

SESSION 2010

---

**AGREGATION  
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

## L'ATELIER DE SOUDAGE D'UN GRAND CONSTRUCTEUR AUTOMOBILE

**Ce sujet comporte 3 dossiers distincts :**

📁 Dossier de présentation, texte du sujet avec le travail demandé	25 pages
📁 Documents réponses DR	4 pages
📁 Documents techniques (DTA à DTE)	40 pages

**le sujet se décompose en cinq parties indépendantes:**

- A- l'étude du soudage par points
- B- l'étude du circuit électrique des soudeuses
- C- l'étude du système de serrage des pinces
- D- alimentation en énergie d'une partie de l'atelier tôlerie
- E- communication

**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 repérée 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.

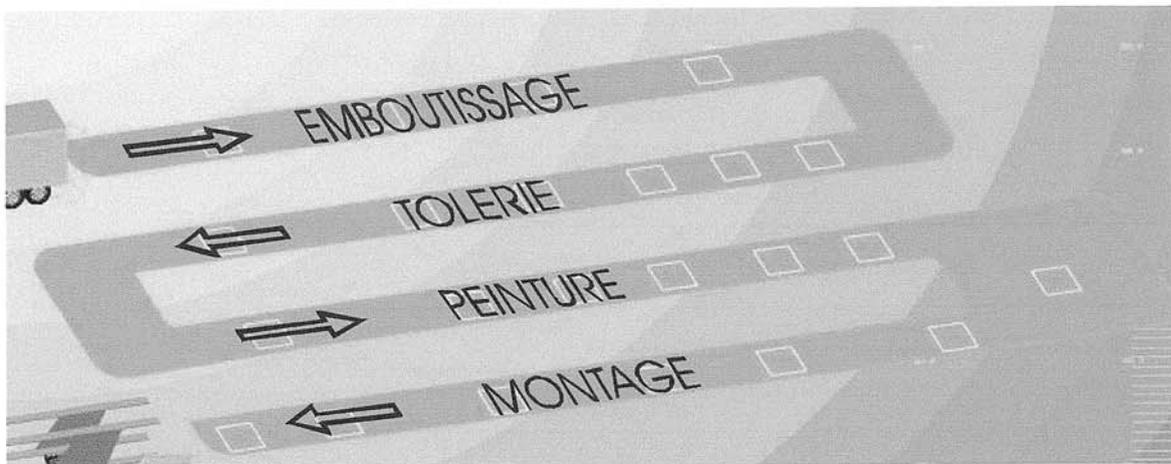
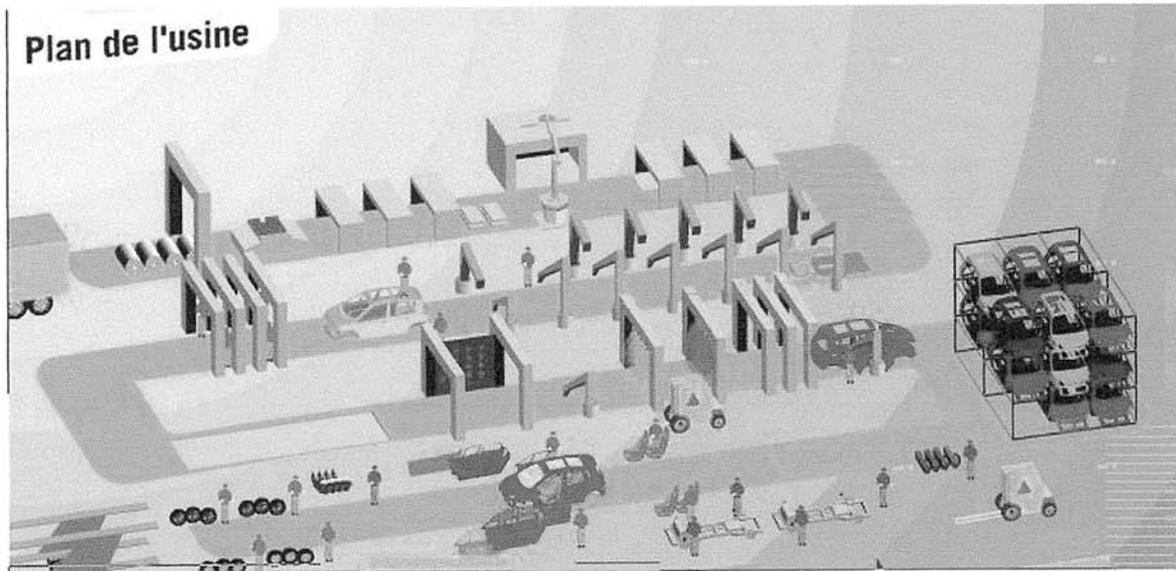
Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.

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.

## PRESENTATION DU CONTEXTE ET DE LA PROBLEMATIQUE

Un grand constructeur automobile fabrique dans une de ses usines un modèle de voiture très répandu suivant le processus suivant



La chaîne de production, très automatisée permet de fabriquer une voiture en 30h  
La cadence de production est de 2400 véhicules par jour.  
La flexibilité de cette chaîne de production permet la fabrication de plus de 250 variantes de ce véhicule en fonction des options qu'a choisies le client.

Nous nous intéressons plus particulièrement à l'atelier de tôlerie.

**L'atelier de tôlerie** a une superficie de 70000 m<sup>2</sup>.

Il reçoit les différentes tôles issues de l'atelier d'emboutissage et les assemble par soudage pour constituer la caisse de la voiture et les différents accessoires tels que les portes, les coffres, etc...

L'assemblage terminé est contrôlé en fin de chaîne avant d'être expédié vers l'atelier de peinture.

