



Secrétariat Général

Direction générale des  
ressources humaines

MINISTÈRE  
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE

Sous-direction du recrutement

---

**Rapport des membres du jury**

**Session 2012**

**Concours externe de l'agrégation**

**Génie Mécanique**

Les rapports des jurys des concours sont établis sous la responsabilité des présidents de jury

## Plan du rapport

Rapport du jury .....	2
1 – Composition du jury .....	3
2 – Résultats de la session 2012 .....	4
3 – Compte-rendu de la première épreuve d'admissibilité : <b>Étude d'industrialisation</b> .....	6
4 – Compte-rendu de la seconde épreuve d'admissibilité <b>Analyse et conception des systèmes</b> .....	6
5 – Compte-rendu de la troisième épreuve d'admissibilité <b>Automatique et Informatique Industrielle</b> .....	6
6 – Compte-rendu de la première épreuve d'admission <b>Technologie</b> .....	7
7 – Compte-rendu de la seconde épreuve d'admission <b>Soutenance d'un dossier industriel</b> .....	7
8 – Compte-rendu de la troisième épreuve d'admission <b>Epreuve de Travaux Pratiques</b> .....	7
9 – Références des textes officiels et des programmes .....	8

## **RAPPORT DU JURY**

## 1 – Composition du jury

<b>Baton</b>	Jean-Jacques	Inspecteur d'académie - Inspecteur Pédagogique Régional
<b>Béarée</b>	Richard	Maître de conférences
<b>Bercot</b>	Michel	Professeur agrégé
<b>Chanal</b>	Hélène	Professeur agrégé
<b>Charlat</b>	Sylvain	Professeur agrégé
<b>Dacunto</b>	Alain	Maître de conférences
<b>Desprez</b>	Jean-Marc	Inspecteur d'académie - Inspecteur Pédagogique Régional
<b>Diverchy</b>	Jean-Jacques	Inspecteur d'académie - Inspecteur Pédagogique Régional
<b>Dugas</b>	Arnaud	Professeur agrégé
<b>Gamelon</b>	Cédric	Professeur agrégé
<b>Pateloup</b>	Vincent	Professeur agrégé
<b>Rage</b>	Michel	Inspecteur d'académie - Inspecteur Pédagogique Régional
<b>Ray</b>	Pascal	Professeur d'université – <i>Vice-président</i>
<b>Rigaud</b>	Régis	Inspecteur d'académie - Inspecteur Pédagogique Régional
<b>Rossi</b>	Olivier	Professeur agrégé
<b>Taraud</b>	Dominique	Inspecteur général de l'éducation nationale – <i>Président</i>
<b>Velut</b>	Christophe	Professeur agrégé

## 2 – RESULTATS DE LA SESSION 2012

### Concours externe

Nombre de postes :.....7

Nombre d'Admissibles : ..... 16

Nombre d'Admis : .....7

Moyenne d'admissibilité du premier Admissible : ..... 14,35

Moyenne d'admissibilité du dernier Admissible : ..... 7,24

Meilleure moyenne des trois épreuves d'Admission : ..... 15,25

Plus basse moyenne des trois épreuves d'Admission : ..... 11,35

Moyenne générale obtenue par le premier Admis : ..... 14,87

Moyenne générale obtenue par le dernier Admis : ..... 11,14

## **Commentaires généraux du président de jury pour la session 2012.**

La session 2012 de l'agrégation externe de génie mécanique est la dernière de ce concours.

En effet, à partir de l'année 2013, cette agrégation fusionnera avec l'agrégation de mécanique pour devenir une agrégation unique de Sciences de l'Ingénieur et de l'Industrie, option Ingénierie Mécanique.

Cette nouvelle agrégation permettra de continuer de recruter des enseignants du plus haut niveau, capables de maîtriser la totalité des processus de conception et de réalisation des parties mécaniques des produits mécatroniques.

Les savoir-faire actuels des agrégés de génie mécanique ne disparaîtra pas, il sera simplement plus restreint dans le domaine de l'industrialisation, sachant qu'on peut faire le pari que des professeurs agrégés compétents dans les domaines de l'optimisation des processus et dans la conduite des systèmes de production retenus, pourront s'adapter aux autres procédés et, surtout, aux évolutions à venir de ces derniers.

C'est donc une chance à saisir et non la fin d'une période, la chance d'intégrer dans les établissements de formation des enseignants de haut niveau maîtrisant l'ensemble des compétences allant de la conception des produits, à leur pré industrialisation et à leur industrialisation.

La session 2012 du concours externe de l'agrégation de génie mécanique a confirmé le faible nombre de candidats potentiels, renforçant ainsi le constat des conséquences des fermetures des centres de formation universitaires faisant suite aux fermetures des concours des CAPET et des CAPLP du domaine de la productique.

Comme l'an dernier, le faible nombre de postes au concours a engendré une diminution du nombre des admissibles, a amené le jury à constater une augmentation du niveau global du concours. Au final, le niveau de la session 2012 du concours a augmenté et les 7 postes pourvus le seront par des professeurs agrégés compétents et performants.

Le jury a même eu le plaisir de constater une nette évolution positive de la qualité des dossiers présentés dans le cadre de l'épreuve de soutenance d'un dossier industriel. Comme cette épreuve continuera d'exister dans la nouvelle agrégation, j'invite les formateurs à continuer dans cette voie et à poursuivre leurs efforts pour que chaque étudiant ait vraiment la possibilité d'intégrer dans son enseignement des expériences réelles du monde industriel.

Le monde évolue très vite et les formations doivent accompagner ces évolutions, voire les anticiper. L'évolution de l'agrégation externe de génie mécanique vers celle d'ingénierie mécanique correspond à ce mouvement. Le dernier président, d'une série de 9 présidents de l'agrégation de génie mécanique officiant depuis 1976, souhaite donc longue vie à la nouvelle agrégation, qu'elle puisse former autant de cadres de haut niveau qui ont toujours su identifier et comprendre les évolutions, les analyser et les mettre en œuvre pour garantir la qualité et l'adaptation des enseignements professionnels et technologiques.

Dominique Taraud  
Président du jury, session 2012

### **3 – COMPTE RENDU DE LA PREMIERE EPREUVE D'ADMISSIBILITE ÉTUDE D'INDUSTRIALISATION**

**Éléments de corrigé et commentaires** : voir fichiers joints au format PDF

- ***AEGM 2012 Premiere\_epreuve\_admissibilite***
  - *Sujet : 1 1.1 Epr\_Indus\_Agreg\_GM\_ext\_2011\_Sujet*
  - *Corrigé : 1.2 Epr\_Indus\_Agreg\_GM\_ext\_2011\_Corrige*
  - *Commentaires : 1.3 Epr\_Indus\_Agreg\_GM\_ext\_2011\_Commentaires*

### **4 – COMPTE RENDU DE LA SECONDE EPREUVE D'ADMISSIBILITE ANALYSE ET CONCEPTION DES SYSTÈMES**

**Éléments de corrigé et commentaires** : voir fichiers joints au format PDF

- ***AEGM 2012 Deuxieme\_epreuve\_admissibilite***
  - *2.1 Epr\_Analyse\_Conception\_Systeme\_Sujet 2*
  - *2.2 Epr\_Analyse\_Conception\_Systeme\_Commentaires*

### **5 – COMPTE RENDU DE LA TROISIÈME ÉPREUVE D'ADMISSIBILITE ÉPREUVE D'AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE**

**Éléments de corrigé et commentaires** : voir fichiers joints au format PDF

- ***3. AEGM 2012\_Troisieme\_epreuve\_admissibilite***
  - *3.1 Epr All\_Sujet 2 Epr All\_Corrige*
  - *3.2 Epr All\_Commentaires*

## **6 – COMPTE RENDU DE LA PREMIERE EPREUVE D'ADMISSION EPREUVE DE TECHNOLOGIE**

J.J. BATON – J.J. DIVERCHY – C. GAMELON – A. DUGAS

Voir fichier joint au format PDF

- *4. AEGM 2012\_Premiere\_epreuve\_admission*  
*4.1 Epreuve Lec<sup>on</sup> Commentaires*

## **7 – COMPTE RENDU DE LA SECONDE EPREUVE D'ADMISSION ÉPREUVE DE SOUTENANCE D'UN DOSSIER INDUSTRIEL**

- M. RAGE - P. RAY – R. RIGAUD - O. ROSSI

Voir fichier joint au format PDF

- *5. AEGM 2012\_Deuxieme\_epreuve\_admission*
- *5.1 Epreuve dossier commentaire 2012*

## **8 – COMPTE RENDU DE LA TROISIÈME ÉPREUVE D'ADMISSION ÉPREUVE DE TRAVAUX PRATIQUES**

A. ATTARD – R. BÉARÉE – S. CHARLAT - A. DACUNTO - JM. DESPREZ - M. BERÇOT –  
H. CHANAL -

Voir fichier joint au format PDF

- *6. AEGM 2012\_Troisieme\_epreuve\_admission*
- *6.1 Epreuve TP Commentaires*



## **9 – Références des textes officiels et des programmes**

Les textes régissant l'agrégation interne de mécanique sont parus dans les bulletins officiels dont les références sont rappelées ci-dessous :

- BO spécial n°3 du 26 avril 2003 pour le programme
- BO spécial n°4 du 28 mai 2008 pour le programme
- Arrêté du 28 décembre 2009 fixant les sections et les modalités d'organisation des concours de l'agrégation

# SESSION 2012

---

## AGRÉGATION CONCOURS EXTERNE

### Section : Génie Mécanique

### Épreuve d'Études d'Industrialisation

Durée : 6 heures

*L'usage des instruments de calcul, en particulier calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique, à fonctionnement autonome, non imprimante - est autorisé conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

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

*Si, au cours de l'épreuve, le candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale très lisiblement dans sa copie, propose la correction et poursuit sa composition en conséquence, indiquant les dispositions prises à son initiative.*

*Le candidat peut formuler des hypothèses qu'il jugera nécessaires pour répondre aux questions posées. Aussi le candidat les mentionne de façon explicite dans ses copies.*

# Fascicule sujet

## Organisation des documents associés au fascicule sujet :

### Ce sujet comporte :

- **la présentation de l'étude de pré-industrialisation** : mise en situation, présentation du sujet de l'épreuve, présentation du contexte de production, l'unité de découpage et assemblage des contacts auto-dénudants de la platine électronique composant la prise RJ45
- un fascicule sujet comprenant 3 parties identifiées « **PARTIE A** », « **PARTIE B** », et « **PARTIE C** »

**Les 3 parties, « PARTIE A », « PARTIE B », « PARTIE C », ainsi que les différentes sous parties du sujet sont indépendantes**

- Une chemise « **DOSSIER TECHNIQUE** » dans laquelle des documents spécifiques au support de l'étude, sont identifiés **DT- [n° du document]** ;
- Une chemise « **DOSSIER RESSOURCE** » dans laquelle des documents extraits de catalogues sont identifiés **DRS- [n° du document]** ;
- Une chemise « **DOSSIER RÉPONSE** » dans laquelle des documents utilisés pour répondre aux questions sont identifiés **DR- [n° du document]** ; Les feuilles de copie du candidat compléteront ces documents réponses.

Après avoir complété les en-têtes, le candidat remettra en fin d'épreuve ses copies paginées et ses « Documents Réponses » regroupés dans trois copies distinctes :

**PARTIE A – ANALYSE du CONTEXTE INDUSTRIEL DE PRODUCTION**

**PARTIE B – QUALIFICATION DE LA PHASE DE DÉCOUPAGE**

**PARTIE C – INDUSTRIALISATION DE LA MATRICE FIXE**

### **Avertissement :**

- Le candidat est invité à formuler toutes les hypothèses nécessaires à la résolution du problème posé.
- Il sera tenu compte dans la correction de la clarté et de la concision des réponses.

# COMPOSITION DU SUJET

Présentation du contexte et du sujet de l'épreuve : 3 pages  
Questions à traiter dans les PARTIES « A », « B » et « C » : 10 pages

## DOCUMENTS TECHNIQUES

DT- 1	Dessin de définition des contacts auto-dénudants
DT- 2	Nomenclature des étapes de découpe
DT- 3	Plan de la matrice fixe
DT- 4	Éclaté et nomenclature de l'outil de découpe
DT- 5	Documentation FESTO
DT- 6	Rapport d'analyse matériaux

## DOCUMENTS RESSOURCES

DRS- A1	Extrait du Profil Environnemental Produit (PEP) de la prise RJ45
DRS- A2	Tables Norme ISO 2859 : Plans d'échantillonnages
DRS- B1	Caractéristiques de l'acier « Vanadis 23 »
DRS- C1	Conditions de découpe au fil
DRS- C2	Paramètres d'électroérosion
DRS- C3	Outils et conditions de coupe UGV

## DOCUMENTS RÉPONSES

DR- B1	Étapes de découpe
DR- B2	Lecture de spécifications géométriques
DR- B3	Cotation de la bande
DR- C1	Formes de découpe fil
DR- C2	Gamme de découpe fil phases 10 et 20
DR- C3	Gamme de découpe fil phases 30 et 40
DR- C4	Modification de forme pour l'usinage

# ÉTUDE D'INDUSTRIALISATION D'UNE PRISE RJ45

## MISE EN SITUATION

Le support d'étude de cette épreuve est une prise informatique RJ45 conçue et fabriquée en grande série par une entreprise spécialisée dans les équipements et appareillages électriques, distribuée dans les grandes surfaces et enseignes spécialisées.



La conception actuelle de ces prises RJ45, qui fait l'objet d'un dépôt de brevet, permet aux installateurs de gagner du temps dans l'installation des réseaux informatiques. En quelques secondes, sans pour autant dénuder les fils de la tresse informatique, il est possible de réaliser une connexion informatique très rapidement et d'assurer un fonctionnement optimal en « clipsant » (simple clic) une **platine électronique équipée de différents ergots**, (connecteurs LCS) cf. **DT1, dessin de définition des ergots**, qui viendront assurer la continuité électrique entre la prise RJ45 et le réseau informatique.

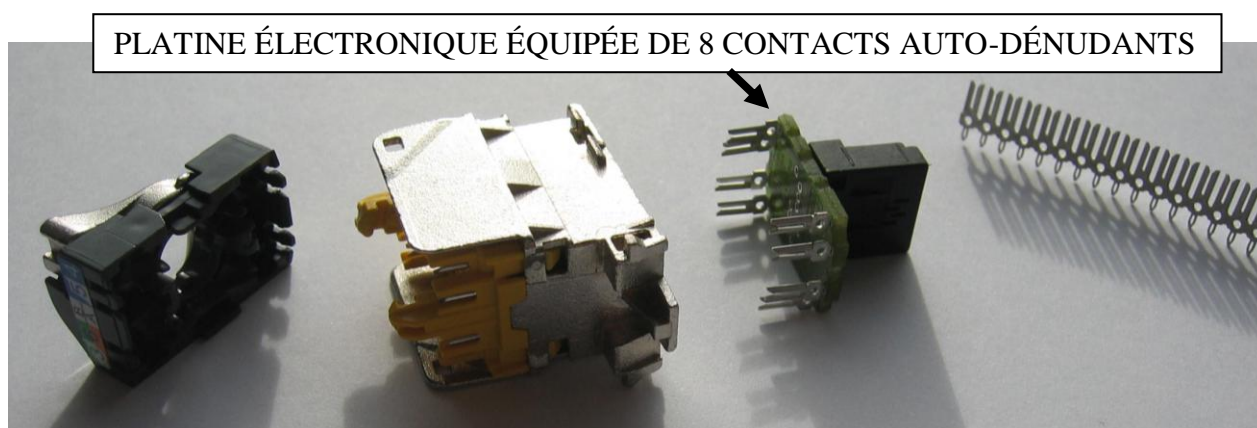
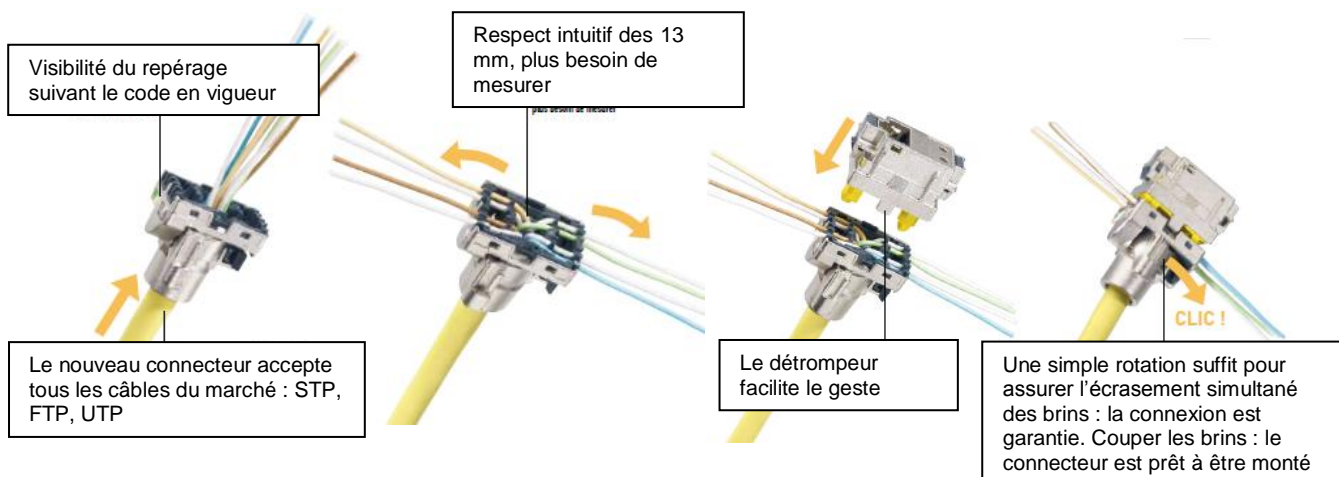


Figure 1 – PHOTOS de la PRISE RJ45 DÉMONTÉE

Dans le cadre de cette épreuve, on s'intéresse plus particulièrement à l'unité de découpage et d'assemblage des contacts auto-dénudants sur la platine électronique.

## PRÉSENTATION du SUJET de l'ÉPREUVE

Pour faire face au marché des prises RJ45, qui se caractérise par un environnement de production dynamique et concurrentiel, l'entreprise conçoit ses propres moyens de production. Elle est engagée dans une démarche d'innovation (protégée par des dépôts de brevets) et dans une démarche d'amélioration continue de sa productivité (Coûts, Qualité et Délais de Production). Pour cela, cette entreprise a mis au point un processus de production automatisé de poinçonnage, découpage et assemblage de contacts auto-dénudants sur une platine électronique.

L'unité de production des prises RJ45 est présentée sur la page suivante, figure 4. Elle est principalement constituée d'un carrousel avec 4 postes principaux :

- 1) Poste de chargement des platines,
- 2) Poste de découpe des contacts auto-dénudants avec une alimentation par bande des contacts,
- 3) Poste d'assemblage des contacts auto-dénudants sur la platine
- 4) Poste de déchargement.

**Le sujet s'intéresse au poste de découpe des contacts auto-dénudants (présenté sur la figure 4) et plus particulièrement à l'outillage de découpe (présenté sur la figure 5).**

« **PARTIE A** » : Cette partie de l'épreuve analyse le contexte industriel de l'entreprise, la productivité, le suivi de la qualité et des coûts. Cette partie explore les différentes solutions que l'entreprise engage pour réduire l'ensemble des ses coûts.

### Travail demandé

- Analyser le contexte actuel de production, la stratégie d'entreprise en matière d'innovation.
- Étudier et analyser différentes solutions pour améliorer le Taux de Rendement de l'unité de production (**Quantité**), pour contrôler la production (**Qualité**).
- Réaliser une étude de rentabilité (**Coûts**).

« **PARTIE B** » : Cette partie de l'épreuve analyse les problèmes réguliers rencontrés sur l'outillage de poinçonnage-découpage de l'unité de production des contacts auto-dénudants, problèmes qui pénalisent le taux de rendement de cette unité. Au travers de cette partie, des pistes de remédiation sont analysées.

### Travail demandé

- Apporter des solutions en vue d'augmenter le Taux de Rendement.
- Explorer le procédé et le processus de réalisation des pièces qui composent l'outillage.
- Explorer différentes pistes d'améliorations de l'outillage.

« **PARTIE C** » : Le bureau d'industrialisation de l'entreprise envisage de modifier les processus de réalisation de la matrice fixe afin de générer des économies : cette partie de l'épreuve étudie le processus de réalisation de cette pièce spécifique appartenant à l'outillage de découpe.

### Travail demandé

- Explorer différentes gammes de réalisation (procédés et processus : électro érosion par enfonçage, découpage au fil par électroérosion, usinage UGV).
- Proposer une nouvelle gamme de réalisation de la matrice fixe.

## PRÉSENTATION de L'UNITÉ DE DÉCOUPAGE ET ASSEMBLAGE des CONTACTS AUTO-DÉNUDANTS de la PLATINE ÉLECTRONIQUE

L'entreprise a conçu et breveté la conception de ses platines électroniques. Une innovation technologique, permet de réaliser la continuité du circuit électrique entre les contacts auto-dénudants et la platine. Sur l'unité de production, à partir d'une bande métallique (Figure 2), ces contacts auto-dénudants sont poinçonnés, découpés, positionnés et insérés en force à l'intérieur des alésages de la platine (Figure 3), sans pour autant qu'ils ne soient soudés.

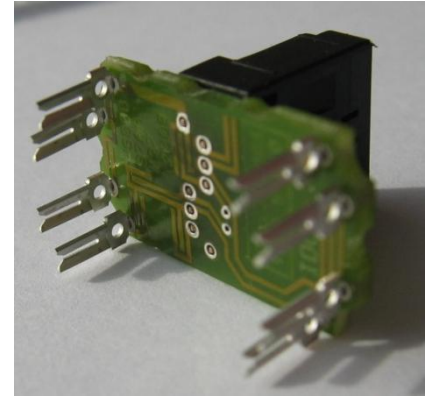
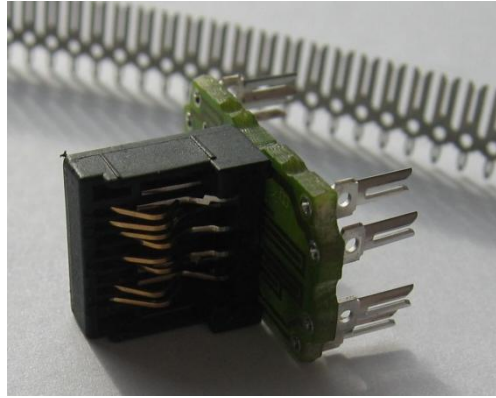
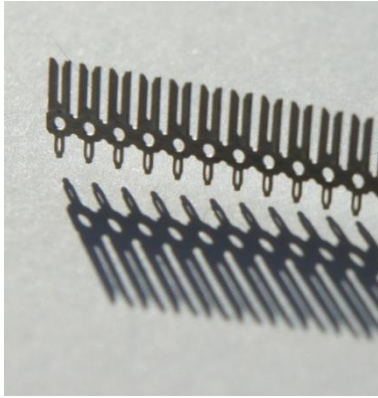
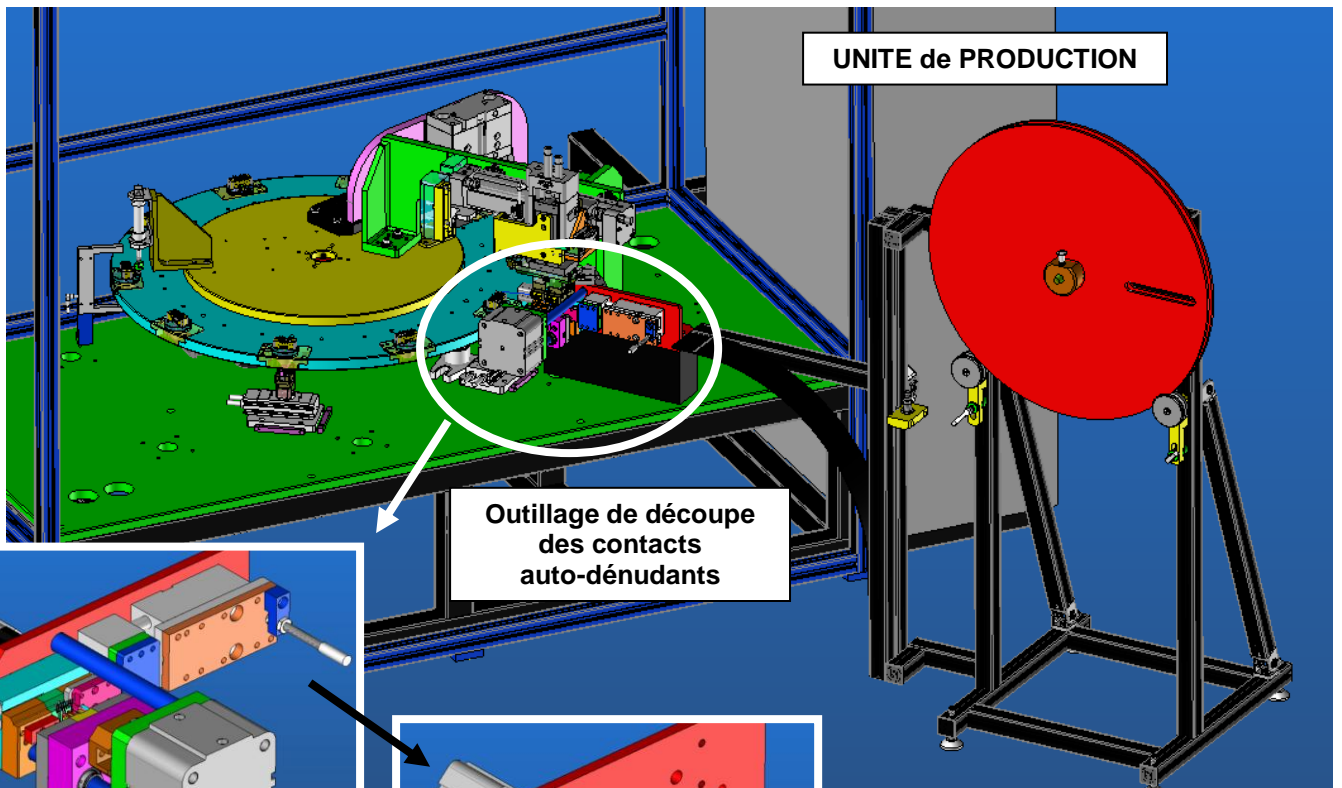


Figure 2 - Mise en Bande

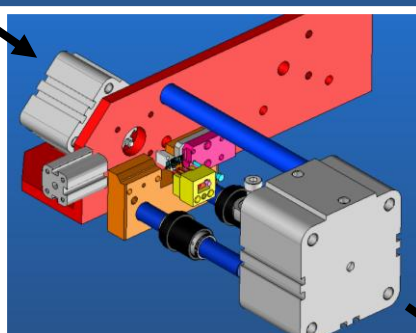
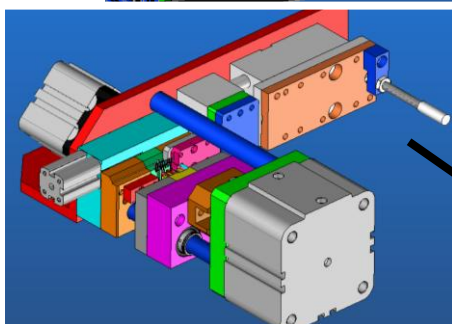
Figure 3 – Platine électronique équipée des contacts auto-dénudants



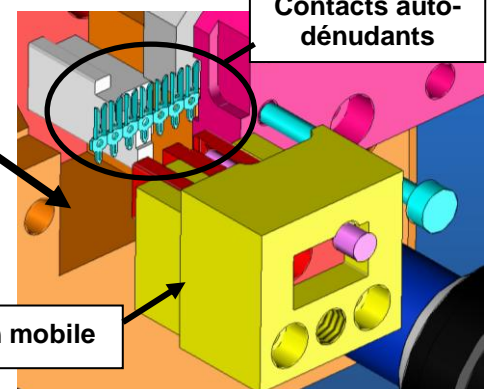
UNITE de PRODUCTION

Outillage de découpe des contacts auto-dénudants

Figure 4 – Vue d'ensemble de l'Unité de Production



Contacts auto-dénudants



Poinçon mobile

Figures 5 – Outillage de découpe des contacts auto-dénudants (voir également DT-4 Éclaté outil de découpe)

## A - ANALYSE du CONTEXTE INDUSTRIEL de PRODUCTION

*Avec la configuration actuelle, décrite au travers des différents documents du sujet et du dossier technique, l'entreprise produit actuellement 1200 platines / heure. Compte tenu d'un marché stratégique en plein développement (informatique, industriel et tertiaire), elle mobilise 3 équipes d'opérateurs, fonctionne le week-end et les jours fériés pour répondre à la demande.*

### A.1. Analyse du contexte industriel associé au produit commercialisé

*Malgré un marché très concurrentiel, l'entreprise a pris l'initiative de protéger la conception de ses produits en déposant des brevets, par ailleurs accessibles à ses concurrents. Ces brevets portent sur la disposition des contacts auto-dénudants sur la platine électronique, sur le procédé réalisant la continuité électrique entre ces contacts auto-dénudants et la platine. L'entreprise a pris également l'initiative de communiquer sur le Profil Environnemental de ses Produits (PEP).*

#### Question A-1

**Expliquer** les intérêts et avantages de même que les inconvénients pour l'entreprise, de déposer des brevets pour protéger ses innovations.

#### Question A-2

**Justifier**, du point de vue du client, du point de vue de l'entreprise, l'intérêt de disposer du Profil Environnemental Produit (PEP) des produits. A partir des indicateurs fournis par le fabricant cf. DRS\_A1, **Préciser** les étapes du cycle de vie et les impacts environnementaux pris en compte par le fabricant. **Proposer** une représentation graphique du Profil Environnemental du Produit pour visualiser les impacts environnementaux des trois étapes de son cycle de vie (Fabrication, Distribution et utilisation).

### A.2. Amélioration du taux de rendement synthétique (TRS)

*L'unité de production automatisée affiche un Taux de Rendement Synthétique de 70%. En vue d'améliorer ce taux de rendement, une analyse récente des modes de défaillance et états critiques (AMDEC) a démontré sur cette unité de production, une faiblesse des outils de découpe qui ont tendance à casser trop souvent.*

#### Question A-3

**Expliquer** les objectifs et l'intérêt pour une entreprise de procéder à une AMDEC pour cette unité de production.

#### Question A-4

**Définir** les composantes permettant de déterminer le Taux de Rendement Synthétique. **Indiquer** les principaux indicateurs que le responsable de production a intérêt à surveiller pour augmenter le Taux de Rendement Synthétique au niveau de l'unité et l'environnement de production.

#### Question A-5

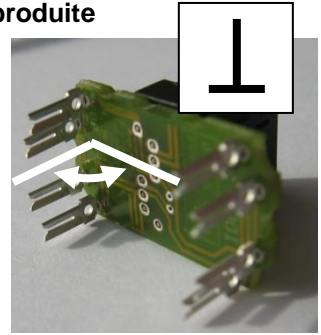
**Proposer** des solutions curatives et/ou alternatives qui permettraient à l'entreprise de maintenir son Taux de Rendement actuel, malgré la défaillance continue de certains poinçons, démontrée par l'AMDEC.



### A.3. Analyse du contexte de production, amélioration et suivi de la qualité produite

L'entreprise souhaite s'assurer que ses clients reçoivent des produits conformes et s'impose un contrôle qualité des produits fournis.

Les contacts auto-dénudants assemblés sur la platine électronique doivent respecter une spécification géométrique de perpendicularité avec celle-ci. Cette spécification imposée est particulièrement surveillée dans le cadre d'une démarche de maîtrise statistique du procédé.



#### Question A-6

Justifier l'importance de cette spécification de perpendicularité. .

#### Question A-7

**Décrire** à l'aide de schémas et/ou de façon littérale le type de contrôle, le moyen de contrôle adapté, à mettre en œuvre et à appliquer à cette spécification de perpendicularité obtenue dans le cadre de cette production automatisée, sérielle et en grande série.

Dans le cadre d'une démarche qualité fournisseur-client, l'entreprise souhaite mettre en œuvre une démarche d'amélioration qualitative de ses produits disponibles sous forme de lots. Elle souhaite mettre en œuvre des plans d'échantillonnage par attribut pour ses différents contrôles. L'entreprise souhaite comparer l'efficacité de ses procédures de contrôle pour les normaliser dans le cadre d'audits produits et de sa démarche de certification. Des lots ( $N$ ) de 1000 produits sont régulièrement constitués.

#### Question A-8

A l'aide de la table I de la norme ISO 2859-1, cf. DRS\_A2, pour un Niveau de Qualité acceptable de 0,65%, pour un contrôle général de niveau II : **déterminer** le plan d'échantillonnage normal simple à mettre en œuvre. **Préciser** la taille des échantillons à prélever, les critères d'acceptation  $A_c$  et de rejet  $R_e$ .

La courbe d'efficacité de ce contrôle représente la probabilité pour un échantillon de taille  $n$ , de proportion  $p$  de non conformes, d'être accepté. Par approximation d'une loi binomiale, la courbe d'efficacité  $P_a$ , peut s'écrire :

avec

\_\_\_\_\_

#### Question A-9

**Tracer** la courbe d'efficacité  $P_a = f(p)$  de ce contrôle normal simple. Pour un lot qui contiendrait  $p=2\%$  de défectueux, **déterminer** analytiquement ou graphiquement la probabilité d'acceptation  $P_a(p=2\%)$ .

NOTA : Pour les tracés de courbes d'efficacité, questions A9, A10 et A12, utiliser un seul graphique et distinguer les courbes afin de les comparer

#### Question A-10

Souhaitant un niveau de qualité élevé, l'entreprise peut fixer un critère d'acceptation  $A_c$  à 0 (zéro). **Donner** l'expression littérale de la probabilité d'acceptation  $P_A = f(p)$ . **Tracer** la courbe d'efficacité de ce nouveau plan d'échantillonnage. **Déterminer** la probabilité d'acceptation pour un lot contenant respectivement 1% et 2% de défectueux. **Commenter et conclure** sur l'efficacité de ce plan.

Les plans d'échantillonnage double et multiple sont couramment employés dans l'industrie, lorsque les productions sont stabilisées, car susceptibles de générer des économies sur la taille des échantillons et sur la durée du contrôle. Lorsque la qualité évolue, l'entreprise et le client peuvent souhaiter mettre en place des plans d'échantillonnage réduit ou renforcé. L'entreprise souhaite déterminer l'efficacité de tels plans dans la cadre de sa production actuelle.

Selon la norme en vigueur, au plan simple normal précédent correspondent les plans double et multiple suivants :

Plan double	Prélèvement	n1 = 50	n2 = 50
	Ac	0	1
	Re	1	2

Plan multiple	Prélèvement	n1 = 20	n2 = 20	n3 = 20	n4 = 20	n5 = 20	n6 = 20	n7 = 20
	Ac	-	-	0	0	1	1	2
	Re	2	2	3	3	3	3	3

(On ne peut conclure à l'acceptation du lot lors des deux premiers prélèvements)

### Question A-11

**Rédiger** sous forme d'organigramme l'arbre de décision pour ces deux plans. **Déterminer** pour les plans double et multiple correspondants au plan simple, les économies réalisables lorsque le niveau de qualité exigé est au rendez-vous. **Évaluer** l'opportunité d'un plan multiple lorsque la qualité est moyenne : jusqu'à 1 pièce défectueuse détectée par échantillon (n).

Au plan simple normal correspondent les plans simples réduit et renforcé suivants

Plan réduit	Prélèvement	n = 32	Plan renforcé	Prélèvement	n = 80
	Ac	0		Ac	0
	Re	1		Re	1

### Question A-12

**Tracer** la courbe d'efficacité de ces deux plans (réduit et renforcé), en les comparant avec la courbe d'efficacité du plan normal simple (Question A9). **Conclure** sur l'efficacité de ces deux plans lorsque la qualité évolue de façon satisfaisante ou à contrario de façon non satisfaisante.

### A.4. Étude de rentabilité pour un nouvel investissement envisagé.

En réponse à la demande du marché, l'entreprise envisage d'augmenter sa production. Compte tenu de l'évolution de la demande, l'entreprise souhaite passer d'une production de 1200 à 3500 platines / heure pour cette unité de production, une solution s'offre à elle : investir dans une nouvelle unité de production qui remplacerait l'unité actuelle.

Une nouvelle unité permettrait de baisser les coûts de revient ramenés à la platine produite par l'augmentation de la cadence de production. Le dirigeant de l'entreprise souhaite avoir une idée précise de la rentabilité de cet investissement. Les calculs nécessitent d'isoler les retombées de cet investissement en comparant les flux de trésorerie avec et sans investissement, en comparant, année par année, les flux de trésorerie positifs (recettes) et négatifs (dépenses). Cet investissement ne sera envisagé que si les flux nets de trésorerie cumulés sur la durée de vie sont supérieurs au montant de l'investissement et si le délai de récupération de l'investissement est rapide.

Hypothèses :

- L'entreprise travaille sur **350 jours ouvrés**
- Prix de vente actuel : **0,01 euros / platine produite.**
- Coût de l'investissement : **200 000 euros.**
- Durée d'utilisation de la nouvelle unité de production envisagée : **5 ans.**
- Au terme de ces 5 ans, l'unité est estimée par sa valeur résiduelle ou valeur à la fin de la durée d'amortissement : **7 500 euros.**

- Charges d'exploitations supplémentaires (matières, main d'œuvre, charges) dues à l'investissement réalisé : **50 000 euros / an / 5 ans**
- Taux d'imposition des bénéfices : **33,33%**
- Mode d'amortissement retenu sur les 5 années de durée de vie estimée : **linéaire**

#### Question A-13

En fonction de l'augmentation de la cadence de production attendue, **calculer** le chiffre d'affaire attendu lié à l'investissement envisagé.

#### Question A-14

**Établir** le tableau d'amortissement linéaire (cf. dotation aux amortissements) de cette nouvelle unité de production.

#### Question A-15

**Compléter** sur feuille de copie, tel que proposé ci-dessous, le tableau de calcul des Flux Nets de Trésorerie lié à ce projet

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Chiffre d'affaire attendu (1) :					
- Charges d'exploitations supplémentaires (1) :					
- Dotation aux amortissements (2)					
= <b>Résultat avant impôt</b>					
- Impôts sur les bénéfices (3)					
= <b>Résultat après impôts</b>					
+ Dotation aux amortissements (2)					
+ Valeur résiduelle de l'actif (4)					
= <b>Flux Nets de Trésorerie (5)</b>					

Les étapes de calcul :

- (1) Le chiffre d'affaire attendu (bénéfices proportionnels à l'augmentation de la production) et les dépenses (charges fixes d'exploitations supplémentaires) sont estimés à la fin de chaque année
- (2) L'unité de production envisagée fait l'objet d'une dépréciation annuelle constatée par une dotation aux amortissements. Cette dépréciation, ou perte de valeur ne fait pas l'objet de sortie de trésorerie. C'est une charge qu'il faut soustraire pour le calcul du résultat puis pour le calcul de l'impôt et qu'il faudra rajouter pour le calcul des Flux Nets de Trésorerie
- (3) L'impôt sur les bénéfices se calcule à partir du résultat avant impôt x taux d'imposition
- (4) La valeur résiduelle de l'actif est une recette supplémentaire intégrée au calcul des flux nets de trésorerie la dernière année d'amortissement
- (5) Les flux nets de trésorerie représentent les disponibilités financières de l'entreprise

#### Question A-16

**Calculer** la somme des flux nets de trésorerie

#### Question A-17

**Déterminer** le délai de récupération (années et mois) du capital investi

#### Question A-18

**Conclure** quant à l'intérêt de cet investissement.

## B - QUALIFICATION DE LA PHASE DE DÉCOUPE

*Dans le cadre de l'amélioration du taux de rendement ainsi que dans la perspective d'une montée en cadence, une AMDEC a montré la nécessité de pallier les défaillances des outils de découpe. Une recherche des causes de défaillance et des pistes d'amélioration du processus est donc mise en place.*

### B1 - Étude des opérations de découpe

*La définition de la pièce est définie sur le document technique DT-1. Les conclusions de l'AMDEC révèlent le niveau important de criticité des caractéristiques réalisées dans cette phase de découpe pour le bon déroulement des phases d'assemblage ultérieures. Il est ainsi nécessaire d'évaluer le niveau de qualité de réalisation de ces spécifications.*

#### Question B-1

**Symboliser**, sur le document réponse DR-B1, les choix technologiques de mise et de maintien en position de chaque pièce pour les étapes de 1 à 3 (description sur DT-2). **Surligner** en rouge les surfaces découpées lors de chaque étape.

#### Question B-2

**Analyser**, en complétant le document réponse DR-B2, la spécification géométrique réalisée.

#### Question B-3

**Décrire** le problème posé par la réalisation de plusieurs pièces dans la même phase de travail.

**Identifier**, pour chacune des pièces de 1 à 4, les causes de défauts potentiels liés à la réalisation de cette spécification.

#### Question B-4

**Commenter** la mise en position du produit lors de l'étape 1 de la phase de découpe.

**Proposer** sur le document réponse DR-B3 une solution d'écriture du tolérancement de la bande de produit brut. (Le calcul ou l'estimation des dimensions des intervalles de tolérance ne sont pas demandés, les valeurs pouvant rester sous la forme  $t_1$ ,  $t_2$ ...).

### B2 - Étude du procédé de découpage.

*Dans le cadre de la recherche des causes de défaillance, on se propose de vérifier les limites du procédé de découpe compte tenu des paramètres choisis.*

#### Question B-5

**Décrire** à l'aide d'un ou plusieurs schémas une opération de découpage d'une tôle. **Tracer** l'allure générale de la courbe présentant l'évolution de l'effort en fonction du temps pour un cycle de découpage et **identifier** les différentes zones. **Préciser** quels sont les principaux paramètres à prendre en compte lors de la définition d'une opération de découpe, ainsi que leur(s) influence(s) sur les défauts générés.

#### Question B-6

**Justifier** la présence des centreurs de matrice en précisant leur fonction et en commentant le tolérancement de la matrice fixe (voir DT-3 et DT-4).

*Le matériau retenu pour les contacts est un bronze au phosphore, dont le Rm est donné entre 685 N/mm<sup>2</sup> et 785 N/mm<sup>2</sup>. Les vérins choisis sont des vérins ADVU standards (et non S2 ou S20), de diamètre de piston 80 mm pour le vérin N°1 et 50 mm pour le vérin N°2, et dont les caractéristiques sont fournies sur le document technique DT-5.*

*Le calcul des efforts de découpage pourra être réalisé à l'aide d'un modèle simplifié et l'effort de dévêtissage sera estimé à 15% de l'effort de découpage.*

#### **Question B-7**

**Vérifier** la compatibilité des vérins retenus avec le processus mis en œuvre et **commenter** ce choix.

### **B3 - Métallurgie des poinçons et matrices.**

*L'usure et le bris des poinçons et matrices étant identifiés comme les causes principales de défaillance, l'analyse d'une matrice par un laboratoire de métallurgie est demandée. Les résultats de cette analyse sont fournis sur le document technique DT-6.*

*Le matériau est un Vanadis 23, acier rapide fritté fortement allié caractérisé par une très bonne résistance à l'usure abrasive et une résistance élevée à la compression. Les caractéristiques et préconisations d'emploi de ce matériau sont fournies sur le document ressource DRS-B1.*

#### **Question B-8**

**Commenter** la quantification des éléments d'alliage et justifier son appartenance à la famille des aciers rapides.

*Sachant que la dureté requise est de 64 HRC (ou 800 HV/10),*

#### **Question B-9**

**Détailler**, en respectant les préconisations du fournisseur, le processus de traitement thermique que devra subir le matériau afin de répondre à l'exigence de dureté demandée. Relever les caractéristiques mécaniques du matériau après traitement.

#### **Question B-10**

**Décrire**, de façon succincte et à l'aide de croquis, les essais permettant de mesurer la résilience, la dureté HRC et le module d'élasticité.

*Après vérification des paramètres de mise en œuvre du traitement thermique qui s'avèrent corrects par rapport aux préconisations, l'analyse de la pièce fournie (voir document technique DT-6) fait apparaître 2 types de surfaces :*

- *les surfaces rectifiées, qui présentent une dureté de 64 à 65 HRC,*
- *les surfaces obtenues par électroérosion qui présentent une dureté supérieure à 70 HRC.*

#### **Question B-11**

**Commenter** ces résultats d'analyse en termes de causes et d'effets sur les caractéristiques de l'outil et les conséquences sur le processus de découpe.

