – Schéma de principe de l'alimentation HTA/BT

1.2.1 Transformateurs triangle-étoile T1

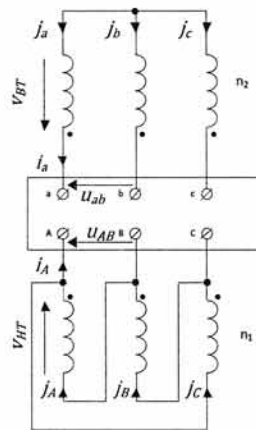


Fig. B5 – Couplage du transformateur T1

- QB 1-17) Tracer le diagramme vectoriel des tensions primaires et secondaires pour en déduire l'indice horaire I1 du transformateur T1.
- QB 1-18) Calculer le rapport de transformation m_1 en fonction du nombre de spires primaire et secondaire.

1.2.2 Transformateurs triangle- triangle T1'

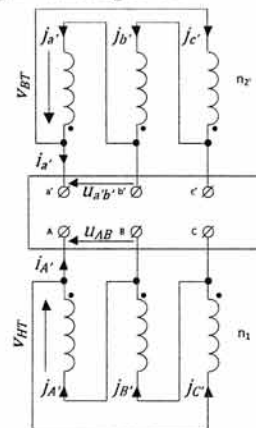


Fig. B6 – Couplage du transformateur T1'

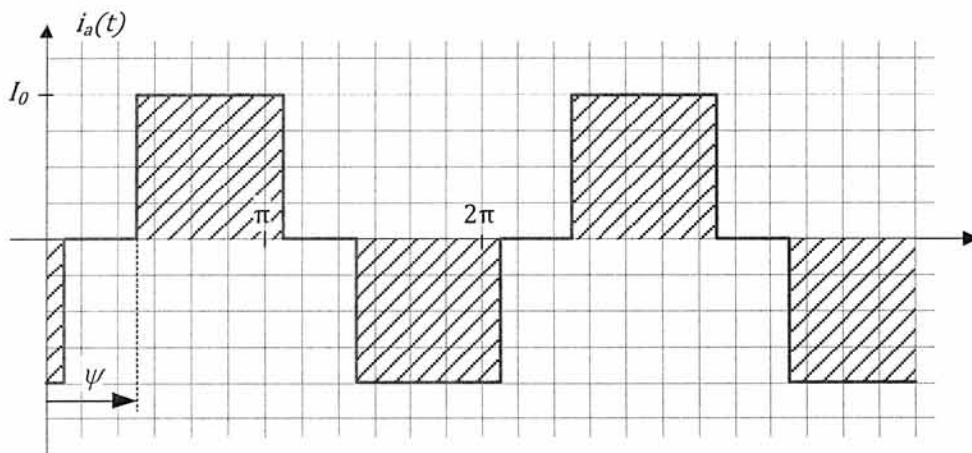
- QB 1-19) Tracer le diagramme vectoriel des tensions primaires et secondaires pour en déduire l'indice horaire I1' du transformateur T1'.

- QB 1-20) Calculer le rapport de transformation m_1' en fonction du nombre de spires primaire et secondaire.
- QB 1-21) Les primaires des deux transformateurs étant identiques, déduire le retard entre les tensions secondaires homologues.
- QB 1-22) Déduire la relation entre les spires secondaires des 2 transformateurs T1 et T1'. Calculer le rapport de transformation m_1 .
- QB 1-23) Comparer ces résultats avec les éléments du schéma électrique de la distribution.

1.2.3 Etude du courant secondaire

On suppose que l'intensité du courant en sortie d'un redresseur est parfaitement lissée. La valeur de cette intensité I_a est de 16200 A correspondant au cas de figure où le réglage de la commande du gradateur est $\psi = 75^\circ$.

Les formes d'ondes des courants absorbés par le groupement 1 (gradateur-transformateur-redresseur) sont données sur le document réponse DRB-6.



- QB 1-24) Déterminer la valeur efficace I_a du courant $i_a(t)$ en fonction de I_0 et calculer sa valeur.
- QB 1-25) Déterminer l'expression $i_a(t)$ de la décomposition en série de Fourier de $i_a(t)$.
- QB 1-26) Donner l'expression de $i_{af}(t)$ et montrer que la valeur efficace de I_{af} s'écrit :

$$I_{af} = 0,78 I_0$$

- QB 1-27) Compléter le document réponse DRB-6 avec l'allure du fondamental.
- QB 1-28) Déterminer la puissance active P en fonction de ψ et en déduire l'expression du facteur de puissance FP .
- QB 1-29) Déterminer l'expression du taux global de distorsion $THDI_{ia}$ du courant $i_a(t)$.

1.2.4 Etude du courant primaire

On prend comme hypothèse que chaque groupement 1 et 2 fonctionne comme s'il était seul et que la commande des deux gradateurs est parfaitement identique.

Les transformateurs sont supposés parfaits et ils ont le même rapport de transformation m_1 .

La valeur efficace de la tension composée du réseau HT vaut 5,5 kV.

- QB 1-30) Donner l'équation $i_a(t)$ en fonction des courants dans les enroulements secondaires et en déduire l'équation de $i_A(t)$ en fonction de m_1 . Tracer l'allure de $i_A(t)$ sur le document réponse DRB-6.

- QB 1-31) Compte-tenu du déphasage entre les deux enroulements secondaires, tracer l'allure de $i'_a(t)$ sur le document réponse DRB-6.
- QB 1-32) Donner l'équation $i'_a(t)$ en fonction des courants dans les enroulements secondaires et en déduire l'équation de $i'_A(t)$ en fonction de m_1 . Tracer l'allure de $i'_A(t)$ sur le document réponse DRB-6.
- QB 1-33) A partir des allures de $i_A(t)$ et de $i'_A(t)$, tracer l'allure du courant en ligne $i_1(t)$ sur le document réponse DRB-6.
- QB 1-34) Montrer que la valeur efficace I_1 de $i_1(t)$ s'exprime en fonction de m_1 et I_0 . Calculer sa valeur.
- QB 1-35) Montrer que la valeur efficace I_{1f} du fondamental du courant de $i_1(t)$ s'exprime en fonction de m_1 et I_0 par la relation :

$$I_{1f} = 1,56 \frac{I_0}{m_1}$$

Calculer sa valeur.

- QB 1-36) Compléter le document réponse DRB-6 avec l'allure du fondamental.
- QB 1-37) Comparer les valeurs de I_1 et de I_{1f} et commenter.
- QB 1-38) Tracer le spectre des courants harmoniques générés par le convertisseur étudié $i_1(t)$ et comparer au spectre des courants harmoniques générés par un groupement gradateur-transformateur-redresseur $i_a(t)$.
- QB 1-39) Déterminer le taux de distorsion harmonique THDI_{i_1} du courant $i_1(t)$. Comparer le résultat avec le taux de distorsion harmonique THDI_{i_a} du groupement gradateur-transformateur-redresseur.
- QB 1-40) Déterminer la puissance active P , la puissance réactive Q et la puissance déformante D fournies par le réseau. En déduire l'expression du facteur de puissance FP .

2 Etude de la structure réelle

Pour rendre plus facile l'étude de l'association gradateur-transformateur-redresseur nous avons utilisé un redresseur de type PD3. En réalité le redresseur utilisé est différent. Nous allons faire son étude et mettre en évidence son intérêt par rapport à la solution avec redresseur P3.

Toute l'étude précédente des tensions et des courants en amont du transformateur de l'association gradateur-transformateur-redresseur reste valable.