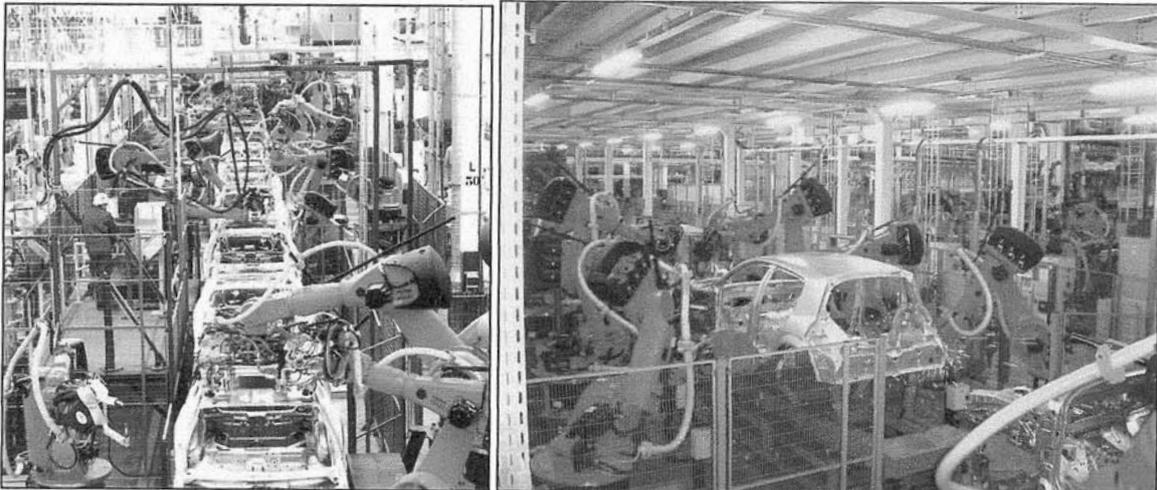
1300 personnes y travaillent en 3 équipes.

Capacité de production : **2400 caisses par jour**.

Nombre moyen de pièces de tôlerie par caisse : 400.

Taux d'automatisation : 98%.

830 robots assurent la manutention et l'assemblage des unités et de la caisse. Quelques **800 soudeuses** par points installées tout le long de la chaîne réalisent plus de **4000 points** de soudure par caisse.



Ces soudeuses sont, pour la plupart, embarquées sur un robot et réalisent les points de soudure sur la caisse, c'est le robot qui positionne la soudeuse pour chaque point de soudure

Les autres, fixes, réalisent les points de soudure sur les petites pièces que leur présentent des robots de manutention.

Cet atelier est alimenté en énergie par trois réseaux 20 kV différents:

- un réseau spécial pour les soudeuses
- un réseau spécial pour les robots et les automatismes
- un réseau d'éclairage
- l'ensemble étant issu du réseau 90 kV propre à l'usine.

L'échauffement produit par les soudeuses est important ; un réseau hydraulique (en circuit fermé) spécifique à cet atelier fournit à chaque soudeuse l'eau déminéralisée nécessaire à son refroidissement.

Cette eau est stockée dans une bûche.

Le refroidissement de cette eau est assuré par une tour d'évaporation.

Le débit global maximum de ce réseau hydraulique est de 10 m<sup>3</sup> / min, il assure la fourniture d'eau froide à 20°.

L'eau récupérée en sortie d'atelier est à une température d'environ 30°C.

### **Problématiques abordées dans ce sujet**

Fabriqué depuis 13 ans dans cette usine (compte tenu des évolutions successives), ce modèle de voiture arrive à son terme.

Les services techniques (travaux neufs, développement et maintenance) préparent la fabrication d'un nouveau type de véhicule sur cette même chaîne.

Ceci entraîne des modifications importantes du processus de fabrication et de l'outillage.

Pour l'atelier de tôlerie, des modifications sont à prévoir au niveau

- des supports de pièces (mécanique)
- des programmes des robots (trajectoire)
- **des réglages de soudeuses existantes**
- **de l'installation de nouvelles soudeuses par points**
- **des infrastructures telles que l'alimentation en énergie.**

Or depuis 10 ans la technologie a évolué et les enjeux économiques ont été modifiés.

Il est donc intéressant de partir d'un état des lieux existant, d'étudier les nouvelles solutions que proposent les constructeurs pour établir des critères de choix économiques judicieux.

## PARTIE A: GENERALITES SUR LE SOUDAGE PAR POINTS

Choisir une solution technologique répondant à un cahier des charges nécessite de connaître le procédé de fabrication mis en jeu ainsi que les paramètres influents.

Dans cet objectif, cette partie étudie plus particulièrement comment se fait un point de soudure et comment certains paramètres influent sur la qualité d'un point de soudure.

Se référer au dossier technique DTA.

### Remarque préliminaire:

le modèle considéré est un modèle très simplifié dans lequel on ne tiendra pas compte

- des échanges thermiques avec l'extérieur (durée très faible)
- des non linéarités des caractéristiques des composants électriques (en particulier avec la température et l'état de la matière)
- des échanges d'énergies interactifs
- la dispersion des lignes de courant dans le métal.

### A-I- Fusion des tôles sous les électrodes :

A partir des propriétés géométriques du volume concerné et des propriétés des matériaux donnés dans le dossier technique

**A-I-1.** Donner l'expression de la résistance électrique que présentent les tôles au passage du courant:  $R_{t1} + R_{t2}$  en fonction des paramètres électriques et géométriques de l'ensemble « tôles+électrodes »

On appellera le diamètre de l'électrode  $d$  et l'épaisseur d'une tôle  $e$

**A-I-2.** Courbe de réglage  $I_{eff} = f(\Delta t)$

La quantité de chaleur ( $Q$  en J) nécessaire pour porter un matériau à sa température de fusion est fonction de ses paramètres physiques

$$Q = m \cdot [c \cdot (T_{fusion} - T_{ambiante}) + Q_f]$$

Où

- $m$  est la masse en kg
  - $c$  est la chaleur massique en  $J/kg/^\circ C$
  - $Q_f$  est la chaleur latente de fusion (sans échange thermique avec l'extérieur)
- cette quantité de chaleur est apportée par effet Joule

- Etablir la relation  $I_{eff} = f(\Delta t, S)$

Où

- $I_{eff}$  est l'intensité efficace du courant qui passe dans les tôles
- $\Delta t$  est la durée de passage du courant qui permet d'atteindre la fusion des tôles
- $S$  est la section de la surface de contact de l'électrode.

AN: tracer cette courbe pour  $\Delta t$  variant de 100 ms à 500 ms

On prendra

- une électrode de diamètre  $d = 6$  mm
- une épaisseur de tôle  $e = 1$  mm
- $T_{\text{ambiante}} = 40^{\circ}\text{C}$
- $\rho = 14 \mu\Omega.\text{cm}$  pour tenir compte de la variation importante de la température pendant l'échauffement

**Pour la suite, les paramètres de soudage sont les suivants:**

- épaisseur totale de tôles à souder: 2 mm
- $I_{\text{eff}} = 10$  kA
- $\Delta t = 400$  ms
- $F_s$  (effort de serrage) = 240 daN

Comportement de la zone de contact tôle – tôle.