## C- OBTENTION DE LA MATRICE FIXE PAR USINAGE

*Le plan de définition de la matrice est présenté sur le Document Technique DT-3. Le matériau constitutif de la matrice fixe est du X130 W Cr MO V 6 5 4 3. Cette pièce est actuellement entièrement réalisée en combinant deux procédés : un procédé d'électroérosion par découpe au fil et un procédé d'électroérosion par enfonçage.*

*La gamme de fabrication pour ce type de matrice (ou poinçon) consiste à réaliser une forme brute cubique puis à réaliser par différentes opérations d'usinage, les trous et taraudages, avant de réaliser les traitements thermiques souhaités et d'usiner l'ensemble des surfaces fonctionnelles.*

*Un traitement thermique de masse appliqué à la matrice permet d'obtenir une dureté de 64 HRc. Toutes les opérations d'usinage permettant d'obtenir les formes fonctionnelles sont réalisées après le traitement thermique.*

*Pour réduire les coûts de production pour ce type de pièces, le bureau d'industrialisation envisage de réaliser la matrice fixe par usinage grande vitesse (UGV). Tous les trous taraudés et alésages de la pièce ne font pas partie de l'étude. Ils continueront à être réalisés par enlèvement de matière.*

### C1 - Étude du procédé d'obtention de la matrice fixe par électroérosion

*Afin de valider, sur les plans technique et économique, le changement de procédé d'obtention de la matrice fixe, il est nécessaire de quantifier, dans un premier temps, les coûts de production du procédé actuel par électroérosion.*

#### Question C-1

**Décrire**, en s'appuyant sur un schéma, le principe physique d'électroérosion. Dans le cadre de ce procédé, **indiquer** si tous les matériaux peuvent être usinés.

#### Question C-2

**Indiquer** les différents paramètres à régler lors de la mise en œuvre du procédé d'électroérosion. **Indiquer** quels sont les différents critères technologiques influencés par ces paramètres.

#### Question C-3

**Décrire**, en s'appuyant sur un schéma, le principe de procédé de découpe au fil par électroérosion. **Citer** quelques exemples de pièces classiques obtenues avec ce procédé. **Indiquer** les limites du procédé en termes de formes réalisables.

#### Question C-4

**Décrire**, en s'appuyant sur un schéma, le principe de d'électroérosion par enfonçage. **Indiquer** la nature des matériaux généralement utilisés pour réaliser les électrodes. **Classer** les différents matériaux proposés en termes de durée de vie et coût de réalisation d'une électrode. **Citer** quelques exemples de pièces classiques obtenues avec ce procédé. **Indiquer** les limites du procédé en termes de formes réalisables.

### C2 - La découpe au fil par électroérosion : détermination du coût de production, application à la matrice fixe.

*La découpe au fil par électroérosion ne nécessite pas la réalisation d'électrodes spécifiques. Ce procédé a été choisi initialement pour réaliser un maximum de formes sur la matrice fixe.*

*Le bureau d'industrialisation souhaite déterminer le coût de production associé à ce procédé, et souhaite formaliser la gamme de fabrication de découpe au fil par électroérosion de la matrice fixe.*

*La matrice fixe, dans son état initial, est une pièce brute, cubique, englobant avec les surépaisseurs de matière nécessaires à l'obtention des formes et aux différentes prises de pièces. Quatre phases différentes sont proposées sur le document réponse DR-C1. Ce nombre est le nombre maximal de posages. Il ne doit pas être dépassé.*

### Question C-5

**Indiquer**, sur le Document-Réponse DR-C1 et en respectant le code couleur proposé, l'ensemble des formes obtenues par découpe au fil par électroérosion, en les groupant par phase de découpe (chaque phase correspond à un posage de la pièce).

### Question C-6

**Préciser**, en utilisant le Document-Ressource DRS-C1-1, le nombre de passes (ébauche, demi-finition et finition) pour chacune des faces en fonction des caractéristiques géométriques et d'état de surface spécifiées sur la pièce.

### Question C-7

**Réaliser** la gamme de fabrication : **compléter** les Documents-Réponses DR-C2 et DR-C3 en indiquant pour chaque phase :

- l'enchaînement des opérations de découpe (ne pas omettre de préciser l'axe du fil) ;
- les trajectoires du fil lors des différentes coupes ;
- la mise en position et le maintien en position de la pièce.

### Question C-8

**Estimer** le temps de découpe de la pièce. Pour cela, **mesurer** la longueur de découpe et **considérer** que la vitesse d'avance programmée est en permanence respectée. Sachant que le coût horaire d'une machine de découpe au fil est estimé à 50 euros par l'entreprise, **déterminer** le coût de revient de la découpe fil.

## **C3 - L'électroérosion par enfonçage : détermination du coût de production, application à la forme « guide-contre poinçon » de la matrice fixe.**

*Sur le plan de définition de la matrice fixe présenté sur le Document Technique DT-2 une forme nommée « guide contre-poinçon » est obtenue par électroérosion par enfonçage. La pièce à réaliser étant unitaire, le matériau choisi pour réaliser l'électrode est le cuivre.*

### Question C-9 :

**Indiquer** pourquoi cette forme est obtenue par électroérosion par enfonçage.

*La gamme d'électroérosion initiale est précisée sur le Document-Ressource DRS-C2-1. Les différents choix de programmation sont présentés ci-après.*

*La surface frontale de l'électrode en cuivre étant de 23,5 mm<sup>2</sup>, la puissance de départ choisie pour ébaucher la forme est la puissance P6. Le jeu de paramètres choisi est le jeu 282 qui maximise l'enlèvement de matière avec la puissance P6 (voir « courbes de technologies »). Comme il faut obtenir un Ra de 0,8 microns sur la forme finale, la puissance finale choisie pour finir la forme est la puissance P2. Le jeu de paramètres choisi est le jeu 181 qui permet l'obtention du Ra avec la puissance P2 (voir « courbes de technologies »).*

*En parallèle, le document « Choix des sous dimensions » DRS-C2-2 permet de voir que l'électrode d'ébauche doit avoir des dimensions radiales en retrait de 150 microns par rapport à la forme finale alors que le retrait ne doit être que de 8 microns pour la finition.*

*Comme seule la surface frontale de l'électrode s'use au cours de l'opération d'électroérosion, toutes les opérations sont réalisées avec la même électrode. La programmation la plus simple consiste alors à réaliser le programme d'ébauche avec le jeu de paramètres 282 puis directement les quatre programmes de finition (un programme par face) avec le jeu de paramètres 181.*

*Le temps d'usinage de l'électrode est estimé à 40 minutes. L'électrode est réalisée sur un centre d'usinage grande vitesse à 3 axes dont le coût horaire est de 110 euros / heure.*

### Question C-10

**Calculer** la durée de l'opération d'ébauche et des 4 opérations de finition (une opération de finition par face), en fonction des débits d'enlèvement de matière proposés sur le Document-Ressource DRS-C2-1.

### Question C-11

En utilisant le temps d'usinage par électroérosion estimé à la question C-10, **calculer** le coût de revient de l'obtention de la forme « guide contre-poinçon » sachant que le coût horaire de la machine d'électroérosion par enfonçage est de 80 euros.

### Question C-12

**Préciser** l'intérêt d'insérer un programme intermédiaire de « demi-finition » pour la gamme d'électroérosion de la forme étudiée. Sans développer l'ensemble des calculs, **indiquer** votre raisonnement.

## **C4 - Usinage UGV : détermination du coût de production, application à la matrice fixe, obtenue initialement par un découpage au fil par électroérosion.**

*Le bureau d'industrialisation souhaite remplacer l'ensemble des opérations de découpe au fil par électroérosion par des opérations d'usinage à l'outil coupant et envisage de réaliser la matrice fixe par un procédé d'usinage à grande vitesse (UGV).*

*Le bureau d'industrialisation souhaite déterminer le coût de production associé à ce procédé, aussi est-il nécessaire de formaliser la gamme de fabrication par usinage de la matrice fixe.*

*Une gamme d'outils et de conditions de coupe est fournie sur le Document-Ressources DRS-C3. Le coefficient spécifique de coupe pour le matériau constitutif de la matrice est considéré proche des 4000 N/mm<sup>2</sup>.*

*Le centre d'usinage grande vitesse possédé par l'entreprise est un centre d'usinage 3 axes, de volume usinable de 500 mm au cube, équipé d'une électro-broche de 12 KW avec une fréquence de rotation maximale de 36000 tr/min.*

*Nous nous intéressons dans un premier temps à l'obtention de la forme « dégagement découpe poinçon » qui a la particularité d'imposer un diamètre de fraise très faible pour une forme usinée assez profonde.*

### Question C-13

**Indiquer** s'il est envisageable d'obtenir cette forme par usinage. **Justifier et argumenter** votre réponse, en admettant que le coefficient spécifique de coupe du matériau de la matrice fixe possède une valeur proche de 4000 N/mm<sup>2</sup>.

***Pour la suite nous considérons que cette forme continuera à être réalisée par découpe au fil par électroérosion.***

***De plus, pour des raisons économiques, l'ensemble des formes obtenues initialement par découpage au fil par électroérosion, conservera le même mode d'obtention car l'usinage par outil coupant de ces formes n'est pas rentable.***



**C5 - Usinage UGV : détermination du coût de production, application à la forme « guide contre poinçon », obtenue initialement par électroérosion par enfonçage**

*On souhaite remplacer l'opération d'électroérosion par enfonçage de la forme « guide contre poinçon » par une opération d'usinage.*

**Question C-14**

**Proposer**, sur le Document-Réponse DR-C4, une modification de la forme « guide contre-poinçon » qui permettrait de réaliser cette forme par un usinage par enlèvement de matière

**Question C-15**

**Réaliser** la gamme de fabrication par usinage de la forme proposée à la question précédente.

**Compléter** le Document-Réponse DR-C4 en indiquant :

- l'enchaînement des opérations d'usinage (ne pas omettre de préciser l'axe outil),
- les trajectoires outils lors des différentes opérations,
- la mise en position et le maintien en position de la pièce.

Pour compléter l'avant-projet de fabrication, veuillez compléter pour chaque phase d'usinage

- le choix de la géométrie et des nuances des outils de coupe,
- les conditions de coupe, en remplissant sur votre copie un tableau comme présenté ci-dessous :

Outil	Vc	N	fz	Vf	Remarques

**Question C-16**

**Estimer** la longueur des différents trajets. En considérant que la vitesse d'avance programmée est en permanence respectée, **estimer** le temps d'usinage de la pièce. Sachant que le coût horaire d'un centre d'usinage grande vitesse à 3 axes est estimé à 110 euros par l'entreprise, **déterminer** le coût de revient de ces usinages.

**C6 - Synthèse : comparaison des différents procédés et choix de la gamme de réalisation finale, application à la matrice fixe.**

*Cette partie est à traiter sous forme d'une argumentation s'appuyant sur les résultats précédents, sans mener une étude complète.*

**Question C-17**

En utilisant les différents coûts de production calculés dans les questions précédentes, **déterminer et choisir** une combinaison de procédés assurant une des réalisations les moins coûteuses pour obtenir cette matrice fixe.

# Épreuve d'Études d'Industrialisation

## Éléments de correction

### Partie A - A - ANALYSE du CONTEXTE INDUSTRIEL de PRODUCTION

Cette partie de l'épreuve avait pour objectif d'analyser le contexte industriel de l'entreprise, la productivité, le suivi de la qualité et des coûts. Cette partie avait pour objectif d'explorer les différentes solutions que l'entreprise engage pour réduire l'ensemble de ses coûts.

#### Le travail demandé consistait

- Questions A1 et A2 à analyser le contexte actuel de production, la stratégie d'entreprise en matière d'innovation.
- Questions A3 à A12 à étudier et analyser différentes solutions pour améliorer le Taux de Rendement de l'unité de production (**Quantité**), pour contrôler la production (**Qualité**).
- Questions A13 à A18 à réaliser une étude de rentabilité (**Coûts**).

#### A.1. Analyse du contexte industriel associé au produit commercialisé

Connaissances évaluées : protection industrielle et dépôts de brevet, éco conception, impacts environnementaux.

**Question A-1 : Expliquer** les intérêts et avantages de même que les inconvénients pour l'entreprise, de déposer des brevets pour protéger ses innovations.

Éléments de réponse : *Se référer également au site national de l'INPI*

Intérêts : *Pour une entreprise, le fait de déposer des brevets et protéger ses innovations lui confère une avancée technologique certaine, ses concurrents ne pouvant, sans son accord, utiliser ses innovations. Celles ci sont le fruit d'investissements, d'études et de recherches qu'il faut savoir préserver et sur lesquels il faut savoir capitaliser. La réussite et la pérennité de l'entreprise dépendent de sa capacité à innover et à se protéger.*

*Au demeurant ce n'est pas le produit en lui-même, la prise RJ45 qui fait l'objet d'un brevet, mais bien les processus innovants imaginés par les développeurs du produit pour assurer, comme précisé, soit la disposition des contacts auto-dénudants facilitant l'assemblage sur une chaîne automatique, soit la continuité électrique sans avoir recours à un procédé de soudage à la vague par exemple.*

Avantages : *Possibilité de se protéger au niveau national, européen et international. Le brevet renforce la valeur de l'entreprise : plus qu'un indicateur de performance, il constitue un élément de son actif immatériel, qui peut être valorisé et transmis (vendu). Pour une entreprise qui souhaite innover, le fait d'accéder, sous forme de veille technique et scientifique aux brevets déposés, lui permet d'optimiser ses investissements dans la recherche d'innovations.*

Inconvénients : *Les brevets concernent avant tout des procédés, des produits ou les moyens techniques mis en œuvre pour concrétiser une idée. Il n'est pas possible de déposer une idée. Les brevets déposés sont publics, accessibles à la concurrence. Il est facile pour une entreprise de réaliser une veille technologique à partir des brevets déposés par une entreprise et de connaître ses stratégies de recherche et d'innovation. Il lui est soit possible de remonter à l'idée, de déposer une variante, soit possible de poursuivre et d'apporter des modifications, évolutions, innovations à des brevets déposés.*

**Question A-2 : Justifier**, du point de vue du client, du point de vue de l'entreprise, l'intérêt de disposer du Profil Environnemental Produit (PEP) des produits. A partir des indicateurs fournis par le fabricant cf. DRS\_A1, **Préciser** les étapes du cycle de vie et les impacts environnementaux pris en compte par le fabricant. **Proposer** une représentation graphique du Profil Environnemental du Produit

pour visualiser les impacts environnementaux des trois étapes de son cycle de vie (Fabrication, Distribution et utilisation).

*Disposer et mettre à la disposition du plus grand nombre, le profil environnemental de ses produits, indique clairement que l'entreprise a engagé et intégré une politique de management environnemental sur ses sites industriels, cf normes ISO 14000. Mettre à la disposition de ses clients et fournisseurs, du grand public, le profil environnemental de ses produits, c'est leur garantir qu'elle est engagée dans une politique de réduction des impacts environnementaux de ses produits et processus, qu'elle répond aux exigences réglementaires REACH, DEEE, que les cycles de vie des produits font l'objet d'une attention dans le cadre de démarches d'éco conception. C'est la possibilité de fournir à ses clients toutes les informations pertinentes (composition, consommation, fin de vie...), leurs permettre de choisir des solutions respectueuses de l'environnement et leurs permettre de s'engager à leur tour, dans une approche de développement durable en choisissant, en connaissance de cause, des produits respectueux de l'environnement pour concevoir leurs propres produits et/ou installations.*

*Ces profils environnementaux s'attachent à dégager différents impacts vis-à-vis de l'épuisement des ressources naturelles ou qui se raréfient, des consommations énergétiques ou en eaux utilisées pour les étapes du cycle les plus importantes, de la production des Gaz à Effets de Serre (GES) ayant un impact sur la couche d'ozone, de la production de substances dangereuses ayant un impact sur l'eau, l'air.*

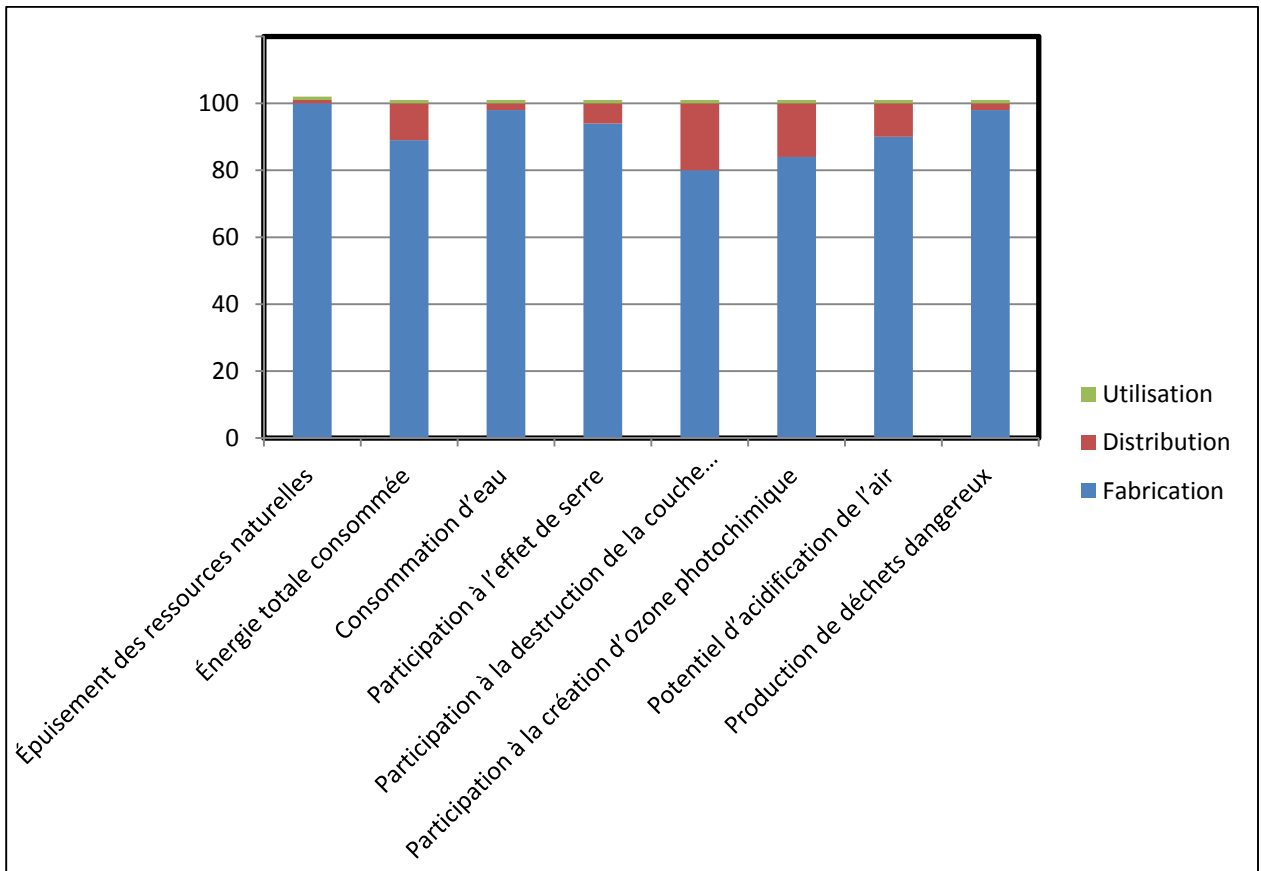
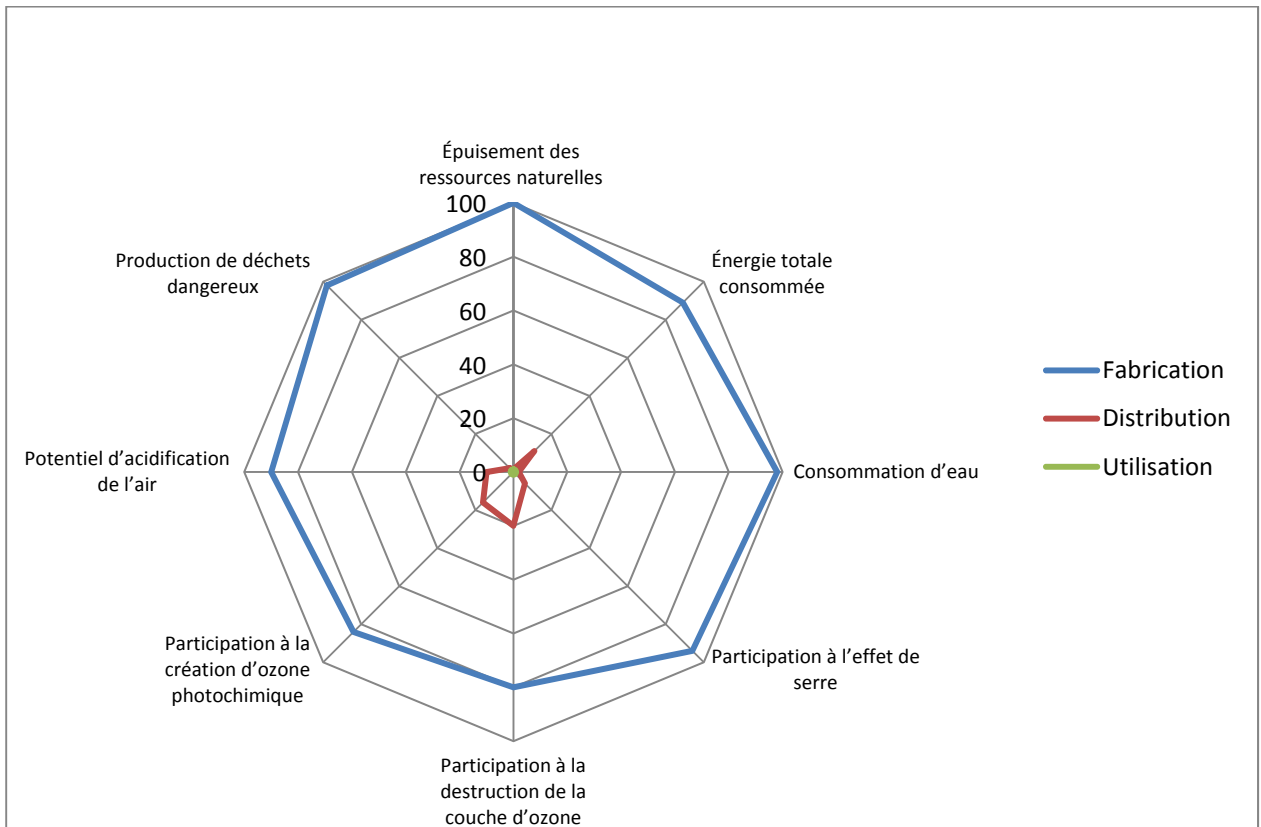
*Pour la prise RJ45, le constructeur a choisi de préciser les différentes matières premières constituant le produit, leurs poids respectifs, les matières premières utilisées dans l'emballage et le conditionnement des produits. A cela il précise les impacts environnementaux liés à sa fabrication (certification ISO 14001), sa distribution (scénario de transport et nature des emballages), son utilisation (scénario d'utilisation, nature des consommables requis, consommation énergétique sur 20 ans, maintenance), sa fin de vie (produits dangereux, potentiel de recyclage, potentiel de valorisation énergétique).*

*Les étapes de cycle de vie intègrent l'ensemble des processus, de l'extraction, utilisation et transformation des matières premières à la destruction et valorisation du produit en fin de vie. Les fabricants détaillent plus particulièrement les profils environnementaux qu'ils peuvent évaluer dans ce cycle de vie : Fabrication, Distribution et Utilisation.*

*Généralement les représentations utilisées mobilisent soit des courbes « radar », soit des graphiques (histogrammes) cumulés.*

*Dernièrement, des logiciels de CAO ont intégré des modules spécifiques permettant d'obtenir un retour d'information immédiat d'une éco conception sur l'empreinte carbone et les autres impacts que le produit peut avoir sur son environnement tout au long de son cycle de vie, en particulier pour et par la sélection de matériau, vis-à-vis des phases et étapes de production, de transport, d'utilisation et en fin de vie. A ce jour, il est possible d'obtenir un rapport détaillé indiquant la valeur d'impacts environnementaux mesurés, que ce soit :*

- Empreinte carbone (Équivalent CO<sup>2</sup> & Méthane)
- Acidification de l'Air (Équivalent SO<sup>2</sup>; dioxyde de soufre)
- Eutrophisation de l'eau (Équivalente PO<sub>4</sub>; Phosphate)
- Consommation totale d'énergie (MJ)



## A.2. Amélioration du taux de rendement synthétique (TRS)

### Question A-3

**Expliquer** les objectifs et l'intérêt pour une entreprise de procéder à une AMDEC pour cette unité de production.

*Une AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance et États Critiques va permettre à l'entreprise de réaliser un audit interne des causes associées aux problèmes détectés sur l'unité de production. Cette AMDEC lui permettra de classer les causes principales qui seront rassemblées et organisées suivant que la cause soit à associer avec le Milieu environnant, la Matière, les Moyens mobilisés, les Ressources Humaines (Main d'œuvre), les Méthodes ou procédures mobilisées. (approche par les 5 M). Hiérarchisées, pondérées (fréquence, gravité, ...) ces causes feront l'objet d'un programme d'actions pour remédier aux problèmes constatés. Les causes assignables ou spécifiques seront éliminées, les causes aléatoires recherchées et minimisées.*

### Question A-4

**Définir** les composantes permettant de déterminer le Taux de Rendement Synthétique. **Indiquer** les principaux indicateurs que le responsable de production a intérêt à surveiller pour augmenter le Taux de Rendement Synthétique au niveau de l'unité et l'environnement de production.

*Le taux de rendement synthétique mesure l'efficacité d'une ligne de production. C'est le ratio entre le temps utilisé pour une production donnée et réalisée ramené le temps théorique qui était attendu pour cette production. Le TRS met en évidence les pertes de production. Il peut être calculé comme le rapport entre la quantité de pièces bonnes produites sur une période donnée et le nombre de pièces théoriquement produites durant la même période. Ce TRS est influencé par :*

- Les pannes et les changements d'outils, d'où l'intérêt d'avoir une politique de changement rapide d'outillage (type SMED). Dans le cas de la production des prises RJ45, l'entreprise est confrontée à des problèmes récurrents de changement de poinçons.*
- Les pannes, les micro-arrêts et les baisses de cadences (changement d'opérateur, condition de travail en évolution, influence et évolutions de la pression dans le réseau d'air comprimé, problème avec le déroulement de la mise en bande des contacts auto-dénudants, problème de mise en position non correcte des contacts auto-dénudants (non respect de la perpendicularité) sur la platine, ... )*
- Tous les problèmes de non qualité (rupture des poinçons, qualité de la mise en bande, qualité des actionneurs, la compétence et la vigilance des opérateurs qui se relaient au poste de production, ...*

### Question A-5

**Proposer** des solutions curatives et/ou alternatives qui permettraient à l'entreprise de maintenir son Taux de Rendement actuel, malgré la défaillance continue de certains poinçons, démontrée par l'AMDEC.

*Plusieurs méthodes sont à envisager : SMED (changement rapide d'outillages), TPM (Totale Productive Maintenance), 5S (organisation du poste de travail, rangé, nettoyé), juste à temps (réduction des temps d'arrêts et synchronisation des flux de production, de stocks), auto qualité au poste de travail, amélioration des conditions de travail (ergonomie des postes de travail par exemple).*

*Dans le cas de l'entreprise qui fabrique les prises RJ45, on peut envisager de :*

- mettre en œuvre une maintenance préventive plutôt que curative ;*
- mettre en œuvre un changement rapide d'outillage ;*
- mobiliser des actionneurs fiables et surs ;*
- disposer de poinçons de qualité, en nombres suffisants pour anticiper leurs remplacements ;*
- maintenir la pression pneumatique à une valeur spécifique ;*
- former les opérateurs à anticiper les problèmes (auto analyse causes effets) ;*
- formaliser des procédures explicites et testées ;*
- contrôler en amont de la production la qualité des produits à assembler ;*
- ....*

### A.3. Analyse du contexte de production, amélioration et suivi de la qualité produite

#### Question A-6

Justifier l'importance de la spécification de perpendicularité. .

*S'agissant d'une unité automatique d'assemblage des contacts auto-dénudants (x8) sur la platine et ensuite assemblage des autres parties de la prise RJ45 sur cette platine, cette perpendicularité est imposée afin de garantir les opérations en aval. Tout défaut de perpendicularité entraînerait un assemblage forcé, la déformation et/ou détérioration des contacts ou de la platine. Compte tenu des cadences de production, le non respect de cette perpendicularité entraînerait un assemblage défectueux qui pourrait engorger, endommager l'unité de production. La difficulté réside dans le respect de cette perpendicularité, de façon simultanée, pour les 8 contacts auto-dénudants.*

#### Question A-7

Décrire à l'aide de schémas et/ou de façon littérale le type de contrôle, le moyen de contrôle adapté, à mettre en œuvre et à appliquer à cette spécification de perpendicularité obtenue dans le cadre de cette production automatisée, sérielle et en grande série.

*Compte tenu de la production envisagée, le respect de cette perpendicularité doit être assuré par la surveillance étroite des dispositifs (poinçons fixes et mobiles) qui mettent en place les contacts auto-dénudants sur la platine. Lors de la fabrication de ces poinçons, la surface de contact entre les poinçons et les contacts auto-dénudants doit être vérifiée ponctuellement, systématiquement, et régulièrement lorsque les poinçons sont mis en service.*

*Le respect de cette perpendicularité est conditionné également par la qualité de la platine (planéité plus facile à contrôler), de l'orientation des alésages courts réalisés sur la platine et assurant la continuité électrique.*

*Sur le poste automatique, l'opérateur doit pouvoir disposer d'un gabarit « entre-n'entre pas » à l'image de l'opération de montage de la platine équipée avec le reste de la prise RJ45 afin de détecter un lot défectueux. A partir d'un prélèvement régulier, dont la fréquence doit être déterminée avec précision, l'opérateur doit prendre en charge, en temps masqué, sur la base de prélèvement, la vérification des lots de platines également.*

*contrôle sans contact ? sur chaîne*

#### Question A-8

À l'aide de la table I de la norme ISO 2859-1, cf. DRS\_A2, pour un Niveau de Qualité acceptable de 0,65%, pour un contrôle général de niveau II : **déterminer** le plan d'échantillonnage normal simple à mettre en œuvre. **Préciser** la taille des échantillons à prélever, les critères d'acceptation et de rejet.

*À l'aide des documents fournis, on détermine le plan d'échantillonnage normal simple comme suit :*

*Données :*

- N = lot de 1000 produits, NQA = 0,65%, Niveau de contrôle général II*

*Plan requis :*

- lettre code : J*
- effectif des échantillons : n = 80*
- critère d'acceptation : Ac = 1*
- critère de rejet : Re = 2*

### Question A-9

**Tracer** la courbe d'efficacité  $P_a = f(p)$  de ce contrôle normal simple. Pour un lot qui contiendrait  $p=2\%$  de défectueux, **déterminer** analytiquement ou graphiquement la probabilité d'acceptation  $P_a(p=2\%)$ .

*On détermine l'expression de  $P_a = f(p)$ ,*

$$P_a = p(X < 1) = C_{80}^0 p^0 (1-p)^{80} + C_{80}^1 p^1 (1-p)^{79}$$

*en déterminant  $C_{80}^0 = 1$  et  $C_{80}^1 = 80$ ,*

$$P_a = (1-p)^{80} + 80 p^1 (1-p)^{79}$$

*en factorisant par  $(1-p)^{79}$ , on obtient l'expression de  $P_a = f(p)$*

$$P_a = p(X < 1) = (1-p)^{79} (79p + 1)$$

*Pour  $p = 2\%$  de produits, la probabilité d'acceptation  $P_a = 0,52$ , soit 52% de chance d'être accepté. Or avec 2 % de produits défectueux, si la probabilité d'acceptation du lot est de plus de 50%, la probabilité de rejet l'est tout autant. Une telle probabilité amène l'entreprise à rejeter comme à accepter des lots contenant jusqu'à 20 produits défectueux sur 1000 pièces produites, ce qui n'est pas acceptable. Il lui faut donc définir une procédure de contrôle plus efficace.*

*Alors que le niveau de qualité acceptable NQA est pourtant faible, et malgré aussi un prélèvement important ( $n=80$ ), ce plan d'échantillonnage simple démontre donc sa faible efficacité, le risque client d'accepter un lot défectueux est élevé, client n'est pas protégé, tout comme l'entreprise qui accepte de les livrer. Les risques clients et fournisseur ne sont pas compatibles avec une exigence de qualité.*

### Question A-10

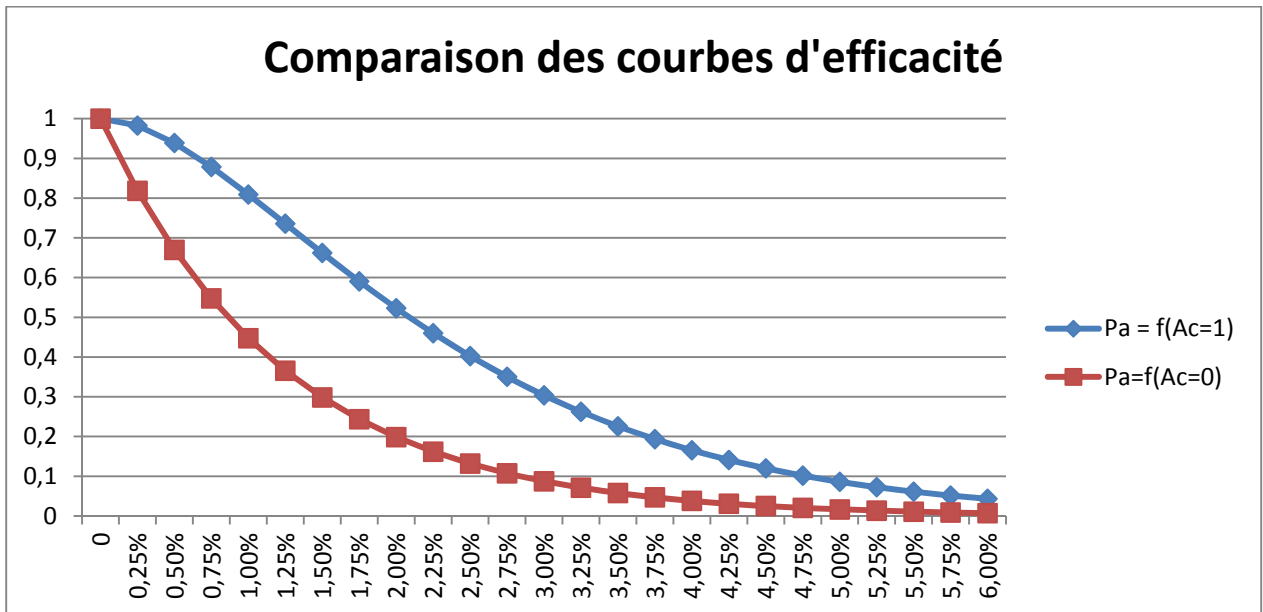
Souhaitant un niveau de qualité élevé, l'entreprise peut fixer un critère d'acceptation  $A_c$  à 0 (zéro). **Donner** l'expression littérale de la probabilité d'acceptation  $P_A = f(p)$ . **Tracer** la courbe d'efficacité de ce nouveau plan d'échantillonnage. **Déterminer** la probabilité d'acceptation pour un lot contenant respectivement 1% et 2% de défectueux. **Commenter et conclure** sur l'efficacité de ce plan.

*On détermine pour un critère d'acceptation  $A_c=0$ , la nouvelle expression de la courbe d'efficacité*

$$P_a = p(X < 0) = C_{80}^0 p^0 (1-p)^{80} = (1-p)^{80}$$

*On note sur le graphique que pour un lot contenant 2% de produits défectueux, la probabilité d'acceptation chute à 20%. Pour un lot contenant 1% de produits défectueux, la probabilité d'acceptation reste en dessous de 50%. On constate de suite le caractère beaucoup plus discriminant entre ces 2 plans de contrôle. Ce deuxième plan protège davantage le client mais aussi le fournisseur, l'entreprise.*

*On notera tout de même les limites économiques de ce type de contrôle, qui revient à prélever un nombre élevé de produits par échantillon ( $n=80$ ), qui revient de ce fait à y consacrer du temps, même si le temps peut être associé à un temps masqué et qui démontre qu'avec la présence d'un nombre importants de produits défectueux, persistent des probabilités non négligeables d'accepter les lots*

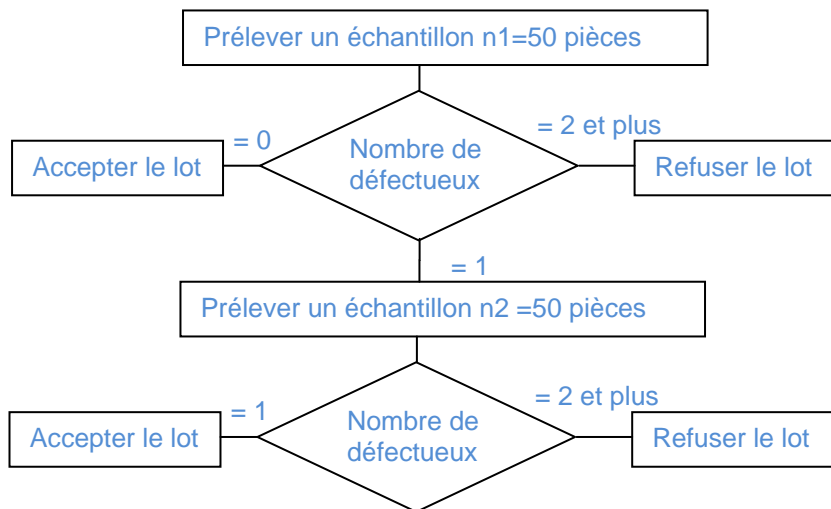


**Question A-11**

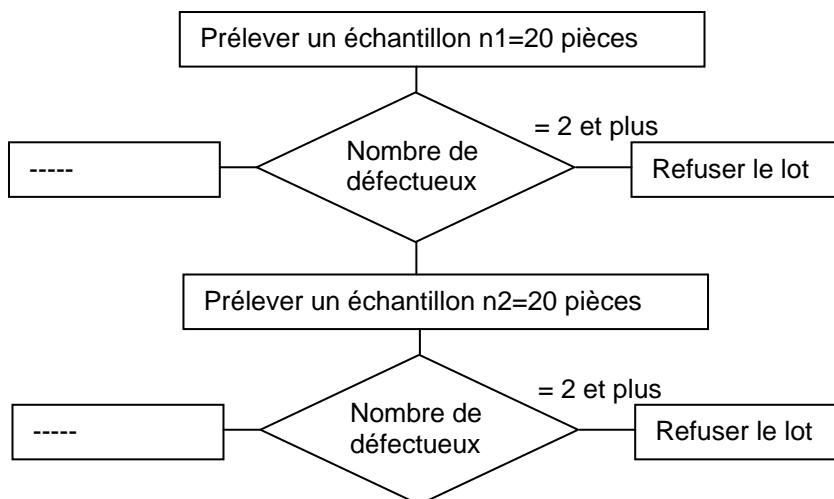
**Rédiger** sous forme d'organigramme l'arbre de décision pour ces deux plans. **Déterminer** pour les plans double et multiple correspondants au plan simple, les économies réalisables lorsque le niveau de qualité exigé est au rendez-vous. **Évaluer** l'opportunité d'un plan multiple lorsque la qualité est moyenne : jusqu'à 1 pièce défectueuse détectée par échantillon (n).

*Pour les plans doubles et multiples, les nombres de défectueux s'additionnent à chaque prélèvement*

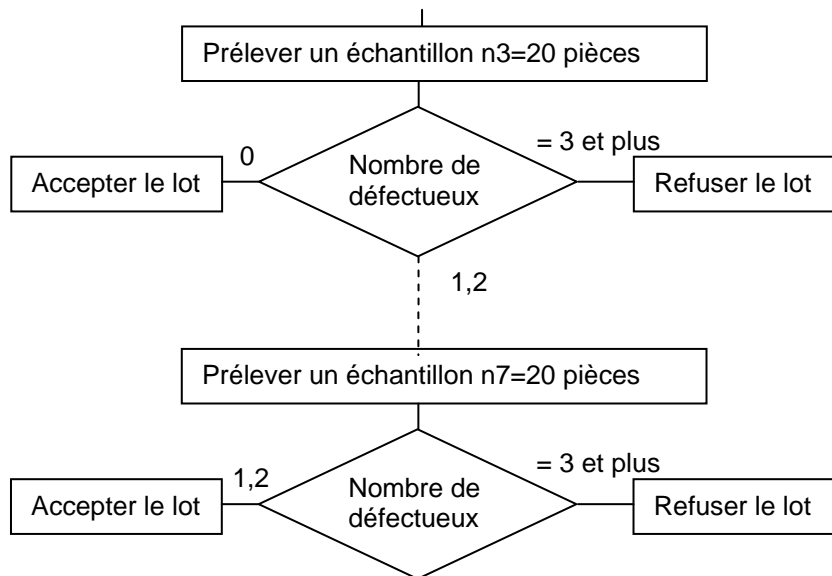
**Plan d'échantillonnage double**



**Plan d'échantillonnage multiple**







Lorsque le niveau de qualité est au rendez vous, (comme lorsque le niveau de qualité est très mauvais), l'économie est conséquente, plus spécialement pour un plan double. En effet, il suffit de prélever un échantillon de 50 pièces soit une économie de pièces et de temps de près de 30%. Pour un plan multiple, par contre il faut prélever jusqu'à 3 échantillons pour décider d'accepter le lot, sauf si la qualité est mauvaise où la décision peut se faire dès le premier prélèvement.

### Question A-12

**Tracer** la courbe d'efficacité de ces deux plans (réduit et renforcé), en les comparants avec la courbe d'efficacité du plan normal simple (Question A9). **Conclure** sur l'efficacité de ces deux plans lorsque la qualité évolue de façon satisfaisante ou à contrario de façon non satisfaisante.

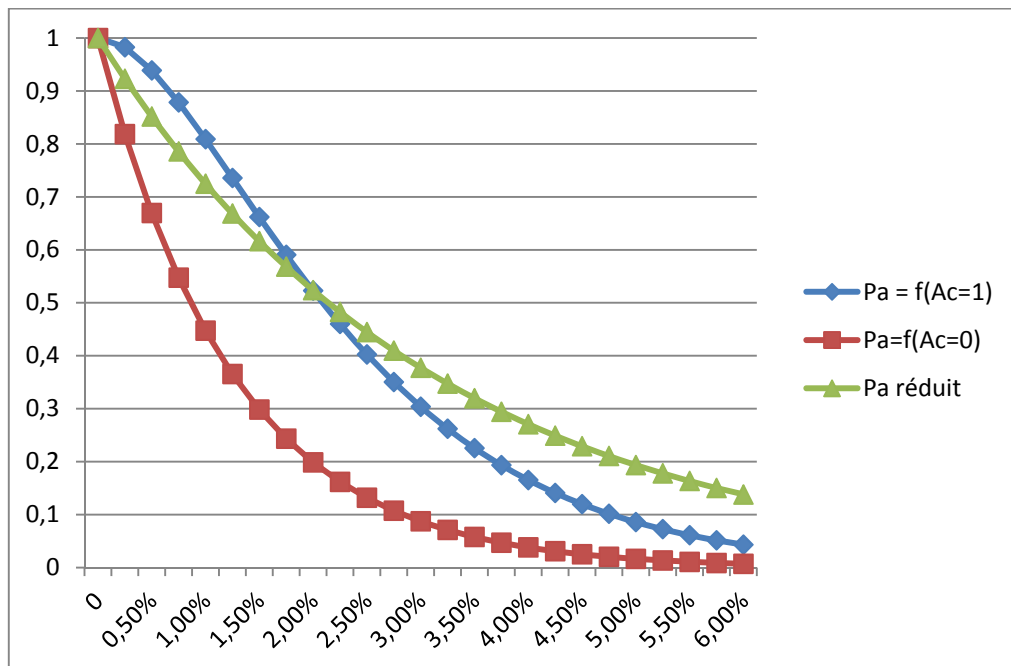
*Les plans réduits se mettent en place lorsque la production et le niveau de qualités sont très satisfaisants et stables dans le temps. A cette occasion, la norme recommande donc le passage aux plans réduits, de ce fait la taille des échantillons diminue, apportant une économie supérieure au plan double étudié.*

*Lorsque la qualité se dégrade de nouveau, généralement on repasse en contrôle normal. Les plans renforcés se mettent en place lorsque cette dégradation de la qualité persiste, elle permet de mettre en œuvre une détection renforcée dans le temps, et ce afin d'identifier rapidement cette dérive, causes, fréquence et possibilités d'y remédier.*

La question A-10 a permis de définir l'expression littérale de la courbe d'efficacité d'un plan d'échantillonnage dont le critère d'acceptation  $A_c$  est fixé à 0, soit  $P_a = (1-p)^n$

$$P_a (\text{plan réduit}) = (1-p)^{32} \quad , \quad P_A (\text{plan renforcé}) = (1-p)^{80}$$

On peut donc affirmer que l'efficacité du plan renforcé est de même nature que la comparaison effectuée lorsque le critère d'acceptation du plan simple a été ramené à  $A_c=0$ .



Ces courbes d'efficacité démontrent bien le caractère sélectif du plan réduit par rapport au plan normal simple. Pour autant, s'il discrimine mieux les lots de bonne qualité, la probabilité d'accepter des lots de mauvaise qualité est importante et ce dès 2% de pièces défectueuses. De ce fait, la démonstration est faite de n'appliquer ce type de plan que sur les productions réputés conformes, de bon ne qualité, lorsque la production est stabilisée.

#### A.4. Étude de rentabilité pour un nouvel investissement envisagé.

##### Question A-13

En fonction de l'augmentation de la cadence de production attendue, **calculer** le chiffre d'affaire attendu lié à l'investissement envisagé.

Le chiffre d'affaire va correspondre à l'augmentation de capacité de production, soit 2300 platines / heure  $0,01$  euros /platine produite  $\times$  350 jours ouvrés  $\times$  24 heures (3 équipes d'opérateurs, en fonctionnement, jours fériés inclus sur 7j / 7, cf. indications en début de sujet).