- QB 2-1) A partir du schéma électrique DTB-2, proposer le schéma de principe de l'ensemble transformateur-redresseur. Préciser le nom de ce redresseur.
- QB 2-2) Préciser le nom et la fonction de l'élément L71.
- QB 2-3) Donner l'expression de la valeur moyenne U_{d0} de la tension de sortie du redresseur en fonction de la valeur efficace V_2 de sa tension simple d'alimentation.
- QB 2-4) A partir du résultat précédent et du schéma de la structure (Fig. B3), déterminer l'expression de la valeur moyenne de la tension de sortie en fonction de la tension d'alimentation lorsque l'association est à pleine puissance (commande des thyristors $\psi = 0$).

On désigne respectivement par V_1 et V_2 la valeur efficace des tensions simples primaires et secondaires.

- QB 2-5) Calculer la valeur de m' pour trouver la même valeur de tension U_{d0} .

- QB 2-6) Donner l'expression du courant efficace secondaire I_2 en fonction de I_d et m , en déduire l'expression du courant efficace primaire I_1 et celle du courant efficace en ligne I_L .
- QB 2-7) Calculer les valeurs efficaces de I_2 , I_1 et I_L .
- QB 2-8) Déterminer le facteur de puissance secondaire FP_S et primaire FP_P . Comparer ces résultats avec le montage PD3.
- QB 2-9) Calculer le courant moyen dans une diode. Comparer ce résultat avec celui du montage PD3.

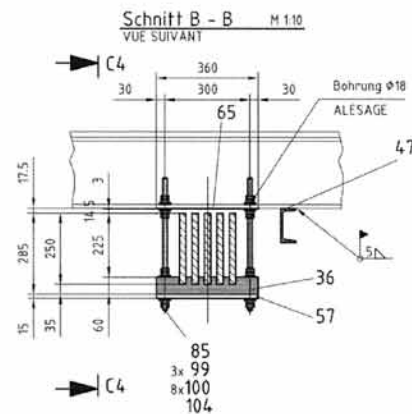
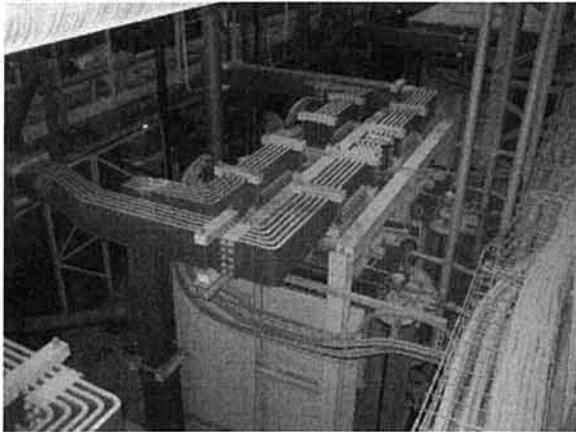
3 Problème de l'alimentation des électrodes

Vues les puissances mises en jeu, les problèmes de la dissipation thermique, du contact électrique et des efforts électrodynamiques ne peuvent pas être négligés.

3.1 Alimentation de la cellule par le jeu de barres

Afin de réduire la longueur des jeux de barres et diminuer la masse de cuivre le transformateur et le redresseur du groupement gradateur-transformateur-redresseur est installé au plus près de la cellule.

Il n'en reste pas moins que la longueur du jeu de barres en continu est importante et que les barres sont le siège d'efforts électrodynamiques.



Le jeu de barre est constitué de 5 barres :

- Dimension : 250 mm × 20 mm
- $\rho_{Cu} = 18,51 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ à $T_a = 40^\circ\text{C}$
- Longueur : $L = 10 \text{ m}$

QB 3-1) Déterminer la chute de tension dans les barres. Calculer sa valeur pour $I = 60 \text{ kA}$.

QB 3-2) Déterminer les pertes dans le jeu de barres. Calculer leurs valeurs.

3.2 Dimensionnement de l'ensemble bague-balais

La cathode de la cellule est reliée au jeu de barres en sortie du redresseur par un ensemble bagues-balai.

Chaque extrémité de l'axe du tambour de la cellule est munie de collecteur. Un ensemble de 144 balais assure le passage du courant entre le jeu de barres et les bagues.

Cellule Rouleau principal (cylindre cathodique) :

- Diamètre du rouleau principal D_C : 1830 à 1820 mm (en fonction de l'usure)
- Diamètre des bagues D_b : 450 mm

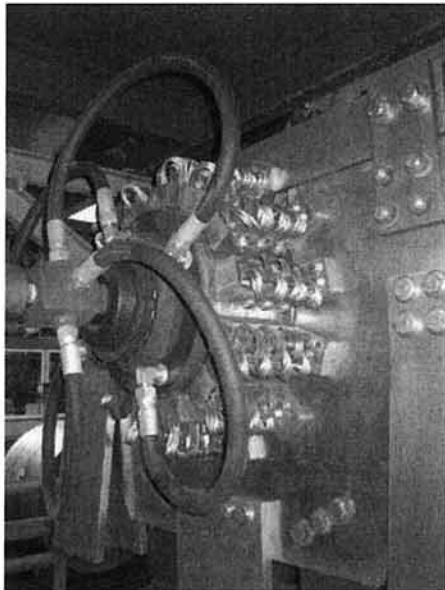
Tôle à traiter

- Largeur L_t : 700 à 1520 mm

- Epaisseur e_t : 0,4 à 3 mm
- Vitesse de défilement maximale v_t : 85 m.min⁻¹

Les balais de qualité MC79P développés par la société Carbone Lorraine ont pour dimensions :

- 37,7 mm × 37,7 mm × 50 mm (DTB-5)



Pertes dans les balais

- soit d'**origine mécanique** et leur expression est : $W_m = \mu \cdot F \cdot v$
avec :
 - F : composante normale de la force d'appui du balai sur le collecteur en daN
 - v : vitesse périphérique en m/s
 - μ : coefficient de frottement du balai sur le collecteur ;
- soit d'**origine électrique**, avec trois composantes :
 - $W_{ch} = \left(\frac{\rho h}{S}\right) I^2$ due à la résistance électrique, faible, du balai de hauteur h et de surface S ,
 - $W_S = r \cdot I^2$ due à la résistance r de la connexion,
 - $W_Z = I \cdot \Delta U$ due à la chute de tension ΔU au contact.



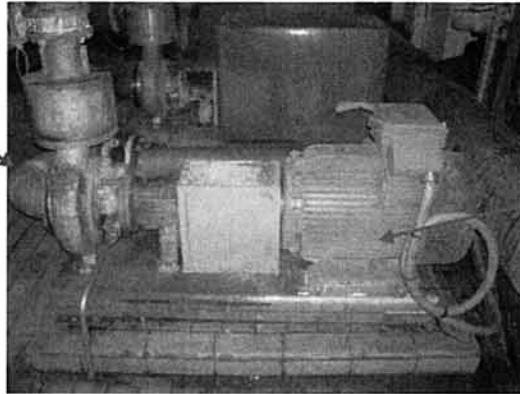
- QB 3-3) Déterminer la densité de courant dans chaque balai J_b . Calculer sa valeur
- QB 3-4) Déterminer la vitesse périphérique v_b au niveau des balais. Calculer sa valeur.
- QB 3-5) Vérifier la compatibilité avec la nuance de balai utilisée.
- QB 3-6) Déterminer la force à exercer sur le balai et calculer les pertes mécaniques dans le balai W_m .
- QB 3-7) Déterminer la résistance d'un balai et calculer les pertes dans le balai W_{ch} et la chute de tension dans le balai ΔU_b .
- QB 3-8) Déterminer la chute de tension au contact du balai et calculer les pertes au contact W_Z .
- QB 3-9) Déterminer l'ensemble des pertes. Indiquer une solution technique pour assurer un fonctionnement correct de l'ensemble bagues/balais.