**Justifier sans calcul les affirmations suivantes.**

**A-I-3.** La résistance de contact  $R_{c3}$  a une valeur importante par rapport à la résistance des tôles.

**A-I-4.** La fusion commence toujours dans cette zone.

**A-I-5.** La résistance de contact décroît très vite et la durée de cette phase est très courte (en pratique inférieure à 20 ms).

**A-I-6.** Il faut appliquer un effort de serrage déterminé (ni trop fort ni trop faible) sur les tôles.

Comportement de la zone de contact électrode - tôle

**Justifier sans calcul les affirmations suivantes.**

**A-I-7.** Les résistances de contact  $R_{c1}$  et  $R_{c2}$  ont une valeur faible par rapport à  $R_{c3}$

**A-I-8.** En cours de soudage, la température superficielle peut atteindre quelques  $600^{\circ}\text{C}$ , la structure de l'électrode en cuivre va se modifier au fur et à mesure des soudures qu'elle réalise:

- la surface de contact va augmenter
- la résistivité va augmenter à cause de la présence du zinc à la surface des tôles à souder.

Préciser les incidences de ces phénomènes sur la qualité des points de soudure et sur la durée de vie des électrodes.

Tension entre électrodes:

**A-I-9.** Calculer la valeur efficace de la tension à appliquer entre les électrodes pour réaliser un point de soudure en supposant que les tôles ne sont que résistives.

La qualité du point de soudure:

En pratique, une certaine tolérance de réglage des 3 paramètres ( $I_{eff}$ ,  $\Delta t$  et effort de serrage) est possible.

**A-I-10.** Remplir le tableau du document réponse DR1 en indiquant les effets indésirables observés lorsqu'on s'écarte trop des réglages optimaux.

**A-II- Procédé**

A partir du chronogramme (cf DTA fig 4 et page 3) détaillant les différentes phases du procédé, construire un Grafcet de macrodescription.

**A-III- Le refroidissement en soudage par résistance**

**A-III-1** Justifier la présence de deux circuits de refroidissement par soudeuse (cf DTA fig 8).

**A-III-2** Calculer la puissance évacuée par l'eau de refroidissement pour chaque soudeuse (cf DTA page 6 )

On prendra  $c$  (chaleur massique de l'eau) = 4180 J / kg / °C.

**A-III-3** En déduire la puissance totale dissipée par l'ensemble des soudeuses de l'atelier de soudage (cf présentation du contexte et de la problématique).

## **PARTIE B: LE CIRCUIT DE PUISSANCE DE LA SOUDEUSE**

**Valider une nouvelle solution technologique nécessite :**

- la maîtrise du principe de fonctionnement
- La connaissance des critères de performances d'une solution existante afin d'établir une comparaison des deux solutions.

**Cette partie permettra de valider la structure de la soudeuse par points dite « 1000 Hz ».**

Se référer aux dossiers techniques DTB1 et DTB2.

### **PARTIE B1: ETUDE DU MODULATEUR D'ENERGIE DE LA SOUDEUSE "50 HZ":**

#### **PRESENTATION**

La structure matérielle d'une soudeuse «50 Hz » est donnée figure 1 du DTB1. Cette structure est fiable et éprouvée par l'entreprise dans ses différents ateliers. Elle constitue actuellement la majorité des équipements de soudage.

Pour la soudeuse étudiée, cette structure comprend :

- l'alimentation électrique :
  - 400 V prise entre 2 phases
- le modulateur d'énergie (F1) :
  - gradateur monophasé à thyristors
- le transformateur de soudage (F2) :
  - valeurs efficaces de
    - \*la tension primaire nominale  $U_{1n} = 400 \text{ V}$
    - \*la tension secondaire à vide  $U_{20} = 13,5 \text{ V}$
    - \*l'intensité du courant secondaire en régime permanent  $I_{2np} = 7,4 \text{ kA}$
    - \*l'intensité du courant secondaire ponctuellement admissible lors des essais électrodes serrées  $I_{2cc} = 23 \text{ kA}$
- les électrodes (F3):
  - électrode fixe
  - électrode mobile
- la commande programmable de soudage « CPS » (F4) ; elle gère
  - le réglage des intensités de soudage
  - les cycles de soudage
  - l'effort de serrage
  - les informations de contrôle et de surveillance des défauts
  - la communication avec le robot.

## ETUDE

L'objectif de l'étude est :

- B1-I - d'identifier et de caractériser les constituants de la chaîne de puissance à partir d'essais sur site
- B1-II - de vérifier les performances de la soudeuse
- B1-III - d'identifier la pollution harmonique engendrée par l'atelier de soudage.

### **B1-I MODELISATION de l'ensemble « TRANSFORMATEUR + ELECTRODES »**

cf DTB1

La modélisation du circuit électrique s'effectue à partir de relevés lors

- d'un essai à vide sous tension primaire nominale
- d'un essai en court circuit (pinces serrées sans tôles).

Les résultats des essais sont consignés dans le DTB1

**B1-I-a.** Déterminer  $Z_s$ , module de l'impédance du modèle équivalent de la soudeuse représenté figure 2 du DTB1

**B1-I-b.** En déduire  $Z_p$ , module de l'impédance du modèle équivalent de la soudeuse représenté figure 3 du DTB1

**B1-I-c.** On désigne par :

$\psi$  : l'angle de retard à l'amorçage des thyristors référencé par rapport aux passages par 0 de la tension d'alimentation  $u_1(t)$

$\varphi$  : l'argument de l'impédance  $Z_p$

- Montrer que l'expression du courant primaire  $i_1(t)$  peut se mettre sous la forme :

$$i_1(t) = \left( A e^{\frac{R_p}{L_p} \left( t - \frac{\psi}{\omega} \right)} \right) + (B(\sin(\omega t - \varphi)))$$

dans l'intervalle  $\frac{\psi}{\omega} \leq t \leq \frac{\pi + \psi}{\omega}$

- Exprimer A et B en fonction de  $U_{1m}$ ,  $Z_p$ ,  $\psi$  et  $\varphi$

**B1-I-d.** Exprimer  $\varphi$  en fonction de  $R_p$  et  $Z_p$

**B1-I-e.** En déduire la valeur de  $\psi$  pour laquelle la conduction des thyristors devient continue.

A l'aide du DTB1 (§ commande programmable de soudage)

**B1-I-f.** Relever  $\varphi$

En déduire les valeurs de  $R_p$  et  $L_p \omega$  à 50 Hz

**B1-I-g.** Relever la valeur maximale de  $\psi$

Justifier la nécessité de cette butée vis-à-vis du courant de maintien ( $I_{th_{hold}}$ ) des thyristors.