Avec cet investissement envisagé, l'augmentation du chiffre d'affaire attendu peut s'élever jusqu'à 193 750 euros / an.

##### Question A-14

**Établir** le tableau d'amortissement linéaire (cf. dotation aux amortissements) de cette nouvelle unité de production.

L'amortissement linéaire consiste à imputer tous les ans une part fixe proportionnelle au montant des investissements envisagés, soit ici 200 000 euros auquel il faut retirer la valeur résiduelle, soit sur 5 ans,  $(200\ 000 \text{ euros} - 7\ 500 \text{ euros}) / 5 \text{ ans} = 38\ 500 \text{ euros}$

### Question A-15

**Compléter** sur feuille de copie, tel que proposé ci-dessous, le tableau de calcul des Flux Nets de Trésorerie lié à ce projet

*Les étapes de calcul étant données, il sagissait de compléter le tableau proposé en suivant la démarche :*

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	
	Chiffre d'affaire attendu (1) :	193 752,00 €	193 752,00 €	193 752,00 €	193 752,00 €	193 752,00 €
-	Charges d'exploitations supplémentaires (1) :	50 000,00 €	50 000,00 €	50 000,00 €	50 000,00 €	50 000,00 €
-	Dotation aux amortissements (2)	38 500,00 €	38 500,00 €	38 500,00 €	38 500,00 €	38 500,00 €
=	<b>Résultat avant impôt</b>	105 252,00 €	105 252,00 €	105 252,00 €	105 252,00 €	105 252,00 €
-	Impôts sur les bénéfices (3)	35 080,49 €	35 080,49 €	35 080,49 €	35 080,49 €	35 080,49 €
=	<b>Résultat après impôts</b>	70 171,51 €	70 171,51 €	70 171,51 €	70 171,51 €	70 171,51 €
+	Dotation aux amortissements (2)	38 500,00 €	38 500,00 €	38 500,00 €	38 500,00 €	38 500,00 €
+	Valeur résiduelle de l'actif (4)					7 500,00 €
=	<b>Flux Nets de Trésorerie</b>	108 671,51 €	108 671,51 €	108 671,51 €	108 671,51 €	116 171,51 €

### Question A-16

**Calculer** la somme des flux nets de trésorerie

*Les flux nets de trésorerie se calculent en additionnant le résultat après impôts, en rajoutant la dotation aux amortissements et, la dernière année de vie fiscale de l'équipement, sa valeur résiduelle, considérée comme un actif. De ce fait la dernière année, le flux net de trésorerie est supérieur aux 4 années précédentes.*

### Question A-17

**Déterminer** le délai de récupération (années et mois) du capital investi

*Le délai de récupération se calcule ou se détermine graphiquement. À partir du tableau, on constate que le délai de récupération sera inférieur à 2 ans, (217 343 euros de flux nets de trésorerie en 2 ans pour 200 000 euros d'investissements initial). Le délai de récupération sera de 1 an et 10 mois (à un ou deux jours près)*

### Question A-18

**Conclure** quant à l'intérêt de cet investissement.

*Ce délai de récupération est tout à fait correct pour une entreprise. L'investissement envisagé est donc rentable, à condition que la production soit maintenue à ce niveau et que les quantités produites soient au rendez vous.*

*Si le Taux de Rendement Synthétique devait rester à son niveau, le délai de récupération augmenterait, puisque la production diminuerait de 30%. Il sera important pour l'entreprise de capitaliser sur l'expérience acquise sur la maîtrise de ses procédés lorsqu'elle passera à ce niveau de production.*

## B - QUALIFICATION DE LA PHASE DE DÉCOUPE

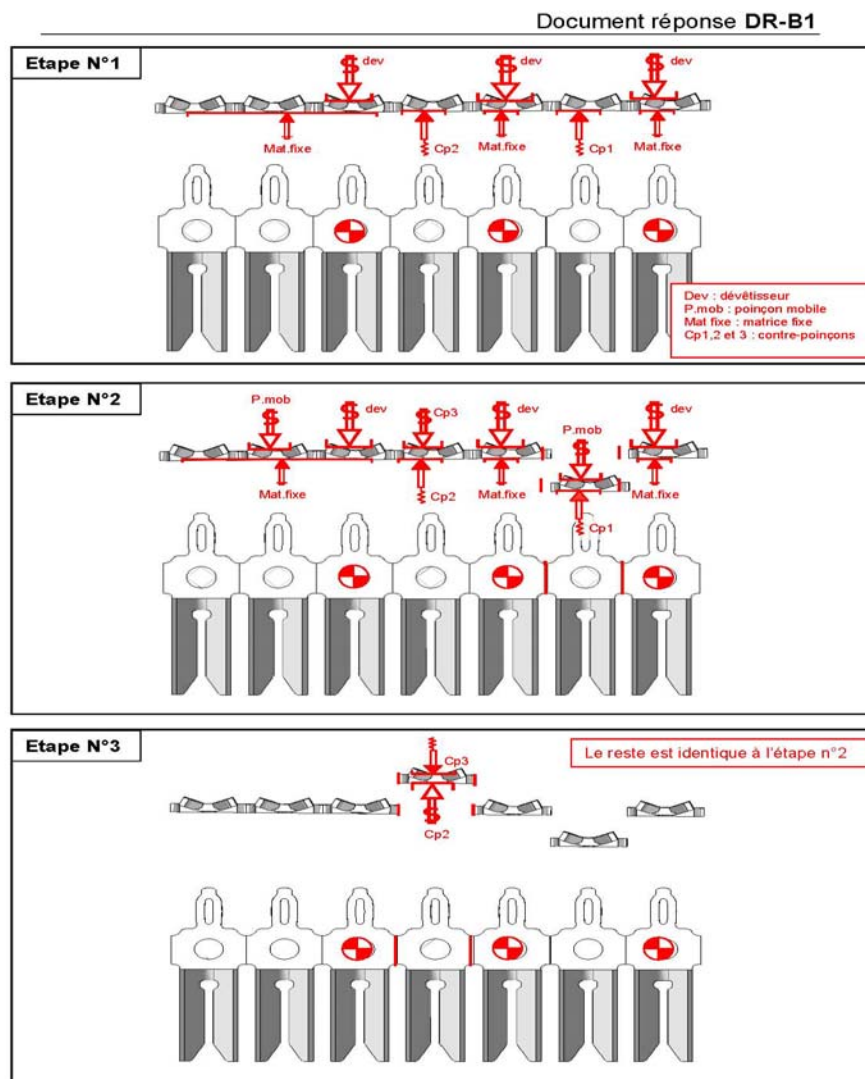
Dans le cadre de l'amélioration du taux de rendement ainsi que dans la perspective d'une montée en cadence, une AMDEC a montré la nécessité de pallier les défaillances des outils de découpe. Une recherche des causes de défaillance et des pistes d'amélioration du processus est donc mise en place.

### B1 - Étude des opérations de découpe

La définition de la pièce est définie sur le document technique DT-1. Les conclusions de l'AMDEC révèlent le niveau important de criticité des caractéristiques réalisées dans cette phase de découpe pour le bon déroulement des phases d'assemblage ultérieures. Il est ainsi nécessaire d'évaluer le niveau de qualité de réalisation de ces spécifications.

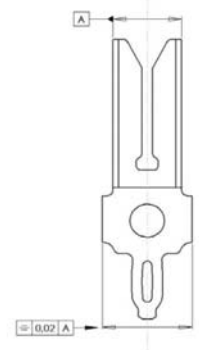
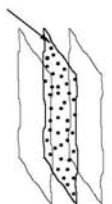
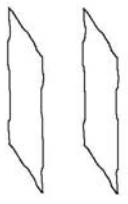
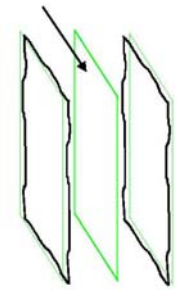
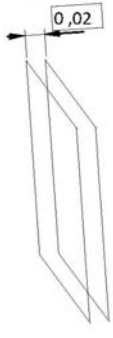
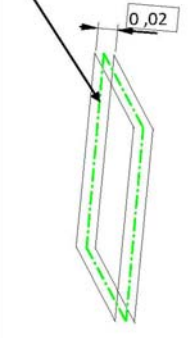
#### Question B-1 :

**Symboliser**, sur le document réponse **DR-B1**, les choix technologiques de mise et de maintien en position de chaque pièce pour les étapes de 1 à 3 (description sur DT-2). **Surligner** en rouge les surfaces découpées lors de chaque étape.



### Question B-2

Analyser, en complétant le document réponse DR-B2, la spécification géométrique réalisée.

TOLERANCEMENT NORMALISE		Analyse d'une spécification par zone de tolérance			
Symbole de la spécification	Eléments non idéaux extraits du « Skin Modèle »		Eléments idéaux		
Type de spécification	Elément(s) tolérancé(s)	Elément(s) de référence	Référence(s) spécifiée(s)	Zone de tolérance	
Forme Orientation Battement Position .....SYMETRIE.....					
<b>Condition de conformité :</b> L'élément tolérancé doit se situer tout entier dans la zone de tolérance.	unique groupe	unique multiples	simple commune système	simple composée	Contraintes orientation position par rapport à la référence spécifiée
<b>Schéma</b> extrait du dessin de définition 	Surface médiane extraite de deux surfaces surfaces nominale planes opposées. 	Deux surfaces nominale planes opposées. 	PLAN A : Plan bissecteur des 2 plans tangents « extérieur matière » aux éléments de référence. 	Volume défini par deux plans parallèles distants de 0,02mm. 	Le plan médian de la zone de tolérance est confondu avec le plan A. 

DOCUMENT  
REPOSE  
DR-B2

### Question B-3

Décrire le problème posé par la réalisation de plusieurs pièces dans la même phase de travail.

Identifier, pour chacune des pièces de 1 à 4, les causes de défauts potentiels liés à la réalisation de cette spécification.

Lors de la réalisation de plusieurs pièces dans la même phase de travail, un des principaux problèmes à gérer est la traçabilité des pièces, que ce soit en phase d'industrialisation lors de la mise au point ou en phase de production stabilisée pour le contrôle et le suivi de la série. Ici, l'identification des pièces de 1 à 4 n'est pas prévue dans le processus. L'information relative à l'association outil-pièce sera donc délicate à conserver.

Bien entendu, on peut citer également les problèmes liés à la complexité de l'outillage qui sera augmentée en fonction du nombre de pièces réalisées dans la même phase. (Conception d'une solution de récupération des 4 pièces découpées, synchronisation et séquençage des opérations...)

Pour chacune des pièces numérotées de 1 à 4, un défaut d'alignement et/ou de positionnement de la bande aura une influence directe sur la spécification de symétrie réalisée.

De la même façon et pour chacune des pièces, des efforts de serre-flancs insuffisants pourront engendrer des glissements provoquant des défauts sur les surfaces engendrées lors des opérations de découpage.

Concernant l'usure des outils et l'évolution des jeux poinçons-matrices, on peut distinguer plusieurs cas de figure :

(Prendre en compte le cas des sens de découpe opposés des arêtes)

Pièce n°1 : une seule arête, commune à la pièce n°2, est découpée dans cette phase. Le jeu entre le poinçon mobile et la matrice fixe a donc une influence directe. La seconde arête ayant été découpée dans la phase précédente, et donc commune avec la pièce n°4 du lot précédent, le jeu entre le dévêtisseur et le contre-poinçon n°1 sera donc également un élément influent.

Pièce N°2 : jeu poinçon mobile / matrice fixe

Pièce N°3 : une arête commune avec la pièce n°2 (jeu poinçon mobile / matrice fixe) et une arête commune avec la pièce n°4 (jeu dévêtisseur / Contre-poinçon n°1)

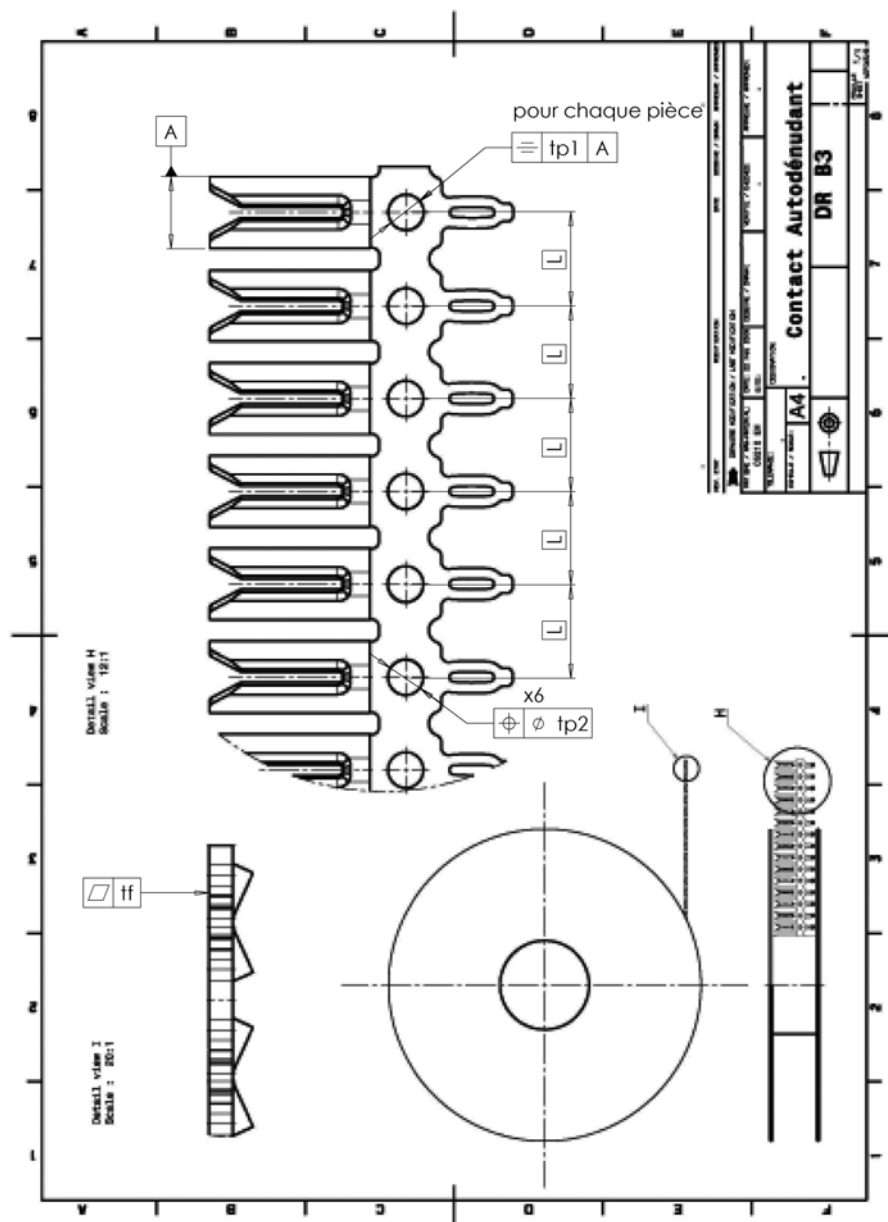
**Question B-4**

**Commenter** la mise en position du produit lors de l'étape 1 de la phase de découpe.

**Proposer** sur le document réponse **DR-B3** une solution d'écriture du tolérancement de la bande de produit brut. (Le calcul ou l'estimation des dimensions des intervalles de tolérance ne sont pas demandés, les valeurs pouvant rester sous la forme t1, t2...).

*Lors de l'étape 1 de la phase de découpe, la mise en position de la bande est effectuée par les 3 pilotes, qui jouent le rôle de centreurs, et les faces supérieures de la matrice fixe et des contre-poinçons n°1 et n°2, qui assurent un appui plan.*

*Cette mise en position, nécessitée par la séparation ultérieure des pièces, est hyperstatique. Le tolérancement de l'outillage devra donc prendre en compte cette contrainte (qualité du plan associé à 3 éléments et localisation des pilotes). Les alésages présents sur la bande brute, dans lesquels viennent se centrer les pilotes, devront donc également respecter un positionnement précis. Une proposition d'écriture de spécifications prenant en compte ces contraintes est proposée sur DR-B3.*



## B2 - Étude du procédé de découpage.

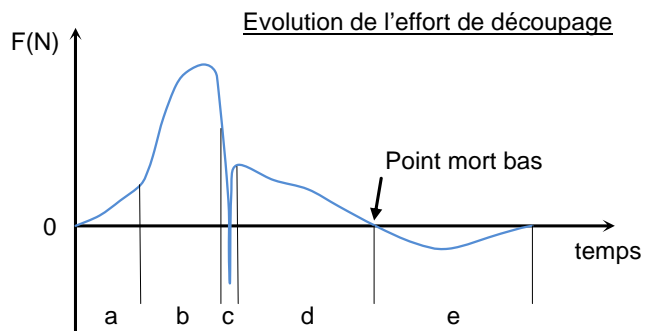
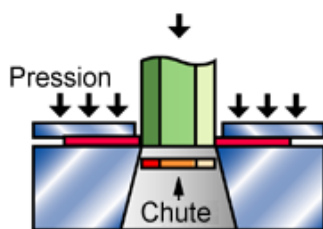
Dans le cadre de la recherche des causes de défaillance, on se propose de vérifier les limites du procédé de découpe compte tenu des paramètres choisis.

### Question B-5

**Décrire** à l'aide d'un ou plusieurs schémas une opération de découpage d'une tôle. **Tracer** l'allure générale de la courbe présentant l'évolution de l'effort en fonction du temps pour un cycle de découpage et **identifier** les différentes zones. **Préciser** quels sont les principaux paramètres à prendre en compte lors de la définition d'une opération de découpe, ainsi que leur(s) influence(s) sur les défauts générés.

*Schéma d'une opération de découpage d'une tôle faisant apparaître la pièce, le poinçon, la matrice et le serre-flan : (source CES Edupack 2011)*

#### Découpage



*Zone a : descente du poinçon et mise en contact du serre-flan (ou dévêtisseur)*

*Zone b : découpage (cisaillement de la tôle)*

*Zone c : fin de la découpe par arrachement (coup de fusil)*

*Zone d : descente du poinçon dans la matrice*

*Zone e : remontée du poinçon (effort de dévêtissage)*

*Les principaux paramètres à prendre en compte lors de la définition d'une opération de découpe sont :*

*- l'effort de découpage, fonction du périmètre découpé, de l'épaisseur du brut et de la résistance au cisaillement du matériau découpé. La qualité du cisaillement (arrachements, par exemple) est directement liée à ce paramètre.*

*- l'effort de dévêtissage, qui permet de maintenir la tôle pendant la descente et la remontée du poinçon.*

*- le jeu poinçon-matrice, qui aura une influence sur l'usure des outils, ainsi que sur la qualité de la pièce découpée (bavure).*

*- la vitesse de découpage est également un paramètre qui peut être influent.*

### Question B-6

**Justifier** la présence des centreurs de matrice en précisant leur fonction et en commentant le tolérancement de la matrice fixe (voir DT-3 et DT-4).

*Pour réaliser une opération de découpage, il est indispensable de maîtriser le jeu poinçon / matrice. Lorsque ce jeu est obtenu par assemblage d'un nombre important d'éléments, cela implique des spécifications de réalisation des pièces beaucoup plus précises. Les centreurs de matrice assurent le positionnement direct de la partie mobile de l'outillage (poinçon) par rapport à la partie fixe (matrice), et évitent ainsi un surcoût important en autorisant un jeu plus grand au niveau des colonnes de guidage, par exemple.*

*Le tolérancement de la matrice fixe laisse donc naturellement apparaître une localisation précise des alésages recevant les centreurs de matrice par rapport aux surfaces de mise en position de la matrice dans l'outillage (A, B et C).*

Le matériau retenu pour les contacts est un bronze au phosphore, dont le  $R_m$  est donné entre 685 N/mm<sup>2</sup> et 785 N/mm<sup>2</sup>. Les vérins choisis sont des vérins ADVU standards (et non S2 ou S20), de diamètre de piston 80 mm pour le vérin N°1 et 50 mm pour le vérin N°2, et dont les caractéristiques sont fournies sur le document technique DT-5.

Le calcul des efforts de découpage pourra être réalisé à l'aide d'un modèle simplifié et l'effort de dévêtissage sera estimé à 15% de l'effort de découpage.

### Question B-7

Vérifier la compatibilité des vérins retenus avec le processus mis en œuvre et **commenter** ce choix.

*Effort total :  $F_t = F_{\text{découpe}} + F_{\text{dévêtissage}} = 1,15 * F_{\text{découpe}}$*

*$F_{\text{découpe}} = P * e * R_m = 2 * (1,75 - 0,55) * 0,4 * 785 = 754 \text{ N}$*

*D'où  $F_t = 868 \text{ N}$  (capacité du vérin 1 en avance : 3016N)*

*Le vérin 2 n'a pas à fournir l'effort de dévêtissage (voir étape 4), d'où  $F_t = 754 \text{ N}$ . (Capacité du vérin 2 en avance : 1178N, capacité du vérin 1 qui doit résister à la poussée : 3016N)*

*Du point de vue des efforts, les vérins retenus sont compatibles avec le processus choisi. Le dimensionnement du vérin 1 doit également tenir compte de la masse de l'ensemble « poinçon mobile » à lever.*

### B3 - Métallurgie des poinçons et matrices.

L'usure et le bris des poinçons et matrices étant identifiés comme les causes principales de défaillance, l'analyse d'une matrice par un laboratoire de métallurgie est demandée. Les résultats de cette analyse sont fournis sur le document technique DT-6.

Le matériau est un Vanadis 23, acier rapide fritté fortement allié caractérisé par une très bonne résistance à l'usure abrasive et une résistance élevée à la compression. Les caractéristiques et préconisations d'emploi de ce matériau sont fournies sur le document ressource DRS-B1.

### Question B-8

**Commenter** la quantification des éléments d'alliage et justifier son appartenance à la famille des aciers rapides.

*Le choix d'un acier rapide pour les poinçons et matrices est justifié au regard des caractéristiques mécanique recherchées. Les outillages sont mis en œuvre à des cadences importantes et doivent donc être résistants à l'usure et à la fatigue.*

*Une dureté élevée du matériau est donc requise, ce qui explique la structure martensitique constatée, ainsi que la proportion importante d'éléments carburogènes (W, V, Mo).*

*On peut noter également que le tungstène et le vanadium permettent de conserver les caractéristiques mécaniques du matériau lors d'une élévation de la température des outils en fonctionnement.*

Sachant que la dureté requise est de 64 HRC (ou 800 HV/10),

### Question B-9

**Détailler**, en respectant les préconisations du fournisseur, le processus de traitement thermique que devra subir le matériau afin de répondre à l'exigence de dureté demandée. Relever les caractéristiques mécaniques du matériau après traitement.

*La première étape préconisée par le fournisseur est un recuit doux, à une température inférieure à la température d'austénisation. Ce recuit permet entre autre d'obtenir une dureté minimale permettant d'améliorer l'usinabilité. (Chauffe à cœur à 850-900° puis refroidissement lent (10°/h) dans le four jusqu'à 700°, puis refroidissement à l'air).*

*Après usinage, un recuit de détente permet de libérer les contraintes internes à la pièce afin de limiter les déformations qui se produiront lors de la trempe. (Maintient à la température de 600-700° pendant 2h puis refroidissement lent dans le four jusqu'à 500° puis refroidissement à l'air).*

*Une trempe à la température d'austénisation de 1140°, suivie de 3 revenus d'une heure à 560°, est requise afin d'obtenir la dureté de 64HRC demandée.*



Cette trempe sera réalisée par une préchauffe à 450°, puis un second palier sera situé à 900°. Le temps de maintien à température d'austénisation sera de 8 minutes pour une matrice de 23mm. (en bains de sels pour éviter l'oxydation).

### Question B-10

**Décrire**, de façon succincte et à l'aide de croquis, les essais permettant de mesurer la résilience, la dureté HRC et le module d'élasticité.

*Mesure du module d'élasticité :*  
(courbe source CES Edupack 2011)

Il peut être réalisé par un essai de traction, en mesurant sur une éprouvette du matériau étudié les allongements résultants de l'application d'efforts de traction.

La linéarité dans le domaine élastique de la courbe contrainte-déformation permet ainsi de déterminer la valeur du module d'élasticité  $E$ .

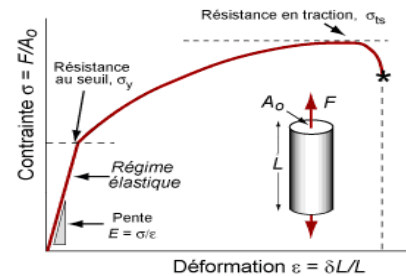
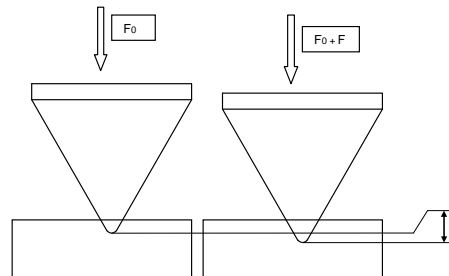


Illustration 1. une courbe contrainte-déformation en traction.

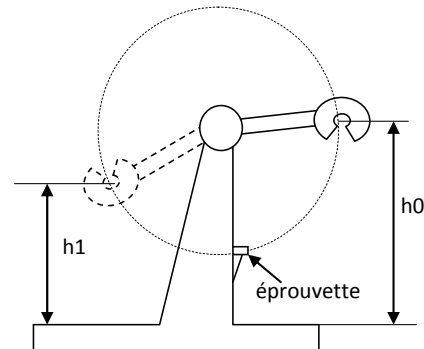
*Mesure de dureté HRC :*

La mesure de dureté Rockwell échelle C s'effectue par pénétration d'un cône diamant dans le matériau testé. Dans un premier temps, un effort  $F_0$  est appliqué et provoque une pénétration initiale du cône. L'enfoncement du pénétrateur obtenu après l'application d'un effort supplémentaire  $F$  permet de déterminer la valeur de la dureté HRC.



*Mesure de résilience*

La mesure de la résilience s'effectue à l'aide d'un mouton pendule de Charpy, en brisant une éprouvette du matériau étudié. La hauteur initiale  $h_0$  du marteau étant connue, on calcule l'énergie de rupture en mesurant la hauteur de remontée  $h_1$  du marteau après le choc.



Après vérification des paramètres de mise en œuvre du traitement thermique qui s'avèrent corrects par rapport aux préconisations, l'analyse de la pièce fournie (voir document technique DT-6) fait apparaître 2 types de surfaces :

- les surfaces rectifiées, qui présentent une dureté de 64 à 65 HRC,
- les surfaces obtenues par électroérosion qui présentent une dureté supérieure à 70 HRC.

### Question B-11

**Commenter** ces résultats d'analyse en termes de causes et d'effets sur les caractéristiques de l'outil et les conséquences sur le processus de découpe.

Les surfaces rectifiées respectent la dureté requise mais présentent des stries et fissures probablement issues de la rectification, qui est un processus d'enlèvement de matière par abrasion. Ces stries ont pour conséquence de fragiliser localement l'outillage, en provoquant des amorces de rupture pouvant générer des effondrements d'arêtes.

Dans le cas de l'électroérosion, l'enlèvement de matière est obtenu par fusion et vaporisation du métal. Le métal fondu est arraché tandis que le métal restant se solidifie en formant une couche de grande dureté

*appelée « couche blanche ». Une dureté trop élevée peut avoir pour conséquence une usure prématurée des pièces en regard (poinçon) et donc un impact sur la gestion et la maintenance des outillages. Une augmentation de la dureté aura également une influence négative sur la résilience (DRS\_B1) et la résistance à la fatigue, qui sont deux caractéristiques stratégiques dans le cas d'un processus de découpage en grande série.*

## C- OBTENTION DE LA MATRICE FIXE PAR USINAGE

### C1 - Étude du procédé d'obtention de la matrice fixe par électroérosion

#### Question C-1 :

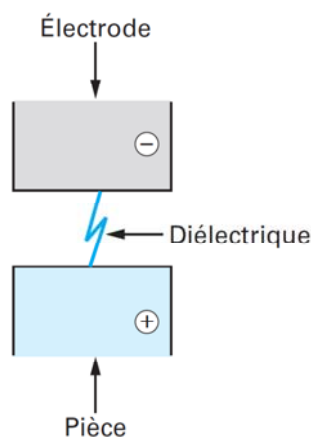
**Décrire**, en s'appuyant sur un schéma, le principe physique d'électroérosion. Dans le cadre de ce procédé, **indiquer** si tous les matériaux peuvent être usinés.

L'électro-érosion est un procédé d'usinage qui consiste à enlever de la matière dans une pièce en utilisant des décharges électriques. On parle aussi d'usinage par étincelage. Cette technique se caractérise par son aptitude à usiner tous les matériaux conducteurs de l'électricité (métaux, alliages, carbures, graphites, etc.) quelle que soit leur dureté.

Pour générer une étincelle entre les deux électrodes (une des électrodes étant la pièce à usiner), une tension supérieure à la tension de claquage du Gap (espace électrode - pièce) doit être appliquée (Figure 1).

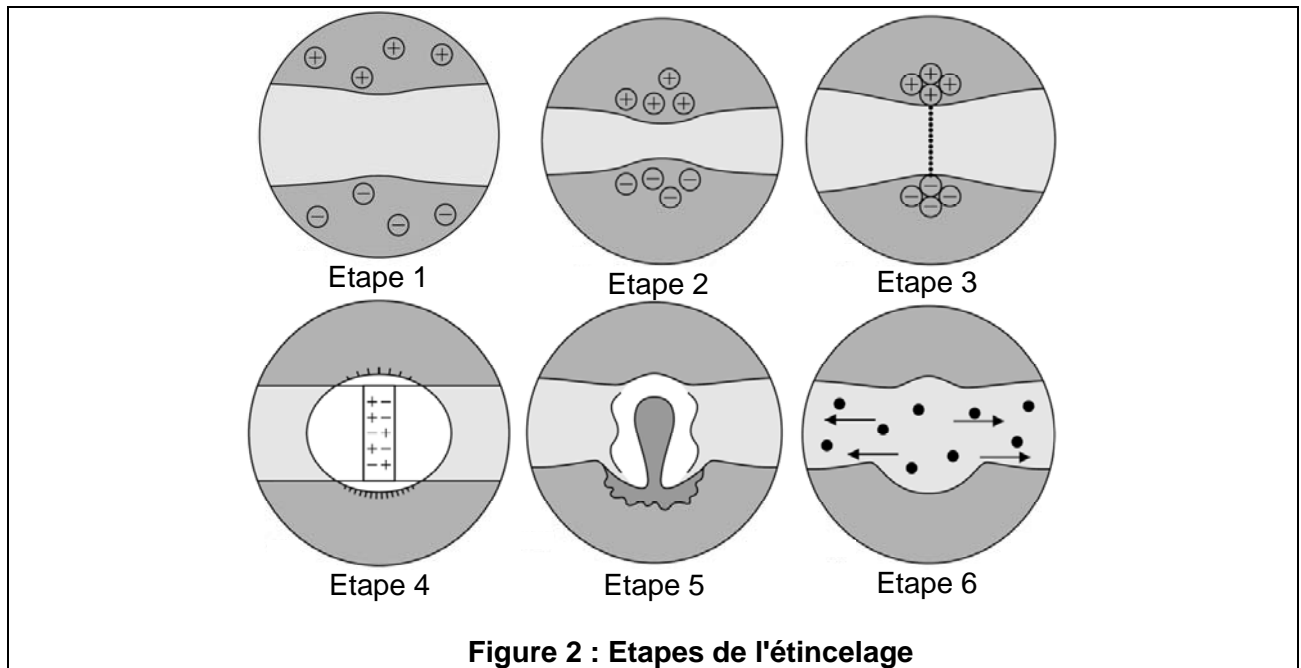
Cette tension de claquage dépend :

- de la distance entre l'électrode et la pièce,
- du pouvoir isolant du diélectrique,
- de l'état de pollution du Gap (résidus de l'érosion).



**Figure 1 : Principe de l'étincelage**

A l'endroit du plus fort champ électrique, une décharge va s'amorcer (Étapes 1 et 2 sur la Figure 2). Sous l'action de ce champ, des ions libres positifs et des électrons vont se trouver accélérés, acquérir de grandes vitesses et, très rapidement, constituer un canal ionisé, donc conducteur (Étape 3 sur la Figure 2). A ce stade, le courant peut circuler et l'étincelle s'établit entre les électrodes, provoquant une infinité de collisions entre les particules. Une zone de plasma se forme. Elle atteint rapidement de très hautes températures, de l'ordre de 8000°C à 12000°C et se développe sous l'effet de chocs toujours plus nombreux, qui entraînent la fusion locale et instantanée d'une certaine quantité de matière à la surface des deux conducteurs (Étape 4 sur la Figure 2). Dans un même temps, la bulle de gaz due à la vaporisation des électrodes et du diélectrique se développe et sa pression s'accroît régulièrement jusqu'à devenir très importante. Au moment de l'interruption du courant, le brusque abaissement de température provoque l'implosion de la bulle, engendrant des forces dynamiques qui ont pour effet de projeter la matière fondue à l'extérieur du cratère (Étape 5 sur la Figure 2). La matière érodée se solidifie alors dans le diélectrique sous la forme de petites sphères et est évacuée par ce dernier (Étape 6 sur la Figure 2). L'érosion sur l'ensemble électrode-pièce est dissymétrique et dépend notamment de la polarité, de la conductibilité thermique, de la température de fusion des matériaux, de la durée et de l'intensité des décharges. Elle est appelée usure lorsqu'elle a lieu sur l'électrode et enlèvement de matière quand elle a lieu sur la pièce.



**Question C-2 :**

Indiquer les différents paramètres à régler lors de la mise en œuvre du procédé d'électroérosion. Indiquer quels sont les différents critères technologiques influencés par ces paramètres.

Les différents paramètres à régler sont :

- L'intensité des différentes impulsions électriques,
- La durée de chaque impulsion,
- Le matériau de l'électrode outil.

Les différents critères technologiques influencés sont :

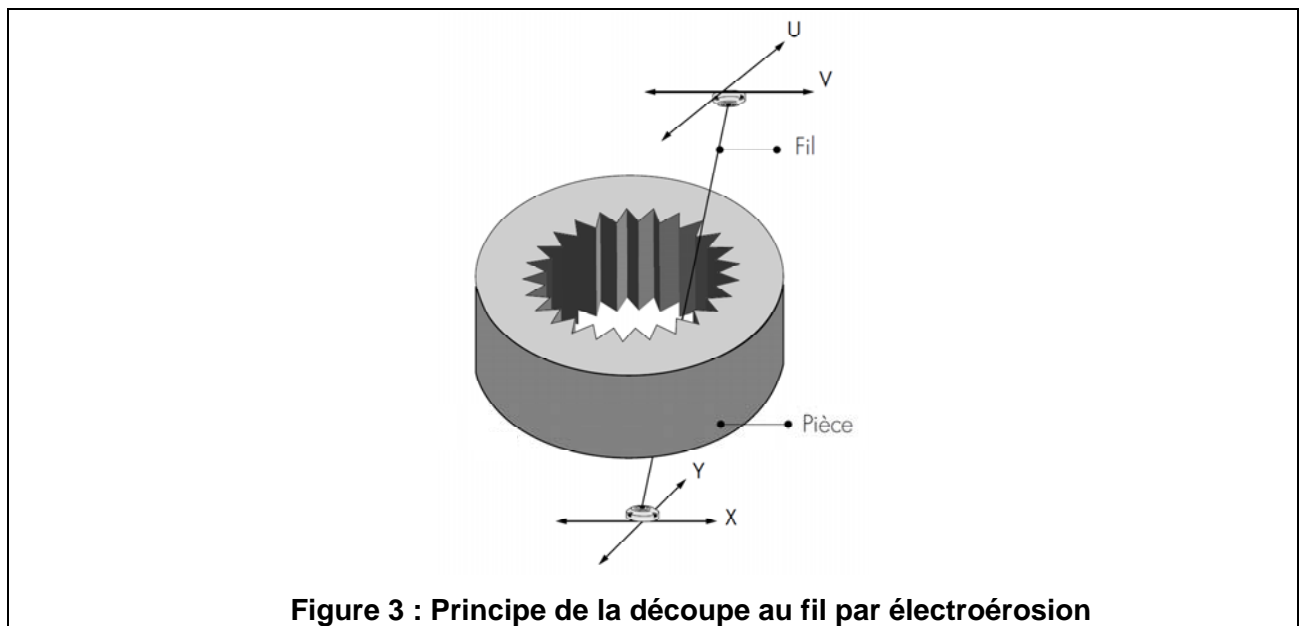
- Le débit matière (influencé par l'intensité et la durée des impulsions électriques),
- L'état de surface obtenu sur la pièce (influencé par l'énergie des impulsions électriques),
- L'usure de l'électrode (influencé principalement par le matériau de l'électrode outil).

**Question C-3 :**

**Décrire**, en s'appuyant sur un schéma, le principe de procédé de découpe au fil par électroérosion. **Citer** quelques exemples de pièces classiques obtenues avec ce procédé. **Indiquer** les limites du procédé en termes de formes réalisables.

Le procédé de découpe au fil par électroérosion est basé sur l'utilisation d'une électrode de type fil qui vient découper une pièce (Figure 3). Les profils sont réalisés à l'aide d'un fil électrode de faible diamètre pouvant se déplacer simultanément en X, Y et U, V.

Les surfaces obtenues doivent obligatoirement être réglées et débouchantes. Le procédé est fréquemment utilisé pour la fabrication de matrices et poinçons de découpage, filières d'extrusion, et tout autre profil traversant complexe.

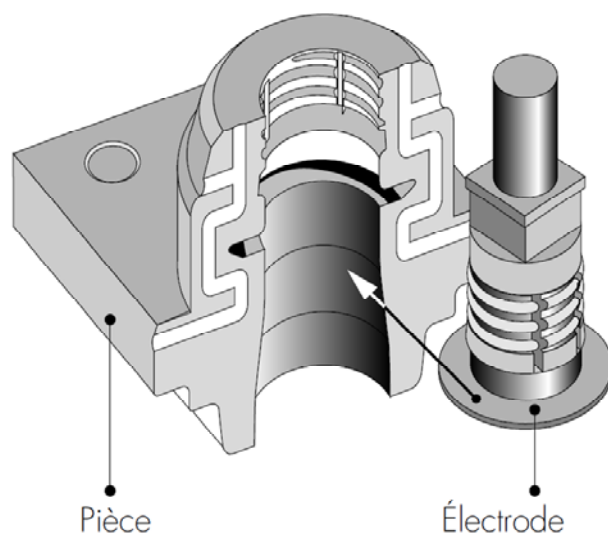


**Question C-4 :**

**Décrire**, en s'appuyant sur un schéma, le principe de d'électroérosion par enfonçage. **Indiquer** la nature des matériaux généralement utilisés pour réaliser les électrodes. **Classer** les différents matériaux proposés en termes de durée de vie et coût de réalisation d'une électrode. **Citer** quelques exemples de pièces classiques obtenues avec ce procédé. **Indiquer** les limites du procédé en termes de formes réalisables.

Le procédé d'électroérosion par enfonçage est basé sur l'utilisation d'une électrode ayant la forme inverse à la pièce désirée qui vient usiner la pièce en se déplaçant dans une direction d'enfonçage (Figure 4Figure 3). Cette technique nécessite la fabrication préalable d'une ou de plusieurs électrodes. Son intérêt principal est de reporter la difficulté d'usinage direct de la pièce, liée au matériau ou à la forme à produire, sur l'usinage de l'électrode, qui est plus généralement plus aisé. Elle permet aussi l'obtention de formes non réalisable en usinage par outil coupant (trou de forme rectangulaire par exemple).

Le procédé est utilisé pour la fabrication de moules d'injection, moules de formes et toutes cavités ou volumes à formes complexes. Les limites de formes sont imposées par la nécessité de retirer l'électrode de la pièce usinée et impose donc des formes « démoulables ».



Le matériau constituant l'électrode doit avoir une haute conductivité thermique. Les trois familles de matériaux utilisés pour réaliser les électrodes sont :

- Le cuivre et ses alliages,
- Le tungstène et ses alliages,
- Les graphites (nuancés par la taille des grains utilisés).

Matériau de l'électrode	Cout	Usinabilité	Résistance à la température	Usure	Etat de surface de la pièce
Cuivre	Faible	Facile	Faible	Assez rapide	Assez bon
Tungstène	Elevé	Difficile	Très bonne	Faible	Bon
Graphite	Moyen	Facile	Bonne	Moyenne	Moyen

## **C2 - La découpe au fil par électroérosion : détermination du coût de production, application à la matrice fixe.**

*La découpe au fil par électroérosion ne nécessite pas la réalisation d'électrodes spécifiques. Ce procédé a été choisi initialement pour réaliser un maximum de formes sur la matrice fixe.*

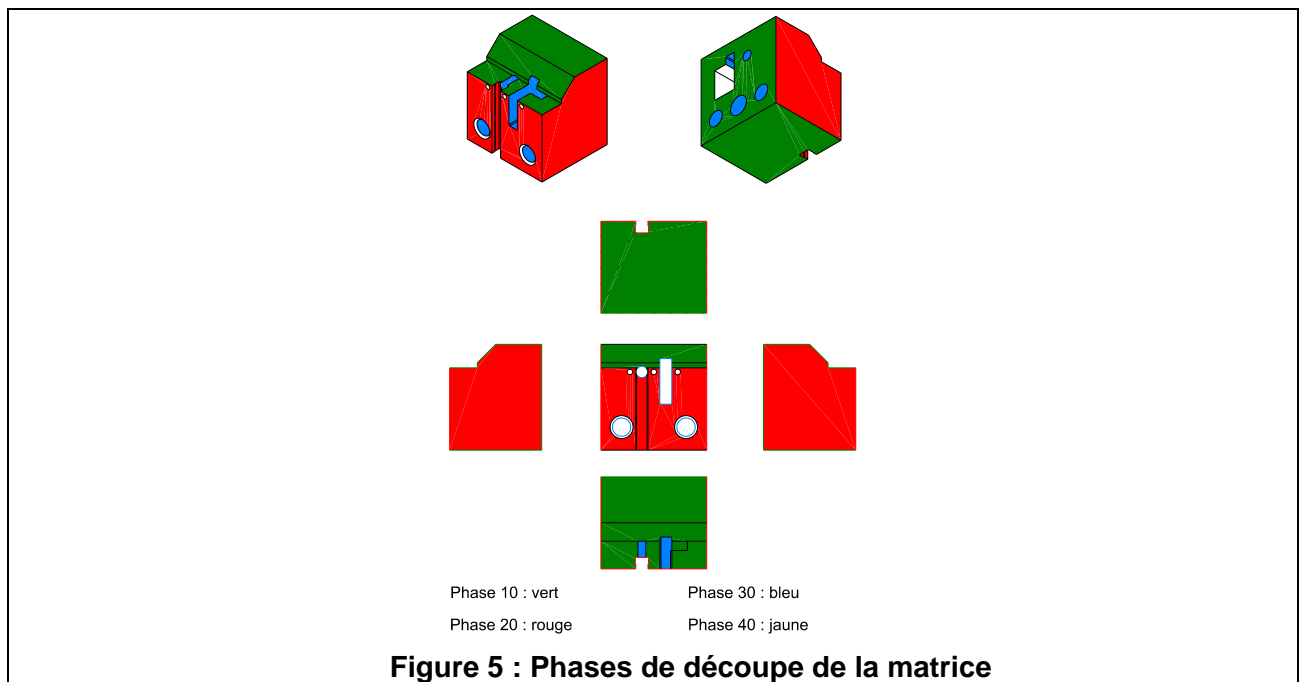
*Le bureau d'industrialisation souhaite déterminer le coût de production associé à ce procédé, et souhaite formaliser la gamme de fabrication de découpe au fil par électroérosion de la matrice fixe.*

*La matrice fixe, dans son état initial, est une pièce brute, cubique, englobant avec les surépaisseurs de matières nécessaires à l'obtention des formes et aux différentes prises de pièces. Quatre phases différentes sont proposées sur le document réponse DRC1. Ce nombre est le nombre maximal de posages. Il ne doit pas être dépassé.*

### **Question C-5 :**

**Indiquer**, sur le Document-Réponse DR-C1 et en respectant le code couleur proposé, l'ensemble des formes obtenues par découpe au fil par électroérosion, en les groupant par phase de découpe (Chaque phase correspond à un posage de la pièce).

3 phases sont nécessaires à l'obtention des toutes les formes réalisables par découpe au fil par électroérosion. Les surfaces cylindriques coloriées sur le document réponses correspondent à l'ébauche des différents trous. Le perçage du trou initial nécessaire au passage du fil n'est pas pris en compte.



**Question C-6 :**

**Préciser**, en utilisant le Document-Ressource DRS-C1-1, le nombre de passe (ébauche, demi-finition et finition) pour chacune des faces en fonction des caractéristiques géométriques et d'état de surface spécifiées sur la pièce.