Partie C : Rénovation de la régulation de débit d'une cellule d'électrozingage

Pour assurer une électrolyse correcte, il faut garantir un débit d'électrolyte (acide sulfurique) constant. Depuis la création de la ligne d'électrozingage avec ses deux accumulateurs verticaux en 1999, la régulation de débit de l'électrolyte est assurée par une vanne régulatrice.

La consigne de débit de l'électrolyte est délivrée par un automate CEGELEC C350, cette valeur est modifiable au niveau de la supervision pour répondre au besoin du type de production.

Pompe DURCO
Débit max de $200\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.



Moteur asynchrone triphasé 230 / 400 V
Puissance de 45 kW
 $\cos \varphi = 0,89$
 $\eta = 92,5\%$
Intensité de 85A sous 400 V
Intensité de 146A sous 230 V
 $N_n = 2940 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$

La pompe DURCO (repère ZN n°8) est entraînée par un moteur asynchrone triphasé de 45 kW en démarrage direct. L'automate C350 CEGELEC fournit une consigne de débit q_c à un régulateur numérique SANSON TROVIS. Le débit q est mesuré par un débitmètre électromagnétique KHRONE associé à un convertisseur de mesures qui fournit une mesure du débit q_m au régulateur numérique. Le régulateur numérique PID délivre alors une commande au positionneur électro-pneumatique NELES de la vanne NELES (repère FCV8). L'action d'ouverture ou de fermeture sur la vanne règle le débit dans la canalisation.

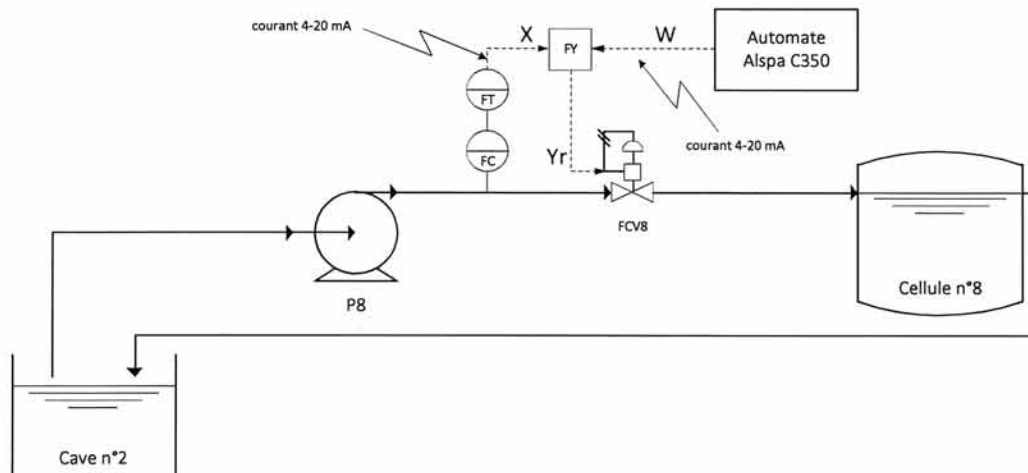
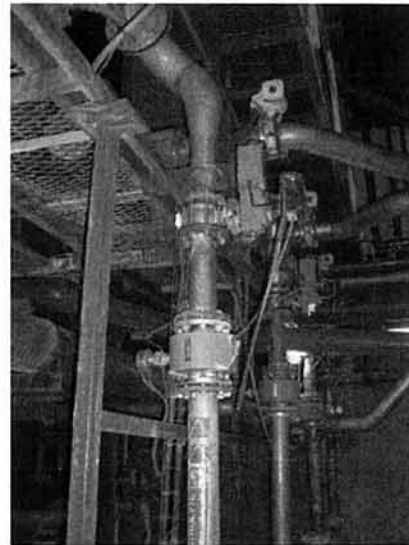


Fig. C1 - Schéma de principe de la boucle de régulation

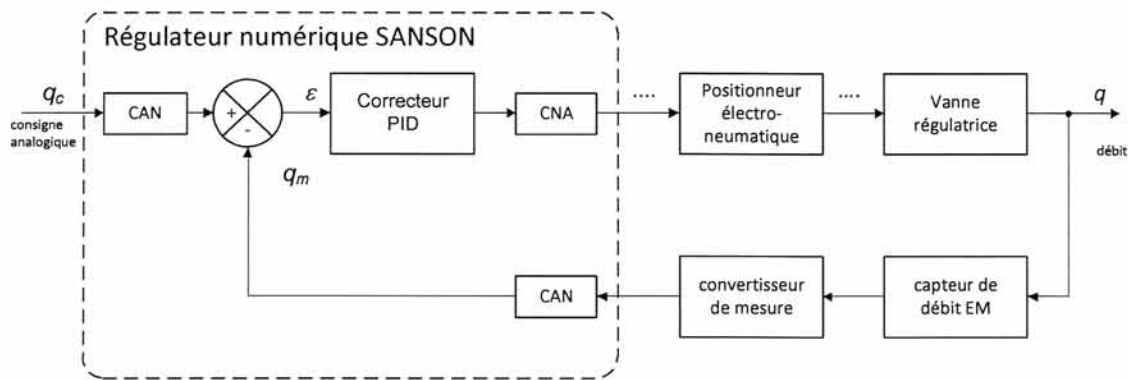
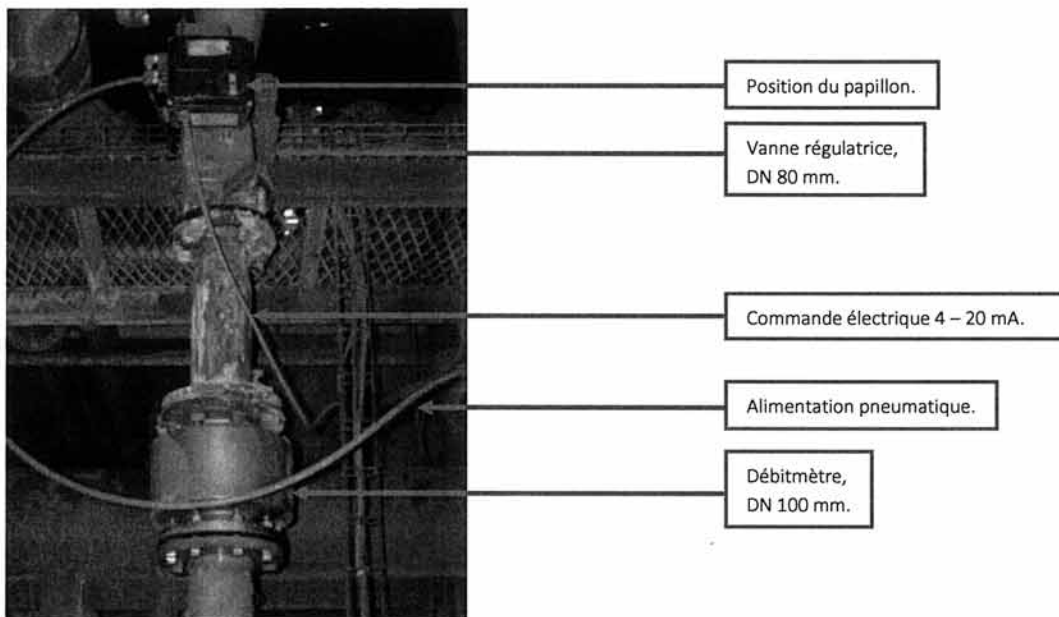


Fig. C2 - Schéma bloc de la boucle de régulation



Dans ce type de régulation la pompe est toujours entraînée à vitesse constante, le moteur fonctionne quasi à son point nominal. La gamme de débit nécessaire pour un fonctionnement optimum de l'électrolyse est inférieure au débit nominal de la pompe. La consommation d'énergie dans ces conditions est beaucoup plus importante que nécessaire.