## **B1-II VERIFICATION DES PERFORMANCES DE SOUDAGE**

### **DONNEES**

Le circuit étudié est représenté figure 4 du DTB1.

Pour la suite du problème, on prendra les valeurs suivantes

-la résistance équivalente ramenée au primaire de l'ensemble

« transformateur+électrodes »  $R_p$  vaut  $0,5 \Omega$

-la réactance équivalente ramenée au primaire de l'ensemble

« transformateur+électrodes »  $L_p\omega$  vaut  $0,2 \Omega$  à 50 Hz

-la résistance moyenne totale des tôles vue du secondaire

$R_{to}$  vaut  $265 \mu\Omega$

-la réactance des tôles est négligeable

-le cycle de soudage type est représenté figure 5 du DTB1

-la variation relative à la valeur efficace nominale de la tension primaire  $U_{1n}$  est limitée à  $+ / -10\%$

**B1-II-a.** Calculer  $R_{pt}$  et  $L_{pt}\omega$  à 50 Hz, respectivement résistance et inductance totales ramenées au primaire du transformateur

**B1-II-b.** En déduire :

-  $Z_{pt}$ , module de l'impédance totale ramenée au primaire

-  $\varphi$ , argument de  $Z_{pt}$

**B1-II-c.** L'expression de  $i_1(t)$  établie en B1-I-b- peut aussi s'écrire :

$$i_1(t) = C. \left[ \sin(\omega t - \varphi) - \sin(\psi - \varphi). e^{\frac{R_{pt}}{L_{pt}}(t - \frac{\psi}{\omega})} \right]$$

Les allures de  $i_1(\omega t)$  et  $u_T(\omega t)$  sont représentées figure 6 du DTB1.

On désigne par  $\theta_1$  l'angle correspondant à l'extinction du courant  $i_1$ .

Montrer que la valeur de  $\theta_1$  est régie par la relation :

$$\sin(\theta_1 - \varphi) e^{\frac{\theta_1}{\omega}} = \sin(\psi - \varphi) e^{\frac{\psi}{\omega}}$$

**B1-II-d.** Etablir l'expression de  $U_T$ , valeur efficace de la tension primaire du transformateur en fonction de :

-  $U_1$  valeur efficace de la tension d'alimentation réseau

-  $\theta_1$

-  $\psi$

**B1-II-e.** A l'aide de la figure 7 du DTB1, déterminer la plage de réglage de  $\psi$  permettant d'atteindre la valeur efficace du courant de soudage de 12 kA quelque soit  $U_1$

**B1-II-f.** Déterminer l'évolution de cette plage de réglage en tenant compte de la loi de compensation d'usure des électrodes (cf DTB1).

**B1-II-g.** Le cycle de soudage décrit figure 5 du DTB1 prévoit 15 alternances maximum pour 1 point de soudure.

Vérifier que les conditions de fonctionnement imposées par ce cycle n'entraînent pas un échauffement excessif du transformateur (cf DTB1).

**B1-II-h.** A l'aide du DTB1

- calculer le facteur de marche **FM** de la soudeuse ;
- vérifier que l'intensité du courant équivalent thermique  $I_{th}$  est inférieure à la valeur nominale du courant secondaire  $I_{2np}$  du transformateur.

\* Le temps de repos correspond au rodage et à l'évacuation des pièces entre 2 cycles de 300 points : il est en moyenne de 30 s.

\* On négligera l'effet de la compensation d'usure d'électrodes.

**B1-III GENERATION D'HARMONIQUES DE COURANT**

Le service « distribution électrique » de l'atelier de soudage veut identifier, par type de soudeuse, la pollution harmonique engendrée en cours de fonctionnement.

L'ensemble « soudeuse+transformateur+tôles » est modélisé par le schéma de la figure 8 du DTB1.

La figure 9 du DTB1 représente l'évolution de la valeur efficace du fondamental et des premiers harmoniques de la tension primaire du transformateur  $u_T$ .

Pour la suite du problème, on prendra les valeurs suivantes :

-la consigne de courant de soudage  $I_c$  est de 12 kA (on ne tient pas compte de la compensation d'usure des électrodes) ; dans ce cas, l'angle  $\psi$  a une plage de variation de  $[60^\circ, 90^\circ]$

-la résistance équivalente ramenée au primaire de l'ensemble « transformateur+électrodes+tôles »  $R_{pt}$  vaut  $0,75 \Omega$

-la réactance équivalente ramenée au primaire de l'ensemble « transformateur+électrodes »  $L_{pt}\omega$  vaut  $0,2 \Omega$  à 50 Hz.

La valeur efficace des harmoniques de tension est proportionnelle à celle de la tension d'alimentation  $U_1$

L'étude est limitée aux harmoniques jusqu'au rang 9.

Rappel : l'angle  $\psi$  varie avec les fluctuations du réseau.

- B1-III-a.** - Déterminer les valeurs du fondamental et des harmoniques de tension de la tension  $u_T$  relatifs à la valeur efficace de la tension  $U_1=400$  V et appelés F% , H3% , H5% , H7% et H9% pour les valeurs de  $\psi$  suivantes : 60°, 70°, 80° et 90°.

- Reporter les valeurs dans le document réponse DR2

**B1-III-b.** - En déduire, pour la valeur de  $\psi$  égale à  $80^\circ$  (valeur efficace  $U_1 \approx 400$  V) et pour une valeur efficace du courant  $I_1$  de 405 A, les valeurs du fondamental et des harmoniques de courant appelés  $I_F$ ,  $I_{H3}$ ,  $I_{H5}$ ,  $I_{H7}$  et  $I_{H9}$ .

- Reporter les valeurs dans le document réponse DR3.
- Tracer le spectre harmonique de courant.