Il faut utiliser le premier tableau du document ressource car l'épaisseur de la pièce est proche de 20 mm (pièce finie de 23 x 23 x 20 mm). De plus, il est spécifié sur le plan de définition de la matrice qu'un  $R_a = 0.8\mu m$  est attendu sur l'ensemble des surfaces fonctionnelles de la pièce (quasiment toutes les surfaces obtenues par découpe au fil par électroérosion, sauf celles de la phase 30) et un  $R_a = 3.2\mu m$  est attendu pour les autres surfaces (celle de la phase 30). Il est donc nécessaire de réaliser la découpe en 3 passes pour les phases 10 et 20 et en une passe pour la phase 30.

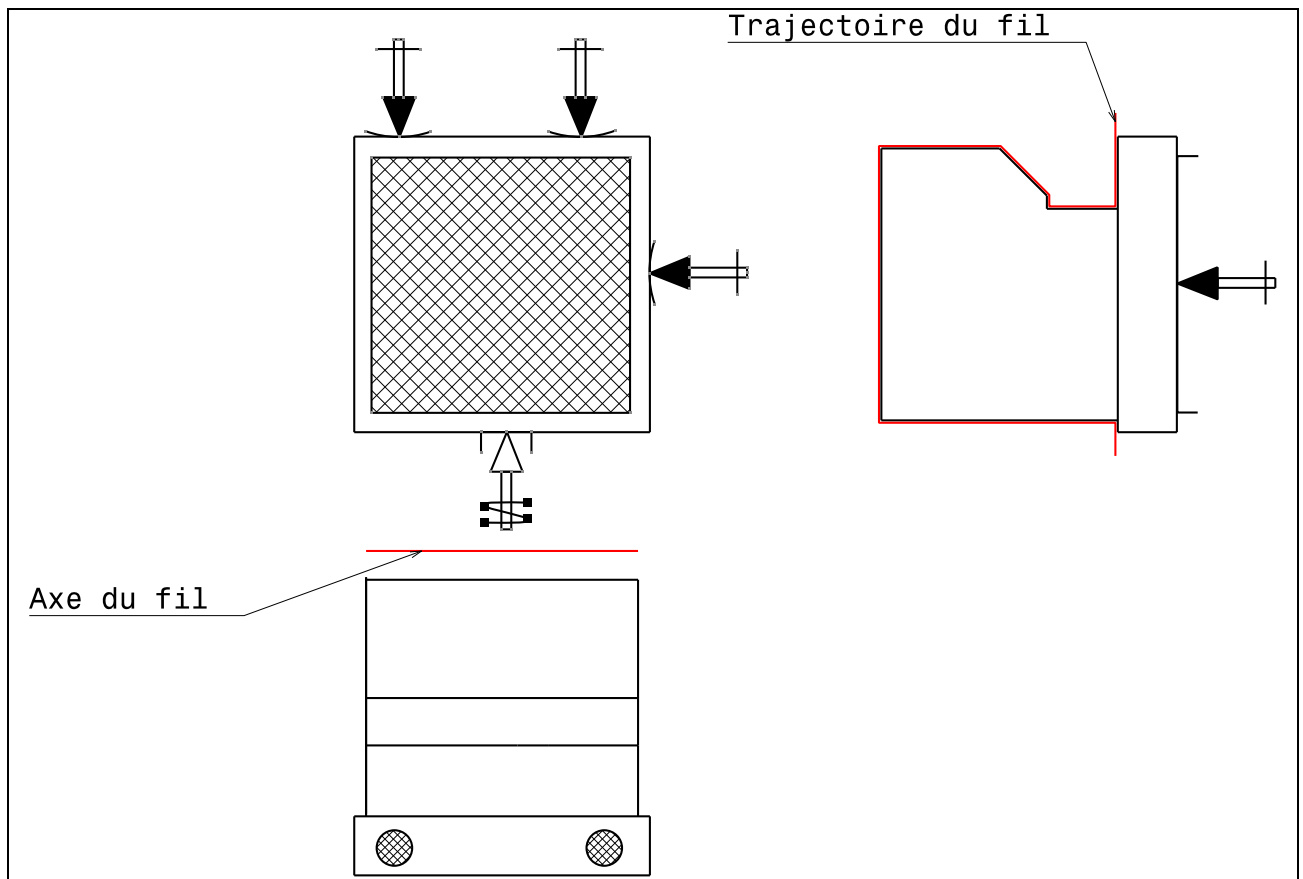
Pour les phases 10 et 20, le décalage du fil pour chacune des passes sera de 0,213 mm ; 0,148 mm et 0,133 mm. Les vitesses d'avances seront respectivement de 7,15 mm/min ; 9,05 mm/min et 6,90 mm/min.

Pour la phase 30, le décalage du fil sera de 0,159 mm. La vitesse d'avance sera de 7,15 mm/min.

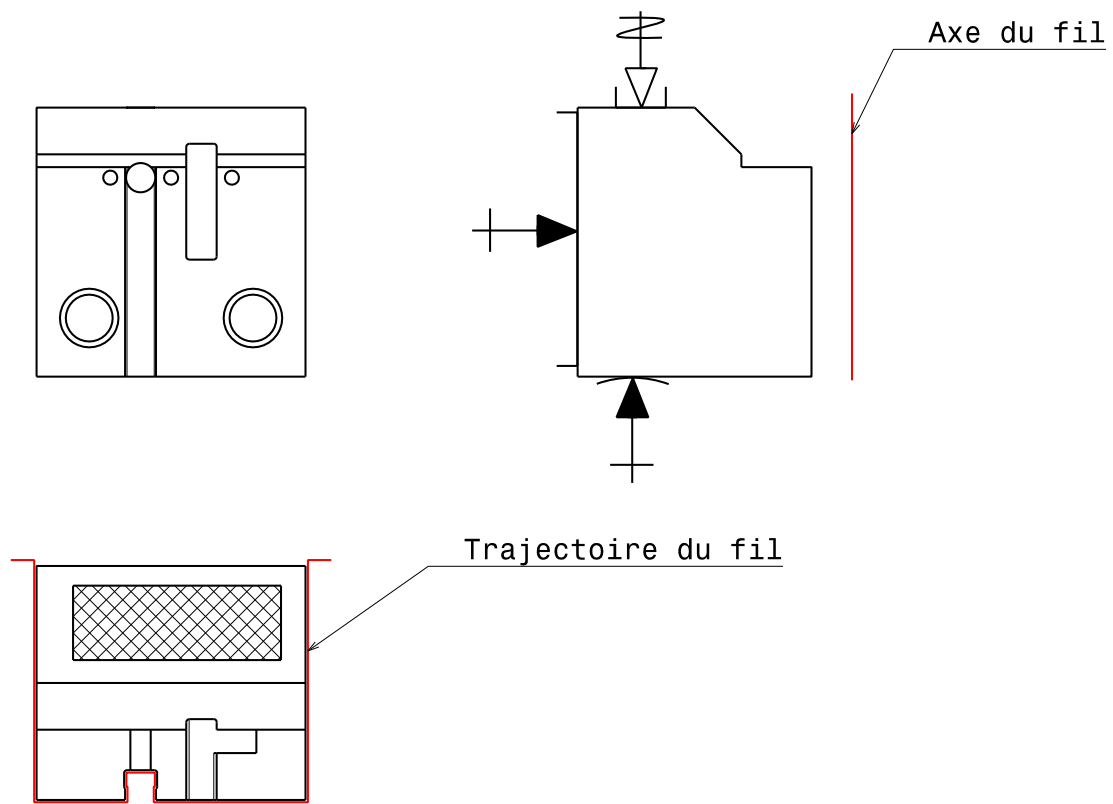
**Question C-7 :**

**Réaliser** la gamme de fabrication : **compléter** les Documents-Réponses DR-C2 et DR-C3 en indiquant pour chaque phase :

- l'enchaînement des opérations de découpe (ne pas omettre de préciser l'axe du fil) ;
- les trajectoires du fil lors des différentes découpes ;
- la mise en position et le maintien en position de la pièce.

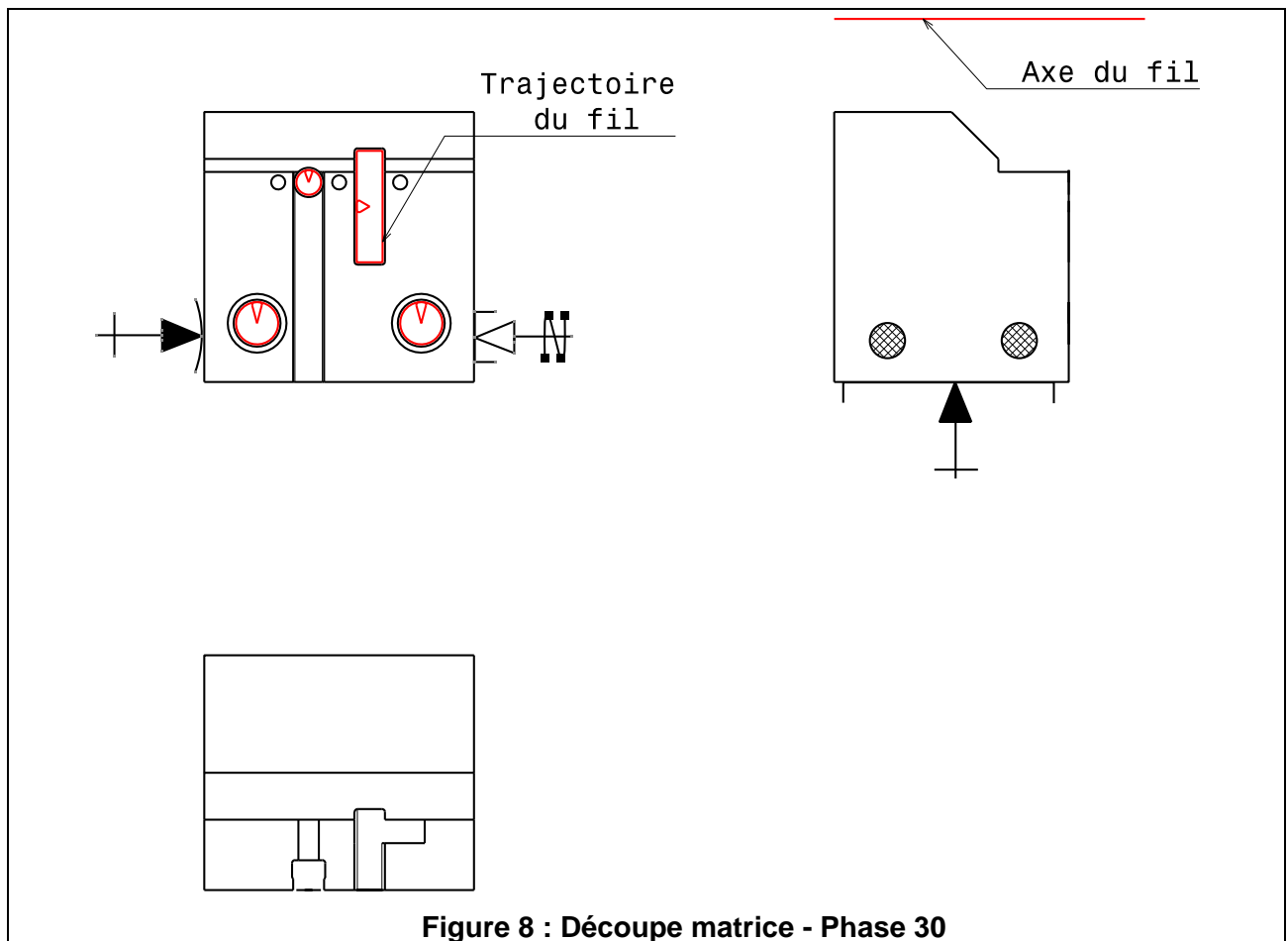


**Figure 6 : Découpe matrice - Phase 10**



**Figure 7 : Découpe matrice - Phase 20**





**Question C-8 :**

**Estimer** le temps de découpe de la pièce. Pour cela, **mesurer** la longueur de découpe et **considérer** que la vitesse d'avance programmée est en permanence respectée, Sachant le coût horaire d'un machine de découpe au fil est estimé à 50 € par l'entreprise, **déterminer** le coût de revient de la découpe fil.

La mesure des différentes trajectoires proposées à la question précédentes donnent :

	Phase 10	Phase 20	Phase 30
Longueur de découpe	75.8 mm	74.3 mm	60.1 mm
Temps passe 1	10.6 min	10.4 min	8.4 min
Temps passe 2	8.4 min	8.2 min	/
Temps passe 3	11 min	10.8 min	/
Temps total	30 min	29.4 min	8.4 min
Coût	25 €	24.5 €	7 €

Le coût total de la découpe est estimé à 56,50 €, en négligeant les temps d'immobilisation machine est le coût horaire de l'opérateur.

### C3 - L'électroérosion par enfonçage : détermination du coût de production, application à la forme « guide-contre poinçon » de la matrice fixe.

Sur le plan de définition de la matrice fixe présenté sur le Document Technique DT-2 une forme nommée « guide contre-poinçon » est obtenue par électroérosion par enfonçage. La pièce à réaliser étant unitaire, le matériau choisi pour réaliser l'électrode est le cuivre.

#### Question C-9 :

**Indiquer** pourquoi cette forme est obtenue par électroérosion par enfonçage.

Le forme est une forme creuse non cylindrique et possédant des angles vifs (« trou rectangulaire»). Il en peut donc être obtenu par découpe au fil par électroérosion (non débouchant) et par usinage (angles vifs). Pour un matériau aussi dur (64 HRC), il ne reste que le procédé d'électroérosion par enfonçage.

La gamme d'électroérosion initiale est précisée sur le Document-Ressource DRS-C2-1. Les différents choix de programmation sont présentés ci-après.

La surface frontale de l'électrode en cuivre étant de 23,5 mm<sup>2</sup>, la puissance de départ choisie pour ébaucher la forme est la puissance P6. Le jeu de paramètres choisi est le jeu 282 qui maximise l'enlèvement de matière avec la puissance P6 (voir courbes de technologies). Comme il faut obtenir un Ra de 0,8 microns sur la forme finale, la puissance finale choisie pour finir la forme est la puissance P2. Le jeu de paramètres choisi est le jeu 181 qui permet l'obtention du Ra avec la puissance P2 (voir « courbes de technologies »).

En parallèle, le document « Choix des sous dimensions » DRS-C2-2 permet de voir que l'électrode d'ébauche doit avoir des dimensions radiales en retrait de 150 microns par rapport à la forme finale alors que le retrait ne doit être que de 8 microns pour la finition.

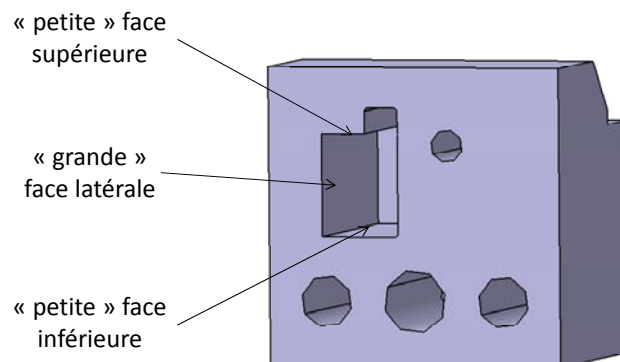
Comme seule, la surface frontale de l'électrode, s'use au cours de l'opération d'électroérosion, il est choisi de réaliser toutes les opérations avec la même électrode. La programmation la plus simple consiste alors à réaliser le programme d'ébauche avec le jeu de paramètre 282 puis directement les quatre programmes de finition (un programme par face) avec le jeu de paramètre 181.

Le temps d'usinage de l'électrode est estimé à 40 minutes. L'électrode est réalisée sur un centre d'usinage grande vitesse à 3 axes dont le coût horaire est de 110 €/h.

#### Question C-10 :

**Calculer** la durée de l'opération d'ébauche et des 4 opérations de finition (une opération de finition par face), en fonction des débits d'enlèvement de matière proposés sur le Document-Ressource DRS-C2-1.

Il n'y a en fait que 3 faces à usiner par électroérosion par enfonçage (2 « petites » faces supérieure et inférieure et 1 « grande » face latérale) (Figure 9).



**Figure 9 : Faces à obtenir par électroérosion par enfonçage**

La forme débouchante et adjacente est obtenue précédemment par découpe au fil par électroérosion. Les deux faces supérieures et inférieures sont donc identiques en surface.

	« grande » face latérale	« petite face » supérieure ou inférieure
Dimensions	$7.9 \times 16 \text{ mm}^2$	$3.4 \times 16 \text{ mm}^2$
Surépaisseur en ébauche	0.150 mm	
Volume à usiner par électroérosion en ébauche	$(7.9 - 2 \times 0.15) \times (3.4 - 0.15) \times (16 - 0.15) = 392 \text{ mm}^3$	
Débit ébauche	$14 \text{ mm}^3 / \text{min}$	
Durée ébauche	28 min	
Surépaisseur en finition	0.008 mm	
Volume à usiner par électroérosion en finition	$7.9 \times 16 \times (0.15 - 0.008) = 17.95 \text{ mm}^3$	$3.4 \times 16 \times (0.15 - 0.008) = 7.72 \text{ mm}^3$
Débit finition	$0.28 \text{ mm}^3 / \text{min}$	
Durée finition	64 min	27.5 min
Durée totale	$(28 + 64 + 2 \times 27.5) = 147 \text{ min}$	

**Question C-11 :**

En utilisant le temps d'usinage par électroérosion estimé à la question C-10, **calculer** le coût de revient de l'obtention de la forme « guide contre-poinçon » sachant que le coût horaire de la machine d'électroérosion par enfonçage est de 80 euros.

	Electroérosion	Usinage électrode
Durée de l'opération	147 min	40 min
Coût horaire	80 €/ heure	110 €/ heure
Coût	196 €	73.3 €

Le coût total d'obtention de la forme est estimé à 269.3 €

**Question C-12 :**

**Préciser** l'intérêt d'insérer un programme intermédiaire de « demi-finition » pour la gamme d'électroérosion de la forme étudiée. Sans développer l'ensemble des calculs, **indiquer** votre raisonnement.

Le coût de l'opération d'électroérosion par enfonçage est très supérieur à celui de la découpe au fil par électroérosion. L'opération d'enfonçage est donc celle à améliorer en priorité. Dans cette opération, c'est la finition qui dure le plus longtemps (80% du temps) car il y a beaucoup de matière à enlever et le débit d'enlèvement de matière est limité par l'obtention d'un  $R_a = 0.8 \mu\text{m}$ . Il faut donc mettre en place une

ou plusieurs opérations intermédiaires de demi finition afin de se rapprocher de la forme finale en ayant des débit d'enlèvement de matière supérieurs.

Par exemple, on peut envisager un programme intermédiaire avec un jeu de paramètre 232 générant un  $R_a = 1.5\mu\text{m}$  et laissant une surépaisseur de  $20\mu\text{m}$ . L'opération de demi finition ne dure que 10 min (débit d'enlèvement de matière de  $3.2\text{mm}^3 / \text{min}$ ) et l'opération de finition dure alors aussi 10 min. Nous obtenons ainsi une durée totale de l'opération d'électroérosion par enfonçage de 48 min (gain de temps de 67%).

#### **C4 - Usinage UGV : détermination du coût de production, application à la matrice fixe, obtenue initialement par un découpage au fil par électroérosion**

*Le bureau d'industrialisation souhaite remplacer l'ensemble des opérations de découpe au fil par électroérosion par des opérations d'usinage à l'outil coupant et envisage de réaliser la matrice fixe par un procédé d'usinage à grande vitesse (UGV).*

*Le bureau d'industrialisation souhaite déterminer le coût de production associé à ce procédé, aussi est-il nécessaire de formaliser la gamme de fabrication par usinage de la matrice fixe.*

*Une gamme d'outils et de conditions de coupe est fournie sur le Document-Ressources DRS-3. Le coefficient spécifique de coupe pour le matériau constitutif de la matrice est considéré proche des  $4000\text{ N/mm}^2$ .*

*Nous nous intéressons dans un premier temps à la l'obtention de la forme « dégagement découpe poinçon » qui a la particularité d'imposer un diamètre de fraise très faible pour une forme usinée assez profonde.*

#### **Question C-13 :**

**Indiquer** s'il est envisageable d'obtenir cette forme par usinage. **Justifier et argumenter** votre réponse, en admettant que le coefficient spécifique de coupe du matériau de la matrice fixe possède une valeur proche de  $4000\text{ N/mm}^2$ .

Il existe deux possibilités pour obtenir une forme comme celle-ci par usinage :

- Usinage de forme avec une fraise à la forme de la rainure (Figure 10). Cette possibilité implique un outil spécifique « sur commande » et impose un usinage pleine matière de l'outil dans un matériau de dureté 64 HRC. Cela n'est donc pas envisageable.
- Usinage d'enveloppe avec une fraise deux tailles. Le diamètre de la fraise est imposé par le rayon de coin de la forme qui vaut  $0,25\text{ mm}$ . Il faudra donc une fraise de diamètre  $0,5\text{ mm}$  et de longueur coupante de  $18\text{ mm}$ . Il n'existe pas de fraise avec cette géométrie dans les documents fournis. De plus, en considérant la fraise comme une poutre cylindrique de diamètre  $0,5\text{ mm}$  et de longueur  $18\text{ mm}$  encadrée à une extrémité et sollicitée par les efforts de fraisage à l'autre, on se rend compte que l'outil fléchit beaucoup trop lors de chaque passe. En effet les calculs de contrainte maximale ci-dessous montrent qu'avec des conditions de coupe moyenne, l'outil casse (contrainte maximale trop élevée) et qu'avec des conditions de coupe minimales l'outil est en permanence sollicité à la limite de la rupture (contrainte maximale proche de la limite élastique).

$$\text{Effort de coupe} = F_c = K_c \times a_p \times f_z$$

(on borne la valeur du copeau moyen par celle de l'avance à la dent)

$$F_c = 4000 \times 0.014 \times 0.016 = 0.9 N$$

(on prend les valeurs moyennes de conditions de coupe de l'outil)

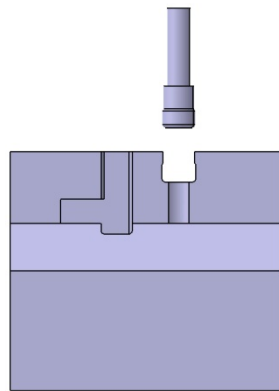
$$\sigma_{\max} = \frac{Mfz_{\max}}{I(G, \vec{z})} \frac{D}{2} = \frac{32Mfz_{\max}}{\pi D^3}$$

(contrainte normale maximale en flexion plane simple)

$$\sigma_{\max} = \frac{32F_c L_{\text{outil}}}{\pi D^3} = \frac{32 \times 0.9 \times 0.018}{\pi \times 0.0005^3} \approx 1300 MPa$$

$$\sigma_{\max} = \frac{32 \times (4000 \times 0.009 \times 0.011) \times 0.018}{\pi \times 0.0005^3} \approx 580 MPa$$

(en appliquant les conditions de coupe mini)



**Figure 10 : Fraisage de forme pour obtention de la rainure**

Il n'est donc pas possible de réaliser la forme par usinage. Elle sera donc obtenue par découpe au fil par électroérosion.

***Pour la suite nous considérons que cette forme continuera à être réalisée par découpe au fil par électroérosion.***

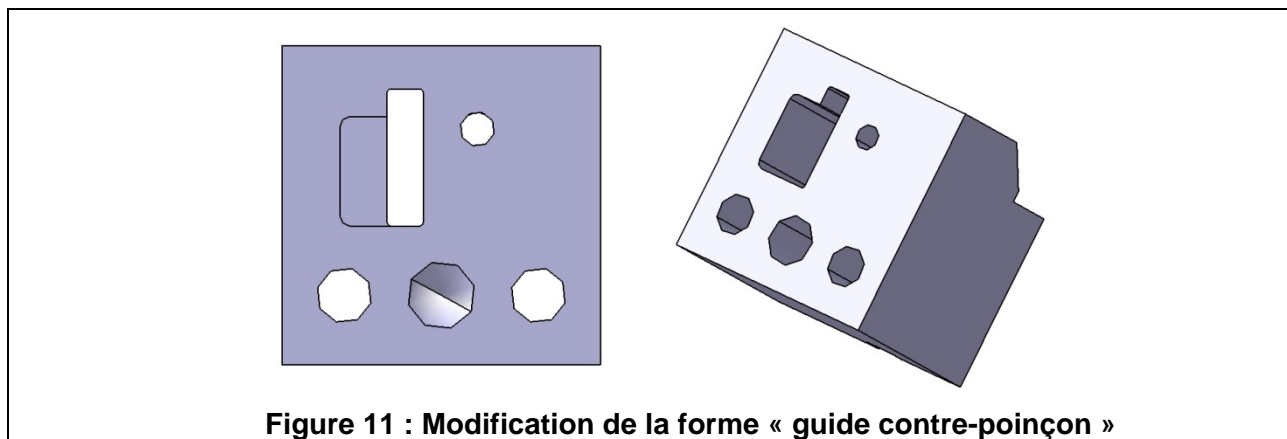
**C5 - Usinage UGV : détermination du coût de production, application à la forme « guide contre poinçon », obtenue initialement par électroérosion par enfonçage**

*On souhaite remplacer l'opération d'électroérosion par enfonçage de la forme « guide contre poinçon » par une opération d'usinage.*

**Question C-14 :**

**Proposer**, sur le Document-Réponse DR-C6, une modification de la forme « guide contre-poinçon » qui permettrait de réaliser cette forme par un usinage par enlèvement de matière

Pour usiner la forme « guide contre-poinçon », il est nécessaire d'utiliser un outil dont la longueur utile d'usinage est au moins égale à 16 mm. En analysant le document DRS-C3\_3, il apparaît qu'il est nécessaire de choisir un outil dont le diamètre est au moins égal à 1 mm. Il faut donc « rayonner » les coins de la cavité avec des congés de rayon 0.5 mm. Afin de ne pas générer des trajets à angle vifs dans les angles, il est décidé de mettre en place des congés de rayon 0.7 mm (Figure 11).



**Figure 11 : Modification de la forme « guide contre-poinçon »**

**Question C-15 :**

**Réaliser** la gamme de fabrication par usinage de la forme proposée à la **Question C-14**.

**Compléter** le Document-Réponse DR-C6 en indiquant :

- l'enchaînement des opérations de d'usinage (ne pas omettre de préciser l'axe outil),
- les trajectoires outils lors des différentes opérations,
- la mise en position et le maintien en position de la pièce.

Pour compléter l'avant-projet de fabrication, veuillez compléter pour chaque phase d'usinage

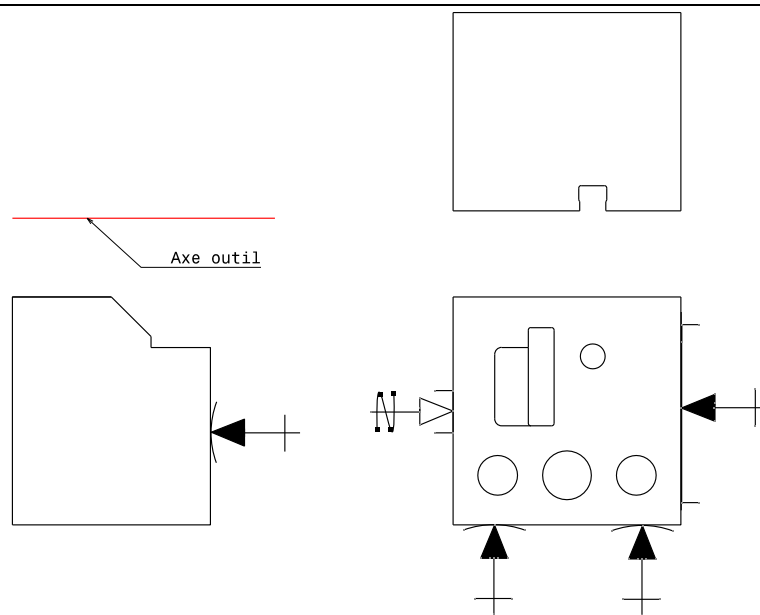
- le choix de la géométrie et des nuances des outils de coupe,
- les conditions de coupe, en remplissant sur votre copie un tableau comme présenté ci-dessous :

Outil	Vc	N	fz	Vf	Remarques

L'outil nécessaire à l'opération de finition est choisi à la question précédente et il s'agit d'une fraise 2 tailles de diamètre 1 mm référencée EPDS-2010-16. Il n'est pas opportun de réaliser la totalité de l'enlèvement de matière avec cet outil car le temps d'usinage serait trop important. Nous cherchons donc l'outil le plus grand possible capable de réaliser l'ébauche de l'évidement. Pour des raisons d'accessibilité par la forme découpée au fil adjacente (forme de 2.6 mm de largeur) et afin de ne pas laisser trop de matière dans les coins pour l'outil de finition, il est chois une fraise 2 tailles de diamètre 3 mm référencée EPP-4030-TH. Les conditions de coupe des deux outils sont données dans le tableau ci-dessous. De plus les approches et retraits d'usinage se faisant dans la partie découpée, l'usinage pleine matière des outils n'existe pas.

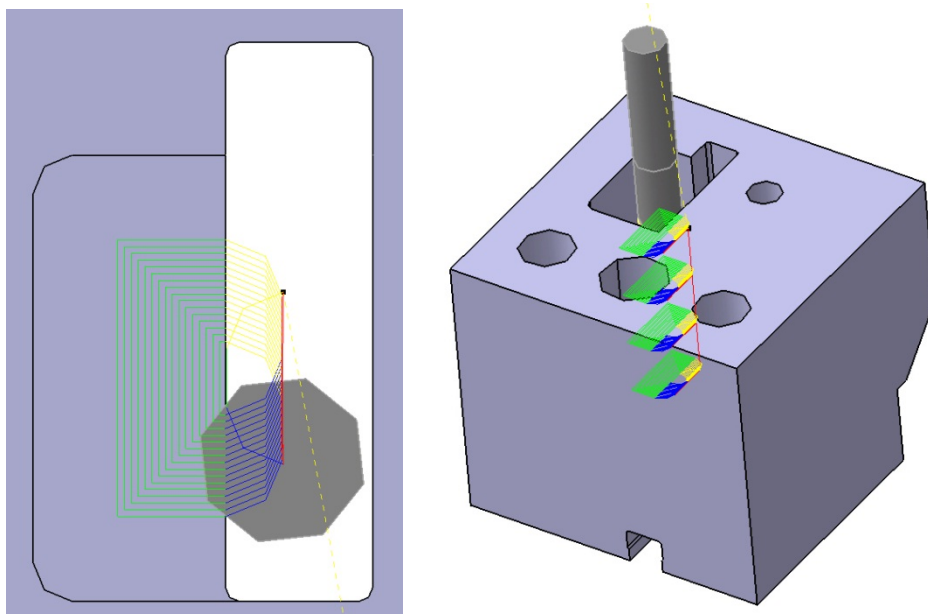
Outil	Vc	N	fz	Vf	Remarques
Fraise 2T diamètre 3 mm : EPP-4030-TH	20 m/min	2100 tr/min	0.009 mm	80 mm/min	Ap = 4.5mm Ae = 0.12 mm
Fraise 2T diamètre 1 mm : EPDS-2010-16	62 m/min	19600 tr/min	0.016 mm	635 mm/min	Ap = 0.011 mm

La mise et le maintien en position de la pièce sont présentés Figure 12.



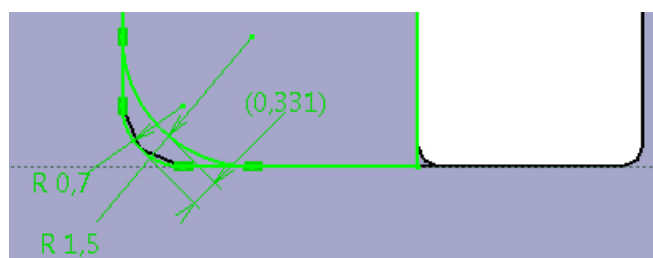
**Figure 12 : Mise et maintien en position de la matrice pour l'usinage du « guide contre-poinçon »**

Il faut deux passes d'usinage avec la fraise d'ébauche pour réaliser l'usinage en respectant les conditions de coupe. Les trajets d'usinage d'ébauche sont présentés sur la Figure 13.



**Figure 13 : Trajets d'ébauche de la forme « guide contre-poinçon »**

Pour trouver le nombre de passes de finition, il faut estimer l'épaisseur de matière restante dans le coin de la forme et s'assurer qu'elle est inférieure au diamètre outil. Pour cela, nous réaliser le schéma présenté sur la Figure 14 qui montre qu'il reste au maximum 0.33 mm de matière. Un passe par niveau suffit donc pour finir la pièce.



**Figure 14 : Matière restante après ébauche du « guide contre-poinçon »**

Les trajets d'usinage de finition sont présentés sur la Figure 15.

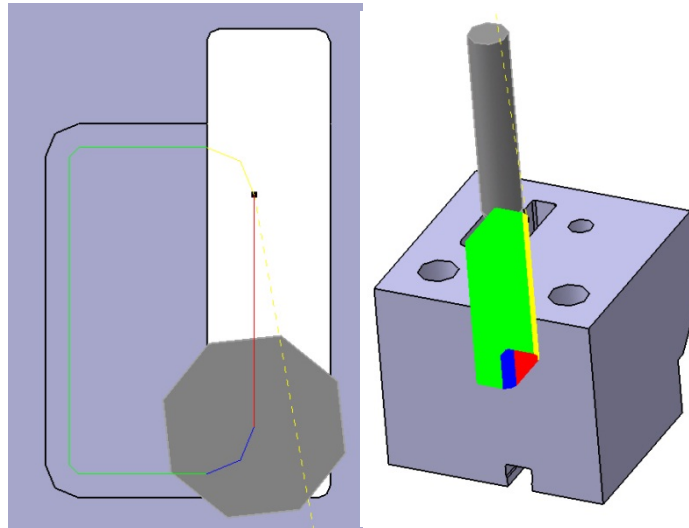


Figure 15 : Trajets de finition de la forme « guide contre-poinçon »

**Question C-16 :**

**Estimer** la longueur des différents trajets. En considérant que la vitesse d'avance programmée est en permanence respectée. **Estimer** le temps d'usinage de la pièce. Sachant le coût horaire d'un centre d'usinage grande vitesse à 3 axes est estimé à 110 euros par l'entreprise. **Déterminer** le coût de revient de ces usinages.

	Ebauche	Finition
Longueur une passe (Z fixé)	95.2 mm	14.1 mm
Nombre de passes	4	1455
Longueur totale	381 mm	20515 mm
Temps d'usinage	4,8 min	32 min
Coût	9 €	59 €

Le cout total de l'opération est donc de 68 €.

**C6 - Synthèse : comparaison des différents procédés et choix de la gamme de réalisation finale, application à la matrice fixe**

*Cette partie à traiter sous forme d'une argumentation s'appuyant sur les résultats précédents, sans mener une étude complète.*

**Question C-17 :**

En utilisant les différents coûts de production calculés dans les questions précédentes, **déterminer et choisir** la combinaison de procédés, la réalisation les moins coûteuse pour obtenir cette matrice fixe. .

D'après les études menées dans les questions précédentes, il est clair que le procédé de découpe au fil par électroérosion est le procédé d'usinage le moins couteux alors que l'électroérosion par enfonçage est le plus couteux pour ce type de matériau). Nous conseillons donc pour l'obtention des pièces à venir de réaliser le maximum de formes avec le procédé de découpe au fil par électroérosion, puis d'utiliser l'UGV pour les autres formes réalisables par ce procédé et enfin d'avoir recours à l'électroérosion par enfonçage si aucun autre procédé en peut satisfaire la demande.

On peut envisager de faire remonter au BE le fait de minimiser les formes non débouchantes et ne possédant pas de rayons de coins.

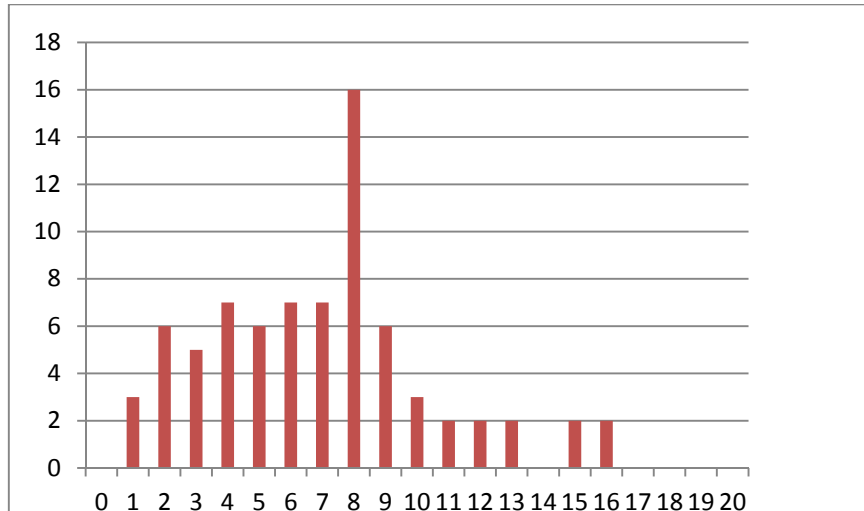


# Épreuve d'Études d'Industrialisation

## Commentaires sur la prestation des candidats

### Notes globales obtenues par les candidats :

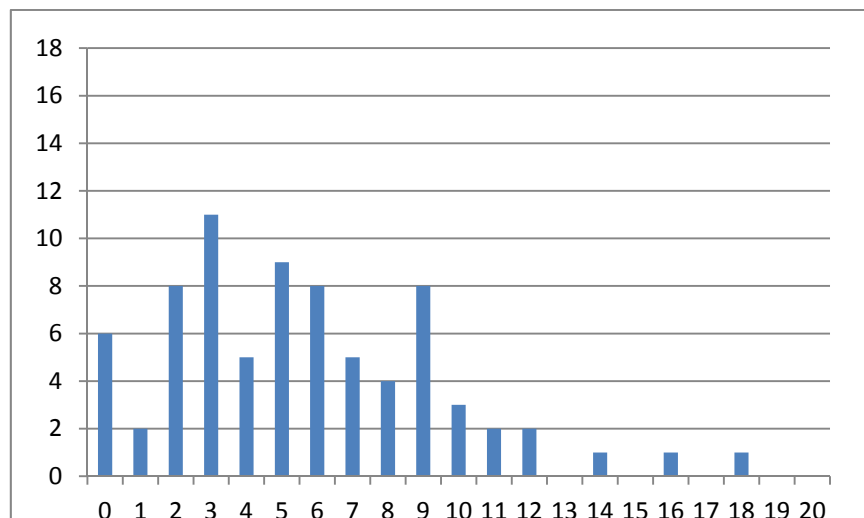
Ces résultats prennent en compte le fait que les candidats ont traité les 3 parties de façon différente, privilégiant manifestement de consacrer plus de temps à la première partie, partie A.



Note minimum obtenue	0,25
Note maximum obtenue	15,7
Moyenne	6,45
Écart type	3,25

### PARTIE A : ANALYSE du CONTEXTE INDUSTRIEL de PRODUCTION

#### Répartition des notes pour la partie A :



6 candidats n'ont pas du tout traité la partie A : note 00/20

### **A.1. Analyse du contexte industriel associé au produit commercialisé**

Connaissances et capacités évaluées : protection industrielle et dépôts de brevet, éco conception, impacts environnementaux, Profil Environnemental Produit. Proposer une représentation des impacts environnementaux pour les différents cycles de vie du produit.

Commentaires : Cette partie a été traitée par la majorité des candidats (95% des candidats)

La plupart des candidats ont su aborder ces quelques questions. Des réponses tantôt très développées, des réponses parfois très succinctes. Quelques candidats sont très au courant des démarches d'éco-conception, démarche qui traverse actuellement les problématiques industrielles et les référentiels de formation des élèves et étudiants (en 2006 dans le cadre du BTS Électrotechnique, dans le cadre des BTS Conception de Produits Industriels, dans le cadre du baccalauréat STI2D depuis la rentrée 2011, ...) . Plusieurs candidats justifient parfaitement l'utilisation des Profils Environnementaux des Produits en précisant que les aspects réglementaires, les normes l'exigent, l'exigeront, à termes, quelque soient les produits manufacturés. Pour ces connaissances évaluées, force est de constater que ces connaissances restent minimalistes en la matière et mériteraient d'être approfondies par les candidats.

### **A.2. Amélioration du taux de rendement synthétique (TRS)**

Connaissances et capacités évaluées : Composantes du taux de rendement synthétique. Proposer une stratégie de surveillance des composantes du Taux de Rendement Synthétique pour le contexte décrit

Commentaires : Cette partie a été traitée par la majorité des candidats (85% des candidats)

La définition et les enjeux associés aux démarches qualités telle que l'AMDEC Processus, la définition exacte du taux de rendement synthétique ne sont pas toujours connues. Généralement les réponses ont été formulées de façon générale, sans détailler ou sans s'appuyer sur le contexte spécifique de l'entreprise pour proposer des réponses ou apporter un point de vue personnel reposant sur une expérience vécue de suivi de production. On pouvait s'attendre à des réponses plus explicites, reposant sur une connaissance plus fine des milieux de production souvent confrontés à de nombreux aléas, en atelier en général, lorsqu'il s'agit de tenir les délais de production. Souvent les candidats, se sont appuyés sur les quelques problèmes décrits dans le sujet pour proposer des solutions et se sont contentés de mettre en évidence le problème des poinçons qui cassaient régulièrement. Les éléments de corrigés démontrent qu'il était possible de faire des propositions au-delà de ce problème traité en partie B.

Ces deux premières parties avaient pour objectif de placer le candidat dans le contexte industriel de l'entreprise de s'approprier les problèmes auxquels elle doit faire face sur le plan qualitatif, économique et quantitatif lorsqu'il s'agit de produire des prises RJ45 dans de bonnes conditions. De nombreux candidats ont abordé cette épreuve, en commençant sur cette partie et en y consacrant une bonne partie des 6 heures allouées, négligeant les parties B et en tout cas la partie C. De ce fait il fallait prendre la décision de répondre rapidement, de manière synthétique, montrer son niveau de connaissances, sans chercher à vouloir développer. Beaucoup de candidats ont cherché à répondre sans apporter les mots clés attendus.

### **A.3. Analyse du contexte de production, amélioration et suivi de la qualité produite**

Connaissances et capacités évaluées : Plans d'échantillonnage simple, double, multiples renforcés. Comparer des courbes d'efficacités. Identifier les risques clients et fournisseurs

Commentaires : Cette partie n'a été traitée que par 70% (A8), puis 30% des candidats)

Pour le contrôle de la perpendicularité, les candidats décrivent souvent les effets possibles du non respect de cette spécification. Pour autant, certains ont répondu de façon très générale, sans se préoccuper des risques engendrés sur l'unité d'assemblage, sans mettre en relation le problème du Taux de rendement Synthétique. Les solutions pour contrôler cette spécification sont parfois étonnantes, alors que la production est une production sérielle en très grande quantité. Des contrôles systématiques, avec l'utilisation de MMT ou gabarits de contrôle + palpeurs sont parfois proposés et décrits. Peu de candidats, proposent des solutions pour garantir cette spécification en agissant en amont. Plusieurs candidats proposent des solutions judicieuses de contrôle sans contact, en temps réel, sur l'unité de production, avec la possibilité d'évacuer toute pièce non conforme.

De nombreux candidats ont su rechercher et définir le plan d'échantillonnage à partir de tables fournies. Par contre ils abandonnent rapidement dès qu'il s'agit d'appliquer une formule pourtant donnée et traiter la suite des questions associées. Pour ceux qui sont allés un peu plus loin que la grande majorité des

candidats, rarement les courbes d'efficacités sont tracées de façons satisfaisantes, peu de candidats les comparent. Les quelques candidats qui ont su aborder correctement cette partie se sont souvent arrêtés à l'écriture des organigrammes de décision.

Certains organigrammes de décisions proposés ne sont pas conformes à la stratégie de contrôle associée. Manifestement les connaissances et différences relatives aux stratégies de contrôle (plan normal, double, multiple, réduit, renforcé) ne sont pas maîtrisées. La comparaison de l'efficacité des plans d'échantillonnages réduits et renforcés n'a généralement pas été abordée. Or cette comparaison devait amener le candidat à s'interroger sur tout l'intérêt de mettre en place des plans d'échantillonnages doubles et multiples supposés être plus économiques, sur l'intérêt de maîtriser la production afin de pouvoir là aussi, au niveau des contrôles (réduits en l'occurrence), réaliser des économies. Quelques rares candidats ont su évoquer, dans leurs analyses, les risques pour l'entreprise et pour le client.