Les coûts de maintenance (prix de la vanne régulatrice), le temps d'immobilisation en cas de panne d'une vanne, le coût de l'énergie électrique ont conduit l'équipe en charge de l'exploitation de la ligne d'électrozingage (service méthode et service instrumentation) de changer de solution technique par une solution en variation de vitesse.

Fig. C3 - Supervision de la régulation de débit d'électrolyte (cellule n°8)

- VP 81 : Aspiration pompe Zn n°8.
- VPR 8 : Refoulement pompe Zn n°8.
- FCV 8 : Vanne régulatrice.
- VB 18 : Bypass.
- VA 28 : Alimentation électrolyte.
- VV 28 : Bypass.
- VT 81 : Configuration simple face.
- VT 82 : Configuration double face.
- VR 28.3 : Débordement.
- VR 28.1 : Débordement.
- VVT 80 : Vidange totale.
- VR 28.2 : Vanne manuelle vidange totale.

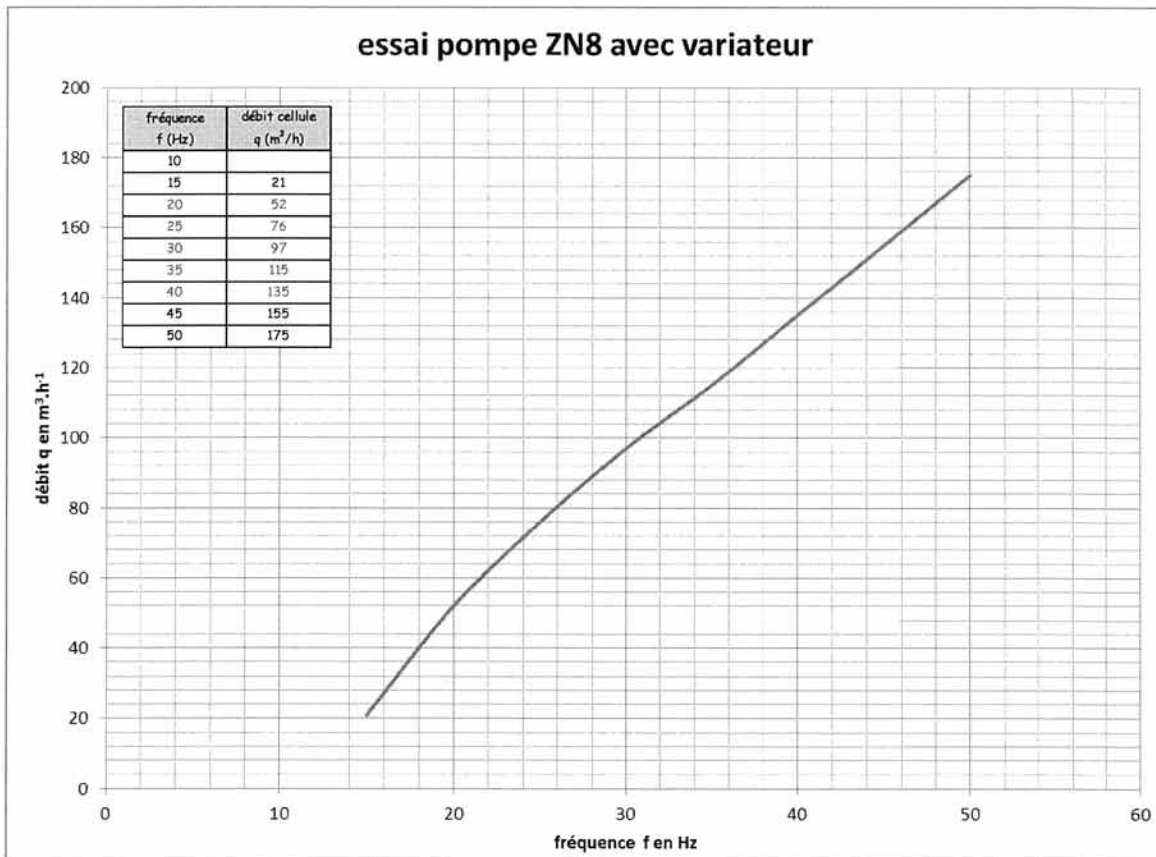
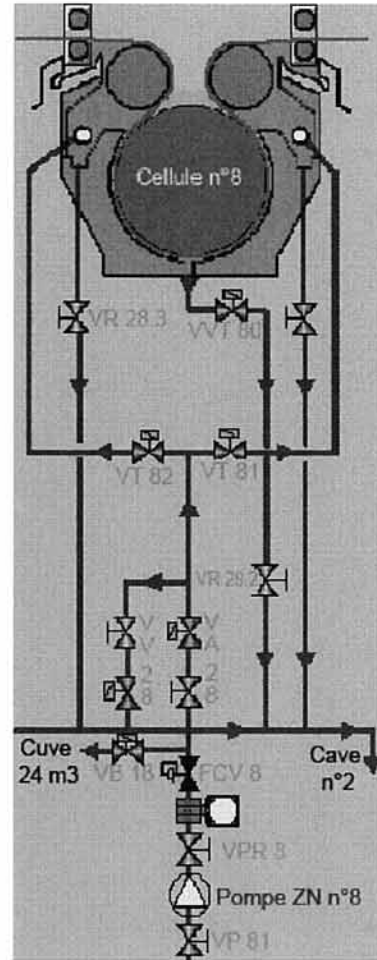


Fig. C4 – Régulation du débit de la pompe avec la vitesse

1 Choix de la pompe

La figure ci-dessous (Fig. C5) présente le profil de la conduite hydraulique reliant la pompe immergée de la cave n°2 à la cellule d'électrolyse n°8, destinée à recevoir l'électrolyte acide.

Il s'agit d'une conduite en inox DN150 (diamètre intérieur 159,3 mm) et de longueur totale $L = 34$ m dont 2 m en sortie de pompe. Il faut aussi compter 6 coudes à 90° qui ajoute chacun 2 m de canalisation.

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

$$J_{tu} = 2,25 \times 10^{-4} \cdot Q_v^2$$

où

- J_{tu} sont les pertes de charge pour 100 m de conduite (elles sont exprimées en m de colonne d'eau mCE)
- Q_v est le débit exprimé en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Les pertes de charge dues à la vanne régulatrice en fonctionnement sans variateur dépendent du débit volumique Q_v et sont données par :

$$J_{va} = 2,39 \times 10^{-3} \cdot Q_v^2$$

où

- J_{va} sont les pertes de charges de la vanne exprimées en m de colonne d'eau mCE
- Q_v est le débit exprimé en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Vu la longueur et la forme de la conduite, on ne pourra pas négliger les pertes de charge singulières devant les pertes de charge régulières.

Une prise d'air permet de maintenir la pression à la surface de l'électrolyte eau dans la cave à la pression atmosphérique.

Côté refoulement, l'électrolyte débouche à une pression de 1,8 bar pour permettre une circulation correcte de l'électrolyte dans la cellule d'électrolyse.

Au cours d'une semaine de fonctionnement, le niveau d'électrolyte dans la cave ne varie pas.