**B1-III-c.** Calculer pour  $\psi = 80^\circ$ , le taux de distorsion harmonique TDHI% relatif à la valeur efficace  $I_1$

on rappelle que 
$$\text{TDHI}\% = 100 \cdot \frac{\sqrt{I_{H3}^2 + I_{H5}^2 + I_{H7}^2 + I_{H9}^2}}{I_1}$$

**B1-III-d.** Les dispositions constructives prises par l'entreprise pour

- réduire les harmoniques renvoyés au réseau
- relever le facteur de puissance global d'une ligne de soudage

Sont :

- l'alimentation 400 V des soudeuses entre phases
- la répartition équilibrée des soudeuses d'une ligne de production sur les 3 phases
- une compensation globale par batterie de condensateurs au secondaire du transformateur d'alimentation HTA/BTA.

- Justifier ces dispositions.

## **PARTIE B2: ETUDE DU MODULATEUR D'ENERGIE DE LA SOUDEUSE « 1000Hz » (PARTIE PEDAGOGIQUE)**

### Introduction :

L'évolution technologique des soudeuses dans la gamme de puissance utilisée dans l'entreprise (50 – 100kVA) tend à développer les structures de soudeuse dite « 1000 Hz ».

Le principe de fonctionnement et les avantages liés à l'utilisation de ces soudeuses sont développés dans le dossier technique DTB2.

### Travail demandé :

#### **A partir de ces documents et à l'aide des extraits du référentiel du BTS**

Electrotechnique, développer une séquence pédagogique, comportant au moins 2 séances (essais de systèmes et génie électrique) et permettant de :

- démontrer la pertinence des arguments développés par les concepteurs des soudeuses 1000 Hz
- mettre en évidence les avancées technologiques réalisées
- cerner les limites actuelles de la mise en œuvre des soudeuses 1000 Hz.

Les points suivants seront abordés dans le développement de la séquence pédagogique :

- concept(s) abordé(s) et niveau taxonomique visé
- activités concernées (génie électrique, essais de systèmes)
- stratégie pédagogique: situation de la séquence dans une progression

cohérente

- durée des séances composant la séquence
- nature des activités (cours / synthèse, TP , TD)
- zones d'activités, matériels et équipements utilisés
- coordination des séances si plusieurs activités
- évaluations (préciser les items évalués)

## PARTIE C: SYSTEME DE SERRAGE DES ELECTRODES

Valider une nouvelle solution technologique nécessite :

- la maîtrise du principe de fonctionnement
- la connaissance des critères de performances d'une solution existante

Cette partie conduira à améliorer le système de serrage des électrodes:

Se référer aux dossiers techniques DTC1 et DTC2

### PARTIE C1: MOTORISATION PAR VERIN

- le déplacement est assuré par un vérin double effet à commande TOR par électro-distributeur monostable 5/2
- l'effort de serrage est réglé par la pression
- la valeur de la pression est contrôlée par une vanne proportionnelle (commande 0-10V, échelle de pression 0-10 bars)

La figure 1 du DTC1 représente la fonction de transfert  $P = f(u_c)$  avec :

- P : pression de sortie du régulateur en bars
- $u_c$  : tension de commande issue de la CPS.

L'effort de serrage F peut varier de 130 à 525 daN selon les séquences de soudage.

L'effort de soudage moyen vaut 400 daN.

L'effort de serrage maximum est de 640 daN pour 10 bars.

**C1-I** A l'aide du DTC1, déterminer le diamètre et la section du piston du vérin.

**C1-II** Déterminer :

- le taux de charge moyen du vérin: **T<sub>cm</sub>** en %
- le taux de charge maximum du vérin **T<sub>cM</sub>** en %
- la valeur maximale de la tension de commande du régulateur **U<sub>cM</sub>**.

On rappelle que:

$$T_{cm}\% = \frac{\text{Effort moyen}}{\text{Effort maximum disponible}} \cdot 100$$

$$T_{cM}\% = \frac{\text{Effort maximum}}{\text{Effort maximum disponible}} \cdot 100$$

**C1-III** - Construire la fonction de transfert de l'effort de serrage en fonction de la tension de commande  $F_s = f(u_c)$  pour la plage de réglage (130-525 bars).  
- En déduire l'incertitude maximale  $\Delta F_s$  en daN liée au réglage de  $F_s$ .

**C1-IV** Etablir le schéma de raccordement pneumatique du régulateur, de l'électro-distributeur et du vérin.

**C1-V** Proposer une solution technique industrielle qui permet d'atteindre la précision requise (5%) sur toute la plage de fonctionnement.

## **PARTIE C2: MOTORISATION PAR MOTEUR ELECTRIQUE**

**Cette partie permet à l'utilisateur de choisir les options de l'équipement proposées par le constructeur en fonction de ses besoins.**

Ce moteur est du type synchrone autopiloté d'indice de protection IP55 refroidi à l'eau

### **C2-I Le cycle de fonctionnement.**

Compléter le chronogramme du document réponse DR4 (vitesse, accélération et effort de serrage)  
(loi de vitesse en trapèze pendant les déplacements, l'accélération et la décélération ont les mêmes valeurs absolues).

### **C2-II Les caractéristiques du mouvement de la pince.**

**C2-II-a** Calculer la longueur  $L$  du déplacement de l'électrode (cf DTC2 fig. 3).

**Pour la suite des calculs, on prendra  $L=200\text{mm}$ .**

**C2-II-b** Calculer l'accélération et la vitesse de croisière de l'électrode pour respecter le cycle de fonctionnement imposé.

### **C2-III Les caractéristiques mécaniques du moteur. (cf DTC2 §II)**

On négligera les pertes mécaniques par frottement  
Le moment d'inertie équivalent à l'ensemble des pièces en mouvement ramené sur l'arbre du moteur (rotor compris)  $J_{eq}$  est estimé à  $1400 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ .

**C2-III-a** Définir les grandeurs qui permettront de choisir le moteur parmi les deux propositions du constructeur.

**C2-III-b** Donner les expressions littérales des grandeurs définies dans la question précédente.

Calculer les valeurs numériques correspondantes.

En déduire le moteur le mieux adapté.

### **C2-IV Les caractéristiques du codeur de position**

La position finale de l'électrode mobile doit être précise ( $+ / - 0,2 \text{ mm}$ )  
Cette précision est définie par le codeur de position placé sur le rotor du moteur.

1. Choisir le codeur parmi les 2 propositions du constructeur (cf DTC2 §II).
2. En déduire la fréquence maxi des impulsions.

### **C2-V Solution adoptée par le constructeur de la soudeuse.**

**Pour la suite du problème, on admettra que c'est le moteur B qui est choisi.**

#### **C2-V-a Le moteur.**

Recenser les avantages de ce type de moteur dans cette application.