#### **A.4. Étude de rentabilité pour un nouvel investissement envisagé.**

*Connaissances et capacités évaluées : Amortissement linéaire, charges d'exploitation, valeur résiduel d'un actif. Établir un tableau d'amortissement. Déterminer les bénéfices avant et après impositions. Évaluer la rentabilité d'un investissement en déterminant son délai de récupération.*

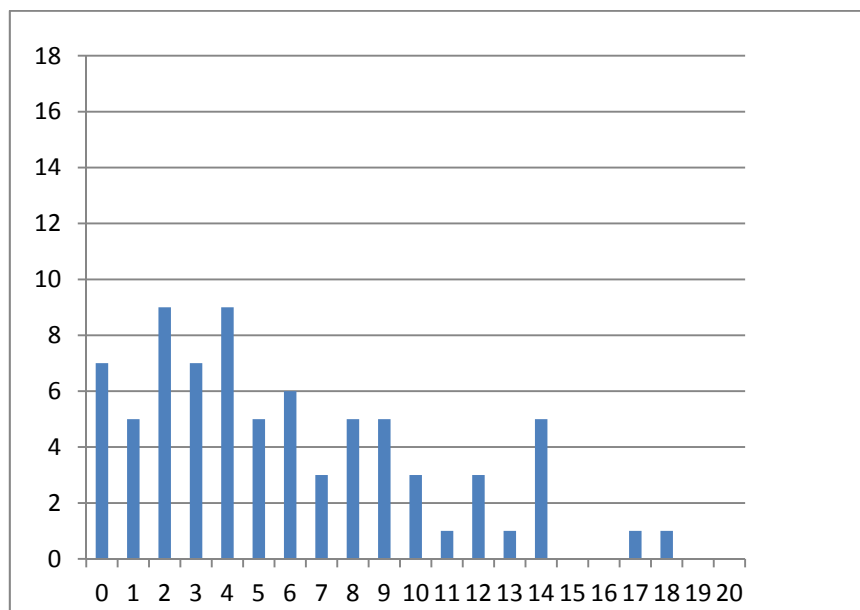
Commentaires : Cette partie a été traitée par 60% (A13), puis 40% des candidats)

La démarche était donnée et plusieurs candidats ont su mener les calculs pour déterminer le délai de récupération de l'investissement. Encore fallait il, déterminer le bon chiffre d'affaire, déterminer un amortissement, savoir ce que représente une valeur résiduelle en terme d'actif. De nombreux candidats déterminent le chiffre d'affaire en lien avec la production envisagée, alors qu'il fallait déterminer le chiffre d'affaire supplémentaire attendu. Le calcul d'amortissement n'est pas toujours connu alors qu'il s'agit d'une connaissance économique légale, supposée connue, indiquée dans tous les savoirs associés aux différents programmes d'économie gestion qui composent les référentiels de formation des BTS et DUT industriels. Pour l'évaluation des questions relatives à cette partie, le fait de ne pas répondre à cette première question n'a pas été pénalisante, puisque c'est la capacité du candidat à s'engager dans la démarche proposée qui a été avant tout évaluée. Déterminer des flux nets de trésorerie pour déterminer ensuite le délai de récupération de l'investissement engagé a été très peu abordé, calculé et argumenté.

Dans sa dernière rénovation, le BTS Industrialisation des Produits Mécaniques a introduit ces notions et les candidats aux BTS sont évalués au travers d'une épreuve « Gestion d'une affaire ». Force est de constater la faiblesse des connaissances des candidats en la matière.

## PARTIE B : QUALIFICATION DE LA PHASE DE DÉCOUPE

Répartition des notes pour la partie B :



**7 candidats n'ont pas du tout traité la partie B : note 00/20**

### B.1. Étude des opérations de découpe

Connaissances et capacités évaluées : mise et maintien en position des pièces dans un outillage de découpe, lecture et écriture de spécifications, analyser d'un processus de découpage.

Commentaires : Cette partie a été traitée par la majorité des candidats (95% des candidats)

La première question permettait d'évaluer la capacité des candidats à utiliser un langage de communication technique afin de représenter de façon schématique l'état du système aux différentes étapes. On peut constater que, même pour les candidats ayant su analyser de façon correcte la mise et le maintien en position des pièces dans l'outillage, la schématisation reste un point délicat.

Curieusement, alors qu'il s'agit d'un exercice usuel et dont la maîtrise est nécessaire, l'analyse de la spécification géométrique demandée a été traitée de manière peu satisfaisante. Seuls quelques candidats ont produit l'effort de formalisation et de rédaction minimum requis.

### B.2. Étude du procédé de découpage.

Connaissances et capacités évaluées : paramètres influents sur le procédé de découpe, déterminer des efforts.

Commentaires : Cette partie a été abordée par 75% des candidats.

Si les connaissances relatives à la détermination et au calcul des efforts de découpage semblent maîtrisées, très peu de candidats arrivent à présenter le procédé de manière satisfaisante. Les croquis sont souvent incomplets et les courbes tracées rarement commentées et justifiées.

Il faut toutefois souligner la qualité de certaines études proposées par des candidats ayant fourni un réel effort de présentation.

### B.3. Métallurgie des poinçons et matrices.

Connaissances et capacités évaluées : composition des aciers rapides, traitements thermiques des aciers, mesure des caractéristiques mécaniques, analyse de défaillance.

Commentaires : Cette partie a été abordée par 75% des candidats.

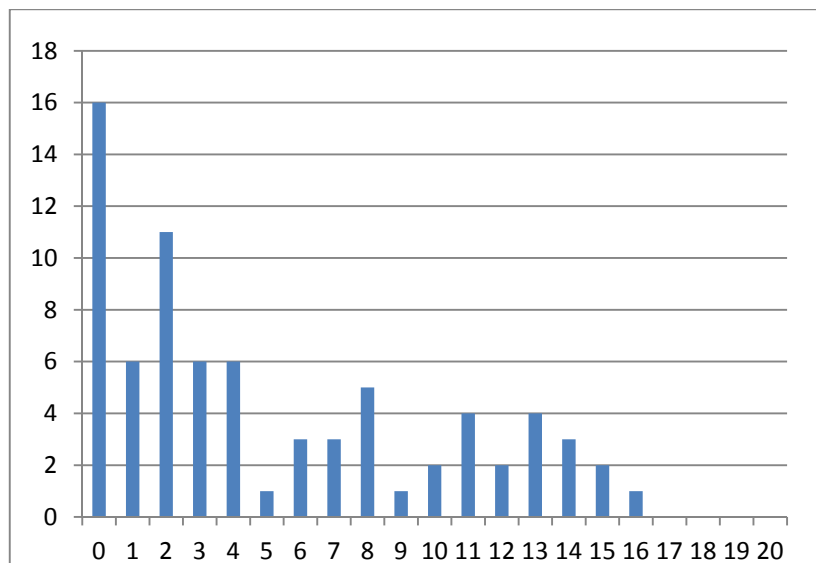
Cette partie a été très peu traitée dans sa globalité, les candidats ayant privilégié d'y répondre de façon ponctuelle. Seuls quelques candidats décrivent de façon succincte et claire les essais de dureté, de traction et de résilience, ce qui est surprenant pour de futurs enseignants.

L'étude de traitement thermique ne nécessitait pas de connaissances de spécialiste dans ce domaine, la question posée relevant uniquement de la détermination de la gamme de traitement selon les préconisations du fournisseur, qui étaient fournies.

En conclusion, alors que le champ du questionnement ne visait surtout pas à traiter de questions de spécialiste, force est de constater la faiblesse des acquis des candidats et leurs réinvestissements dans une relation « Produit Matériaux Procédé » pourtant très abordable.

## **PARTIE C : OBTENTION DE LA MATRICE FIXE PAR USINAGE**

**Répartition des notes pour la partie C :**



**16 candidats n'ont pas du tout traité la partie C : note 00/20**

### **C.1. Étude du procédé d'obtention de la matrice fixe par électroérosion**

Connaissances et capacités évaluées : Principes des procédés d'électroérosion par enfonçage et par découpe au fil

Commentaires : Cette partie a été abordée par l'ensemble des candidats ayant traités la partie C

Tous les candidats possèdent les connaissances fondamentales sur les procédés d'obtention de pièce par électroérosion. Il est cependant dommage qu'ils ne connaissent pas toujours les principaux paramètres de réglage de ces procédés et leurs influences sur l'état final de la pièce ou sur son coût d'obtention. La manière d'aborder la réponse aux questions a souvent privilégié de longs paragraphes de textes assez lourds au détriment de quelques figures explicites. Nombre de candidats n'arrivent pas à présenter un schéma explicite pour illustrer un principe technologique. Curieusement les limites technologiques posées par les deux procédés étudiés ne semblent pas toujours évidentes à certains candidats.

### **C.2. La découpe au fil par électroérosion : détermination du coût de production, application à la matrice fixe.**

Connaissances et capacités évaluées : Mise en place d'une gamme de fabrication – Mise en position et maintien en position d'une pièce – Choix de paramètres de réglage d'un processus – Calcul de coûts de réalisation

Commentaires : Cette partie a été abordée 75% des candidats

Une bonne partie des candidats ayant traité ces questions propose une gamme de fabrication cohérente mais certains proposent de réaliser dans une même phase des faces de la pièce nécessitant des changements d'orientation du fil de découpe. Les choix de mise en position sont souvent corrects mais

beaucoup de candidats ne proposent pas de maintien en position. Certains proposent encore de maintenir la pièce par une face découpée dans la phase.

Le choix des paramètres de découpe à l'aide des documents ressources est assez satisfaisant même si plusieurs candidats ne justifient pas leur réponse (notamment sur l'épaisseur de la pièce à découper).

Le trajet des trajets de découpe est correct pour les candidats qui proposent une gamme de réalisation cohérente. Le calcul de coût qui en découle est lui aussi satisfaisant bien que quelques candidats ne sachent pas évaluer un temps de parcours.

### **C.3. L'électroérosion par enfonçage : détermination du coût de production, application à la forme « guide-contre poinçon » de la matrice fixe.**

*Connaissances et capacités évaluées : Génération de forme à partir d'un procédé – Lecture de documents techniques – Calcul de coûts de production*

Commentaires : Cette partie a été abordée par seulement 40% des candidats

Les candidats ayant abordés cette partie ont généralement apporté des réponses claires. Les justifications du procédé d'obtention par électroérosion par enfonçage sont cohérentes. Les calculs de temps d'usinages sont traités de manière correcte mais l'analyse des documents techniques sur les conditions d'usinage n'est pas toujours satisfaisante. Il est regrettable que seulement 40 % des candidats traitent cette partie qui ne demandait pas de connaissances technologiques pointues.

### **C.4. Usinage UGV : détermination du coût de production, application à la matrice fixe, obtenue initialement par un découpage au fil par électroérosion**

*Connaissances et capacités évaluées : Obtention de forme par usinage par enlèvement de matière – Flexion d'outil de coupe*

Commentaires : Cette partie n'a qu'été abordée par 15% des candidats

Les quelques candidats qui ont abordés cette question n'ont jamais proposé les deux possibilités offertes (fraisage de forme ou d'enveloppe) mais ont toujours répertorié un des deux choix qu'ils ont justifié comme non réaliste de manière cohérente. Cependant aucun d'entre eux n'a proposé d'éliminer l'usinage d'enveloppe par un calcul de flexion d'outil.

### **C.5. Usinage UGV : détermination du coût de production, application à la forme « guide contre poinçon », obtenue initialement par électroérosion par enfonçage**

*Connaissances et capacités évaluées : Choix d'outils de coupe - Stratégies d'usinage - Analyse de documents technique - Mise en position et maintien en position d'une pièce*

Commentaires : Cette partie n'a qu'été abordée par 15% des candidats

Les candidats ayant traités cette partie ont généralement proposé une modification de la forme de la pièce correcte mais sans jamais justifier la valeur de rayon du congé de raccordement mis en place.

La mise et le maintien en position choisis sont cohérents, comme les outils de coupe utilisés pour l'ébauche est la finition. Malheureusement, l'analyse des documents techniques et le choix des conditions de coupes n'ont pas généré de bonnes propositions de parcours outils. Le calcul du coût associé a été traité de manière claire et efficace.

### **C.6. Synthèse : comparaison des différents procédés et choix de la gamme de réalisation finale, application à la matrice fixe**

*Connaissances et capacités évaluées : Analyse et comparaison de procédés d'obtention*

Commentaires : Cette partie a été abordée par 1 seul candidat

Il est regrettable que seul un candidat propose une synthèse de l'étude menée dans la partie C pour en tirer des règles de choix de procédé de fabrication en fonction des morphologies de pièces.

En synthèse, trop peu de candidats sont entrés dans cette partie de l'épreuve qui ne demandait pas de connaissances techniques très pointues sur les procédés de fabrications mis en œuvre.

# Éléments de correction de l'épreuve d'admissibilité d'analyse et de conception des systèmes

## Partie 1 : Validation de l'architecture générale du système robotique

### 1.1. Réflexion préliminaire sur la décomposition cinématique de la tâche

#### Question 1

À l'aide de la présentation du système et de la tâche à réaliser, citer au moins une raison pratique qui ait poussé le concepteur à maintenir le patient dans une position fixe.

Le patient n'a pas l'expertise nécessaire pour connaître le bon emplacement et la bonne orientation de son crâne par rapport à la sonde. Il est donc préférable qu'il reste fixe et que ce soit la sonde qui se positionne par rapport à lui.

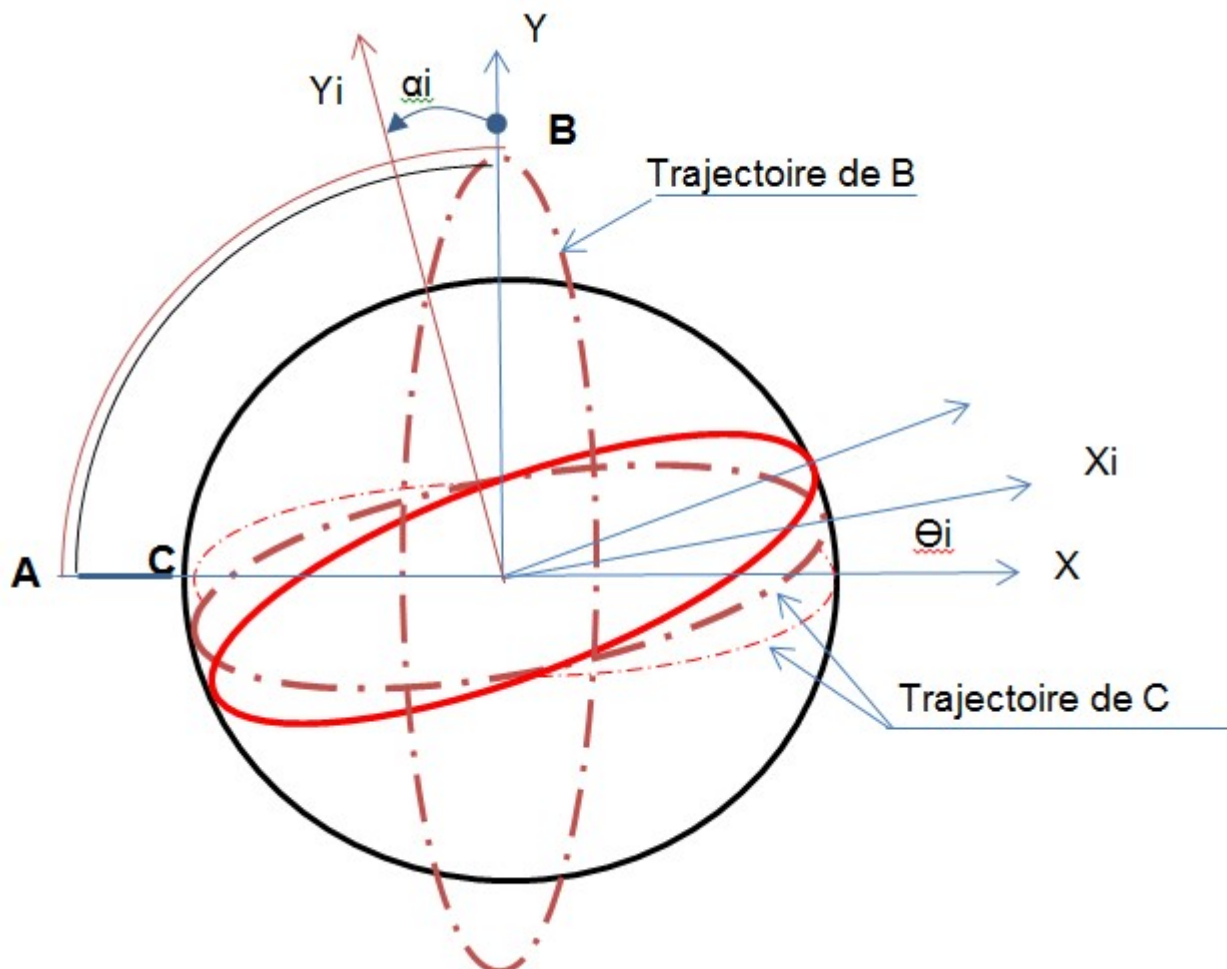
Ne connaissant pas les capacités de mouvement du patient (possibilité de torticolis ou de paralysie locale, il est plus sûr de le considérer fixe et de faire réaliser l'ensemble des mouvements par le système.

### 1.2. Démarche d'évaluation des différentes cinématiques possibles

#### Question 2

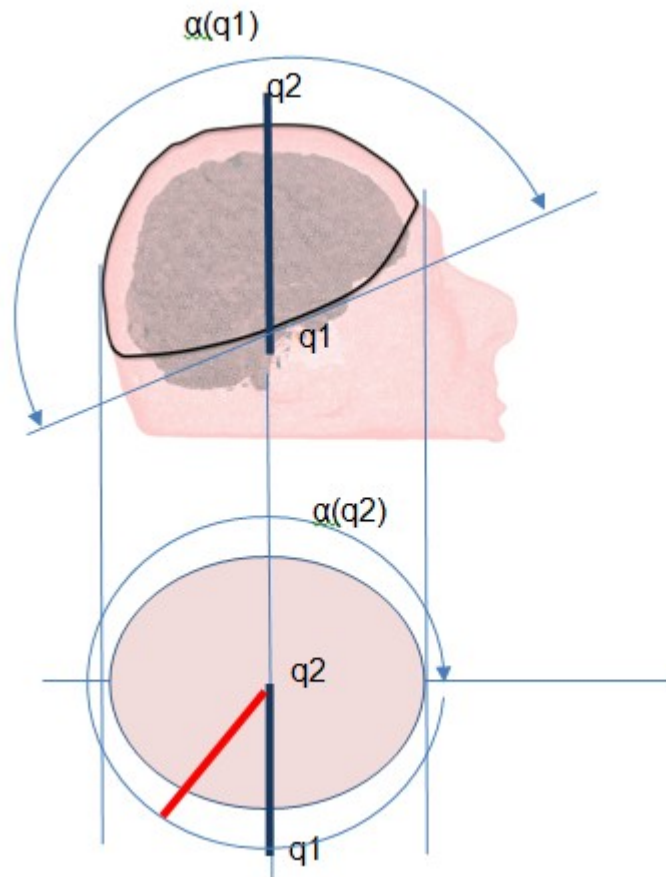
Justifier à l'aide d'un ou plusieurs schémas cinématiques que la solution 1 permet de réaliser un déplacement de la sonde sur une sphère.

Préciser, par des schémas, l'amplitude des mouvements des bras nécessaire pour balayer la zone délimitée en Figure 4.









### Question 3

**Préciser la zone atteignable par la sonde dans la solution 2. Peut-on simplement restreindre les plages angulaires des trois liaisons pivots de façon à ne balayer que la zone représentée en Figure 4 ? Justifier les réponses**

Les trois degrés de liberté possibles dans la solution 2 étant trois rotations suivant trois axes concourants, la zone atteignable par la sonde dans la solution 2 est donc l'ensemble des points d'une sphère située au centre de la cinématique.

Étant donné la zone atteignable, il est toujours possible de restreindre celle-ci de façon à ne balayer que la zone représentée en figure 4. Dans la configuration représentée, le mouvement des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ddl peut être simplement limité pour parcourir une demi-sphère délimitée par une ligne passant par le front et l'arrière de la tête. Si le segment rouge descend vers l'arrière de la tête, il suffit de restreindre la rotation du 2<sup>e</sup> ddl pour ne pas passer sur le visage. Une butée sur le 2<sup>e</sup> ddl en fonction du 1<sup>er</sup> permet donc de limiter simplement l'espace de travail.

### Question 4

**À l'aide des descriptifs du comportement attendu et des solutions n°1, 2 et 3, établir un tableau de synthèse des avantages et inconvénients de chacune des solutions envisagées (positions atteignables, encombrement, rigidité, position des bras par rapport au patient). Justifier brièvement les réponses.**

	Solution 1	Solution 2	Solution 3
Positions atteignables	Zone à traiter uniquement	Supérieures à la zone à traiter	Supérieures à la zone à traiter
Encombrement	Faible	Moyenne	Important
Rigidité	Moyenne	Moyenne	Importante
Position des bras par rapport au patient	Les bras passent devant le patient	Les bras restent derrière le patient (hors de sa vue)	Les bras restent sur le côté et derrière le patient

La solution n°1 est à éliminer car les positions atteignables couvrent la zone à traiter sans aucune marge de manœuvre au-delà, ce qui peut poser des problèmes de positionnement correct de la sonde sur les bords de la zone à traiter.

La solution n°3 est également à éliminer à cause de son encombrement important et de son degré d'hyperstatisme qui sera supérieur à celui de la solution n°2.

La solution à privilégier est donc la solution n°2.

### Question 5

Déterminer le torseur de la liaison  $J_{eq}$  équivalente aux liaisons J1, J2, J3 et J4.

$$\begin{aligned} \{V_{B\hat{a}ti/Axe1}\} &= \begin{Bmatrix} \omega_{xB1}\vec{x} \\ \vec{0} \end{Bmatrix} & \{V_{Axe1/Axe2}\} &= \begin{Bmatrix} \omega_{y12}\vec{y}_1 \\ \vec{0} \end{Bmatrix} \\ \{V_{Axe2/Axe3}\} &= \begin{Bmatrix} \omega_{z23}\vec{z}_2 \\ \vec{0} \end{Bmatrix} & \{V_{Axe3/Axe4}\} &= \begin{Bmatrix} \vec{0} \\ V_{x34}\vec{x}_4 \end{Bmatrix} & \{V_{B\hat{a}ti/Axe4}\} &= \begin{Bmatrix} \omega_{xB1}\vec{x} + \omega_{y12}\vec{y}_1 + \omega_{z23}\vec{z}_2 \\ V_{x34}\vec{x}_4 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

Il s'agit d'une liaison linéaire annulaire ou sphère cylindre.

### Question 6

Déterminer la liaison équivalente aux liaisons J5, J6 et J7.

$$\begin{aligned} \{V_{Axe4/Axe5}\} &= \begin{Bmatrix} \omega_{y45}\vec{y}_4 \\ \vec{0} \end{Bmatrix} & \{V_{Axe6/Axe7}\} &= \begin{Bmatrix} \omega_{x67}\vec{x}_6 \\ \vec{0} \end{Bmatrix} \\ \{V_{Axe5/Axe6}\} &= \begin{Bmatrix} \omega_{z56}\vec{z}_5 \\ \vec{0} \end{Bmatrix} & \{V_{Axe4/Axe7}\} &= \begin{Bmatrix} \omega_{x67}\vec{x}_6 + \omega_{y45}\vec{y}_4 + \omega_{z56}\vec{z}_5 \\ \vec{0} \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

Il s'agit d'une liaison rotule ou sphérique.

### Question 7

Justifier, à partir des réponses précédentes, que la cinématique choisie permet bien de valider les deux premiers critères de la fonction FP1.

Fonction	Critères	Valeurs
FP1 : Positionner la sonde de SMT à la surface de la tête du patient	Distance tête/sonde	Le contact doit être assuré en permanence
	Positionnement du plan de la sonde	Tangent à la surface de la tête

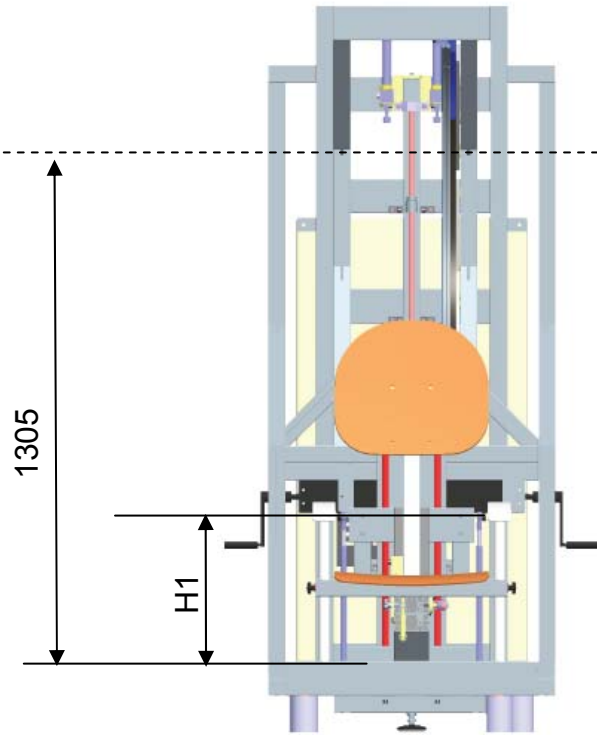
La translation autorisée par la liaison linéaire annulaire permet bien un contact tête/sonde assuré en permanence.

La liaison rotule permet d'orienter la sonde par rapport à la tête du patient assurant ainsi un contact tangent à la surface de la tête.

### 1.3. Prise en compte de la morphologie du patient

#### Question 8

À partir des données fournies dans le Tableau 2, du document DT2 et des mouvements explicités en Figure 7, vérifier si tout patient peut être positionné correctement dans le système (gestion de la taille du corps et de la tête du patient).



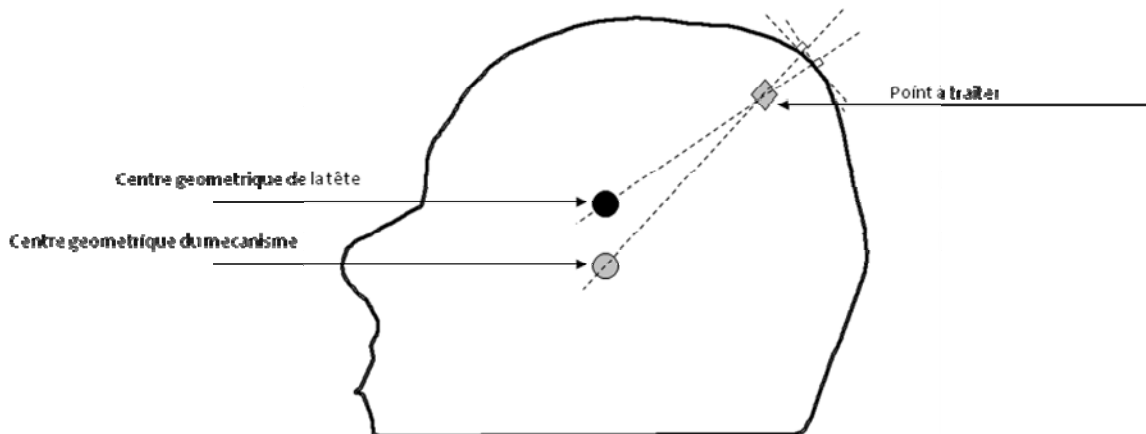
La hauteur yeux-siège d'un patient peut varier entre 689 et 875 mm.

Cette hauteur correspond au calcul :  
 $1305 - H_1 = 655 \rightarrow 895 \text{ mm}$

Tout patient peut donc être positionné correctement dans le système.

#### Question 9

Un décalage peut-il être compensé avec la cinématique retenue ? Quelle est la conséquence principale de l'existence de décalages pour le mécanisme ? On s'appuiera sur le document DR1.



Le décalage peut être compensé par actionnement de la liaison rotule réalisée par les axes 5 à 7.

La conséquence principale de l'existence de décalages est que la zone traitée sera différente de la zone à traiter ce qui peut être dommageable pour le patient. Si le décalage est connu et constant un réajustement de la position du centre géométrique du mécanisme sera possible, mais dégradera les performances du système (notamment en précision) par rapport au cas où il n'y aurait pas de décalage.

### 1.4. Influence du comportement cinématique

#### Question 10

Écrire le modèle géométrique direct, c'est-à-dire le modèle décrivant la position de l'effecteur du système en fonction des coordonnées articulaires, c'est-à-dire les angles décrivant l'état de chaque liaison.

Simplement par projections :

$$\begin{cases} x = L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y = L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases}$$

#### Question 11

Exprimer les relations liant les vitesses des actionneurs aux composantes de la vitesse de l'effecteur. On écrira les relations sous une forme matricielle :  $\dot{X} = J\dot{q}$ .

On dérive les 2 relations précédentes :

$$\begin{cases} \dot{x} = -L_1 \sin(\theta_1)\dot{\theta}_1 - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ \dot{y} = L_1 \cos(\theta_1)\dot{\theta}_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \end{cases}$$

Soit en mettant le jeu de 2 relations sous la forme matricielle proposée :

$$J = \begin{pmatrix} -L_1 \sin(\theta_1) - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & +L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}$$

#### Question 12

À quelle(s) condition(s) peut-on utiliser le modèle cinématique pour déterminer à partir de l'erreur en position une erreur articulaire, c'est à dire une erreur au niveau des liaisons ?

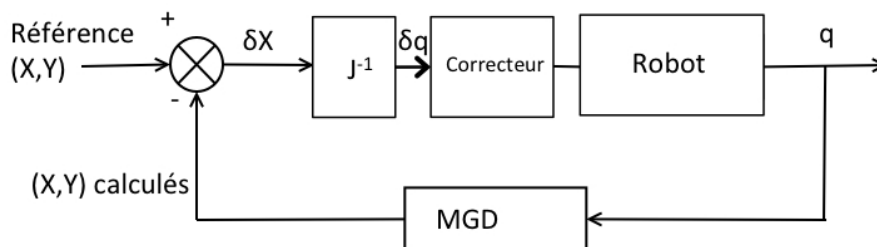
La matrice jacobienne permet d'exprimer une variation de la position de l'effecteur  $\delta X$  en fonction d'une variation  $\delta q$  de l'état des liaisons :

$$\delta X = J\delta q$$

Cette relation permet de déterminer  $\delta q$  à partir de  $\delta X$  si la matrice jacobienne est inversible, ce qui n'est possible que si son déterminant est non nul.

#### Question 13

Proposer un schéma bloc décrivant la commande du robot qui fasse apparaître la trajectoire de référence, l'estimation de position, l'erreur en position et l'erreur articulaire.



#### Question 14

Représenter une configuration du mécanisme de la Erreur ! Source du renvoi introuvable. posant problème lors de l'utilisation de ce type de commande.

La configuration est celle obtenue par exemple quand les deux angles sont nuls, les deux segments étant alors alignés.

### Question 15

Pour les solutions 1 et 3, des singularités existent-elles dans l'espace de travail du mécanisme ? Si oui, préciser les positions où ces singularités apparaissent. Préciser si ces observations peuvent modifier le bilan réalisé en Question 4.

Une singularité se traduit par l'incapacité à générer une vitesse dans une direction à l'aide des degrés de liberté pilotés du mécanisme. Pour la solution 1, on rencontre cette situation quand les deux segments sont alignés, ce qui est le cas sur la figure 9. Avec la solution 1, stimuler la zone située sur les oreilles pose donc problème. Pour la solution 3, lorsque la sonde est située sur les oreilles, le deuxième degré de liberté ne permet pas de générer de vitesse de déplacement de la sonde. Les premier et troisième degrés de liberté permettent en revanche de générer une vitesse de déplacement de la sonde dans toute direction. Pas de souci avec la solution 3.

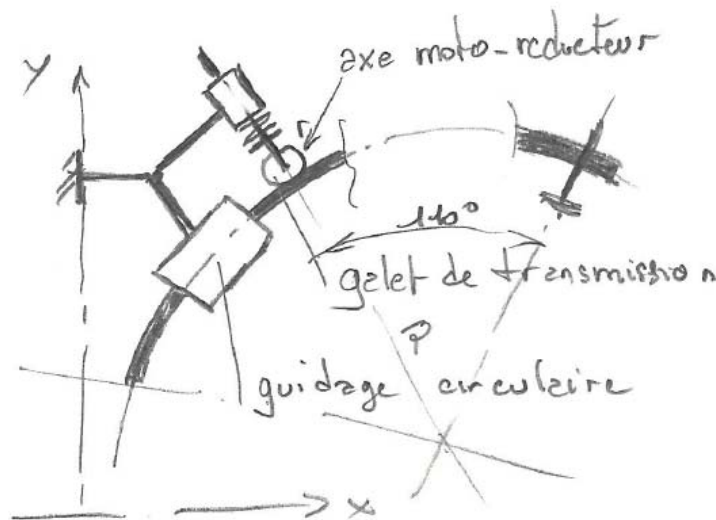
## Partie 2 : Analyse et conception du premier axe

### 2.1 Mode d'actionnement du premier axe

#### Question 16

Proposer un schéma de principe à main levée d'une solution de transmission par galet moteur. Proposer une démarche de choix des éléments : galet (matériau, taille), actionneur, capteur. Les critères qui peuvent aider aux choix des différents composants seront précisés, ainsi que les situations à considérer pour effectuer un dimensionnement.

Schéma de principe à main levée d'une solution de transmission par galet moteur :



Démarche de choix des éléments (il faut toujours se placer dans la situation la plus défavorable) :

- Galet :
  1. calcul de la pression de contact maximale ;
  2. calcul de la charge moyenne du galet sur le guidage circulaire ;
  3. choix du matériau en fonction des résultats précédents ;
  4. calcul de la vitesse de déplacement du galet ;
  5. détermination du diamètre en fonction des résultats précédents.
  
- Actionneur :
  1. calcul du couple moteur maximal nécessaire ;
  2. calcul de la vitesse nominale nécessaire ;
  3. choix du moteur.
  
- Capteur :
  1. détermination de la grandeur physique à mesurer ;
  2. le contact est-il possible ?

3. détermination de l'influence de l'environnement (perturbation possible due au champ magnétique de la sonde) ;
4. détermination de l'étendue de mesure ;
5. choix de la précision ;
6. choix de la sensibilité.

### Question 17

Discuter des avantages et inconvénients des 2 types de solutions (complexité, fiabilité, commande). Conclure.

	Galet moteur	Bielle – manivelle
<b>Complexité</b>	Faible	Moyenne
<b>Fiabilité</b>	Risque de glissement si le couple à transmettre est trop important. Donc possibilité de perdre la position de l'effecteur.	Bonne fiabilité
<b>Commande</b>	Simple (système linéaire)	Complexe (système non-linéaire)

La solution bielle-manivelle est donc à privilégier.

## 2.2 Validation du dimensionnement de l'actionneur

### Question 18

À l'aide du schéma de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, déterminer la relation géométrique d'entrée/sortie du mécanisme liant les variables  $x$  et  $\theta$ .

$$\overline{OA} + \overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CO} = \vec{0}$$

$$-e\vec{y} + x\vec{x} + L\vec{x}_1 + dy\vec{y}_2 - dx\vec{x}_2 - R\vec{x}_2 = \vec{0}$$

Projection sur  $\vec{x}$  :  $x + L \cos \alpha + dy \sin \theta - dx \cos \theta - R \cos \theta = 0$

Projection sur  $\vec{y}$  :  $-e + L \sin \alpha + dy \cos \theta - dx \sin \theta - R \sin \theta = 0$

D'où :  $\sin \theta = \frac{-e + L \sin \alpha + dy \cos \theta}{dx + R}$  et  $x = -L \cos \alpha - dy \sin \theta + (dx + R) \cos \theta$

$$x = -L \cos \alpha - dy \frac{-e + L \sin \alpha + dy \cos \theta}{dx + R} + (dx + R) \cos \theta$$

### Question 19

La courbe de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** est obtenue par simulation numérique du comportement cinématique du système. En utilisant cette figure, vérifier que les performances cinématiques souhaitées sont atteintes :  $\theta$  doit varier de  $0^\circ$  à  $110^\circ$  pour une variation maximale de  $x$  de 0 mm à 1200 mm, la motorisation doit permettre le parcours d'un secteur angulaire de  $110^\circ$  en une dizaine de secondes.

La figure 19 montre bien une variation de  $\theta$  de  $0^\circ$  à  $110^\circ$ . Le parcours d'un secteur angulaire de  $110^\circ$  en une dizaine de secondes impose une vitesse angulaire moyenne de  $11^\circ/s$ . Or, la figure 19 montre une vitesse angulaire moyenne comprise entre  $16^\circ/s$  et  $18^\circ/s$ .

Les performances cinématiques souhaitées sont donc atteintes.

**Question 20**

La configuration la plus défavorable est obtenue lorsque la bielle est verticale, c'est-à-dire lorsque  $\theta = -90^\circ$ . Dans ce cas, il est possible d'approximer  $(R+dx) \approx e$ . Avec cette hypothèse, préciser si le couple moteur permet l'obtention de l'équilibre en statique.

Dans le cas où  $\theta = -90^\circ$ , alors  $\vec{y}_2 = \vec{x}$  et  $\vec{x}_2 = -\vec{y}$

1 - On isole : l'élément piloté (4) + la bielle (3) + le coulisseau (2) et on applique un théorème de la résultante statique en projection sur l'axe  $\vec{x}$ .

Le bilan des actions mécaniques nous donne :

- liaison glissière de 4/0 : n'intervient pas dans le TRS ;
- effort de rappel :  $\left\{ \mathcal{J}_{rap \rightarrow 2} \right\} = \begin{matrix} B \\ \left\{ \begin{matrix} F_{rappel} \cdot \vec{x} \\ \vec{0} \end{matrix} \right\} ;$
- poids de l'ensemble :  $\left\{ \mathcal{J}_{poids \rightarrow 3+2+4} \right\} = \begin{matrix} G \\ \left\{ \begin{matrix} -m_{mobile} g \cdot \vec{x} \\ \vec{0} \end{matrix} \right\} ;$
- liaison hélicoïdale :  $\left\{ \mathcal{J}_{1 \rightarrow 2} \right\} = \begin{matrix} B \\ \left\{ \begin{matrix} X_{12} \vec{x} + Y_{12} \vec{y} + Z_{12} \vec{z} \\ L_{12} \vec{x}_2 + M_{12} \vec{y}_2 + N_{12} \vec{z} \end{matrix} \right\} .$

On applique le théorème de la résultante statique en projection sur l'axe  $\vec{x}$  :

$$F_{rappel} - m_{mobile} g + X_{12} = 0$$

En supposant une liaison hélicoïdale avec un pas à droite :  $X_{12} = L_{12} \frac{2\pi}{p}$

D'où la relation :  $L_{12} = \left( -F_{rappel} + m_{mobile} g \right) \frac{p}{2\pi}$ .

2 - On isole la vis à bille (1) et on applique un théorème du moment statique en projection sur l'axe  $\vec{x}$ .

Le bilan des actions mécaniques nous donne :

- couple réducteur :  $\left\{ \mathcal{J}_{red \rightarrow 1} \right\} = \begin{matrix} A \\ \left\{ \begin{matrix} \vec{0} \\ C_{red} \cdot \vec{x} \end{matrix} \right\} = \begin{matrix} B \\ \left\{ \begin{matrix} \vec{0} \\ C_{red} \cdot \vec{x} \end{matrix} \right\} ;$
- poids de la vis :  $\left\{ \mathcal{J}_{poids \rightarrow 1} \right\} = \begin{matrix} G \\ \left\{ \begin{matrix} -m_{eq} g \cdot \vec{x} \\ \vec{0} \end{matrix} \right\} = \begin{matrix} B \\ \left\{ \begin{matrix} -mg \cdot \vec{x} \\ \vec{0} \end{matrix} \right\} ;$
- liaison hélicoïdale :  $\left\{ \mathcal{J}_{2 \rightarrow 1} \right\} = \begin{matrix} B \\ \left\{ \begin{matrix} X_{21} \vec{x} + Y_{21} \vec{y} + Z_{21} \vec{z} \\ L_{21} \vec{x}_2 + M_{21} \vec{y}_2 + N_{21} \vec{z} \end{matrix} \right\} .$

On applique le théorème du moment statique au point B en projection sur l'axe  $\vec{x}$  :

$$C_{red} + L_{12} = 0$$

La relation liant le couple moteur et le couple réducteur est :  $C_m = C_{red} \frac{k}{\eta}$ , avec  $\eta$  : rendement de l'ensemble vis à billes + réducteur.

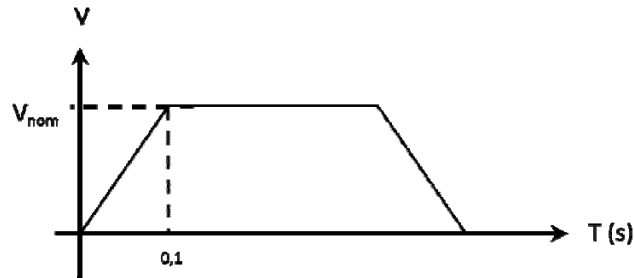
D'où la relation :  $C_m = \left(-F_{\text{rappel}} + m_{\text{mobile}}g\right) \frac{p \cdot k}{2\pi \cdot \eta}$  soit  $C_m = -12,2 \cdot 10^{-3} \text{ N.m}$

Le couple moteur permet donc l'obtention de l'équilibre en statique.

### Question 21

Une simulation numérique dynamique du système a permis d'identifier, dans le cas le plus défavorable, que l'accélération maximale atteignable par le coulisseau est de  $0,2 \text{ m/s}^2$ . Cette accélération permet-elle de satisfaire le cahier des charges ? Conclure sur le choix de la motorisation et de la réduction.

La loi de commande en trapèze est la suivante :



avec  $V_{\text{nom}}$  la vitesse nominale de déplacement du coulisseau.

La vitesse nominale du moteur est de  $N_{\text{mot}} = 6930 \text{ tr / min}$  soit  $\omega_{\text{mot}} = 725,7 \text{ rad / s}$

La vitesse nominale en sortie du réducteur sera donc :  $\omega_{\text{red}} = \omega_{\text{mot}} k = \frac{N_{\text{mot}} \cdot 2\pi \cdot k}{60} = 168,8 \text{ rad / s}$

La vitesse nominale de translation du coulisseau sera donc :

$$V_{\text{nom}} = \frac{p}{2\pi} \omega_{\text{red}} = \frac{N_{\text{mot}} \cdot 2\pi \cdot k \cdot p}{60 \cdot 2\pi} = \frac{N_{\text{mot}} \cdot k \cdot p}{60} = 0,15 \text{ m / s}$$

L'accélération nécessaire du coulisseau est de :  $a = \frac{V_{\text{nom}}}{0,1} = \frac{N_{\text{mot}} \cdot k \cdot p}{60 \cdot 0,1} = \frac{0,13}{0,1} = 1,3 \text{ m / s}^2$

L'accélération maximale atteignable par le coulisseau est de  $0,2 \text{ m/s}^2$ . L'ensemble moteur plus réducteur ne convient pas.

## 2.3 Cotation du système d'entraînement

### Question 22

On considère la totalité des éléments décrits ci-dessus (Document DT4). Doit-on prendre des précautions particulières pour assurer le fonctionnement de l'ensemble, notamment de la vis à billes ?

Il est impératif que l'ensemble des éléments en liaison avec la vis à bille soient coaxiaux.

### Question 23

Sur le document réponse DR2, identifier les surfaces fonctionnelles nécessaires au montage de l'ensemble des composants sur la platine ainsi que les surfaces fonctionnelles nécessaires à l'assemblage de la platine sur le bâti.

Voir document réponse.

### Question 24

À partir des réflexions menées dans les deux questions précédentes, proposer une cotation géométrique de la platine sur le document réponse DR3 permettant d'assurer la mise en position du support moteur sur la platine.

Voir document réponse



### Question 25

Quelle(s) solution(s) alternative(s) peuvent être adoptées afin de limiter les exigences de la cotation géométrique ?

Solutions alternatives :

- utilisation de trous oblongs ;
- accouplements élastiques ;
- joint d'Oldham.

### Partie 3 : Analyse et conception du deuxième axe

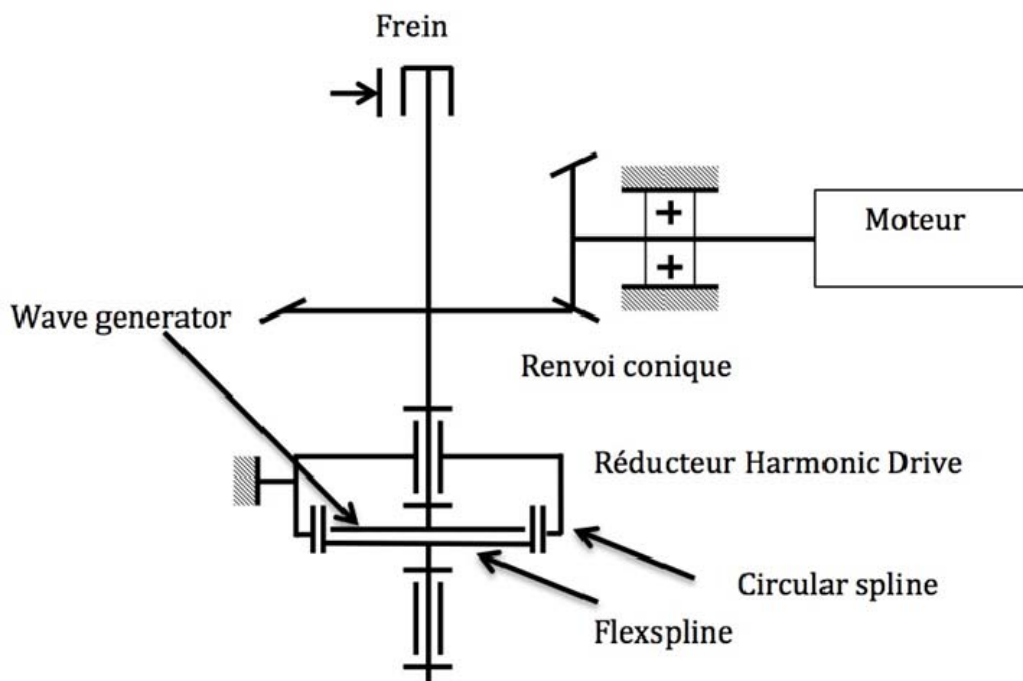
### Question 26

Quel est l'intérêt du type de réducteur employé par rapport aux autres technologies de réduction existantes ?