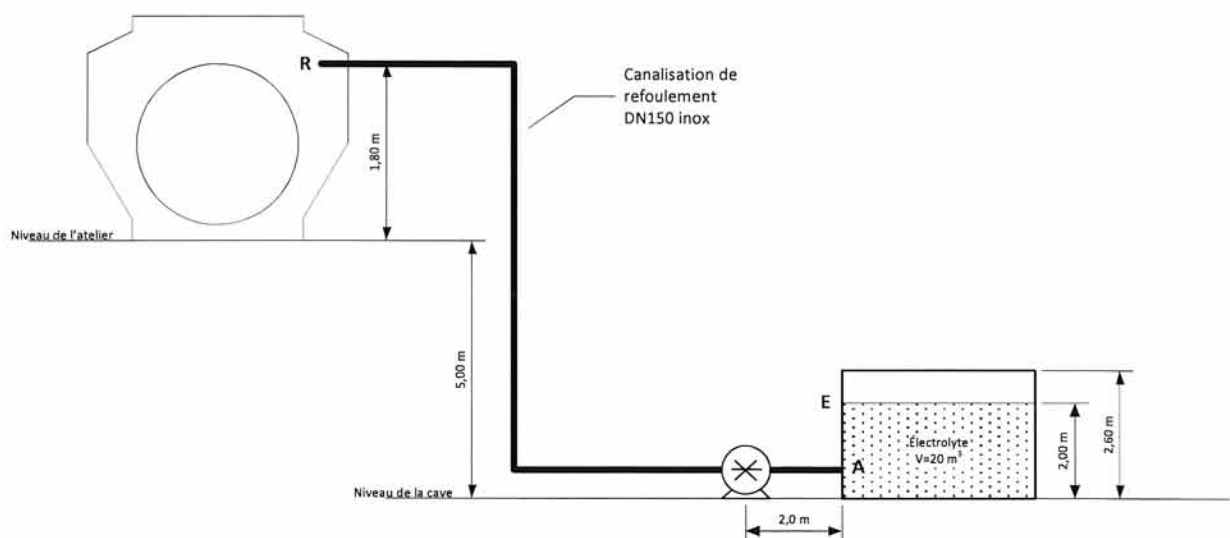


Fig. C5 – Profil de l'installation de pompage de l'électrolyte

Données :

- masse volumique de l'eau (H₂O) : $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- masse volumique de l'acide sulfurique (H₂SO₄) : $\rho = 1830,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- accélération du champ de pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

1.1 Notions d'hydraulique

- QC 1-1) Rappeler la relation entre débit q et vitesse d'écoulement v_e .
- QC 1-2) Rappeler la relation entre pression p et force F .
- QC 1-3) Déterminer la pression p exercée par une hauteur d'eau h .
- QC 1-4) A partir de l'expression de la puissance mécanique, déterminer la relation de la puissance hydraulique P_h en fonction du débit q .
- q est le débit de fluide traversant la pompe (exprimé en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
 - H_{pompe} sa hauteur manométrique totale

$$P_{méca} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

1.2 Caractéristiques hydrauliques de l'installation en vue du choix de la pompe et du moteur

L'expression du théorème de Bernoulli généralisé est la suivante :

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

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.
- QC 1-5) Déterminer les valeurs du dénivelé h entre le point de refoulement dans la cellule et la surface de l'électrolyte dans la cave (Fig. C5) :
- QC 1-6) En appliquant le théorème de Bernoulli généralisé, 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.

- QC 1-7) Déterminer la hauteur manométrique totale de la pompe H_{pompe} et montrer qu'elle peut s'exprimer en fonction du débit dans la conduite q en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et du dénivelé h en m.
- QC 1-8) Compte tenu des caractéristiques de l'installation et des variations possibles du débit, calculer la valeur maximale de H_{pompe} .

- QC 1-9) Calculer la puissance hydraulique P_h que doit fournir la pompe pour assurer le débit maximal $Q_{v,max}$.
- QC 1-10) La pompe choisie a un rendement mécanique de 67%. Déterminer la puissance utile P_u que devra délivrer le moteur d'entraînement de la pompe.

1.3 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 est fourni sur le document réponse DRC-1, 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).

Le moteur d'entraînement est de type asynchrone triphasé, de puissance 45 kW et de vitesse nominale 2940 tr.min^{-1} .

On rappelle que la plage de variation de débit souhaitée s'étend de 70 à $120 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$.

- QC 1-11) Pour un débit $q = 113 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, déterminer la hauteur manométrique totale de la pompe H_{pompe} quand elle est en démarrage direct.
- QC 1-12) Déterminer la puissance mécanique P_m que devra délivrer le moteur d'entraînement de la pompe et la puissance électrique absorbée P_e .
- QC 1-13) A l'aide de l'essai de la pompe en vitesse variable déterminer la consigne de fréquence du variateur assurant un débit de $113 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$.
- QC 1-14) Pour un débit $q = 113 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, déterminer la hauteur manométrique totale de la pompe H_{pompe} quand elle est en vitesse variable.
- QC 1-15) Déterminer la puissance mécanique P_m que devra délivrer le moteur d'entraînement de la pompe et la puissance électrique absorbée P_e .
- QC 1-16) Compléter le document-réponse DRC-1 en plaçant les 2 points de fonctionnement possibles de la pompe. Conclure quant à la validité du choix de cette pompe.

1.4 Validation du choix du variateur

- QC 1-17) Choisir, dans la documentation technique (DTC-2), le variateur de vitesse adapté sachant que la fréquence de découpage est réglée à 6 kHz.
- QC 1-18) Proposer sur le document réponse DRC-2, un schéma de raccordement de la partie puissance du variateur avec ses protections et de la partie commande (voir DTC-3) avec le régulateur de débit Sanson.
- La consigne de vitesse de la pompe est fournie par le régulateur de débit ;
 - Le débitmètre avec son convertisseur transmet une image de la vitesse (débit) après adaptation au variateur ;
 - L'automate C350 donne les ordres de marche de la pompe ;
 - L'automate C350 prend en compte les défauts du variateur et le retour marche.

L'automate C350 de la société CGEE Alstom est maintenant obsolète.

- QC 1-19) A partir du synoptique général de l'automatisme et de la communication DTC-5, proposer une solution permettant de supprimer l'automate C350 sachant que les variateurs MICROMASTER intègrent tous un port Profibus.

2 Calcul de l'amortissement de la solution

Le calcul de l'amortissement permet de déterminer le temps nécessaire pour rentabiliser l'investissement.

Le contrat auprès du fournisseur historique est en tarif vert A8 en version moyennes utilisation MU.

2.1 Calcul du retour sur investissement

On admet que le temps de travail en heures de la ligne est de **5760 h/an** et que le coût moyen de l'énergie est de **5 c€/kWh**.

La vanne régulatrice est un élément fragile car il doit supporter la pression maximale de la pompe. Il faut changer en moyenne 5 vannes tous les deux ans sur la ligne. Son coût est de 8000 €.

La pompe n°5 en démarrage direct est associée avec une vanne régulatrice tandis que la pompe n°8 est associée avec un variateur de vitesse.

Un relevé des puissances pour un débit de $113 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ avant et après rénovation du système de pompage donne :

	Pompe	n°5 (sans variateur)	n°8 (avec variateur)
Mesures	U	405 V	405 V
	I	71 A	30 A
	P	42,36 kW	15 kW
	FP	0,855	0,706

- QC 2-1) Calculer l'économie d'énergie en € HT réalisée par l'utilisation d'une pompe en variation de vitesse.
- QC 2-2) Calculer l'économie en maintenance sans tenir compte du coût de la main d'œuvre.
- QC 2-3) A partir de la nomenclature du matériel (DTC-4), rappeler le coût de l'installation sans tenir compte du coût de la main d'œuvre.
- QC 2-4) Déterminer le temps de retour sur investissement en mois. Conclure sur l'utilité et la rentabilité de cette solution.