**C2-V-b La structure du variateur de vitesse: circuit de puissance.**

Le variateur de vitesse alimente le moteur en tension triphasé de type MLI, il permet la récupération de l'énergie lors du freinage sur le réseau d'alimentation et un fonctionnement à facteur de puissance unitaire côté réseau.

- Donner un exemple de structure de ce circuit depuis le réseau triphasé 400V jusqu'aux enroulements du moteur.

**C2-V-c La structure du variateur de vitesse: circuit de contrôle**

Le document réponse DR5 présente le schéma fonctionnel de l'ensemble moteur - variateur du point de vue "commande".

Remarque: le système d'autopilotage n'est pas détaillé sur ce schéma.

**C2-V-c-1 Autopilotage:**

- Préciser la fonction du resolver

**C2-V-c-2 Régulation du courant:**

- Localiser par un trait de couleur la boucle de régulation du courant sur DR5.
- Indiquer le type d'action du régulateur.
- Préciser la valeur de la limitation de courant qu'il faut programmer dans cette application pour un couple max de 10 Nm.

**C2-V-c-3 Régulation de la vitesse:**

- Identifier sur DR5 la boucle de régulation de vitesse.
- Indiquer le type d'action du régulateur.
- Indiquer les variables de réglage affectées à ce régulateur et le rôle de chacune d'elles.
- Identifier le capteur de vitesse.
- Préciser la nature du signal de sortie de ce capteur.
- Préciser la variable de limitation de vitesse.

**C2-V-c-4 Régulation de la position:**

- Identifier sur DR5 la boucle de régulation de position.
- Indiquer le type d'action du régulateur.
- Identifier le capteur de position.
- Que se passe-t-il si le gain  $K_p$  est trop grand?
- Que se passe-t-il si le gain  $K_p$  est trop petit?

Peut-on admettre un dépassement de la réponse à un échelon de consigne? Justifier la réponse.

**C2-V-c-5 Régulation de l'effort de serrage: solution économique**

On utilise la propriété qu'a le couple moteur d'être proportionnel à l'intensité absorbée par le moteur pour un moteur synchrone à aimants permanents commandé à  $\Psi=0$  ( $i_{sd}=0$ ), la relation est :

$$C = Kt.i_{sq} = 3.p.\phi_v.i_{sq}$$

avec

**p**: nombre de paire de pôles

**$\Phi_v$** : flux rotorique

- Identifier sur le DR5 ce qui fera office de boucle de régulation de l'effort de serrage.
- Indiquer ce qui correspond au signal de mesure de l'effort de serrage.
- Où doit-on appliquer le signal de consigne d'effort (quand la soudeuse fonctionne en phase serrage)?
- Après avoir rappelé la définition de la robustesse d'un asservissement, préciser d'où peuvent provenir les dérives des paramètres.

#### **C2-V-c-6 Régulation de l'effort de serrage: solution plus précise**

Pour améliorer les performances (précision et robustesse), on ajoute un capteur de force piézo-électrique délivrant un signal dont la fréquence est proportionnelle à la force mesurée.

- Préciser les endroits où ce capteur peut être installé.
- Compléter DR5 en intégrant cette solution.

#### **C2-V-c-7 Coefficients de mise à l'échelle "utilisateur":**

cf figure 4 DTC2

Pour faciliter le réglage du variateur, les paramètres à fournir sont exprimées en grandeurs "utilisateur", à savoir:

- l'épaisseur totale de tôles **ept** en mm
- la vitesse maxi de déplacement de l'électrode **Vmax** en mm / s
- Exprimer les variables **POS** et **VIT** en fonction de **L**, **ept** et **Vmax**
- En déduire les facteurs d'échelle
  - pour le déplacement ( $K_s = N_s / D_s$  en impulsions / mm)
  - pour la vitesse ( $K_v = N_v / D_v$  en impulsions / s)

Remarque :  $N_i$  et  $D_i$  sont des nombres entiers.

## **PARTIE D: L'ALIMENTATION DE L'ATELIER DE SOUDAGE EN ENERGIE ELECTRIQUE:**

**L'extension d'une installation nécessite de définir les potentialités du réseau d'alimentation électrique existant.**

**Cette partie permet de vérifier s'il est possible, d'ajouter sur un tronçon d'alimentation, les 30 soudeuses "1000 Hz" nécessaires à la nouvelle chaîne de fabrication.**

Se référer au dossier technique DTD

### **D-1. LE POSTE DE LIVRAISON HTB**

**Caractéristiques de l'installation:** (cf DTD fig1).

**D-1-1.** Justifier la présence de deux arrivées 90 kV.

**D-1-2.** Calculer et commenter la valeur du facteur de puissance de l'arrivée 1.

**D-1-3.** Les transformateurs sont munis d'un régleur en charge, préciser son rôle.

### **D-2. EFFET D'UNE PERTURBATION**

Un enregistreur branché en permanence sur le réseau 90 kV surveille les tensions et contrôle la qualité de la tension conformément au contrat signé avec EDF.

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

Le 31 mars 2008, un déséquilibre de tension est apparu pendant 9 périodes soit 180ms (voir cf fig 2 et 3 du DTD).

**D-2-1.** Déterminer les composantes symétriques de tension simple produites pendant ce défaut.

**D-2-2.** En déduire les composantes directe et inverse des tensions composées  $U_d$  et  $U_i$ .  
Exprimer les en pourcentage de la valeur efficace de la tension composée normale.

**D-2-3.** En déduire l'impact qu'a eu ce défaut sur le fonctionnement

- des moteurs de l'usine
- de l'éclairage
- des automatismes.

### **D-3. LE RESEAU BTA SOUDURE**

L'étude est limitée à une portion du réseau: le tronçon "soudure caisse" (cf fig 6 du DTD)

- Dans un premier temps, on étudie le comportement de ce tronçon avec les soudeuses déjà installées d'un point de vue:

- puissance moyenne installée

- facteur de puissance
  - chute de tension
  - réserve de puissance disponible.
- Dans un deuxième temps, on étudie le comportement qu'aurait ce tronçon avec les nouvelles soudeuses installées.

### ANALYSE DE LA SITUATION EXISTANTE

Ce tronçon alimente 84 soudeuses "50 Hz", chaque soudeuse est connectée aux canalis grâce à un boîtier de connexion et un câble (II + PE) de longueur 5m et de section 50 mm<sup>2</sup>.