La technologie du réducteur permet d'obtenir des rapports de réduction importants, en conservant un rendement intéressant, et la réversibilité du réducteur. Le jeu angulaire est par ailleurs très réduit.

### Question 27

À partir des vues de la maquette numérique fournies en document DT5, représenter sous forme de schéma technologique l'ensemble de la transmission du deuxième axe.



### Question 28

Quel peut être le rôle du roulement à billes installé en sortie du moteur ?

L'arbre moteur est soumis à un effort radial généré par la couronne sur le pignon conique. Le guidage de l'arbre réalisé dans le moteur ne permet pas de reprendre cet effort. Le roulement est installé à cet effet.

### Question 29

Au moment de la fermeture du frein, quelle est la position la plus défavorable pour le système de freinage ? Évaluer le couple de freinage nécessaire au niveau du frein par manque de courant. Conclure sur le choix du frein.

La situation la plus défavorable est obtenue quand :

- le premier axe est piloté pour mettre l'axe de rotation du bras au niveau du deuxième axe en position horizontale ;
- le bras est situé dans un plan horizontal ( $\theta_2 = 90^\circ$ ) ;
- le moment créé par la masse du poignet est maximal :  $\theta_3 = 90^\circ$  et  $D$  maximal.

En considérant qu'il est alors nécessaire d'avoir équilibre statique, le couple devant être généré en sortie de réducteur dans cette situation est égal à :

$$C_{aval} = mgD : \text{avec } m=5 \text{ kg, } D=0,205 \text{ m, donc } C_{aval} = 10,25N \cdot m.$$

Le rendement du réducteur dépend de sa vitesse de rotation. On considère une situation de fonctionnement où à l'instant du déclenchement du frein le moteur tourne à sa vitesse nominale (cas défavorable : le rendement diminue avec la vitesse de rotation). Selon les documents constructeurs :  $V = 10,25/24 = 0,42$

Pour une vitesse de rotation de  $2440/3=813$  tr/min,  $K=0,7$ , et finalement  $\eta_e = 0,7(0,75 - 0,07) = 0,48$

Le couple en amont du réducteur, délivré par le frein pour maintenir le système à l'arrêt, est donc égal à  $C_{amont} = 0,21N \cdot m$ . Le choix du frein est validé.

### Question 30

**Évaluer l'action mécanique maximale nécessaire de la part du praticien pour déplacer manuellement le deuxième axe et rendre possible la sortie du patient. Commenter la valeur numérique obtenue.**

Le couple devant être appliqué sur la sortie du réducteur est égal à  $8 N \cdot m$ . Ce couple peut être créé par une action au niveau du poignet. Cette action sera maximale si  $\theta_3 = 50^\circ$  et  $D=125 \text{ mm}$ . Dans ce cas, l'action doit être égale à  $80 N$ . Action conséquente, mais pouvant *a priori* être délivrée par l'opérateur.

### Question 31

**En utilisant le modèle introduit en Erreur ! Source du renvoi introuvable. et la documentation Harmonic Drive, évaluer la rigidité torsionnelle du composant dans le cas le plus défavorable et le déplacement induit du centre de la sonde.**

Dans la situation défavorable analysée précédemment, le couple appliqué sur la sortie du réducteur est égal à  $10,25 N \cdot m$ . En utilisant la documentation constructeur, on obtient alors un angle de torsion égal à  $6,7^{e-4} \text{ rad}$ , soit avec  $D=205 \text{ mm}$ , un déplacement dû à la torsion du réducteur de  $0,14 \text{ mm}$ .

### Question 32

**Proposer, sans réaliser les calculs, une modélisation pour étudier le comportement sous charge de la glissière à éléments roulants. Comment avec cette modélisation évaluer la contribution du guidage de J3 au déplacement sous charge de la sonde ?**

Lorsque le bras est en position sortie ( $\theta_3 = 130^\circ$ ), le poids du poignet crée un moment au niveau du guidage qui va entraîner une rotation relative des deux éléments du bras. Pour la quantifier, une modélisation possible consiste à considérer que les déformations sous charge se produisent au niveau des contacts entre les billes circulant dans le guidage et les deux éléments formant la structure du guidage. Le modèle de Hertz peut être exploité pour décrire le comportement local au niveau du point de contact de chaque bille : il permet de disposer d'une relation entre déplacement et charge. À l'échelle du guidage, il est possible d'écrire le torseur d'action mécanique que transmet le guidage. Par intégration sur le nombre de billes en contact, on peut en déduire l'expression de la rigidité du guidage à partir des caractéristiques du guidage (taille des billes, nombre de billes, matériaux).

### Question 33

**Comment peut-on utiliser cette analyse pour conclure sur la contribution du deuxième axe, du troisième axe et des éléments de structure associés dans le déplacement sous charge du centre de la sonde ? On précisera quels résultats précédents doivent être réutilisés, et le raisonnement pour conclure sur le déplacement résultant.**

La simulation permet d'estimer la contribution des éléments de structure du bras lors de leur flexion. Pour déterminer le déplacement sous charge au centre de la sonde, nous pouvons utiliser des torseurs de petits déplacements, et considérer que les déplacements dus :

- à la torsion du réducteur du deuxième axe ;

- à la déformation du guidage par éléments roulants du troisième axe ;
  - à la déformation des éléments de structure du bras ;
- s'ajoutent.

#### Question 34

**Quelles dispositions constructives peut-on adopter pour réduire le déplacement sous charge si son amplitude est trop importante ?**

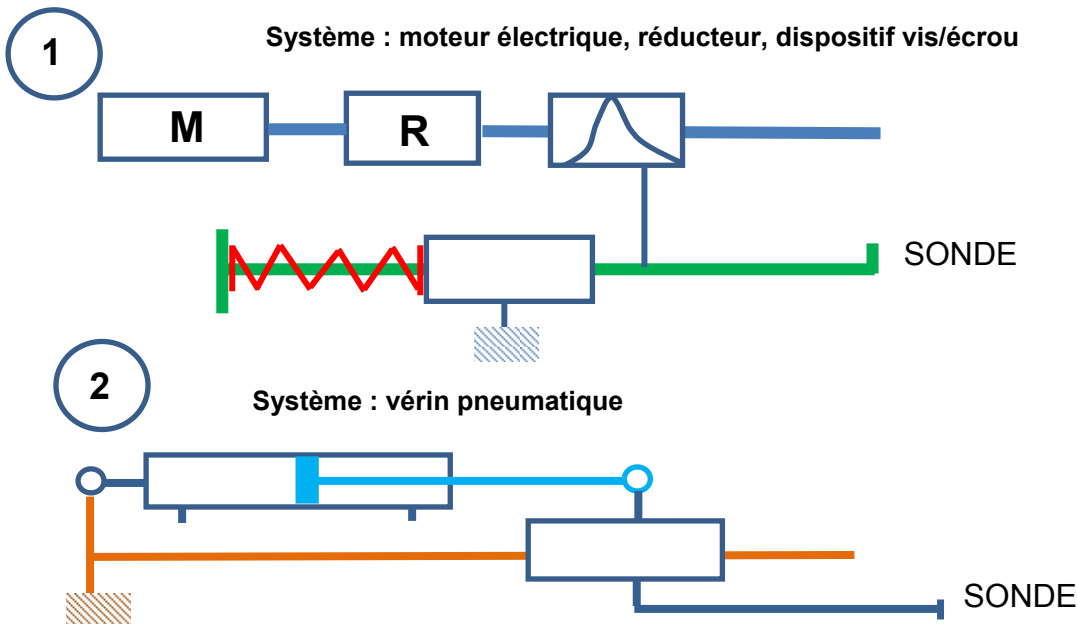
Il est possible d'envisager une modification de la section des éléments de structure, de doubler les guidages pour en utiliser deux afin d'augmenter la rigidité du troisième axe.

### Partie 4 : Analyse et conception du quatrième axe

#### 4.1. Conception de l'entraînement de l'axe

#### Question 35

**Proposer au moins deux solutions, qui seront détaillées dans deux schémas cinématiques, pouvant être utilisées pour remplir la fonction technique FT11.**



#### Question 36

**Donner les avantages et les inconvénients en termes de sécurité, compacité, précision pour chaque solution proposée ainsi que pour la solution adoptée.**

Système existant : Moteur électrique, système Pignon crémaillère	Système 1 : moteur électrique, système vis écrou.	Système 2 : moteur pneumatique.
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Énergie compatible avec l'ensemble du système.</li> <li>- Précision limitée par la géométrie du système pignon crémaillère</li> <li>- Encombrement plus important</li> <li>- Retour plus facile du système en cas d'incident.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Énergie compatible avec l'ensemble du système.</li> <li>+ Précision du déplacement de la sonde plus importante.</li> <li>- Effort de contact plus difficile à gérer</li> <li>- Retour du système plus complexe en cas d'incident.</li> <li>+ Système relativement compact</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Gestion de l'effort de contact de la sonde plus facile</li> <li>+ Vitesse de translation plus rapide si nécessaire</li> <li>+ Retour par vérin monostable sécurisant</li> <li>- Nécessite une énergie pneumatique, donc une technologie différente du reste du mécanisme.</li> <li>- Bruit au niveau de la tête du</li> </ul>

		patient
--	--	---------

## 4.2 Analyse de la régulation en effort

### Question 37

Compléter le schéma bloc du document DR4 illustrant le comportement du système décrit ci-dessus. À l'intérieur des blocs seront notés les noms des composants utilisés. Les grandeurs physiques de chaque lien seront précisées ainsi que leurs unités.

Voir document réponse.

### Question 38

Sur le schéma bloc du document réponse DR5, compléter partiellement la partie correspondante à la modélisation du moteur électrique Maxon F2140.

Voir document réponse.

### Question 39

Question 40 À l'aide des éléments présentés ci-dessus, appliquer le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble des composants de l'axe 4. Le déplacement de la crémaillère par rapport au bâti sera noté  $x(t)$ . Le résultat sera exprimé en fonction de  $I_{eq}$  qui désigne l'inertie équivalente de l'ensemble des éléments ramenée à l'axe moteur. L'expression de  $I_{eq}$  sera précisée.

$$E_T = E_{mot} + E_{Red} + E_{Poulies} + E_{Pignon} + E_{Crémaillère}$$

$$E_T = \frac{1}{2} I_m \omega_m^2 + \frac{1}{2} I_{Red} \omega_{Red}^2 + 2 \left( \frac{1}{2} I_P \omega_{Red}^2 \right) + \frac{1}{2} I_{AS} \omega_{Red}^2 + \frac{1}{2} m (R_{PI} \omega_{Red}^2)$$

$$\text{Avec : } \omega_{Red} = \frac{\omega_m}{200} = K_{Red} \cdot \omega_m$$

$$\text{D'où : } E_T = \frac{1}{2} \omega_m^2 \left[ I_m + I_{Red} K_{Red}^2 + 2I_P K_{Red}^2 + I_{AS} K_{Red}^2 + m R_{PI}^2 K_{Red}^2 \right] \text{ et } E_T = \frac{1}{2} \omega_m^2 I_{eq}$$

$$\text{Avec } I_{eq} = I_m + I_{Red} K_{Red}^2 + 2I_P K_{Red}^2 + I_{AS} K_{Red}^2 + m R_{PI}^2 K_{Red}^2$$

$$\text{TEC appliqué à l'axe 4 : } \frac{dE_T}{dt} = P_{Rappel} + P_{mot} + P_{frott}$$

$$P_{Rappel} = F_R R_{PI} \omega_{Red} = F_R R_{PI} K_{Red} \omega_m$$

$$P_{mot} = C_m \omega_m$$

$$P_{frott} = -f \omega_m^2$$

$$I_{eq} \omega_m \dot{\omega}_m = F_R R_{PI} K_{Red} \omega_m + C_m \omega_m - f \omega_m \text{ d'où : } I_{eq} \dot{\omega}_m = F_R R_{PI} K_{Red} + C_m - f \omega_m$$

### Question 40

À l'aide du résultat de la question précédente et des données du Tableau 3, finir de compléter le schéma bloc du document réponse DR5.

Voir document réponse.

### Question 41

Dans le cas d'un système bouclé convenablement amorti, on pourra utiliser, sans aucune justification, la relation :  $t_{R5\%} \cdot \omega_{0dB} = 3$  où  $\omega_{0dB}$  désigne la pulsation de coupure à 0 dB en boucle ouverte et  $t_{R5\%}$  le temps de réponse à 5% de la valeur en régime permanent.

À l'aide du diagramme de Bode, préciser si la rapidité du système est suffisante.

$$\omega_{0dB} = 2,2 \text{ rad/s} \text{ donc } T_{R5\%} = \frac{3}{2,2} = 1,36 \text{ s}$$

Donc, le cahier des charges n'est pas respecté.

**Question 42**

**Proposer un correcteur permettant de corriger le système. Justifier ce choix.**

On souhaite améliorer la rapidité du système. Pour cela, on peut utiliser un correcteur proportionnel de gain supérieur à 1. Ce correcteur va modifier la valeur de  $\omega_{0dB}$  qui caractérise la rapidité du système.

Le concepteur a choisi un correcteur proportionnel.

**Question 43**

**Proposer une méthode de réglage de ce type de correcteur et préciser la valeur du gain retenu permettant de respecter le cahier des charges.**

On veut  $T_{R5\%} = 1 s$  donc  $\omega_{0dB} = 3 rad / s$ .

Le gain pour  $\omega = 3 rad / s$  est de  $-2,74 dB$ .

On cherche donc le gain K tel que  $20\log|FTBO(\omega_{0dB})| = 0$  donc  $20\log K - 2,74 = 0 dB$ , donc

$$K = 10^{\frac{2,74}{20}} = 1,37.$$

**Question 44**

**Afin d'éviter que la sonde ne heurte violemment la tête du patient, le diagramme temporel de l'asservissement en effort de l'axe 4 ne doit pas admettre de dépassement. Le système respecte-t-il le cahier des charges ? Justifier la réponse vis-à-vis de la sécurité du patient.**

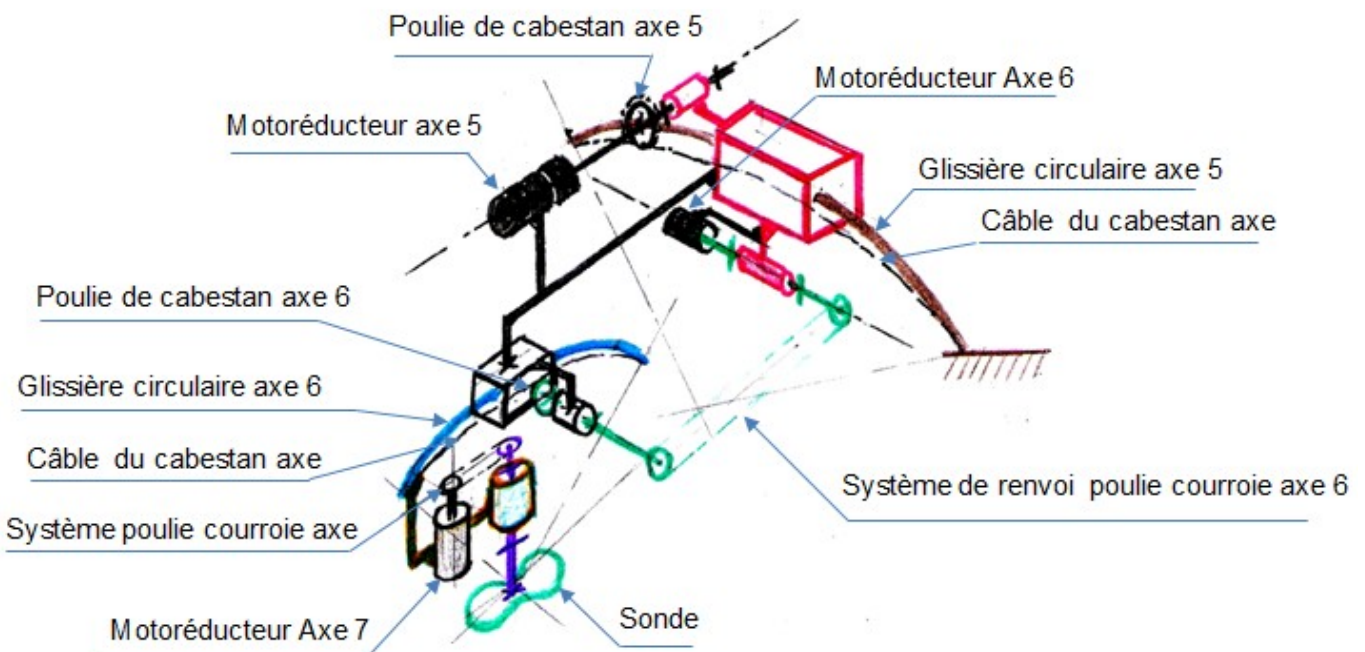
D'après le diagramme de Bode fourni, la marge de phase du système corrigé est de  $90^\circ$  (avec  $\omega_{0dB} = 3 rad / s$ ).

D'après la figure 27, une marge de phase de  $90^\circ$  correspond à une absence de dépassement. Donc, le cahier des charges est respecté.

**Partie 5 : Analyse et conception du poignet**

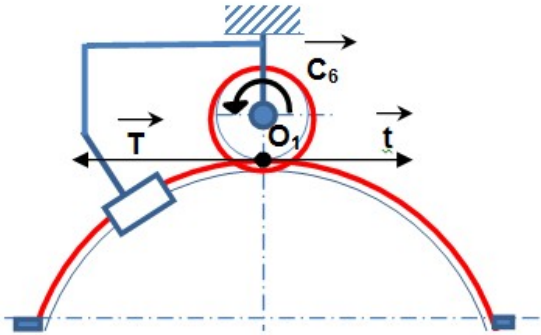
**Question 45**

**Représenter pour chacun des trois axes (5, 6 et 7), sous la forme d'un schéma cinématique, les solutions technologiques utilisées.**

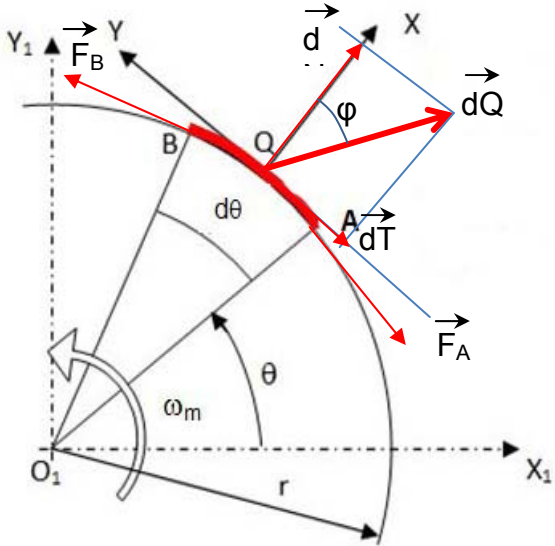


**Question 46**

Dans ce cas, exprimer le couple transmissible sans glissement par le biais de ce dispositif. Faire apparaître explicitement l'angle  $\alpha$  d'enroulement du câble, la tension  $t = 35 \text{ N}$  du brin mou et  $T$  du brin tendu du câble. Commenter l'influence du choix des matériaux et de la géométrie du cabestan.



Isolons la portion du câble cabestan AB



Équilibre de la poulie cabestan :  
La poulie est soumise à la tension du brin mou  $t$ , la tension du brin tendu  $T$ , le couple  $C_6$  et l'action du bâti en  $O_1$ .

Théorème du moment en  $O_1$  en projection sur  $z_1$  :

$$C_6 - T.r + t.r = 0$$

$$\text{Soit : } T - t = \frac{C_6}{r}$$

$$\text{Soit } T - t = \frac{45}{0.015} = 300 \text{ N} \quad (1)$$

On néglige les effets dynamiques, ainsi que l'action de la pesanteur.

Elle est soumise à :

- $\vec{F}_B$  en B, coté du brin tendu ;
- $\vec{F}_A$  en A, coté du brin mou ;
- $\vec{dQ}$ , l'action de la poulie sur la portion AB de la courroie, de composante normale  $\vec{dN}$  et de composante tangentielle  $\vec{dT}$ .

Avec  $\|\vec{F}_A\| = F$  ;  $\|\vec{F}_B\| = F + dF$

PFS appliqué à la portion du câble cabestan AB :  $\vec{dQ} = \vec{F}_A + \vec{F}_B = \vec{0}$  (2)

Soit en projection :

Équation (2) en projection sur  $\vec{x}$  :  $-(F + dF) \sin \frac{d\theta}{2} + dN - F \sin \frac{d\theta}{2} = 0$  (3)

Équation (2) en projection sur  $\vec{y}$  :  $0 + (F + dF) \cos \frac{d\theta}{2} - dT - F \cos \frac{d\theta}{2} = 0$  (4)

Avec  $d\theta$  infiniment petit on obtient en développant au premier ordre :

En projection sur x l'équation (3) s'écrit :  $-Fd\theta + dN = 0$  (5)

En projection sur y l'équation (4) s'écrit :  $dF - dT = 0$  (6)

D'autre part, à la limite du glissement les lois de coulomb nous permettent d'écrire :  $dT = fdN$  où  $f$  est le facteur d'adhérence entre la poulie et la courroie.

À partir des équations (5) et (6) on déduit :

$$dF - f.F.d\theta = 0 \quad ; \quad \text{soit : } \frac{dF}{F} = f.d\theta$$

En intégrant cette équation différentielle on obtient, avec  $T$  la tension dans le brin tendu de la courroie,  $t$  la tension dans le brin mou et  $\alpha$  l'angle en radian d'enroulement :  $T = t.e^{f\alpha}$  (7)

Le couple transmissible par le cabestan est :  $C_6 = r.t(e^{f\alpha} - 1)$

## Influence des matériaux et de la géométrie du cabestan

Pour un couple transmissible donné, l'angle d'enroulement du câble s'écrit  $\alpha = \frac{k}{f}$  avec  $k$  une constante. Donc,

l'enroulement sera d'autant plus important que le coefficient d'adhérence est faible.

Une poulie en forme de gorge permettra de transmettre un couple plus important pour un même nombre de tours d'enroulement du câble.

### Question 47

À l'aide de la question précédente, déterminer l'enroulement nécessaire pour la transmission de l'axe 6.

Soit des équations (1) et (7) on en déduit :

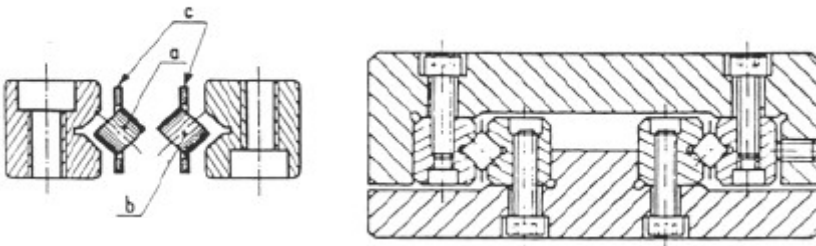
$$\alpha = \frac{1}{0,2} \ln \frac{335}{35} ; \text{ soit : } \alpha = 11,3 \text{ rd}$$

Le câble du cabestan est enroulé sur deux tours de la poulie

### Question 48

Décrire une solution constructive en indiquant les composants utilisés pour assurer la fonction de guidage, et la démarche de dimensionnement qu'il faudrait appliquer. Justifier vos choix.

La liaison glissière peut être envisagée par des guidages bilatéraux utilisant des rouleaux à cage croisés avec deux rails en V creux.



Intérêt :

- mêmes principes de réglages du jeu que pour les guidages lisses ;
- suppression du glissement ;
- diminuer le frottement entre les surfaces de contact - moins d'usure.

Démarche de dimensionnement :

- en statique :  $p_{max} < p_{admissible}$  ;
- en dynamique : pas nécessaire au regard des faibles vitesses.

### Question 49

La maquette numérique complète du système est disponible. On se focalise ici sur les déformations de l'élément support (S), qui comprend les deux bras (Erreur ! Source du renvoi introuvable. et Erreur ! Source du renvoi introuvable.), lors du fonctionnement du système robotique. Quelle démarche d'analyse adopter pour étudier avec des outils numériques les déformations de cette pièce ? Préciser les outils numériques qu'il serait intéressant d'utiliser, les informations qu'ils permettraient d'extraire, et l'ordonnancement qu'il faudrait adopter pour pouvoir conclure sur le comportement sous charge de l'élément lors du fonctionnement du robot.

La maquette numérique sera disponible dans un logiciel de CAO, avec lequel les propriétés matériaux ont été définies.

Un logiciel de simulation de dynamique de solides rigides va permettre dans un premier temps à partir de cette maquette numérique d'analyser le chargement mécanique auquel est soumis l'élément support. On pourra alors discrétiser l'espace de travail pour identifier la situation la plus critique. Dès lors, on pourra exploiter un logiciel de simulation de type EF pour évaluer dans la situation identifiée les déformations de la pièce.

Ces outils seront indépendants ou partie intégrante d'un même logiciel comme c'est souvent le cas aujourd'hui.

### Question 50

L'étude des déformations des différents éléments du système peut passer par l'emploi de logiciels de simulation par méthode des éléments finis. Préciser la chronologie des étapes de l'analyse qui doit être respectée avec ce type d'outil. Pour la pièce support (S), préciser et commenter les choix qu'il faudrait faire en ce qui concerne la modélisation des conditions aux limites, du chargement, du maillage.

*Chronologie d'une analyse par éléments finis.*

Pièce réelle sous sollicitation par analyse structurelle générative :

- a – modélisation géométrique ;
- b – maillage de la pièce ;
- c – modélisation des liaisons ;
- d – modélisation des chargements ;
- e – lancement du calcul ;
- f – analyse des résultats (contraintes, déformations, calculs des erreurs).

*Pour le support S*

**La géométrie** et le chargement admettent deux plans de symétrie, il est donc possible de travailler sur ¼ support S :

- exécuter une coupe de la pièce support S par rapport aux plans de symétrie ;
- donner un matériau à la pièce support S.

**Le choix du maillage** tient compte :

- du Type Tétraèdres Octree Linéaire ;
- de sa taille ; c'est la longueur maximale pour les arêtes du tétraèdre. Elle est proportionnée à la plus petite dimension du support S (EX : 5 mm) ;
- de la flèche ; c'est la distance maximale entre une arête du tétraèdre et la géométrie : (choisir : 0,5 mm).

**Modélisation des liaisons (analyse du DT11) :**

- l'étude se réduit à un problème plan ;
- le support S est supposé encastré au centre de l'arc AB ;
- il est sollicité par une charge ponctuelle (représentant le poids de la sonde) appliquée au centre de la corde AB.

### Question 51

Quel critère mettre en place pour valider le choix d'un matériau à partir des résultats fournis dans le document DT11? À partir de l'observation du champ de déplacements, quelle(s) information(s) est-il possible d'extraire concernant l'erreur de positionnement de la pièce. Comment en déduire l'erreur de positionnement du point cible sur le cerveau (Figure 5).

Critère pour valider le choix d'un matériau :

$$\sigma_{Von Mises} < R_{pe} \text{ soit à partir de la lecture du doc DT11 : } R_{pe} > 1,42 \text{ e}+006 \text{ N.m}^{-2}$$

**Erreur de positionnement de la sonde :**

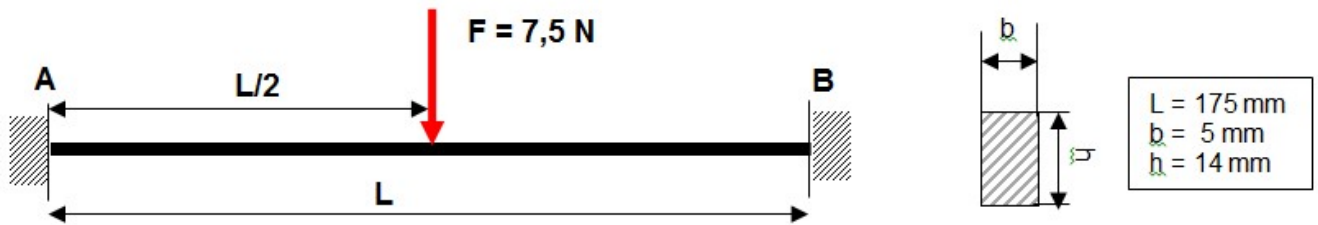
La sonde doit être positionnée pour minimiser la distance entre le point à traiter sur le cerveau et le point de contact sur le crâne. La déformation du support S sous sollicitations entraîne une erreur possible maximale de 0,37 mm (déformation maximale enregistrée au centre de la corde AB de la pièce support S).

Remarque : La déformation sous charges de la pièce S support de sonde est due principalement à la déformation de la corde AB dont le comportement mécanique peut être comparé à une lame de ressort de flexion.

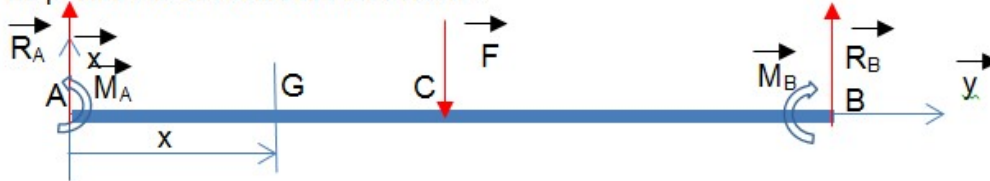
### Question 52

Déterminer dans ce cas simplifié, la flèche maximale de la poutre AB, la contrainte maximale dans cette poutre, et exprimer la condition de résistance du support (S) simplifié.





La poutre AB est sollicitée en flexion :



Le problème est plan et symétrique :  $R_A = R_B = \frac{F}{2}$

$$\|M_A\| = \|M_B\|$$

Le problème est hyperstatique d'ordre 1.

Isolons le tronçon AG :

Soit l'équation du moment de flexion en G en projection sur l'axe  $\bar{z}$  :

$$Mf = M_A - x.R_A = M_A - x \frac{F}{2} \quad \text{et} \quad EI_{Gz} \bar{y} = \frac{F}{2} x - M_A \quad ; \quad EI_{Gz} \bar{y} = \frac{F}{4} x^2 - M_A x + C1$$

Conditions aux limites :  $x=0 \quad \bar{y} = 0$  donc  $C1 = 0$  ;

$$\text{Pour } x = \frac{L}{2} ; \quad \bar{y} = 0 = \frac{F L^2}{4 \cdot 4} - M_A \frac{L}{2} \quad \text{soit : } M_A = \frac{FL}{8}$$

Équation de la déformée :

$$EI_{Gz} y = \frac{F}{12} x^3 - \frac{M_A}{2} x^2 + C2 \quad \text{conditions aux limites : } x = 0 \quad y = 0 \quad C2 = 0 \quad EI_{Gz} y = \frac{F}{12} x^3 - \frac{FL}{16} x^2 \quad \text{soit :}$$

$$y_{\max i} = \frac{-1}{192} \frac{FL^3}{EI_{Gz}}$$

La contrainte maximale dans la poutre s'exprime par :

$$\sigma_{\max i} = \frac{Mf_{\max i}}{IG_z} \quad \text{avec} \quad \frac{IG_z}{h} = b \frac{h^2}{6} \quad \text{et} \quad Mf_{\max i} = \frac{FL}{8} \quad \text{soit : } \sigma_{\max i} = \frac{3FL}{4bh^2} = 1 \text{ N.mm}^{-2} = 1 \text{ MPa}$$

Condition de résistance : la contrainte maximale doit rester inférieure ou égale à la contrainte admissible  $Rpe$ .

$\sigma_{\max i} \leq Rpe$ , donc  $Rpe$  doit être supérieure ou égale à 1 MPa.

### Question 53

Exprimer pour ce cas simplifié, en tenant compte des résultats précédents, le coefficient de raideur ( $k$ ) de ce support. En déduire un indice de performance  $M = f(E, \rho, k, \dots)$  répondant à l'objectif 2, pour lequel  $E$  représente le module d'Young,  $\rho$  la masse volumique et  $k$  la raideur.

La pièce support S dans ce cas simplifié peut être assimilée à une lame de ressort encastrée à ses extrémités telle que  $F = kf$  avec  $k$  le coefficient de raideur de la lame AB et  $f$  sa flèche sous une sollicitation  $F$ .

La rigidité en flexion peut s'exprimer par  $k = \frac{F}{y_{\max i}}$  avec  $y_{\max i} = \frac{FL^3}{16Eb^3}$ . Soit  $k = \frac{16Ebh^3}{L^3}$

### Indice de performance répondant à l'objectif 2 :

Objectif 2 : Conserver la légèreté du système en gardant une grande rigidité.

Pour répondre à l'objectif 2, nous devons minimiser la masse  $m$  de la pièce support de sonde S en conservant sa rigidité  $k$ .

Soit minimiser la masse  $m = bhL\rho$ .

Introduisons  $k$  dans l'écriture de  $m$  :

$$m = bL \sqrt[2]{\frac{k}{16b}}$$

$$\frac{\rho}{\sqrt[3]{E}}$$

**Objectif :** Pour répondre à l'objectif 2, nous devons minimiser ce terme correspondant à la variable libre.

**Contrainte :** Pour une géométrie et une rigidité spécifiées ce terme est constant.

L'indice de performance peut alors s'écrire :  $M = \frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}}$ .

#### Question 54

Compte tenu de l'objectif 1, calculer la valeur de la limite élastique minimale. Représenter sur la carte d'Ashby (Limite élastique / matériaux) du document DR6 le champ des matériaux possibles.

Pour un coefficient de sécurité de 2 retenu pour l'objectif 1 nous prendrons :

$$Re_{\min} \geq 2Rpe \text{ soit } 2 \text{ MPa}$$



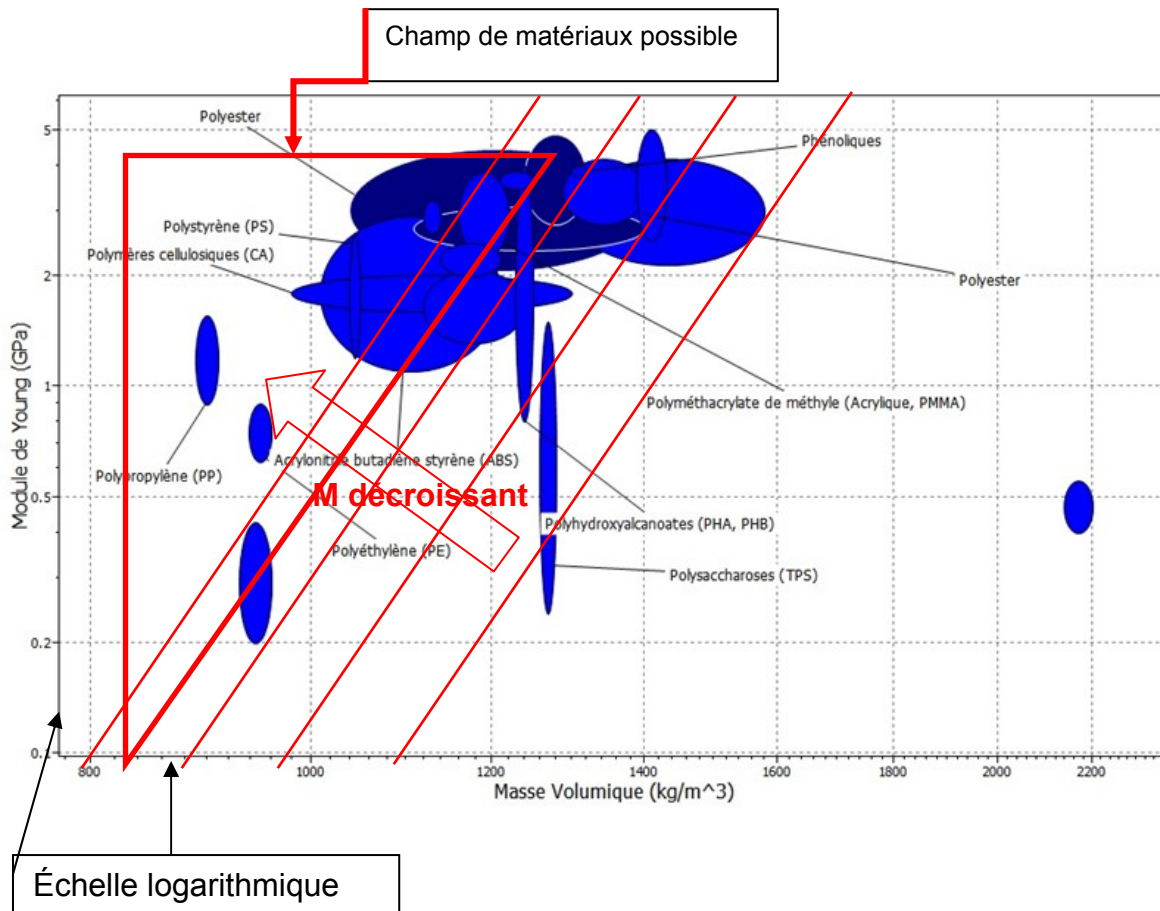
#### Question 55

Après avoir tracé sur la carte à bulles du document DR7 l'indice de performance  $M=f(E, \rho)$ , proposer une exploitation de cet indice. En déduire un champ de matériaux possibles répondant aux objectifs 1 et 2. Identifier au moins deux matériaux situés dans la zone de choix.

Il faut choisir un matériau ayant le plus petit rapport  $\frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}}$

$$E = \frac{\rho}{M^3}, \text{ en exprimant } \text{Log } E = 3 \text{ Log } \rho - 3 \text{ Log } M$$

Traçons les droites  $M$  de pente 3 sur le graphe  $(\rho, E)$



Les deux matériaux - Polypropylène (PP) et Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) répondent aux objectifs 1 et 2 de l'étude.

#### Question 56

Compte tenu de l'objectif 3, quel(s) procédé(s) d'obtention du support (S) proposeriez-vous ? Justifiez votre réponse.

La pièce support de sonde S n'est produite qu'à 50 exemplaires par an, ce petit nombre nous permet de la produire par usinage. Cependant, sa forme complexe nous impose un procédé par moulage par injection.

#### Question 57

En vous aidant de la base de données des matériaux (Document DT10) quel matériau répondrait d'une façon optimale à l'ensemble des 5 objectifs fonctionnels retenus ?

Tableau comparatif des matériaux au regard des 5 objectifs de l'étude.

Matériau	Objectif 1 & 2 M minimal	Objectif 3 Moulé et usinable	Objectif 4 Minimiser l'empreinte carbone Eco conception	Objectif 5 Limiter l'influence du champ magnétique.
Phénoliques	X	XXX	X	XXX
Polyester	X	XX	X	
Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)	XXX	XX	XX	XX
Polypropylène (PP)	XX	XX	XXX	XX

L'ABS répond le mieux aux 5 objectifs de l'étude.

### Question 58

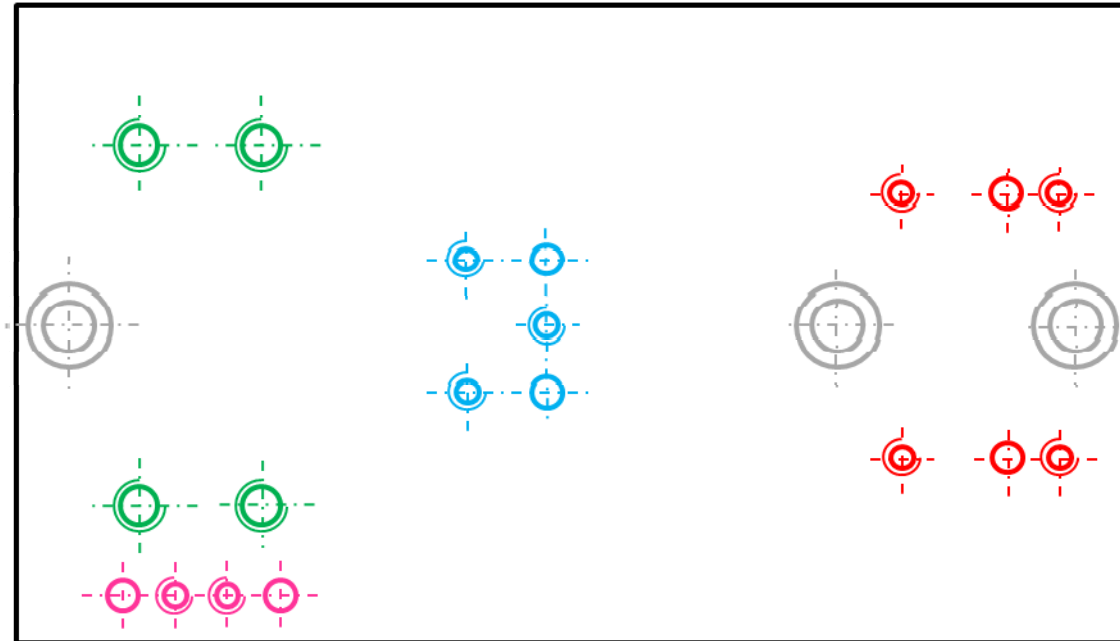
**Proposer, en 10 lignes au maximum, une brève note technique présentant le résultat de votre analyse et de votre conception résumant le travail que vous avez mené et en quoi le système répond au cahier des charges initial.**

Le dispositif proposé semble posséder les caractéristiques essentielles à un tel système en contact avec l'humain :

- l'espace de travail de la sonde est compatible avec le besoin. En d'autres termes, il est possible de traiter correctement tout point du cortex cérébral. Ceci est possible tout en restreignant l'espace d'évolution de la sonde. L'architecture retenue permet en effet de limiter de manière assez simple l'espace de travail pour éviter que la sonde ne touche une partie non désirée de la tête du patient ;
- l'architecture permet de recourir à un asservissement en effort sur un seul axe de déplacement, et ce dernier possède les caractéristiques souhaitées ;
- les solutions techniques retenues semblent globalement pertinentes. Si la précision globale de positionnement n'a pas été étudiée, des solutions constructives pour améliorer la rigidité du bras porte-sonde ont été identifiées. La version étudiée du dispositif montre par ailleurs qu'il est possible d'exploiter des matériaux compatibles avec le champ magnétique créé par la sonde.