2.2 Amélioration de la rentabilité avec les certificats d'économie d'énergie CEE

Le dispositif CEE est un outil destiné à déclencher de nouveaux investissements en matière de maîtrise de l'énergie. En cela, les CEE sont à considérer comme un levier financier supplémentaire, au service d'un programme d'économies d'énergie, au même titre que les subventions ou les avantages fiscaux (amortissement exceptionnel, crédit d'impôt...).

La démarche à engager doit viser en premier lieu la réduction de la consommation d'énergie et des coûts associés. L'économie d'énergie reste, pour les actions éligibles, le premier bénéfice motivant l'investissement, le CEE étant un facteur facilitant cet investissement.

La fiche concernant les systèmes de variations de vitesse est fournie dans le dossier technique (DTC-6).

L'étude de rentabilité et la faisabilité de la solution technique (remplacement d'une vanne régulatrice par un variateur de vitesse) sont concluantes. Nous cherchons donc à moderniser l'ensemble des pompes et à trouver une aide financière.

- QC 2-5) Déterminer les conditions d'obtention d'un certificat d'économie d'énergie.
- QC 2-6) Calculer le nombre de kWh cumac et en déduire le montant de la prime sachant que le prix moyen du certificat d'économie d'énergie est de 0,35 c€ le kWh cumac.
- QC 2-7) Déterminer le nouveau temps de retour sur investissement en mois dans ces conditions. Conclure sur l'utilité et la rentabilité de cette solution.

Partie D : Influence des variateurs dans le dimensionnement de la ligne d'alimentation

Le passage de la commande des pompes d'électrolyte en variation de vitesse apporte des gains non négligeables d'un point de vue économique en diminuant la consommation électrique et en termes de maintenance en évitant des interruptions de productions.

Par contre le facteur de puissance de l'installation des lignes d'électrozingage a diminué et dorénavant nous sommes en présence d'une pollution harmonique importante due au principe même des variateurs de fréquence.

Nous allons donc déterminer l'origine de cette pollution harmonique, la quantifier et vérifier que le dimensionnement de l'installation électrique (câble et protection contre les surintensités) est correct.

1 Modèle des variateurs de vitesse pour MAS

Les variateurs de vitesse pour MAS sont constitués d'un convertisseur alternatif-continu (redresseur), d'une cellule de filtrage (bus DC) et d'un convertisseur continu-alternatif (onduleur MLI) comme l'indique le schéma de principe ci-dessous (Fig. D1).

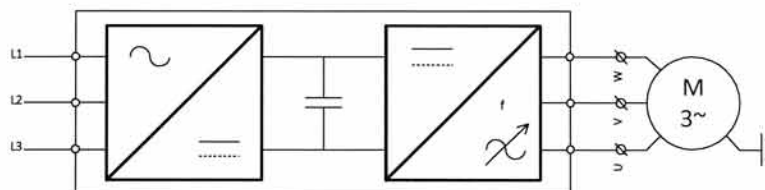


Fig. D1 – Principe d'un variateur de vitesse pour MAS

La structure interne est la suivante :

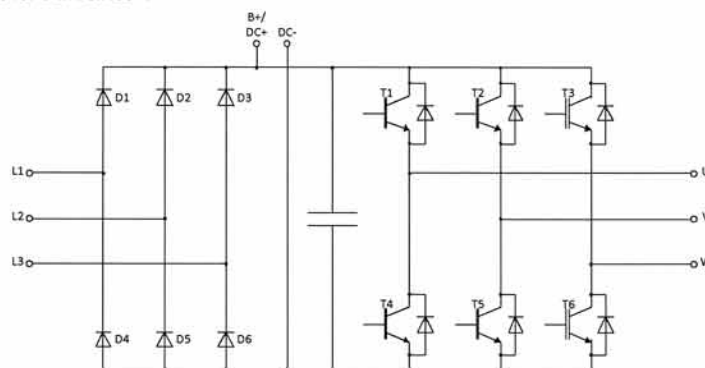


Fig. D2 - Structure interne d'un variateur de vitesse

1.1 Forme d'onde

Soit un courant $i(\theta)$ défini, sur l'intervalle $\left[-\frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha}{2}\right]$ par la fonction : $i(\theta) = \hat{I} \cdot \cos(q \cdot \theta)$ avec $\theta = \omega \cdot t$

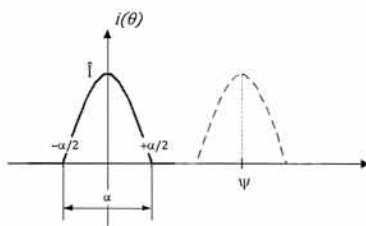


Fig. D3 - Forme d'onde

QD 1-1) Déterminer la relation qui lie q et α .

Le courant précédent est décalé d'un angle quelconque ψ .

QD 1-2) Déterminer la nouvelle équation du courant $i(\theta)$

1.2 Allure du courant en ligne du variateur

On suppose que le courant absorbé par le redresseur a la forme suivante (Fig. D4) ce qui correspond au cas d'un redresseur avec filtrage capacitif sur lequel on absorbe un courant continu.

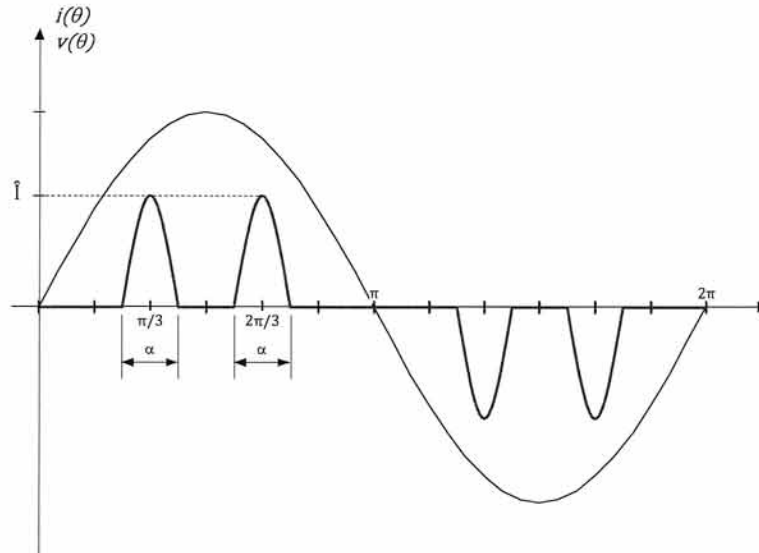


Fig. D4 - Allure théorique du courant en ligne d'un variateur pour MAS triphasé

QD 1-3) Déterminer l'équation du courant $i(\theta)$ sur les deux intervalles en fonction de q .

QD 1-4) Déterminer la valeur efficace I du courant $i(\theta)$ en fonction de α .

QD 1-5) A partir de la structure de puissance du variateur (Fig. D2), donner une explication sur la forme du courant.

1.3 Analyse harmonique du courant en ligne du variateur

QD 1-6) Développer en série de Fourier le courant en ligne $i(\theta)$, déterminer l'expression de la valeur efficace des harmoniques I_{hn} en fonction de q , I et de n .

$$i(\theta) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{hn} \sqrt{2} \sin(n\theta + \varphi_n)$$

QD 1-7) Calculer l'amplitude des 17 premiers harmoniques pour :

- $\alpha = 24^\circ$
- $I = 29 \text{ A}$

Tracer le spectre d'amplitude.