En réalité:

- les branchements sont répartis sur toute la longueur du tronçon
- les différentes soudeuses (monophasées) sont réparties sur les trois phases pour équilibrage
- toutes les soudeuses ne fonctionnent pas avec les mêmes réglages (tôles d'épaisseur différente)
- les soudeuses fonctionnent de manière non synchronisée complètement aléatoire.

Pour faciliter l'étude, on admettra que:

- les 84 soudeuses monophasées se comportent comme 28 soudeuses triphasées équivalentes
- les 28 soudeuses fonctionnent de manière aléatoire
- 2 groupes de 14 soudeuses triphasées équivalentes sont branchées aux deux points du tronçon (M et M') les plus défavorables d'un point de vue impédance
- toutes les soudeuses ont les mêmes caractéristiques moyennes suivantes

Caractéristiques de la soudeuse "50Hz" monophasée moyenne équivalente			
U1n	Valeur efficace	Tension primaire nominale	400 V
U20	Valeur efficace	Tension secondaire à vide	13,5 V
I2np	Valeur efficace	Courant permanent de soudage (au secondaire) pour un facteur de marche a = 10%	4,44 kA
a		Facteur de marche donnant le fonctionnement nominal (15 périodes toutes les 3s)	10%
Sn		Puissance apparente nominale	60 kVA
I2max	Valeur efficace	Courant maximum de soudage (au secondaire)	13,8 kA
Smax		Puissance apparente maximale	186 kVA
cos φ		Facteur de puissance	0,8

#### D-3-1. Caractéristiques d'une soudeuse triphasée équivalente

Déterminer les caractéristiques moyennes S3n, I31n, I31max, S3max et cos φ d'une soudeuse **triphasee équivalente**

- où
- $S_{3n}$  est la puissance apparente nominale
  - $I_{3np}$  est le courant permanent de soudage (en ligne) pour un facteur de marche  $a$  de 10%
  - $I_{3max}$  est le courant maximum de soudage (en ligne)
  - $S_{3max}$  est la puissance apparente maximale
  - $\cos \varphi$ : facteur de puissance.

### **D-3-2. Puissance moyenne totale installée**

La puissance moyenne consommée par l'ensemble des soudeuses n'est pas la somme des puissances unitaires des soudeuses car elles ne fonctionnent pas toutes en même temps.

- déterminer pour ce tronçon, la puissance moyenne totale que représente l'ensemble des soudeuses triphasées équivalentes  **$S_{moyeq}$**  (voir §VII du DTD)

**Pour la suite des calculs, on prendra  $S_{moyeq} = 1800$  kVA et  $\cos \varphi = 0,8$ .**

### **D-3-3. Le facteur de puissance.**

Chaque transformateur est associé à une compensation fixe de facteur de puissance de 5 batteries de condensateurs 50 kvar 410V (cf fig 6 et 7 du DTD).

- vérifier que l'énergie réactive fournie par cette batterie de condensateurs est suffisante pour ramener le  $\cos \varphi$  de l'ensemble à 0,92
- Justifier le fait que la compensation de  $\cos \varphi$  soit fixe bien que le fonctionnement des soudeuses varie fortement.
- Justifier l'emploi d'inductances montées en série avec ces condensateurs.

### **D-3-4. Schéma équivalent du tronçon étudié.**

- Déterminer la position des deux points M et M'.
- Montrer que le tronçon étudié peut se représenter par le schéma équivalent des figures 7 et 7bis du DTD.
- Déterminer les impédances du réseau équivalent.

### **D-3-5. Chute de tension maximale en cours de soudage:**

Pour la suite des calculs on prendra le schéma équivalent suivant, on considérera

- que toutes les soudeuses sont alimentées en un même point du tronçon (P2)
- que le schéma équivalent du réseau est le suivant:

		<b>R en mΩ</b>	<b>X en mΩ</b>
	<b>Ztr</b>	<b>0,735</b>	<b>4,253</b>
	<b>Zcan</b>	<b>0,105</b>	<b>0,035</b>
	<b>Zc</b>	<b>0,0341</b>	<b>0,114</b>

La chute de tension est la somme de 3 chutes de tension:

- dans le transformateur ( $Z_{tr}$ )
- dans la canalis ( $Z_{can}$ )
- dans le câble de la soudeuse ( $Z_c$ )

Si la tension d'alimentation d'une soudeuse devient inférieure à  $U_n - 10\%$  (soit 360V), son fonctionnement est incorrect: le point de soudure est mauvais.

Cette chute de tension dépend du nombre de soudeuses fonctionnant simultanément.

Pour faciliter les calculs, on admettra que:

- les chutes de tension dans le canalis et dans le transformateur dépendent du nombre de soudeuses fonctionnant simultanément.
- $I_1$  est la somme de 2 courants: le courant absorbé par les soudeuses et le courant absorbé par la batterie de condensateurs.
- le pire des cas se produit dans les conditions suivantes: le courant de soudage est maximum (13.8kA)

Nous allons calculer la chute de tension que provoque  $p$  soudeuses fonctionnant simultanément:

**D-3-5-a** Donner la relation qui permet de déterminer la chute de tension " $\Delta U_{P1}$ " au point P1 en fonction

- du nombre de soudeuses " $p$ " en fonctionnement simultanément
- des impédances de la partie concernée
- du courant maximum absorbé par les soudeuses équivalentes:  $I_{3max}$
- du facteur de puissance des soudeuses équivalentes :  $\cos \varphi$
- du courant réactif produit par les condensateurs:  $I_c$

**D-3-5-b** Donner la relation qui permet de déterminer la chute de tension totale " $\Delta U_{P2}$ " au point P2 en fonction

- du nombre de soudeuses "p" en fonctionnement simultané
- des impédances de la partie concernée
- du courant maximum des soudeuses équivalentes:  $I_{3max}$
- du facteur de puissance des soudeuses équivalentes :  $\cos \varphi$
- du courant réactif produit par les condensateurs:  $I_c$

**D-3-5-c** Donner la relation qui permet de déterminer la chute de tension totale " $\Delta UP_3$ " au point P3 (aux bornes d'une soudeuse monophasée).