# **DOSSIER RÉPONSES**

## Document réponse DR2 : Surfaces fonctionnelles de la platine

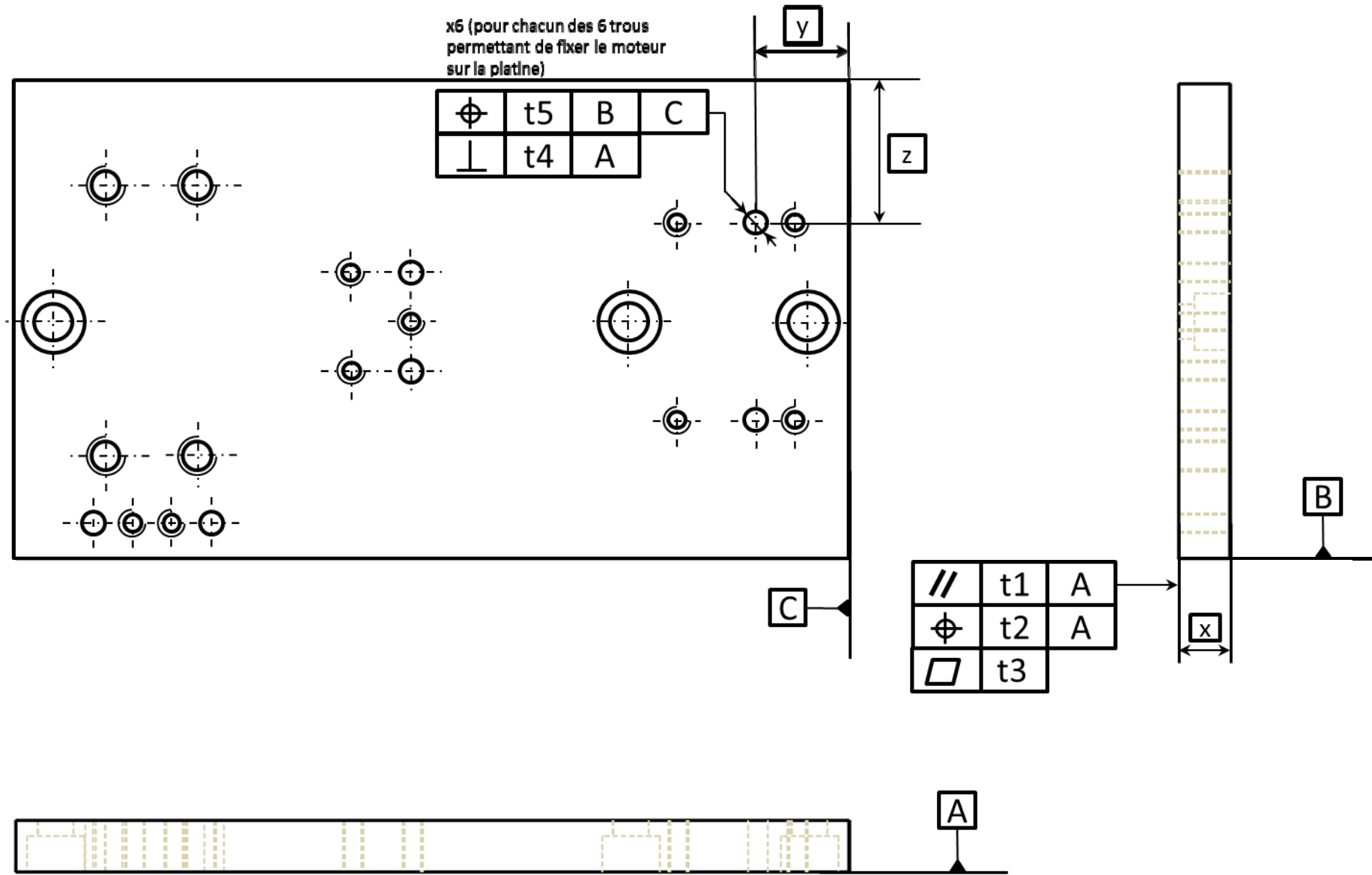


### Code couleur des surfaces fonctionnelles :

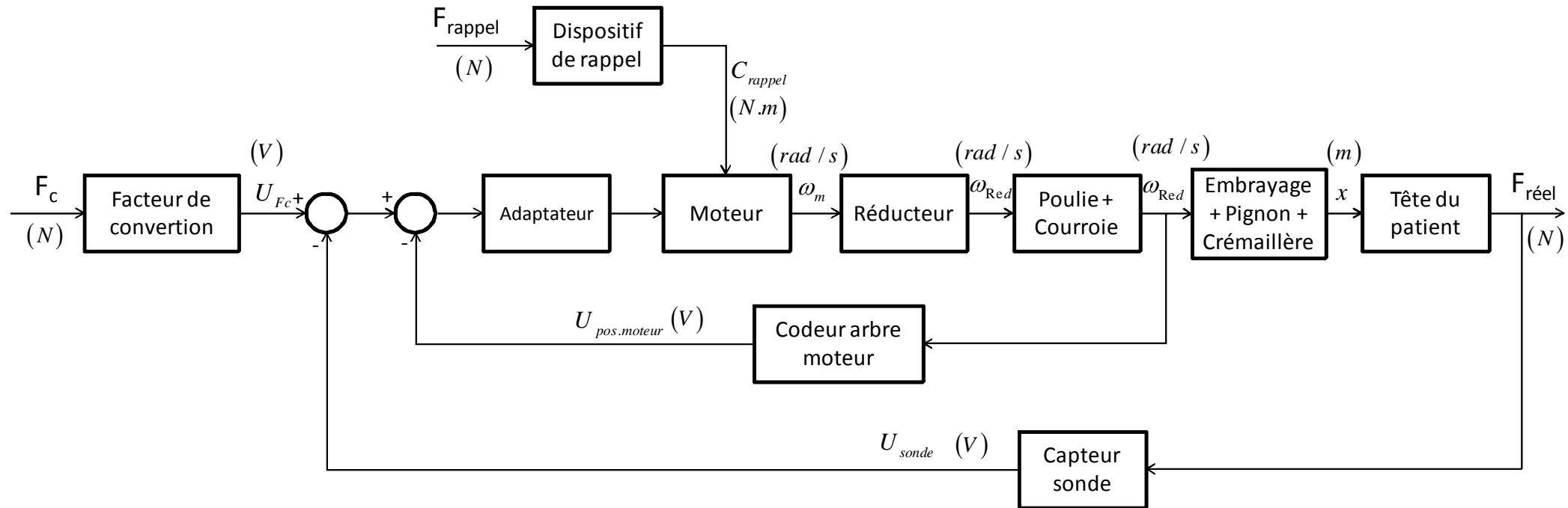
- Gris : platine / bâti
- Rouge : support moteur / platine
- Bleu : support embrayage / platine
- Vert : paller de guidage / platine
- Rose : plaque de positionnement / platine



# Document réponse DR3 : Cotation géométrique de la platine

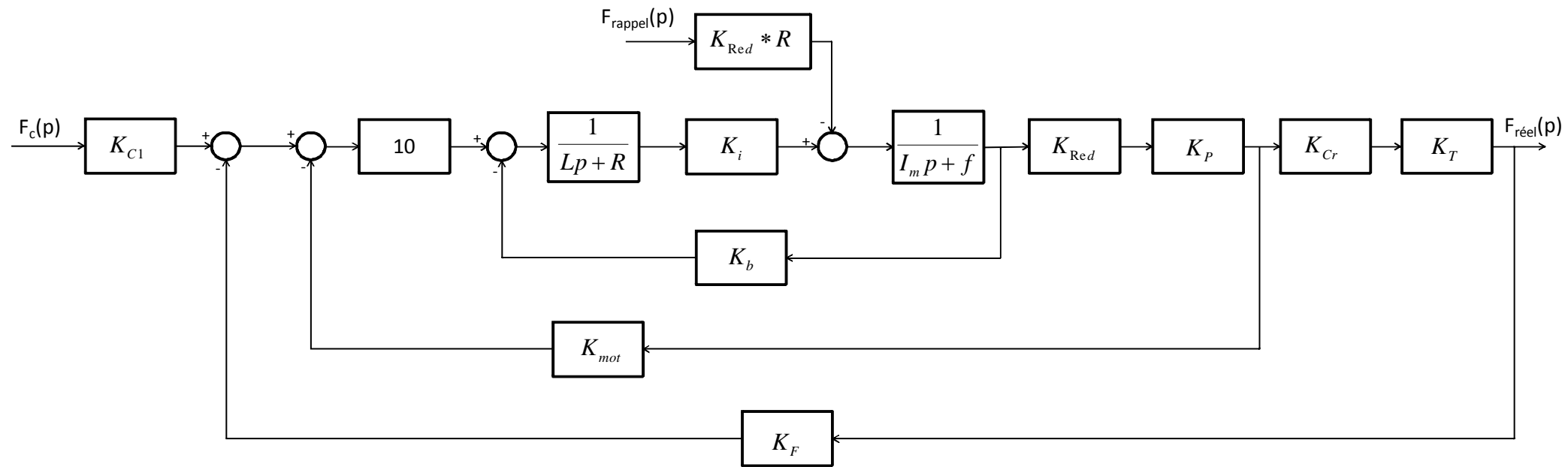


Document Réponse DR4 - Schéma bloc simplifié modélisant le comportement de l'asservissement en effort de l'axe 4





Document Réponse DR5 - Schéma bloc complet modélisant le comportement de l'asservissement en effort de l'axe 4



# Rapport du jury de l'épreuve d'admissibilité d'analyse et de conception des systèmes

## 1. Présentation du sujet

L'épreuve de la session 2012 s'appuie sur la technologie d'un système robotisé de stimulation magnétique transcrânienne (SMT) permettant de traiter des patients atteints de troubles dépressifs graves. La SMT est une technique qui vise à moduler l'activité de certaines zones du cortex cérébral. Pour ce faire, on crée des courants électriques dans ces zones, par émission d'un champ magnétique à proximité. Il s'agit de pouvoir traiter un point sur le cerveau à l'aide d'une sonde avec une précision de l'ordre du millimètre. Le système proposé vise à positionner avec précision la sonde de SMT autour du patient, tout en lui assurant un haut niveau de sécurité ainsi qu'au praticien supervisant le déroulement de la séance.

L'étude proposée est déclinée en cinq parties qui visent d'une part, à valider des performances spécifiées dans le cahier des charges et les réponses au besoin décrit ci-dessus par l'étude des solutions techniques adoptées par le constructeur et d'autre part, à confronter les solutions techniques intégrées au système à des solutions alternatives, et critiquer les solutions retenues par comparaison.

En particulier sont abordés :

- l'assurance de pouvoir accéder à toute la zone de traitement sur la tête du patient (Parties 1.1, 1.2 et 1.3) ;
- le respect de la sécurité du patient (Parties 1.4, 3.1 et 4.2) ;
- le respect des performances cinématiques et dynamiques nécessaires au déplacement de la sonde (Parties 2.1, 2.2, 4.1 et 5.1) ;
- la précision du système (Parties 3.2 et 5.2) ;
- la compatibilité du dispositif avec le champ magnétique (Partie 5.3).

La première partie permet aux candidats de valider la cinématique retenue. Il s'agit d'une part de valider la décomposition du mouvement de la sonde par rapport au patient, puis de valider l'architecture du système robotique ; d'autre part, sont mis en évidence l'impact des variations de morphologie des patients sur le dimensionnement du système robotique, et l'importance du comportement cinématique pour la commande du système robotique.

La deuxième partie permet de valider les solutions adoptées pour le premier axe de déplacement du système. Le candidat est conduit à faire le choix de la solution de transformation de mouvement en la confrontant à une solution alternative, puis à valider le groupe motoréducteur en vérifiant que le couple moteur permet l'obtention de l'équilibre statique et qu'il délivre une accélération au coulisseau suffisante pour répondre au cahier des charges. Enfin, le candidat doit mettre en évidence les contraintes géométriques générées par l'assemblage (motoréducteur, embrayage et palier de guidage de la vis à billes) et vérifier la faisabilité de celui-ci. Ces contraintes de spécifications géométriques sont à exprimer par un codage normalisé de cotation sans valeur numérique des tolérances.

La troisième partie s'intéresse aux solutions adoptées dans la conception du second axe de déplacement du système robotisé. Il s'agit de valider le choix du frein et du réducteur par rapport au comportement attendu dans le cahier des charges pour assurer la sécurité du patient, et d'évaluer les erreurs de positionnement introduites par les flexibilités du réducteur et du bras pour déterminer le respect de la précision de positionnement spécifiée de la sonde.

La quatrième partie a pour but de valider les solutions adoptées pour le quatrième axe de déplacement du système robotisé. Il est demandé au candidat de justifier le choix de la solution de

transformation de mouvement permettant la translation du poignet porte-sonde en la confrontant à deux solutions alternatives qu'ils doivent définir et représenter à l'aide de schémas cinématiques.

Une deuxième étude permettra de valider le comportement de l'asservissement de l'axe lors de sa commande pour réguler l'effort de contact de la sonde sur la tête du patient. Il est demandé au candidat de compléter le schéma bloc illustrant le comportement du système, de préciser si la rapidité du système est suffisante, de proposer un correcteur pour répondre au cahier des charges, et de vérifier que l'asservissement en effort n'admet pas de dépassement.

Enfin la cinquième partie a pour but de valider les solutions adoptées pour le système sphérique du poignet du système robotisé. Le candidat est conduit à décrire sous forme de schémas cinématiques les chaînes d'actions mettant en mouvement le poignet. Il lui est demandé d'exprimer le couple transmissible sans glissement par le biais du dispositif de cabestan utilisé, et de commenter l'influence des matériaux sur la géométrie du cabestan.

Afin de statuer sur l'adéquation de la solution en termes de précision, il doit évaluer les erreurs de positionnement introduites par la flexibilité du poignet pour une solution alternative et choisir un couple matériau-procédé pour la solution alternative considérée. Après avoir analysé les résultats d'une étude par éléments finis, à partir d'un modèle d'étude simple de RDM, il est conduit à mettre en évidence un indice de performance du matériau du support de la sonde lui permettant, par l'utilisation de cartes d'Ashby, le choix d'un matériau optimal répondant au cahier des charges.

Pour conclure, il est demandé au candidat, en 10 lignes au maximum, une brève note technique présentant le résultat de son analyse et de sa conception, résumant le travail qu'il a mené et en quoi le système répond au cahier des charges initial.

## **2. Analyse globale des résultats**

Le sujet, relativement long, n'a pas été traité dans sa totalité par une majorité de candidats. Certains n'ont traité que partiellement les cinq parties en choisissant les questions sur lesquelles ils se sentaient le plus à l'aise. Quelques candidats ont montré d'excellentes aptitudes à modéliser et proposer des solutions efficaces en ayant une bonne vision d'ensemble du sujet. Il reste néanmoins quelques candidats mal préparés qui ne maîtrisent pas les éléments de base pour traiter une épreuve de ce type.

## **3. Commentaires sur les réponses apportées**

La première partie « Validation de l'architecture générale du système robotique » comporte quatre études. Les première et deuxième études concernant la validation de la décomposition du mouvement de la sonde par rapport au patient et de l'architecture du système robotique font appel à des connaissances élémentaires de cinématique. Ces premières études ont été très majoritairement traitées par les candidats avec de bons résultats. Le développement scientifique est souvent juste, mais il apparaît très souvent dans les copies un manque d'efficacité dans les représentations spatiales schématiques ; lesquelles sont souvent incompréhensibles. La troisième étude « mise en évidence de l'impact des variations de morphologie des patients sur le dimensionnement du système robotique » a été correctement traitée. Il s'agissait de partir des données fournies dans le tableau 2, du document DT2 et des mouvements explicités en figure 7, pour vérifier si tout patient pouvait être positionné correctement dans le système (gestion de la taille du corps et de la tête du patient). La lecture et le décodage des documents fournis ont été correctement effectués par les candidats. On remarque cependant qu'il est difficile pour certains de formuler d'une manière synthétique le déroulement de leur analyse.

Dans la quatrième étude de cette première partie, l'influence des propriétés cinématiques du mécanisme sur sa commande est analysée. Si le développement scientifique est souvent juste, il apparaît très souvent dans les copies un manque d'analyse des résultats qui induit des réponses à la

question 12 très superficielles, voire incohérentes. Enfin, peu de candidats ont traité la fin de cette première partie qui concernait l'analyse des singularités cinématiques du mécanisme. La notion de singularité qui se traduit, pour le système, par l'incapacité à générer une vitesse dans une direction à l'aide des degrés de liberté pilotés du mécanisme n'a pas été comprise des candidats, lesquels n'ont pas su lier cette notion aux caractéristiques géométriques et cinématiques du mécanisme.

Dans l'ensemble, cette première partie a été traitée par une très grande majorité des candidats. Les résultats sont satisfaisants, mais néanmoins les copies montrent une insuffisance dans la clarté et la rigueur de l'analyse des résultats. Les conclusions cinématiques des quatre études sont incomplètes et conduisent les candidats à formuler des erreurs.

La deuxième partie de cette épreuve comporte trois études conduisant progressivement le candidat à valider les solutions pour le premier axe de déplacement du système de SMT.

Une majorité de candidats a traité les première et troisième études de manière satisfaisante. Cependant, pour la troisième étude, on constate encore très souvent que la définition géométrique par le codage normatif n'est pas maîtrisée ; dans la plupart des cas, on constate une totale absence de méthode. Il est néanmoins indispensable que le futur professeur agrégé de mécanique puisse déterminer les contraintes géométriques par les outils usuels d'analyse.

La deuxième étude a été peu abordée ; quand ce fût le cas, les candidats n'ont que très rarement su déterminer le couple moteur permettant l'obtention de l'équilibre en statique du système de transmission (question 20), et ont mal exploité les résultats de la simulation numérique dynamique (question 21). Les conclusions de cette analyse sont souvent confuses voire fausses.

La troisième partie de l'épreuve doit conduire le candidat à valider les solutions adoptées pour le deuxième axe de déplacement du système de SMT. Pour la validation du choix du frein et du moto-réducteur, les correcteurs remarquent que très peu de candidats sont capables de représenter sous forme de schémas une solution technologique. Ceux-ci sont souvent incompréhensibles ; ils ne respectent que très rarement les règles élémentaires de la représentation schématique. De plus, les réponses aux questions 32 et 33 relatives à l'évaluation des erreurs de positionnement n'ont été que trop rarement abordées. Aucune modélisation sérieuse n'a été explicitée pour étudier le comportement sous charge de la glissière à éléments roulants.

La quatrième partie de l'épreuve propose de valider la conception du quatrième axe du système SMT. Les résultats obtenus sont peu satisfaisants. Là encore, on constate une grande insuffisance dans l'expression des représentations schématiques et le peu d'imagination des candidats pour concevoir des solutions technologiques pouvant être utilisées pour remplir la fonction technique FT11.

Concernant l'analyse de la régulation de l'effort de contact de la sonde sur la tête du patient les correcteurs constatent des résultats médiocres, voire très mauvais. Le schéma bloc illustrant le comportement du système est souvent incomplet voire totalement faux. Quant à celui relatif à la modélisation du moteur électrique Maxon F2140 rares sont les candidats y ayant répondu. De même rares sont ceux qui ont répondu correctement à la question 39 qui permettait de préciser l'inertie équivalente de l'ensemble des éléments ramenée à l'axe moteur, entraînant de fait une impossibilité de répondre à la question 40. La question classique relative au calcul d'une correction proportionnelle a été correctement abordée.

La cinquième partie de l'épreuve propose de valider les solutions adoptées pour le poignet du système robotique. Elle avait pour objectifs l'analyse du comportement mécanique du support de la sonde ainsi que le choix argumenté d'un matériau constitutif de celui-ci.

Peu de candidats ont abordé cette 5<sup>e</sup> partie du sujet. Certains candidats ont répondu de manière satisfaisante à la plupart des questions, au demeurant classiques pour un grand nombre d'entre-elles. En revanche on peut s'étonner des difficultés à résoudre un problème plan de RDM.

De même, trop peu de candidats ont traité les questions relatives au choix d'un matériau, et peu ont su exploiter les cartes d'Ashby, ce que l'on peut regretter.

## **Conseils aux candidats**

### **Partie 1**

L'investigation du point de vue cinématique a été bien menée par la plupart des candidats ; en revanche, certains, montrent des difficultés à exprimer les résultats de leur analyse. Il est conseillé aux candidats de bien lire le questionnement, de représenter lisiblement les schémas respectant les normes nécessaires au développement de l'étude et de s'assurer de la justesse des développements mathématiques.

### **Partie 2**

Le jury rappelle aux candidats, qu'ils doivent impérativement porter du soin à leur représentation schématique, sous peine de ne pas être compris.

Une analyse comparative de solutions constructives doit nécessairement déboucher sur une conclusion.

Afin de spécifier géométriquement des composants, il est indispensable que le futur professeur agrégé de mécanique puisse déterminer des contraintes géométriques par les outils usuels d'analyse.

### **Partie 3**

Compte-tenu des résultats obtenus sur l'ensemble du questionnement de cette troisième partie, il apparaît qu'une grande majorité des candidats devrait approfondir les savoirs technologiques associés à la conception mécanique et leurs interactions. Ces savoirs portent sur les démarches de conception, la proposition d'architecture raisonnée en passant par leur dimensionnement (approches cinématique, dynamique et RDM).

### **Partie 4**

Afin d'aborder la modélisation des comportements des systèmes asservis ou régulés, les candidats doivent se former à l'écriture de schémas blocs. Ils doivent *a minima* être capables de modéliser un moteur électrique.

### **Partie 5**

La démarche d'analyse par éléments finis doit être comprise des candidats qui auront à exploiter les résultats graphiques de celle-ci.

Les candidats doivent être capables de déterminer et d'utiliser d'un indice de performance afin de conduire une optimisation dans le choix d'un matériau d'une solution constructive à l'aide des cartes d'Ashby.

## **4. Conclusion**

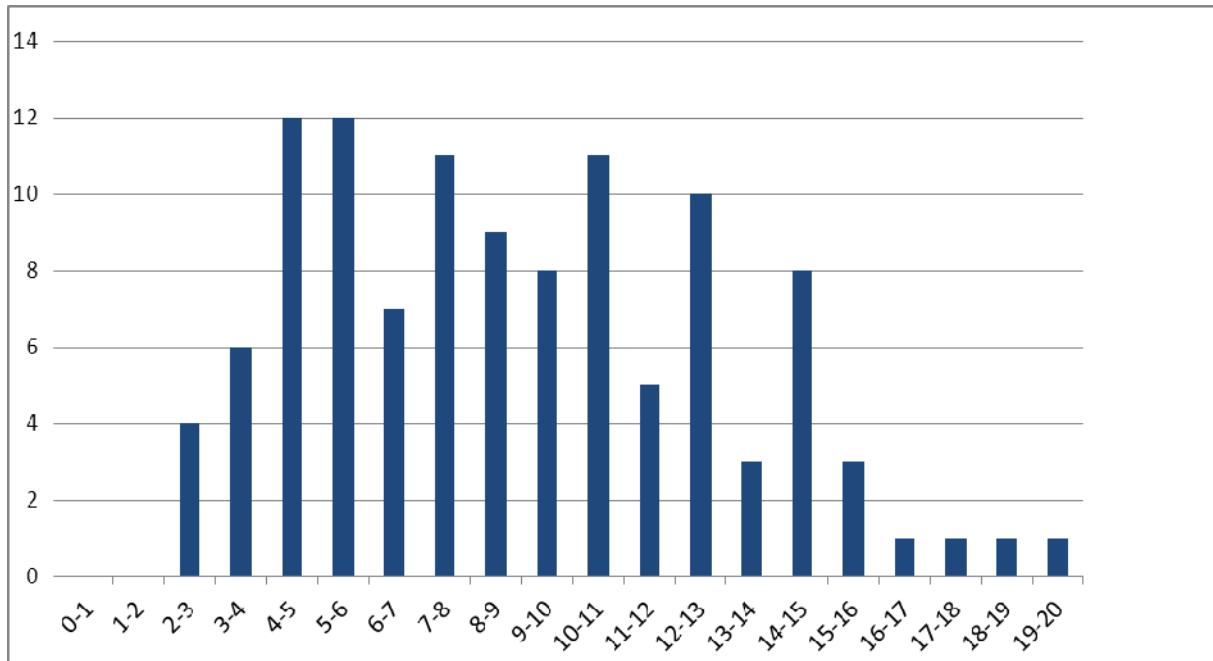
Même si le sujet était long et relativement large dans l'éventail des compétences sollicitées, quelques candidats se sont montrés très à l'aise avec un très bon taux de réussite. Au-delà du fond, il faut signaler également que, sur la forme, la rédaction de la copie doit être soignée car la compréhension des réponses du candidat en est facilitée et la qualité de communication est exigible dans un concours de recrutement de professeurs. Nous conseillons, comme après chaque session de l'agrégation, une lecture globale du sujet au début de l'épreuve afin d'identifier au mieux les parties pour lesquelles le candidat pense avoir les meilleures chances de réussite.

On ne peut qu'encourager les futurs candidats à lire et relire les différents rapports des jurys de l'agrégation afin de bien comprendre ce qui est attendu dans cette épreuve dont l'évolution se tourne vers une analyse et une conception de systèmes pluri technologiques et ne traite plus uniquement que de leur aspect mécanique.

## 5. Résultats

114 candidats, dont 14 candidats à l'agrégation marocaine, ont composé pour cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 8,9 avec :

- 20 comme meilleure note ;
- 2,5 comme note la plus basse.



**COMMENTAIRES RELATIFS A L'EPREUVE  
ANALYSE ET CONCEPTION DES SYSTEMES  
SESSION 2012**

**STIMULATION MAGNETIQUE TRANSCRANIENNE ROBOTISEE**

**Commentaires généraux**

L'épreuve est structurée selon 5 parties, distinctes et indépendantes, couvrant l'ensemble des champs de la conception mécanique: mécanique du solide, résistance des matériaux, analyse et recherche de solutions constructives, étude de conception, cotation ISO, etc.

L'indépendance des parties permet aux candidats d'exprimer leurs connaissances et d'exercer leurs compétences sans pour autant se retrouver bloqués en raison d'une incapacité à répondre à une question.

Peu de candidats s'astreignent à rédiger leurs réponses et le jury regrette d'une manière générale une orthographe et une maîtrise grammaticale approximatives. Cependant quelques candidats produisent de bonnes copies tant sur la forme que sur le fond.

Les modèles de connaissance associés à des solutions constructives apparaissent insuffisamment maîtrisés, les candidats qui se lancent dans les calculs aboutissent que très rarement.

Enfin, les correcteurs remarquent un manque de rigueur de la part des candidats en réponse à des questions énoncées avec des critères précis.

**Histogramme et statistiques**

73 candidats ont composé lors de cette épreuve.

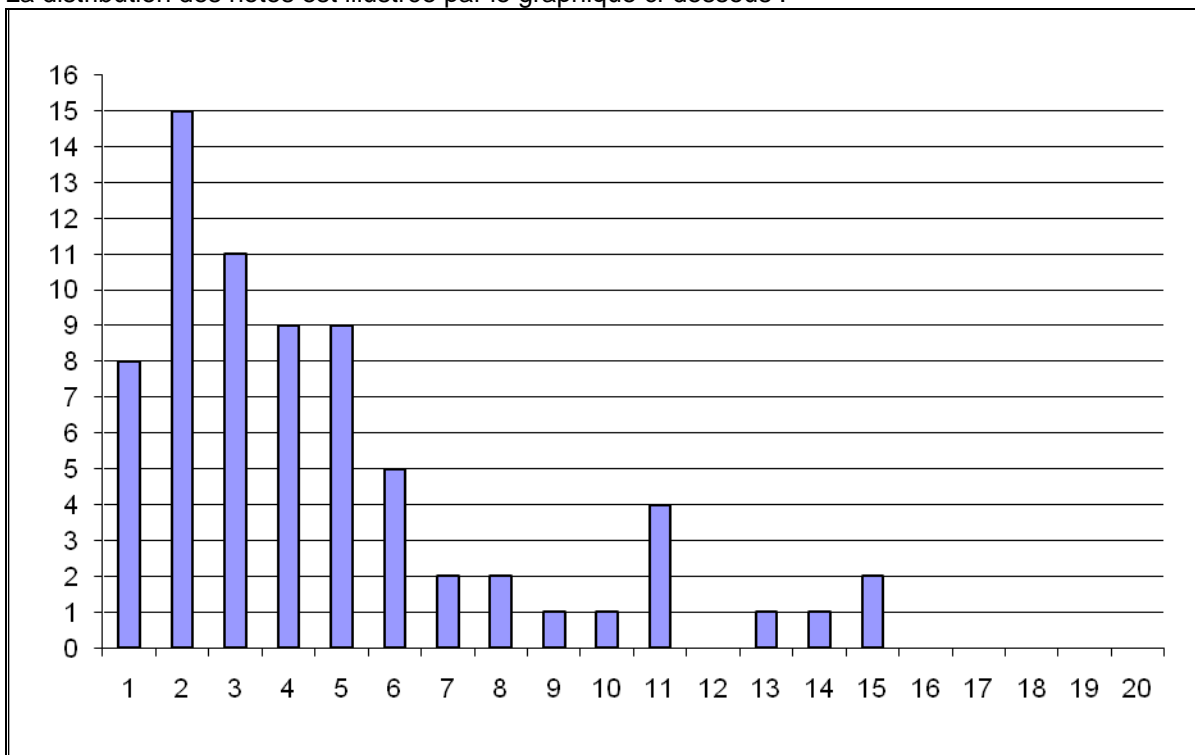
Moyenne : 5,3

Note mini : 1,33

Note maxi : 15,33

Ecart type : 3,5

La distribution des notes est illustrée par le graphique ci-dessous :



## **Commentaires détaillés**

### **Partie 1 : Validation de l'architecture générale du système robotique.**

Cette partie consiste à valider la cinématique retenue selon 4 étapes proposées. Elle est traitée par 95% des candidats ; les résultats obtenus s'établissent à 8,9/20.

Cette partie ne nécessite pas de connaissances de haut niveau mais demande une exploitation de documents techniques et fait appel à la culture technologique des candidats.

Si l'appropriation du sujet s'avère satisfaisante, la maîtrise des outils de communication est parfois insuffisante en termes de schématique simple.

### **Partie 2 : Analyse et conception du premier axe.**

L'objectif est de valider les solutions technologiques adoptées pour le premier axe. Cette partie a été abordée par 70% des candidats qui ont obtenu 4,8/20 en moyenne.

La validation du dimensionnement du groupe moto-réducteur, qui nécessite l'application du Principe Fondamental de la Dynamique, n'est que trop rarement traitée de façon pertinente.

L'écriture des tolérances géométriques relatives à la cotation ISO de la platine est souvent mal maîtrisée.

### **Partie 3 : Analyse et conception du deuxième axe.**

L'objectif est de valider les solutions adoptées pour le deuxième axe en validant le choix du frein et du réducteur puis en évaluant les erreurs de positionnement inhérentes aux solutions adoptées.

75% des candidats se sont intéressés à cette partie et ont obtenu 2,8/20.

La plupart des candidats n'ont pas su représenter correctement, tant en termes de position que d'usage des symboles technologiques, les solutions adoptées par le concepteur. Les réponses à la question 28, concernant le rôle du roulement à billes installé en sortie du moteur, démontrent trop souvent le peu de culture des solutions constructives.

### **Partie 4 : Analyse et conception du quatrième axe.**

La partie s'intéresse à la transformation de mouvement par pignon-crémaillère et à la validation du comportement de l'axe afin de réguler l'effort de contact de la sonde sur la tête du patient.

66% des candidats ont traité cette partie avec pour résultat 3,9/20.

De nouveau, il est fait appel aux compétences des candidats en matière de communication technique par le biais de schémas, très peu d'entre eux ont analysé et décodé l'organisation fonctionnelle de la chaîne d'action et la structure de sa commande.

### **Partie 5 : Analyse et conception du poignet.**

Il s'agit de valider les solutions technologiques adoptées pour le poignet en validant les composants de la chaîne d'action, en évaluant les erreurs de positionnement induites par la flexibilité du poignet et le choix du couple matériau –procédé.

Seuls 45% des candidats ont abordé cette partie et ont obtenu 1,1/20.

L'extrême faiblesse de ce résultat tient au petit nombre de candidats ayant traité cette partie mais également au manque de connaissances en résistance des matériaux et à l'incapacité à choisir une famille de matériaux à partir de cartes Ashby.

**Le corrigé de l'épreuve se trouve dans le rapport de jury de l'agrégation externe de mécanique 2012.**



## SESSION 2012

---

### Concours externe de recrutement de professeurs agrégés

Sections : Génie Mécanique / Mécanique

### Épreuve d'Automatique et d'Informatique Industrielle

Durée : 6 heures

*L'usage des instruments de calcul, en particulier calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique, à fonctionnement autonome, non imprimante - est autorisé conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*Tout document ou autre matériel électronique sont interdits*

*Les candidats peuvent formuler toutes les hypothèses qu'ils jugeront nécessaires pour répondre aux questions posées.*

*Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons de son initiative.*

## Cellule de production agile

### Présentation

La cellule de production agile exploitée dans ce sujet est le fruit d'un partenariat entre différents grands groupes industriels, PME-PMI et Universitaires. Cette plateforme technologique, présentée à la figure 1, permet de matérialiser à l'échelle industrielle les concepts et l'intégration des progrès technologiques permettant de répondre au problème de production flexible où la ligne de production dite « agile » admet une capacité « rapide » de reconfiguration. Ce concept de ligne de production flexible et agile nécessite de prendre en charge la conception du produit et de son moyen de production. Un enjeu important concerne dès lors la traçabilité et la maîtrise dimensionnelle du produit. Cette maîtrise passe par l'optimisation des différents systèmes de productions exploités, ainsi que par la mise en œuvre de moyens de contrôle sur ligne. Le secteur professionnel visé concerne essentiellement le secteur de l'industrie automobile où il existe de fortes différenciations des produits. Le produit utilisé pour cette étude est un carter d'alternateur automobile (figure 2) sur lequel un certain nombre d'opérations d'usinage doivent être réalisées.

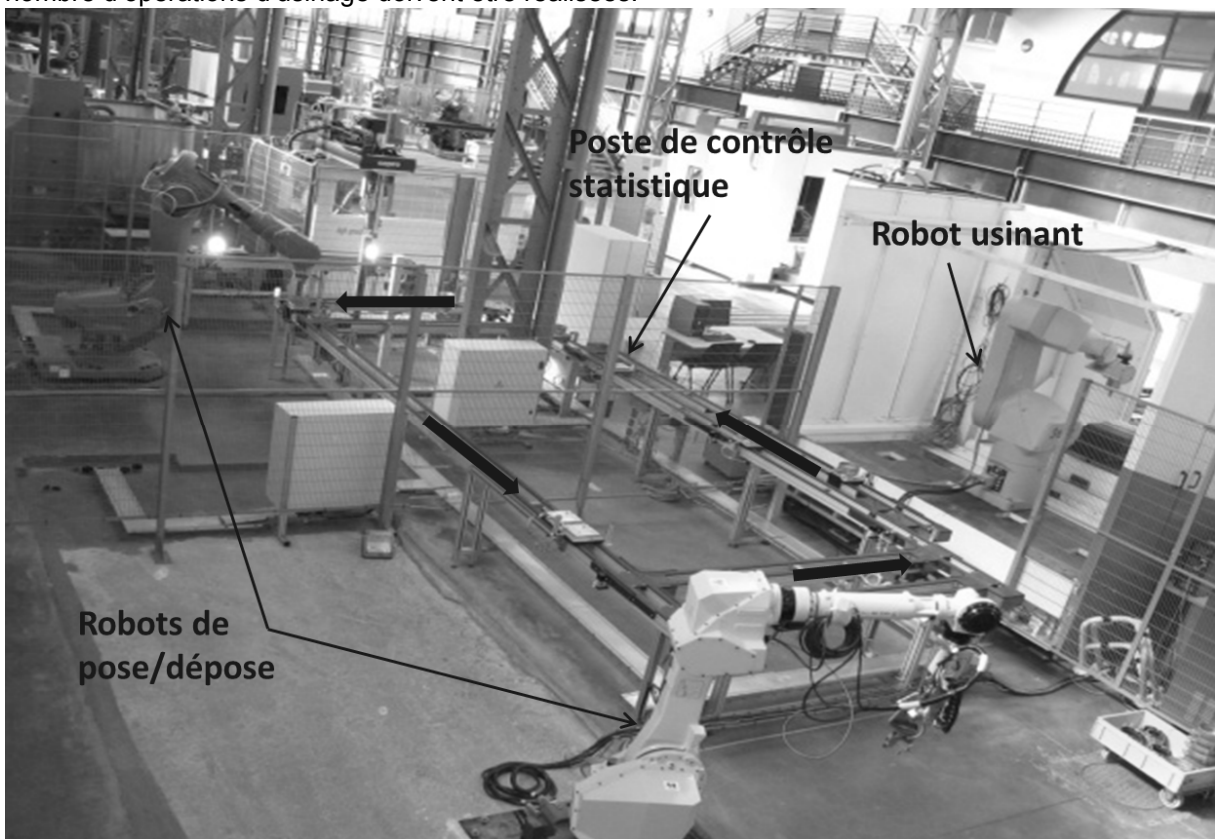


Figure 1 – Cellule de production agile.

La cellule de production agile se décompose en quatre zones (cf. **Document ressource 1**) :

1. la **zone 1** constitue l'entrée de flux physique (pour l'étude des carters bruts de fonderie). Dans cette zone, un robot assisté par vision assure la mise en place des caisses de carters bruts et la dépose des carters sur des palettes équipées de porte-pièce et isolées au poste de chargement.
2. la **zone 2** est constituée de deux postes, le premier poste est conçu pour transformer la matière première (carter brut de fonderie) en un produit fini (carter usiné), et le deuxième permet un contrôle fréquentiel de l'usinage réalisé. L'usinage est

assuré par un robot anthropomorphe 6 axes équipé d'une broche d'usinage à grande vitesse. La figure 3 présente une vue de cette zone.

3. la **zone 3** constitue la sortie du flux physique du convoyeur principal. Les pièces usinées sont déchargée de cette zone vers un convoyeur secondaire (zone 4)
4. la **zone 4** permet le reconditionnement des carters. Un robot de prise/dépose vient placer la pièce sur une palette isolée sur le second convoyeur. La palette est transférée vers un robot cartésien qui assure le reconditionnement.

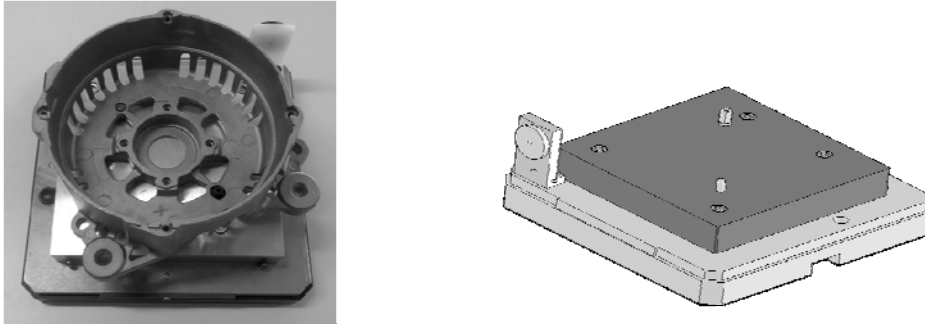


Figure 2 – Carter d'alternateur mis en place sur une palette et vue d'une palette équipée d'une étiquette RFID.

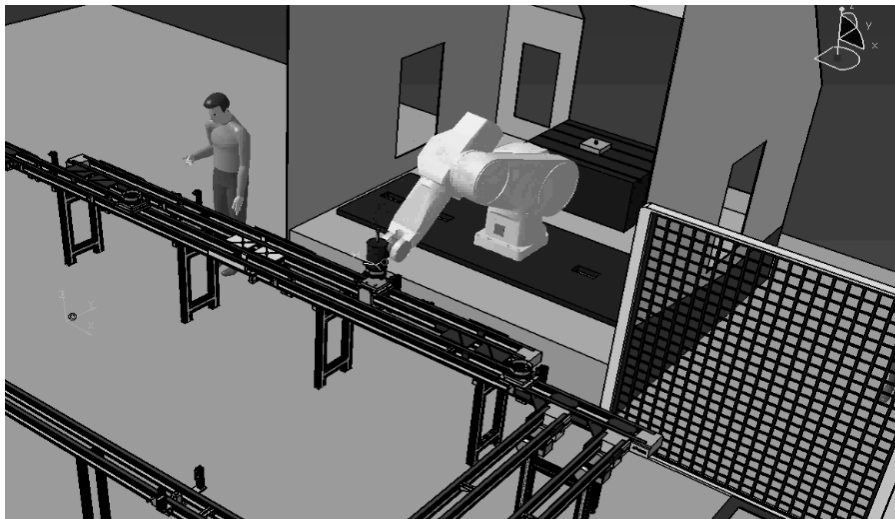


Figure 3 – Situation de la zone 2 (poste d'usinage par robot et poste de contrôle fréquentiel).

### Structure de l'épreuve

L'épreuve comporte trois parties indépendantes :

- **Première partie** : Dans cette partie, nous nous intéressons à la **problématique de la maîtrise dimensionnelle du produit** par la mise en œuvre d'un contrôle fréquentiel sur la zone 2 de la cellule.
- **Deuxième partie** : Cette partie se focalise sur un des moyens de production de la cellule, un robot d'usinage 6 axes. L'objectif consiste ici à **investiguer différentes actions possibles** (optimisation de la compensation de gravité et de certains paramètres de la commande) afin **d'accroître la maîtrise de la précision** des opérations réalisées.
- **Troisième partie** : Cette dernière partie vise à **vérifier le dimensionnement d'un actionneur** entraînant l'axe vertical du robot cartésien (axe potentiellement limitant lors de la phase de reconditionnement).

## Première partie

# Maitrise dimensionnelle du produit : mise en œuvre d'un contrôle fréquentiel sur la zone 2

## 1.1 Gestion du poste d'usinage et des demandes de contrôle

L'étude se situe au niveau de la zone 2 de la cellule de production (cf. Document ressource 2). Les entrées/sorties sont constituées de :

- cinq détecteurs de présence palette nommés *Cpal4*, *Cpal5*, *Cpal6*, *Cpal7* et *Cpal8* ;
- quatre butées d'arrêt de palette, normalement sorties, à commande monostable et nommées *Bar4*, *Bar6*, *Bar7* et *Bar8* ;
- trois aiguillages (commande bistable, normalement aiguillé droit devant), nommé *Aig11* et *Aig12*, *Aig21* et *Aig22*, *Aig31* et *Aig32* (*Aig11-* et *Aig12+* aiguillage vers le poste d'usinage);
- une table d'indexage constituée d'une butée à commande monostable et d'un indexeur à commande bistable nommés respectivement *Bar5* et *Ind2*;
- trois boutons poussoirs pour le poste de contrôle fréquentiel (demande de contrôle, pièce « bonne » et pièce « mauvaise ») ;
- un moteur d'entraînement de la portion de convoyeur associé au poste d'usinage et de contrôle piloté au début du fonctionnement (la gestion des actionneurs des convoyeurs est donc hors étude) ;
- trois postes de lecture/écriture sur les étiquettes RFID liées aux palettes. Un poste en entrée de zone 2, un second au poste d'usinage et un troisième au poste de contrôle fréquentiel.

L'ensemble des entrées/sorties associées à la zone 2 sont rassemblées dans la table 1.

<b>Entrées</b>		<b>Sorties</b>	
Détecteur présence palette	<i>Cpal</i> {i} (i = 4,5,6,7,8)	Rentrer butée d'arrêt	<i>Bar</i> {i} (i = 4,5,6,7,8)
Demande de contrôle fréquentiel	DC	Rentrer butée d'indexage	<i>Ind2-</i>
Pièce contrôlée « bonne »	<i>Pb</i>	Sortir butée d'indexage	<i>Ind2+</i>
Pièce contrôlée « mauvaise »	<i>Pm</i>	Diriger l'aiguillage vers le robot d'usinage	<i>Aig11-</i> et <i>Aig12+</i>
Étiquette palette lue	Lecture validée	Diriger l'aiguillage du convoyeur central vers le poste de contrôle	<i>Aig21-</i> et <i>Aig22+</i>
Étiquette écrite	Écriture effectuée	Diriger l'aiguillage du poste d'usinage vers le convoyeur central	<i>Aig31-</i> et <i>Aig32+</i>
Fin de cycle d'usinage	<i>FcyUsin</i>	Lire étiquette palette	Lire étiquette palette
		Écrire étiquette palette	Écrire
		Démarrer le cycle robot usinage	<i>DcyUsin</i>

Table 1 – Entrées/sorties et mnémoniques associés de la zone 2.

Le scénario associé à la zone 2 est le suivant : une palette se présente en entrée de la zone et son étiquette RFID est lue. Selon qu'un usinage est requis ou non (pièce déjà usinée, absence de pièce sur la palette), la palette est dirigée vers le poste d'usinage par le robot ou continue son trajet sur le convoyeur central. Si une demande de contrôle fréquentiel a été faite par l'opérateur, les pièces usinées passent par le poste de contrôle, sinon elles sont réintroduites en priorité sur le convoyeur central. Lors du contrôle, l'opérateur valide ou non la qualité de la pièce par appui sur le bouton

poussoir correspondant (information écrite sur l'étiquette de la palette). Si la pièce est mauvaise, elle est retirée manuellement de la palette. La figure 4 présente les grafquets d'entrée et de sortie de la zone 2.

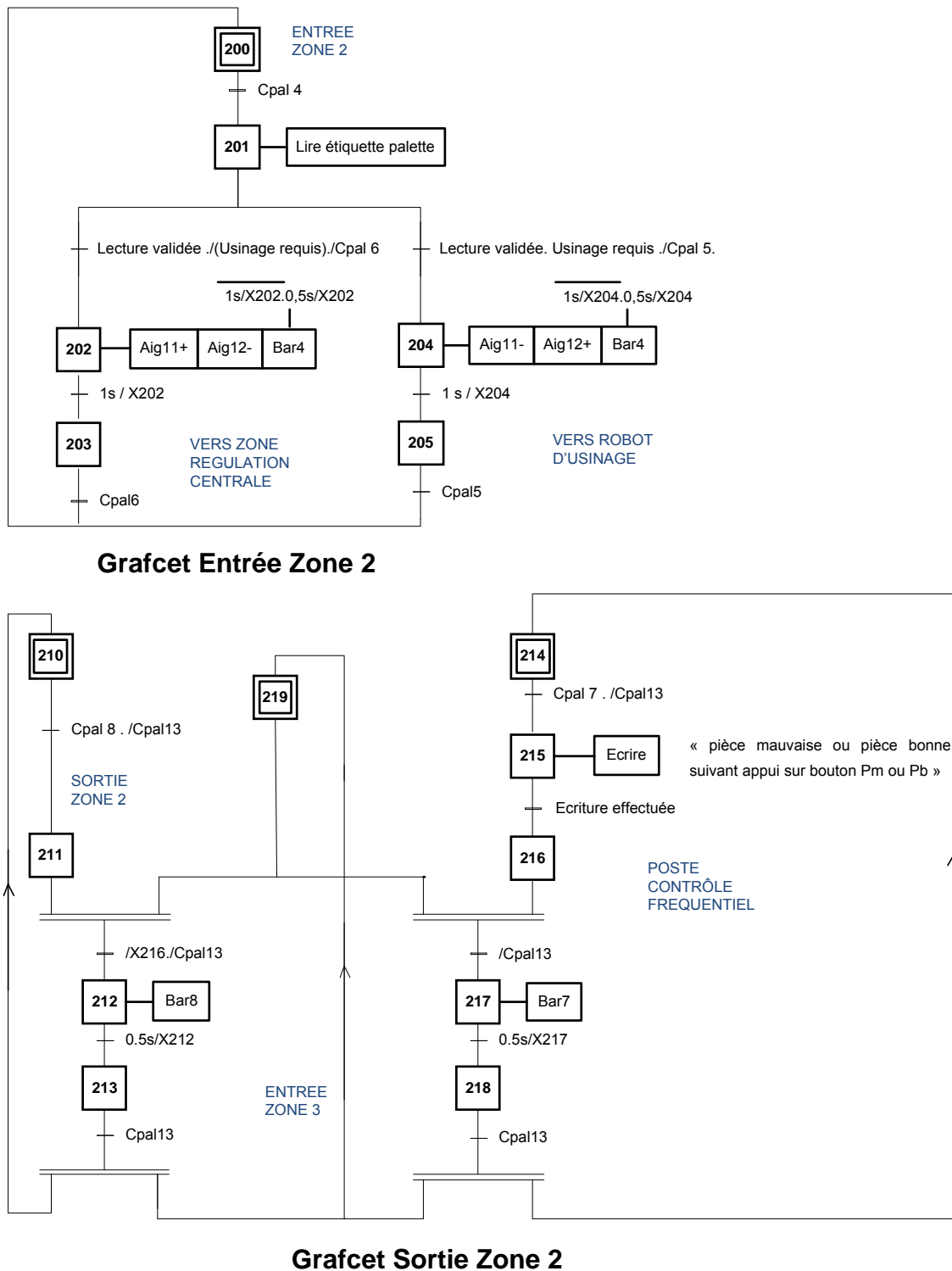


Figure 4 – Grafcet d'entrée et de sortie de la zone 2.