QD 1-8) Exprimer les relations de P , Q , S et D respectivement puissance active, puissance réactive, puissance apparente, puissance déformante et en déduire le facteur de puissance FP vu du côté réseau.

QD 1-9) Exprimer le taux de distorsion harmonique en courant THDI et le facteur de distorsion DF.

QD 1-10) Effectuer les applications numériques de P , Q , S , D , du facteur de puissance FP et du taux de distorsion harmonique en courant THDI et le facteur distorsion DF, puis conclure.

1.4 Analyse des mesures

Un relevé à l'énergimètre Chauvin Arnoux CA8230 et d'une pince ampèremétrique MN93A est effectué en amont du variateur (DTD-1). Il permet de visualiser le courant en ligne du variateur sans self de ligne (Mesures 1) et avec selfs de ligne (Mesures 2). Une mesure du courant en ligne de la pompe en démarrage direct est aussi réalisée (Mesures 3).

- QD 1-11) A partir du relevé (Mesures 1), préciser les grandeurs mesurées
- QD 1-12) Vérifier par le calcul les valeurs de P, Q, S, THDI, DF et le facteur de puissance FP et calculer la puissance déformante D.
- QD 1-13) Comparer ces résultats à l'étude théorique.
- QD 1-14) A partir du relevé (Mesures 1), préciser le déphasage entre la tension et le fondamental du courant. Rappeler le principe de la mesure de puissance en triphasé équilibré avec un appareil monophasé.

1.5 Amélioration du fonctionnement

1.5.1 Utilisation de self de ligne

- QD 1-15) A partir du relevé (Mesures 2), préciser les grandeurs mesurées.
- QD 1-16) Vérifier par le calcul les valeurs de P, Q, S, THDI, DF et le facteur de puissance FP et calculer la puissance déformante D.
- QD 1-17) Présenter les effets de la self de ligne sur le courant. Justifier la nouvelle allure du courant.
- QD 1-18) A partir du relevé, préciser les grandeurs caractéristiques de la tension $u_{\text{var}}(t)$ en aval de la self et faire une analyse harmonique.
- QD 1-19) Justifier à partir de la structure interne du redresseur, l'allure de la tension à l'entrée du variateur en aval des selfs de ligne.
- QD 1-20) Vérifier la valeur de la self de ligne.

1.5.2 Réduction de la distorsion harmonique

- QD 1-21) Proposer le schéma d'une solution de filtrage des harmoniques.
- QD 1-22) Déterminer les éléments du filtre.

2 Influences des variateurs dans le choix et le réglage de la protection

On se propose de vérifier le dimensionnement de la ligne du groupe de 4 pompes par la méthode des impédances. Le groupement est alimenté en énergie par un transformateur de 800 kVA. Nous allons vérifier que la protection générale du transformateur est toujours adaptée au cas où l'utilisation du variateur serait généralisée aux autres pompes (pompes Zn5 à pompe Zn7).

- La liaison transformateur/jeu de barres mesure 50 m.
- Les pertes dues à la charge (cuivre) s'élèvent à 10,7 kW.
- Le courant d'emploi avant modification est estimé à 500 A avec un facteur de puissance de 0,85.
- Les câbles monoconducteurs d'alimentation des départs pompes sont du type U1000 R02V posés sur chemin de câble perforé sans autre circuit.
- La température ambiante est de 40°C.

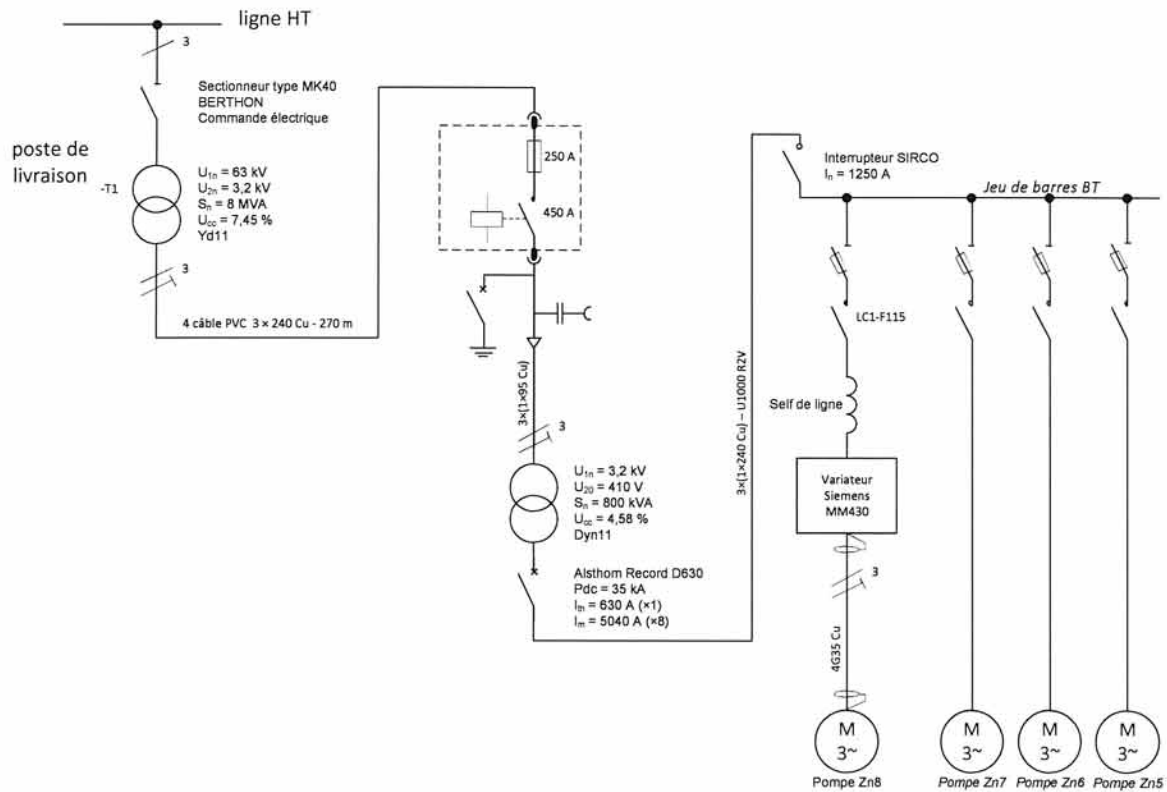


Fig. D5 – Schéma électrique unifilaire alimentation des pompes cave n°2

- QD 2-1) Déterminer la puissance de court-circuit du réseau amont en tenant compte uniquement du transformateur HTB/HTA et du câble.
- QD 2-2) Déterminer le courant nominal I_{2n} et le courant de court-circuit I_{2cc} au secondaire du transformateur.
- QD 2-3) A l'aide du courant d'emploi, vérifier le choix du calibre et des réglages du disjoncteur.
- QD 2-4) Choisir la section des conducteurs.
- QD 2-5) Vérifier la chute de tension pour valider le choix de la section des conducteurs.
- QD 2-6) Déterminer l'impédance amont Z_a du transformateur et les éléments R_a et X_a .
- QD 2-7) Déterminer l'impédance Z_T du transformateur et les éléments R_T et X_T .
- QD 2-8) Déterminer les éléments R_l et X_l de la ligne d'alimentation de chaque pompe.
- QA 2-9) Calculer le courant de court-circuit triphasé I_{cc3} juste en aval du transformateur.
- QD 2-10) Calculer le courant de défaut I_d au niveau du jeu de barre.
- QD 2-11) Vérifier le réglage de la protection.
- QD 2-12) Mettre en évidence l'influence de la modification de la solution technique sur le dimensionnement de la distribution électrique.