**D-3-5-d** Exprimer la relation qui donne la tension  $U_3$  aux bornes d'une soudeuse monophasée en fonction de "p" ( on prendra  $U_{10} = 410V$ )  
 $\Delta UP_3$  est de la forme  $ap+b$   
 - Déterminer a et b  
 - Tracer la courbe d'évolution de la tension  $U_3=f(p)$ .

**D-3-5-e** Quelle probabilité a-t-on d'avoir des mauvais points de soudure à cause d'une tension trop faible (cf §VII.b du DTD) ?  
 On rappelle que le nombre total de soudeuses équivalentes est de 28

**D-3-5-f** De quelle réserve de puissance dispose-t-on sur ce tronçon ?

### D-3-6. AJOUT DES 30 SOUDEUSES "1000 Hz"

Caractéristiques moyennes des soudeuses triphasées "1000 Hz" à ajouter			
V1n	Valeur efficace	Tension primaire nominale	400 V
I1np			45 A
a		Facteur de marche donnant le fonctionnement nominal (15 périodes toutes les 3s)	10%
S3n		Puissance apparente nominale	28,8 kVA
I1max			140 A
S3max		Puissance apparente maximale	90 kVA
$\cos \varphi$		Facteur de puissance	0,98

Il faut vérifier qu'avec ces 30 nouvelles soudeuses:

- le tronçon "soudure caisse" n'est pas en surcharge
- le facteur de puissance reste correct
- la probabilité d'avoir de mauvais points de soudure à cause d'une tension d'alimentation inférieure à 360V ne dépasse pas 5 pour 1000.
- Pour bénéficier de l'étude précédente faite avec des soudeuses triphasées équivalentes, on considère que, d'un point de vue puissance, 6 soudeuses "1000 Hz" vont se comporter comme une soudeuse "50 Hz" triphasée équivalente.  
 30 soudeuses "1000 Hz" sont donc équivalentes à 5 soudeuses "50 Hz"

**D-3-6-a** Que devient la puissance moyenne installée ?

**D-3-6-b** Que devient le facteur de puissance ?

**D-3-6-c** En déduire la probabilité d'avoir un point de soudure défectueux à cause d'un nombre trop grand de soudeuses fonctionnant simultanément (cf §VII.b du DTD).

**D-3-6-d** Conclusion: Peut-on ajouter les 30 soudeuses "1000 Hz"?

## **PARTIE E : LA COMMUNICATION DANS L'ATELIER DE SOUDAGE**

### **L'installation d'un réseau de communication nécessite**

- **La définition de son architecture intégrant nouvelle et ancienne installation**
- **Le paramétrage des composants**

Se référer au dossier technique DTE

### **La problématique est la suivante:**

Profitant des travaux de rénovation, le service « informatique industrielle » a décidé d'installer un réseau de communication de type ETHERNET TCP/IP industriel à 2 niveaux:

- Niveau îlot de production
- Niveau atelier soudage

### **Caractéristiques :**

On considère que l'installation est décomposée en 80 îlots comportant chacun 10 robots soudeurs (soit 800 robots soudeurs au total).

### **au niveau de chaque îlot (gestion des automatismes):**

#### ***liste des équipements ayant besoin de communiquer ensemble:***

- 10 cellules de soudage composées d'un robot et d'une soudeuse
- 1 automate de gestion des périphériques de l'îlot
- 1 pupitre de dialogue local à accès contrôlé de paramétrage local

#### ***fonctionnalités:***

- la communication entre le robot et sa soudeuse (liaison de type RS485 avec protocole INTERBUS) est éprouvée et reconduite.
- Les robots communiquent avec le niveau supérieur grâce à une liaison de même type.
- L'automate et le pupitre de dialogue disposent d'un module de communication ETHERNET TCP/IP MODBUS.
- Les adresses locales seront de la forme 192.168.i.n  
où i est le numéro d'îlot et n est le numéro de station (avec  $n \neq 0$ )
- La bande passante sera 100 Mbits/s pour permettre un débit suffisant notamment pour les échanges d'informations entre les robots et l'API

#### ***distance maximale entre éléments:***

- 50 mètres

### **au niveau atelier (gestion des données):**

#### ***liste des équipements ayant besoin de communiquer ensemble:***

- 80 îlots de production
- un serveur contenant les bases de données suivantes (recettes)
  - o tableaux de configuration des robots soudeurs
    - épaisseurs des tôles
    - séquençement des points de soudure
    - succession des points de soudure
  - o les programmes de fonctionnement
    - robots (trajectoires)
    - soudeuses
    - positions géographiques des éléments annexes (rodeuses , changeurs d'électrodes)
  - o centralisation des données pour traçabilité
- un 2<sup>e</sup> serveur en redondance contenant une image (rafraîchie cycliquement) du premier
- deux superviseurs (à accès contrôlé) contenant :
  - o les pages écran de contrôle
  - o les consignes de production
  - o les données rafraîchies par le serveur
- un superviseur chargé du contrôle du réseau (SNMP)
- un PC équipé
  - o d'une carte GSM permettant l'envoi de SMS aux techniciens de maintenance (20 numéros disponibles)
  - o d'un logiciel de gestion des défauts

***fonctionnalités:***

- le réseau est **redondant** de type ETHERNET TCP/IP industriel de bande passante 100 Mbits/s
- les adresses locales seront de la forme 192.168.0.j  
où j est le numéro du point d'accès

***distance entre éléments:***

- l'informatique de gestion est centralisée dans une salle de contrôle
- les îlots de production sont répartis dans l'atelier sur une distance d'environ 1000 m

**Questionnement :**

**E-1. Communication entre le robot et sa soudeuse**

La figure 1 du DTE montre la communication entre le séquenceur d'un robot et la CPS de la soudeuse associée.

**E-1-1.** Définir les expressions :

- liaison RS 485
- liaison point à point
- protocole INTERBUS.

**E-1-2.** A partir des données fournies dans le dossier technique DTE , caractériser la liaison RS 485 en indiquant :

- sa nature
- son type
- son type de transmission.

**E-2. Communication entre le robot et sa soudeuse**

**E-2-1.** Sur le document réponse DR 6 :

- proposer un schéma architectural de l'ensemble du réseau répondant aux caractéristiques demandées
- préciser la nature des média utilisés.

**E-2-2.** Lister les matériels de connexion nécessaires.

**E-2-3.** - Définir l'adresse exacte de l'îlot 5 au niveau du réseau d'atelier et le masque correspondant.

- Définir l'adresse exacte du robot 8 de l'îlot 3 et le masque correspondant.