Partie E : Distribution électrique du site

Le poste d'alimentation en énergie électrique de l'usine Duferco-Coating est dénommé ALB, il est alimenté en 63 kV par le poste source 225kV/63kV RTE de Beautor.

Ce raccordement est constitué sur la totalité du tracé par 2 liaisons aériennes en câbles Alu acier de type « canna », de section 228 mm², et dénommée ALB-BEAUTOR 1 et ALB-BEAUTOR 2.

Le schéma (DTE-1) représente le schéma unifilaire des installations 63 kV et comporte la dénomination des départs et de l'appareillage ainsi que les limites de propriété.

La distance entre les 2 postes est d'environ 658 m.

La puissance de court-circuit du poste source est de 2500 MVA.

Le poste de livraison de l'usine est constitué de cellules HT Siemens et de 5 transformateurs fournissant des tensions de 3,2 kV et de 5,5 kV alimentant les différentes unités de l'usine.

Les transformateurs T1, T3 et T4 alimentent l'unité d'électrozingage.

- T1 : pompage électrolyte (caves 1 et 2), motorisation ligne, dégraissage, soudeuse, refendage, ...
- T3 : cellules d'électrozingage 3 à 8
- T5 : cellules d'électrozingage 1 et 2

Les transformateurs T2 et T4 alimentent les autres unités de l'usine c'est-à-dire le laminoir à froid quarto, le recuit (traitement thermique), le skin-pass, le cisailage et la rectification.

1 LE POSTE DE LIVRAISON

1.1 Structure de la distribution

Le schéma unifilaire du poste de livraison 63 kV de l'usine est fourni dans le dossier technique (DTE-1).

QE 1-1) Rappeler le domaine de tension des tensions de livraison de l'usine.

QE 1-2) Justifier la présence de deux arrivées 63 kV. Préciser le nom de la structure.

QE 1-3) Indiquer le rôle et la fonction du sectionneur entouré sur le schéma unifilaire (DTE-1).

Le site est alimenté par la liaison ALB-1. Un défaut apparaît sur cette liaison.

QE 1-4) Décrire les manœuvres à effectuer pour continuer à assurer l'alimentation du site.

QE 1-5) La distribution électrique du site utilise un schéma de liaison à la terre (SLT) de type IT. Donner les avantages et les inconvénients de cette solution.

1.2 Tarification

Le contrat auprès du fournisseur historique est un tarif vert A8 en version MU. Les prix du tarif sont donnés en annexe (DTE-2)

Les puissances souscrites sont identiques pour chaque périodes et égales à 13700 kW.

QE 1-6) Rappeler la signification de tarif vert A8.

QE 1-7) Calculer la puissance réduite souscrite P_R .

QE 1-8) Calculer le coût annuel et mensuel en € HT de la prime fixe (abonnement).

1.3 Détermination du coût moyen de l'énergie

L'entreprise produit toute l'année à part un arrêt pour entretien de 4 semaines au mois d'août et un arrêt de 2 semaines pendant la période de Noël.

QE 1-9) Déterminer le nombre d'heure de travail par semaine sur la ligne d'électrozingage pour chaque zone tarifaire (PTE, HPH, HCH, ...J/A) et pour chaque saison (hiver, demi-saison, été et juillet/août).

L'usine fonctionne :

- En semaine du lundi 14h au samedi 14h
- 1 arrêt de ligne de 8 h en semaine le jeudi de 6h à 14h
- 4 semaines d'arrêt en août pour entretien de la ligne et des cellules

QE 1-10) Calculer le temps de travail en heures pour chaque saison tarifaire sur une année. En déduire le temps de travail annuel en heures de la ligne.

QE 1-11) Calculer le coût moyen de l'énergie sur une semaine en c€/kWh pour chaque saison.

QE 1-12) Calculer le coût moyen annuel de l'énergie en c€/kWh.

2 Distribution du site

2.1 Effet d'une perturbation

Un enregistreur branché en permanence sur le réseau 63 kV surveille les tensions et contrôle la qualité de la tension conformément au contrat signé avec RTE.

Dès qu'un défaut dépassant les limites est détecté, il est enregistré.

Le 31 mars 2008, un déséquilibre de tension sur la phase 1 est apparu pendant 20 périodes soit 400 ms (creux de tension de 4 kV soit 6%).

QE 2-1) Sans calcul, préciser les conséquences de cette chute de tension sur les autres phases du réseau.

QE 2-2) En déduire l'impact qu'a eu ce défaut sur le fonctionnement

- des moteurs de l'usine
- de l'éclairage
- des automatismes
- des batteries de compensation d'énergie réactive

2.2 Compensation d'énergie réactive

La compensation d'énergie réactive au niveau HT est assurée par des batteries ABB.

- Puissance 750 kVar pour les cellules 1 et 2
- Puissance 2500 kVar pour les cellules 3 à 8

Données pour une cellule :

- Fonctionnement pleine onde
 - $I_d = 60 \text{ kA}$
 - $FP_{BT} = 0,958$
 - $THDI_{BT} = 29,6\%$
 - $FP_{HT} = 0,987$
 - $I_1 = 79,5 \text{ A}$

- $THDI_{HT} = 14,4\%$
 - Fonctionnement $\psi = 75^\circ$
 - $I_d = 32,4 \text{ kA}$
 - $FP_{BT} = 0,83$
 - $THDI_{BT} = 31\%$
 - $FP_{HT} = 0,685$
 - $I_1 = 38,9 \text{ A}$
 - $I_{1f} = 38 \text{ A}$
 - $DPF = \cos \varphi = 0,708$
 - $THDI_{HT} = 15,4\%$
- QE 2-3) Déterminer la puissance active P et réactive Q au niveau HTA (amont des transformateurs à 2 enroulements secondaires) des cellules d'électrozingage 3 à 8 quand elles absorbent un courant de 32,4 kA.
- QE 2-4) Déterminer la puissance réactive Q_b de la batterie de condensateur assurant la compensation d'énergie réactive dans ce cas de figure.
- QE 2-5) Vérifier la valeur par rapport à la batterie fixe installée.
- QE 2-6) Que se passe-t-il lorsque les cellules débitent leur courant maximal (60 kA) ?

3 Partie pédagogique

Les transformateurs HTA/BT du site sont alimentés par des cellules HTA/BT.

La maintenance de ces cellules doit être assurée tous les 5 ans pour respecter la réglementation en vigueur lors des coupures générales du site au mois d'août (3 semaines d'arrêt de ligne) ou lors d'une journée programmée de coupure le samedi.

- QE 3-1) Présenter le niveau requis en terme d'habilitation électrique pour intervenir sur des cellules HTA.

Vous disposez dans votre établissement de cellules HT de la gamme SM6 de Merlin Gérin (Schneider Electric).

- 2 cellules de sectionnement IM
- 1 cellule de comptage d'énergie CM
- 1 cellule de protection par disjoncteur QM

Vous enseignez en STS électrotechnique et vous assurez l'enseignement des 7 h de génie électrique, de 6 heures d'essais de systèmes ainsi que l'heure de cours en 2^{ème} année.

Vous voulez aborder une séquence de cours, TD et TP centré sur les cellules HT et leur utilisation.

- QE 3-2) Proposer une séquence de travaux pratiques montrant les manœuvres d'une cellule. Vous décrirez les pré-requis, les objectifs ainsi que les outils d'évaluation.