**Question I.1 – Donner la signification de l'expression  $\overline{1s/X202.0,5s/X202}$  utilisée dans le grafcet d'entrée de zone 2. Préciser le rôle de l'étape 219 dans le grafcet de sortie de zone 2 et indiquer quelle gestion de priorité a été mise en œuvre.**

La figure 5 présente une amorce du grafcet décrivant le séquençage des actions associées à la zone médiane (aiguillage ou non vers le poste d'usinage et vers le poste de contrôle) de la zone 2.

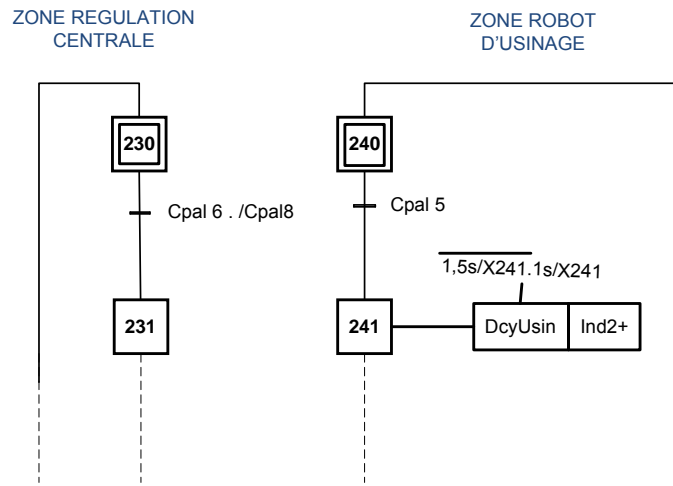


Figure 5 – Grafcet partiel de la zone médiane de la zone 2.

**Question I.2 – Compléter l'amorce de grafcet de la zone médiane afin d'intégrer la gestion du poste d'usinage et des demandes de contrôle. On notera que la priorité est donnée aux palettes sortantes du poste d'usinage.**

## 1.2 Carte de contrôle de la moyenne

En cours de production, on procède périodiquement à un prélèvement d'échantillons de taille  $n$ . On calcule alors la moyenne  $m$  pour une valeur caractéristique de ces  $n$  échantillons (par exemple une dimension fonctionnelle) et on porte le point représentatif de cette valeur sur une carte de contrôle. Le principe de la carte de contrôle, décrit à la figure 6, est le suivant :

- si le point relevé se trouve entre les valeurs  $Ls1$  et  $Ls2$ , on considère que le processus est bien réglé ;
- si le point se trouve entre  $Ls1$  et  $Lc1$  ou entre  $Ls2$  et  $Lc2$ , on procède immédiatement à un autre prélèvement. Si ce second prélèvement confirme le premier, on procède à un réglage immédiat. Si le nouveau point se situe entre  $Ls1$  et  $Ls2$ , on considère que le processus est bien réglé ;
- si le point se trouve au-delà de  $Lc2$  ou au-dessous de  $Lc1$ , on considère que le processus est dérégulé et l'on procède au réglage.

On suppose que la répartition stochastique des valeurs relevées suit la loi normale. Les bornes  $Ls1$  et  $Ls2$  représentent les limites à  $2\sigma$  (95,4%) de la distribution et  $Lc1$  et  $Lc2$  les limites à  $3\sigma$  (99,7%). Ainsi, si le processus est bien réglé, il y aura une probabilité de 95,4 % pour que la moyenne calculée se trouve entre  $Ls1$  et  $Ls2$ .

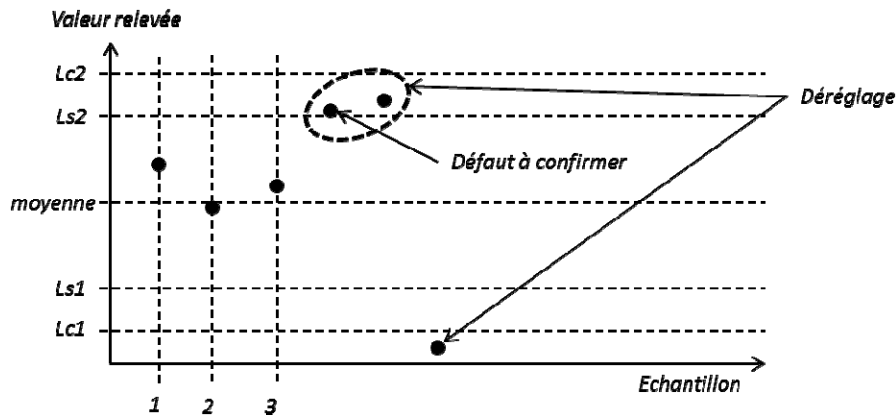


Figure 6 – Exemple d'une carte de contrôle fréquentiel.

**Question I.3 – Donner les probabilités de procéder à un réglage par erreur du processus pour deux valeurs de moyenne calculées. On distinguera le cas où la moyenne est hors des limites  $Lc1$  et  $Lc2$  et le cas où la moyenne calculée se situe entre les bornes  $Ls$  et  $Lc$ .**

### 1.3 Contrôle fréquentiel

Une cote fonctionnelle importante d'une valeur  $\varnothing 106 \pm 0,1$  permet la mise en position du bobinage dans l'alésage du carter d'alternateur. De nombreux prélèvements effectués à la sortie du robot usineur ont permis de déterminer la moyenne  $m = 106$  de la production ainsi que son écart type  $\sigma = 0,04$  dans des conditions normales d'utilisation. Chaque échantillon du contrôle fréquentiel comporte  $n = 5$  mesures successives  $x_1, x_2, \dots, x_5$  de la dimension suivie.

Le conducteur de ligne ayant la responsabilité de plusieurs équipements, une assistance par la partie commande est donc nécessaire lors d'un contrôle fréquentiel afin de mémoriser les mesures d'un échantillon et calculer la moyenne (afficher sur l'interface de supervision). Le grafset de conduite du contrôle fréquentiel est donnée à la figure 7 et l'organigramme du contrôle fréquentiel est présenté à la figure 8.

**Question I.4 – Préciser la condition de lancement de l'organigramme de contrôle fréquentiel (figure 8).**

**Question I.5 – Proposer une méthode et un langage de traduction permettant de calculer la moyenne du lot de pièces contrôlées.**

**Question I.6 – Rédiger dans un langage normalisé (en vous aidant du document ressource 4) le programme permettant d'interpréter la valeur de la moyenne, en respectant l'organigramme et le choix des mnémoniques de la figure 8.**

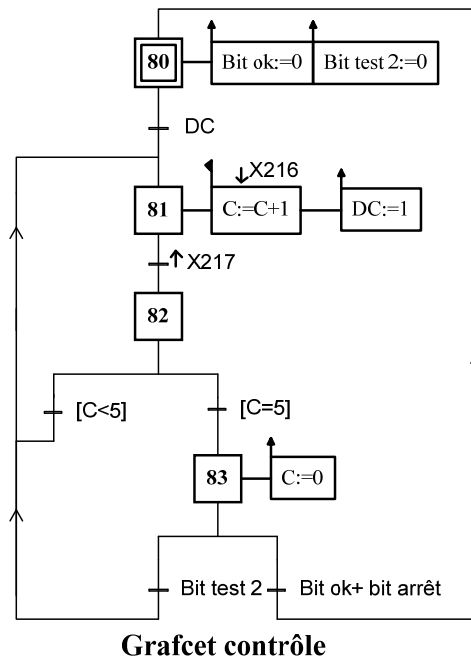


Figure 7 – Grafset de gestion du contrôle fréquentiel de la zone 2.

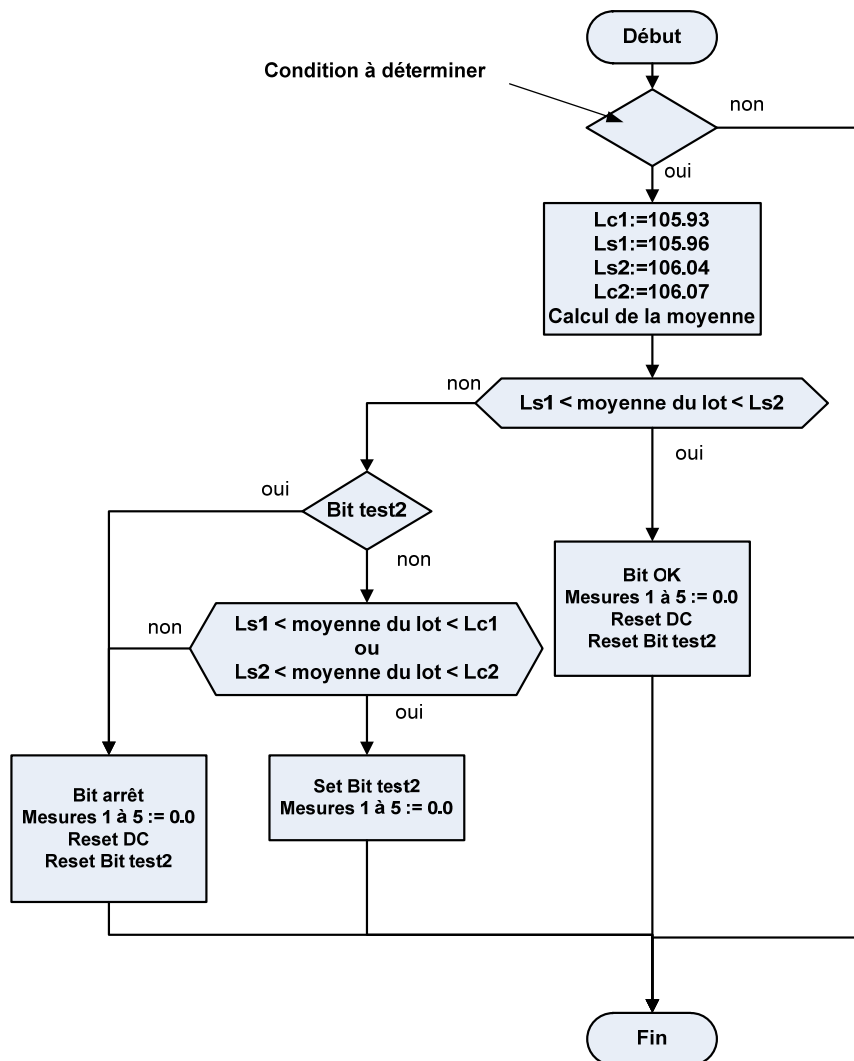


Figure 8 – Organigramme du contrôle fréquentiel de la zone 2.



## Deuxième partie

# Étude du robot d'usinage 6 axes

## II.1 – Modélisation d'un axe du robot

Le robot d'usinage est constitué de six bras liés en série par des articulations rotoïdes. La figure 9 présente le modèle d'étude de ce robot, ainsi que le paramétrage associé. On note  $O_i$  le centre de la liaison entre le solide  $i$  et  $i-1$ ,  $G_i$  et  $m_i$ , respectivement le centre de gravité et la masse du solide  $i$ . L'accélération de la pesanteur est  $-g\bar{z}_0$ . La table 2 rassemble les caractéristiques des solides constituant le modèle de robot.

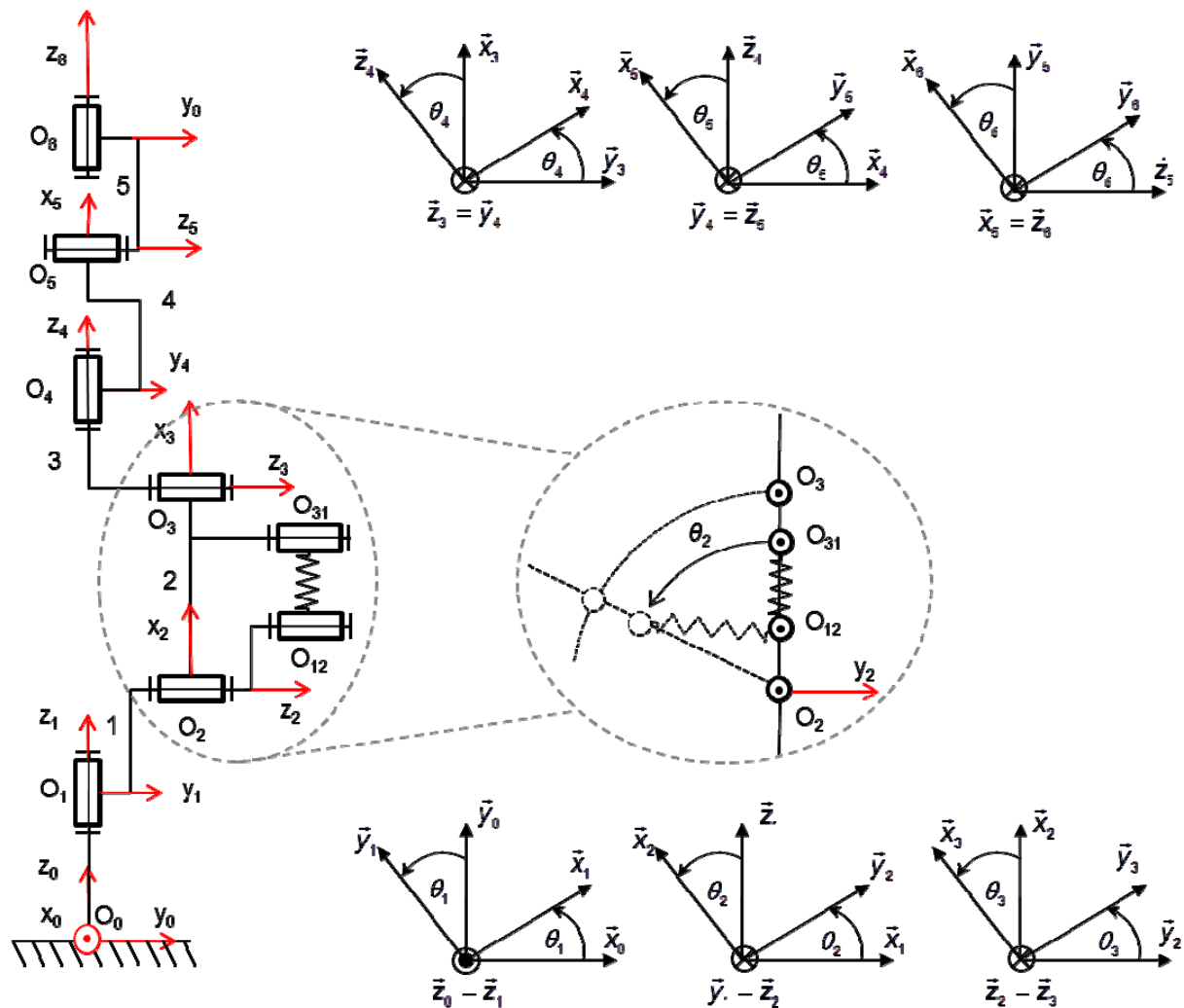


Figure 9 – Géométrie et paramétrage du robot anthropomorphe 6 axes.

$m_1 = 55 \text{ kg}; m_2 = 120 \text{ kg}; m_3 = 150 \text{ kg}; m_4 = 35 \text{ kg}; m_5 = 4 \text{ kg}; m_6 = 0,5 \text{ kg};$
$\overline{O_0O_1} = c_1 \bar{z}_1 (c_1 = 400 \text{ mm}); \overline{O_1O_2} = c_2 \bar{z}_2 (c_2 = 200 \text{ mm}); \overline{O_2O_3} = a_3 \bar{x}_3 (a_3 = 850 \text{ mm});$
$\overline{O_3O_4} = c_4 \bar{z}_4 (c_4 = 180 \text{ mm}); \overline{O_4O_5} = a_5 \bar{x}_5 (a_5 = 550 \text{ mm}); \overline{O_5O_6} = \vec{0};$
$\overline{O_1G_1} = \vec{0}; \overline{O_2G_2} = d_2 \bar{z}_2 (d_2 = 530 \text{ mm}); \overline{O_3G_3} = e_3 \bar{x}_3 (e_3 = 200 \text{ mm});$
$\overline{O_4G_4} = d_4 \bar{z}_4 (d_4 = 400 \text{ mm}); \overline{O_5G_5} = e_5 \bar{x}_5 (e_5 = 100 \text{ mm}); \overline{O_6G_6} = \vec{0}$

Table 2 – Données massiques et géométriques du robot d'usinage.

Ce robot dispose d'un système de compensation de gravité par ressorts travaillant en traction représenté à la figure 10. L'ensemble des ressorts peut être assimilé à une raideur statique linéaire de valeur  $k$  ( $\text{N.m}^{-1}$ ) soumise à une précontrainte notée  $F_p$  (N). La distance  $O_{12}O_{31}$  représente la distance variable entre les points d'attache des ressorts, le point A est confondu avec  $O_{12}$  pour  $\theta_2 = 0$ . L'entraxe  $O_{12}O_2 = AO_2$  est noté  $r$ .

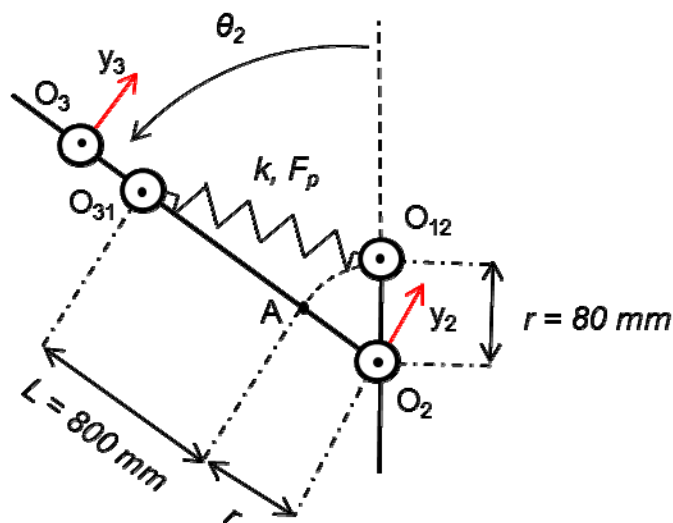


Figure 10 – Géométrie et paramétrage du système de compensation de gravité par ressorts mécaniques.

**Question II.1 - Calculer le couple exercé par les ressorts de compensation de l'axe 2, noté  $C_r$ , en fonction de l'angle  $\theta_2$ ,  $k$ ,  $L$ ,  $r$  et  $F_p$ . En comparant ce couple à celui exercé par la gravité sur l'axe 2, noté  $C_g$ , pour la configuration  $\theta_i = 0$  avec  $i=\{1,3,4,5,6\}$ , en déduire les valeurs de précontrainte et de raideur qui permettent de compenser les effets de la gravité.**

Le système de compensation doit en pratique assurer une compensation moyenne de la gravité pour différentes configurations des axes et différentes charges embarquées. Les valeurs exploitées sont :

$$k = 170 \text{ kN.m}^{-1} \text{ et } F_p = 20 \text{ kN}.$$

**Question II.2 - Calculer la position d'équilibre statique du bras 2 (dans la configuration  $\theta_i = 0$  avec  $i=\{1,3,4,5,6\}$ ) pour une charge embarquée de 15 Kg (broche et support).**

On s'intéresse dans ce qui suit à la maîtrise de la dynamique d'un des axes du robot d'usinage. En dehors des positions d'équilibre statique, le couple résiduel lié à la combinaison des actions des ressorts et de la gravité sera compensé par les couples des moteurs d'axe (compensation par la commande). Ainsi, dans la suite du sujet, **on négligera l'influence de la gravité et du système de compensation sur la dynamique du robot**. La chaîne d'action de chacun des axes du robot est identique dans sa typologie. Le couple moteur pour chaque axe est fourni par un actionneur

synchrone à aimants permanents. Un asservissement numérique en courant est réalisé sur chaque moteur d'axe. Dans un premier temps, **on supposera négligeable la dynamique électrique du système** (l'asservissement en courant d'un axe fera l'objet d'une étude plus détaillée dans la partie II.2). Un réducteur à fort coefficient de réduction est employé sur chaque axe. Le retour d'information pour la commande en position est assuré par un résolveur lié à l'arbre moteur.

**Question II.3 – Donner la ou les hypothèses qui permettent de négliger l'influence de la partie électrique des actionneurs (asservissement en courant) sur la dynamique globale de l'axe.**

**Question II.4 – Expliciter le principe de fonctionnement du résolveur.**

Les couples importants transitant dans le réducteur des axes (de type harmonique drive) conduisent à une légère déformation élastique de certains de ses composants. Cette déformation, dégradant la précision de positionnement de l'axe, et donc de l'effecteur, peut être approximée par une raideur torsionnelle localisée sur l'arbre de sortie du réducteur. La figure 11 présente le schéma à constantes localisées de la chaîne d'action d'un axe du robot.  $J_m$ ,  $J_r$  et  $J_{ch}$  représentent respectivement l'inertie de l'arbre moteur, du réducteur (ramené sur l'arbre moteur) et l'inertie de la charge.  $K_t$  est la raideur torsionnelle équivalente sur l'arbre de sortie du réducteur. On note  $C_m$  et  $C_{ch}$  le couple moteur et le couple de perturbation agissant sur la charge (dynamique des axes en série, efforts de coupe et perturbations exogènes). De même, on note  $\Omega_m$ ,  $\Omega_2$  et  $\Omega_{ch}$ , respectivement la vitesse de rotation de l'arbre moteur, la vitesse de rotation en amont de la raideur torsionnelle et la vitesse de rotation de la charge (vitesse de rotation de l'axe de sortie).  $n = \Omega_2 / \Omega_m$  est le rapport de réduction du réducteur et  $f_v$  le coefficient de frottement visqueux équivalent ramené sur l'arbre d'entrée. On notera que l'on suppose une transformation de mouvement parfaite, sans perte dans le réducteur.

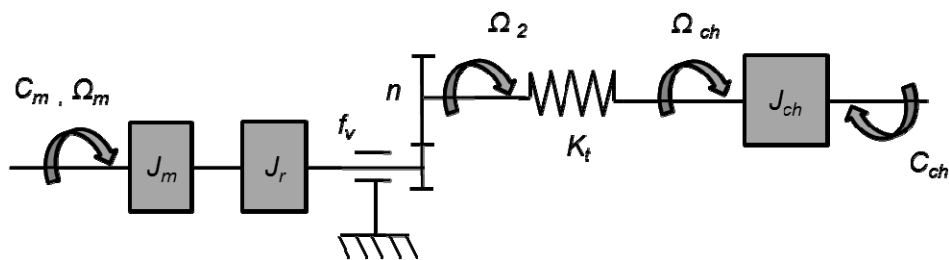


Figure 11 – Modèle simplifié à constantes localisées de la chaîne d'action d'un axe du robot usinant.

**Question II.5 – Expliciter 2 relations temporelles décrivant le comportement dynamique du système.**

**Question II.6 – Les opérations d'usinages réalisées par le robot se font dans le cadre de l'Usinage Grande Vitesse. Justifier cette stratégie d'usinage en décrivant les implications de l'UGV sur la dynamique du système.**

**Question II.7 – En négligeant le couple de perturbation  $C_{ch}$  sur l'axe, déterminer et exprimer sous forme canonique les fonctions de transfert  $\Omega_{ch}(p)/C_m(p)$  et  $\Omega_m(p)/C_m(p)$  ( $p$  étant l'opérateur de Laplace dans le domaine d'étude continu).**

Par décomposition en éléments simples, les fonctions de transfert précédentes peuvent se mettre sous les formes suivantes :

$$\frac{\Omega_{ch}(p)}{C_m(p)} = \frac{n}{(J_{tot}p + f_v)\left(1 + \frac{p^2}{\omega_{r1}^2}\right)}; \quad \frac{\Omega_m(p)}{C_m(p)} = \frac{\left(1 + \frac{p^2}{\omega_{r2}^2}\right)}{(J_{tot}p + f_v)\left(1 + \frac{p^2}{\omega_{r1}^2}\right)}$$

avec  $\omega_{r1} > \omega_{r2} > f_v/J_{tot}$ .

**Question II.8 – Tracer l'allure des diagrammes de Bode asymptotiques des deux fonctions de transfert précédentes.**

Dans l'hypothèse où le capteur de vitesse de l'axe peut être placé soit au niveau de l'axe moteur, soit au niveau de la charge, l'asservissement en vitesse travaillera sur l'une ou l'autre des fonctions de transfert précédentes.

**Question II.9 – En vous appuyant sur les diagrammes de Bode des deux fonctions, argumenter sur le choix de placement du capteur qui vous semble judicieux au regard des différents critères recherchés classiquement pour un asservissement (stabilité, rapidité et précision).**

**Question II.10 – Déterminer le modèle idéalisé de la transmission mécanique  $\Omega_{ch}(p)/C_m(p)$  en considérant une transmission parfaitement rigide ( $K_i \rightarrow \infty$ ).**

## II.2 – Analyse de la boucle d'asservissement en courant d'un axe du robot sous forme numérique

Les axes du robot sont pilotés par des variateurs numériques associés à des Machines Synchrones Autopilotées (MSAP). On suppose une relation linéaire entre les couples fournis par les MSAP et les courants injectés par les variateurs dans les enroulements des MSAP. L'étude se limitera donc à l'analyse de la boucle d'asservissement en courant d'un axe du robot. Les variateurs étant numériques leurs commandes sont donc numériques. L'objectif de cette étude est la mise en œuvre d'une commande analogique (domaine continu) puis numérique en vue de les comparer.

La boucle de courant est la boucle la plus rapide de toutes les boucles d'asservissement intervenant dans le robot. Si les méthodes de réglage avec méthodes analogiques (plus classique dans le monde industriel) et numériques fournissent des résultats similaires l'analyse des autres boucles d'asservissement pourra être réalisée avec les méthodes classiques des modèles continus.

On supposera que la dynamique de la MSAP associée à son onduleur est équivalente à un système du premier ordre (cf. figure 12).

Le cahier des charges fonctionnelles fait apparaître une fonction *IMPOSER UN COUPLE AVEC PRECISION ET RAPIDITE* (Table 3).

Fonction technique	Critère d'appréciation	Niveau	Variabilité
<i>IMPOSER UN COUPLE AVEC PRECISION ET RAPIDITE</i>	$\propto$ Type de réponse (vitesse, dépassement, précision)	Premier dépassement : $D_{1\%}=0\%$	0
		Temps de réponse à 5% : $tr_{5\%}<0,5ms$	0
		erreur statique : $\varepsilon_s<10\%$	$\pm 5\%$

Table 3 : Extrait du CdCF.

### Commande analogique proportionnelle

L'architecture de la commande dans le domaine continu est la suivante :

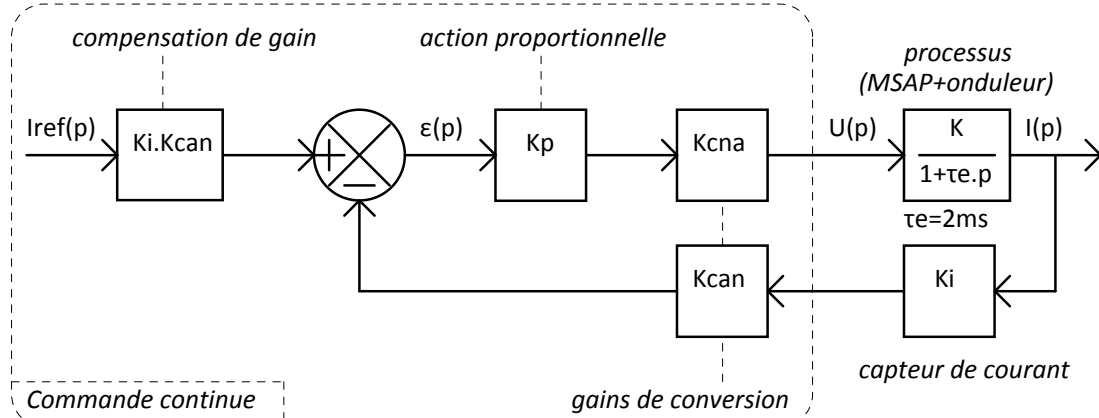


Figure 12 – Structure de l'asservissement de courant de la MSAP.

avec  $K=0,1$  ;  $Kcna=10/32768$  ;  $Kcan=4096/10$  ;  $Ki=1$ .

Pour simplifier les écritures, on posera  $Kt=Kcna.K.Ki.Kcan$ .

**Question II.11 – Déterminer les valeurs de  $Kp$  sous forme littérale assurant un système bouclé stable.**

**Question II.12 – Déterminer le gain statique du système bouclé  $Gsc$  sous forme littérale.**

**Question II.13 – Quelle serait l'action à rajouter à l'action proportionnelle pour obtenir un gain statique unitaire indépendant des fluctuations du gain statique du processus (MSAP + onduleur)?**

**Question II.14 – Déterminer la valeur numérique de  $Kp$ , notée  $Kpa$ , telle que le gain statique en boucle fermée soit égal à 95%.**

**Question II.15 – Pour  $Kp=Kpa$ , quelle est la valeur numérique de la constante de temps en boucle fermée de l'asservissement, notée  $\tau_{BF}$ . En déduire le temps de réponse à 5% :  $tr_{5\%}$ .**

**Question II.16 – Pour  $Kp=1520$ , déterminer l'original  $i(t)$  de  $I(p)$  en réponse à l'échelon unitaire avec une condition initiale nulle ( $i(t=0)=0$ ). Tracer sur le Document réponse 2 la courbe de  $i(t)$ .**

### Commande numérique proportionnelle

L'architecture est la suivante :

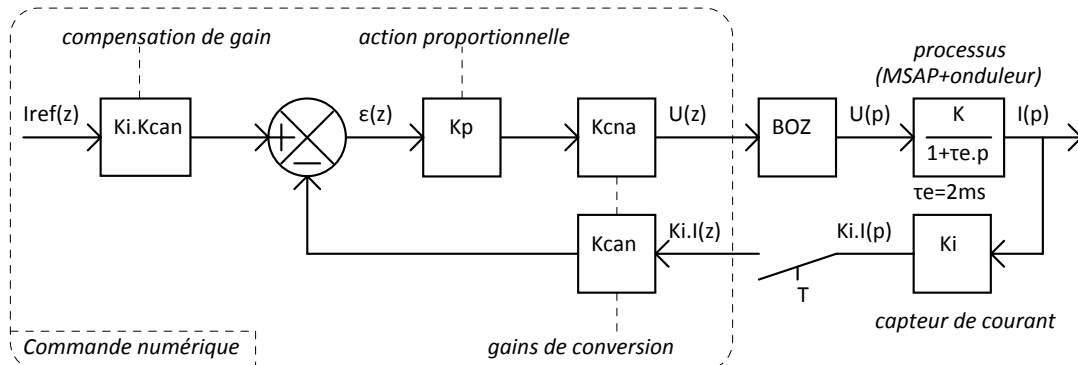


Figure 13 – Structure avec bloqueur de l'asservissement de courant de la MSAP.

Avec  $K=0,1$  ;  $Kcna=10/32768$  ;  $Kcan=4096/10$  ;  $Ki=1$ .

Pour simplifier les écritures on posera  $K_t = K_{cna} \cdot K \cdot K_i \cdot K_{can}$ .

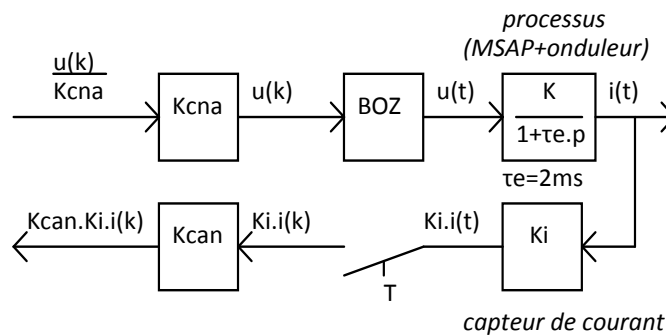
**Question II.17 – À partir de la transmittance  $I(p)/U(p)$ , déduire une équation différentielle littérale de la forme**

$$\frac{di(t)}{dt} + a.i(t) = b.u(t) .$$

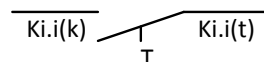
**Question II.18 – Déterminer la réponse du courant  $i(t)$  à un échelon  $u(t)$  d'amplitude  $u_k$  à partir de la condition initiale  $i_k$  sous forme littérale.**

Les variables du processus sont des variables continues du temps  $t$ . Les variables de la commande numérique sont des variables discrètes. Afin de pouvoir déterminer une commande numérique, il convient d'avoir un modèle discret du processus. À une variable continue du temps  $i(t)$  on associe une variable  $i(k.T)$  valeur de  $i$  à l'instant  $k.T$  ( $k$  étant le numéro d'échantillon et  $T$  la période d'échantillonnage), soit  $i(k)$  la valeur de  $i$  pour le  $k^{\text{ième}}$  échantillon.

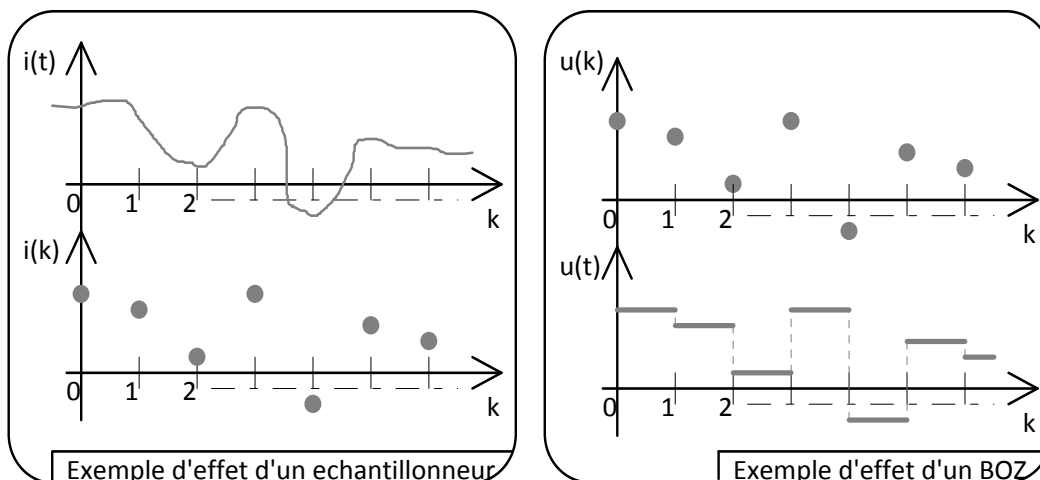
On retrouve donc le montage suivant :



Le BOZ est un Bloqueur d'Ordre Zéro : à chaque pas d'échantillonnage, le BOZ émettra et bloquera la valeur  $u(k)$  sur une durée correspondant à la période d'échantillonnage  $T$ . L'échantillonneur (interrupteur) représenté comme suit :



échantillonnera la valeur  $K_i.i(t)$  pour fournir la valeur  $K_i.i(k)$  à la commande numérique à chaque instant d'échantillonnage.



**Question II.19 – En utilisant le résultat de la question II.18, déterminer l'équation de récurrence du processus sous la forme  $i(k+1)+f.i(k)=g.u(k)$ .**

Le système bouclé peut donc être représenté par le montage suivant :

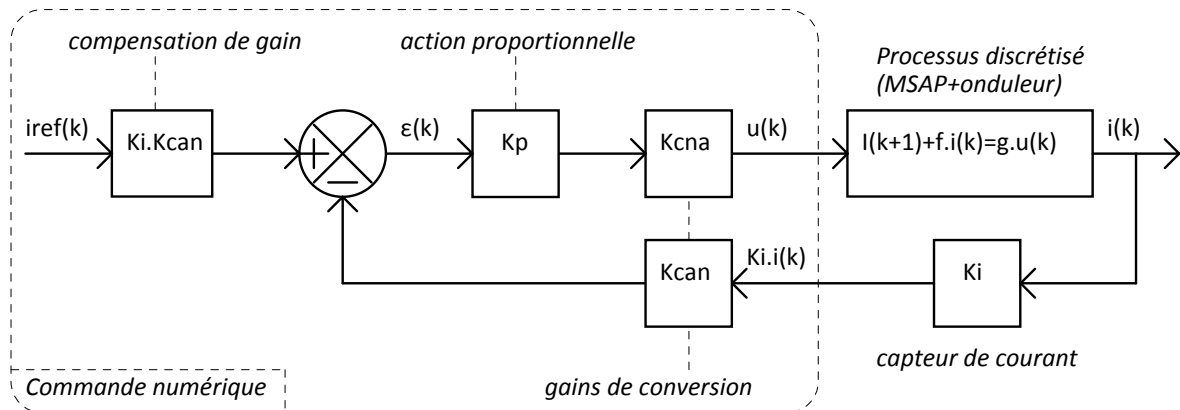


Figure 14 – Structure échantillonnée de l'asservissement de courant de la MSAP.

On rappelle que, pour simplifier les écritures, on posera  $Kt=Kcna.K.Ki.Kcan$ .

**Question II.20 – Montrer que le système bouclé peut se représenter sous la forme d'une équation de récurrence de la forme  $i(k+1)+f_{BF}.i(k)=g_{BF}.iref(k)$ .**

**Question II.21 – Déterminer la solution de cette équation récurrente à partir de l'état initial de  $i(k=0)=I_0$  et d'un échelon de consigne  $iref(k)=Id$  en fonction de  $f_{BF}$ ,  $g_{BF}$ ,  $I_0$  et  $Id$ .**

Quel que soit le résultat obtenu à la question précédente on pose :

$$I(k) = \left( I_0 - \frac{Kt.Kp}{1+Kt.Kp} \right) \cdot \left( e^{-\frac{T}{\tau e}} - Kt \cdot (1 - e^{-\frac{T}{\tau e}}) \cdot Kp \right)^k + \frac{Kt.Kp}{1+Kt.Kp} \cdot Id$$

**Question II.22 – Déterminer le domaine de stabilité de l'asservissement dans le plan  $(T, Kp)$ . On présentera les résultats sous forme de 2 inégalités donnant  $Kp$  en fonction de la période d'échantillonnage  $T$  et des paramètres du processus sous forme littérale.**

**Question II.23 – Déterminer le domaine tel que la réponse indicielle de l'asservissement ne présente pas d'oscillation dans le plan  $(T, Kp)$ . On présentera le résultat sous forme d'une inégalité donnant  $Kp$  en fonction de la période d'échantillonnage  $T$  et des paramètres du processus sous forme littérale.**

**Question II.24 – Déterminer  $Kp$  en fonction de la période d'échantillonnage  $T$  et des paramètres du processus sous forme littérale tel que le système atteigne son régime permanent en une seule période d'échantillonnage (réponse pile). Discuter ce type de commande.**

On cherche à obtenir un comportement en boucle fermée type 1<sup>er</sup> ordre ayant une dynamique associée à une constante en boucle fermée notée  $\tau_{BF}$ .

La plage habituellement conseillée pour la période d'échantillonnage  $T$  est :  $\frac{\tau_{BF}}{4} \leq T \leq \tau_{BF}$

**Question II.25 – Quelles sont les éléments qui ont conduit à cette plage de choix de la période d'échantillonnage ?**

**Question II.26 – Déterminer le domaine correspondant aux valeurs conseillées pour la période d'échantillonnage  $T$  du système bouclé. On présentera le résultat sous forme de 2 inégalités**

**donnant  $K_p$  en fonction de la période d'échantillonnage  $T$  et des paramètres du processus sous forme littérale.**

On désire un temps de réponse à 5% :  $\tau_{5\%} = 300\mu\text{s}$ .

Pour le choix de la période d'échantillonnage maximale :  $T = \tau_{BF}$ .

**Question II.27 – Déterminer la valeur numérique de  $K_p$ , notée  $K_{pn}$ . Comparer le résultat avec la valeur  $K_{pa}$  obtenue à la question II.14.**

**Question II.28 – Pour  $K_p = 957$ , déterminer la réponse du système numérique en réponse à l'échelon unitaire et condition initiale nulle ( $i(k=0)=0$ ). Tracer sur le document réponse 2 la courbe de  $i(k)$ . Comparer cette courbe avec celle de  $i(t)$  obtenu à la question II.16, conclure. Conclure quant au respect du cahier des charges fonctionnelles.**

**Question II.29 – Dans le plan  $(K_p, T)$  la réponse est-elle stable ? Avec ou sans oscillation ? La valeur de  $T$  respecte-t-elle la plage habituellement choisie de la période d'échantillonnage ?**



## II.3 – Analyse de la structure d'asservissement en position d'un axe du robot

Chaque axe du robot est commandé indépendamment en position. La structure d'asservissement est une structure par boucles imbriquées (boucles de position, vitesse et courant). La figure 15 présente le schéma fonctionnel de cette structure de commande. On suppose une dynamique négligeable de l'asservissement en courant (étudié dans la partie II.2) ainsi qu'une compensation parfaite des effets liés à la pesanteur (étudiés dans la partie II.1). Ainsi, à tout instant, le couple de référence est égal au couple moteur, noté  $C_m$ . La position angulaire du moteur est notée  $\theta_m$  et celle de la charge  $\theta_{ch}$ .  $n$  représente le rapport de réduction de l'axe ( $n = \theta_{ch} / \theta_m$ ).  $H_p(p)$  et  $H_v(p)$  sont les fonctions de correction en position et en vitesse de l'axe et  $m$  est un paramètre prenant ces valeurs dans  $\{0, 1\}$ . On mesure la position de l'arbre moteur et la vitesse est obtenue par dérivation numérique. La dynamique de l'axe en vitesse  $\Omega_m(p) / C_m(p)$  est assimilée à un simple système du premier ordre de gain statique  $k_m$  et de constante de temps  $\tau_m$ . On notera que

$$\frac{d\theta_{ch,ref}}{dt} = \Omega_{ch,ref}$$

Le cahier des charges fonctionnelles fait apparaître une fonction *CONTROLLER LE DEPLACEMENT AVEC PRECISION* (Table 4).

Fonction technique	Critère d'appréciation	Niveau	Variabilité
CONTROLLER LE DEPLACEMENT AVEC PRECISION	α Type de réponse (vélocité, dépassement, précision)	Premier dépassement : $D_{1\%}=0\%$	0
		Temps de réponse à 5% : $tr_{5\%}<20ms$	±10%
		erreur statique : $\varepsilon_s=0$	0
		erreur en poursuite : $\varepsilon_p=0$	0

Table 4 : Extrait du CdCF.

Le correcteur de vitesse est choisi tel que :

$$H_v(p) = k_v \left( 1 + \frac{1}{\tau_i p} \right) \text{ avec } \tau_i = \tau_m.$$

**Question II.30 – Justifier le choix d'un tel correcteur pour la boucle de vitesse.**

**Question II.31 – Expliciter la fonction de transfert de la boucle de vitesse  $\Omega_m(p) / \Omega_{ref}(p)$  sous forme canonique. Donner littéralement la bande passante à -3dB de cet asservissement, notée Bp. Réaliser l'application numérique pour  $k_m = 1000$ ,  $k_v = 11$  et  $\tau_m = 6$  s.**

Le correcteur de position est un simple gain proportionnel, noté  $k_p$ , tel que  $k_p^{-1} \ll Bp$

**Question II.32 – Justifier le choix d'un tel correcteur pour la boucle de position.**

**Question II.33 – Calculer la fonction de transfert en position de l'axe  $\theta_{ch}(p) / \theta_{ch,ref}(p)$  en émettant une hypothèse simplificatrice au regard de  $k_p^{-1} \ll Bp$ .**

**Question II.34 – Le paramètre  $m$  permet d'activer ou non (0 ou 1) la fonction dite « d'anticipation » sur l'axe. Comparer, dans les deux cas, les performances en termes de suivi de trajectoire et de rapidité pour une référence de position en rampe ( $\theta_{ch,ref}(t) = 0,8t$ ). Conclure quant à l'intérêt de cette fonction d'anticipation dans le cas de l'usinage.**

**Question II.35 – Affiner les conclusions précédentes en considérant le modèle d'axe développé dans la partie II.1 (intégrant la souplesse du réducteur).**

Les méthodes de réglages des différentes actions correctrices ont été réalisées sous couvert de certaines hypothèses.

**Question II.36 – Présenter de manière synthétique la démarche de résolution de réglage des différentes boucles asservies, les hypothèses retenues, leurs validités dans ce cas d'étude. Une valeur de l'action proportionnelle de la boucle de position conduisant à un comportement satisfaisant de l'axe du robot est évaluée à 200. Conclure quant au respect du cahier des charges fonctionnelles.**

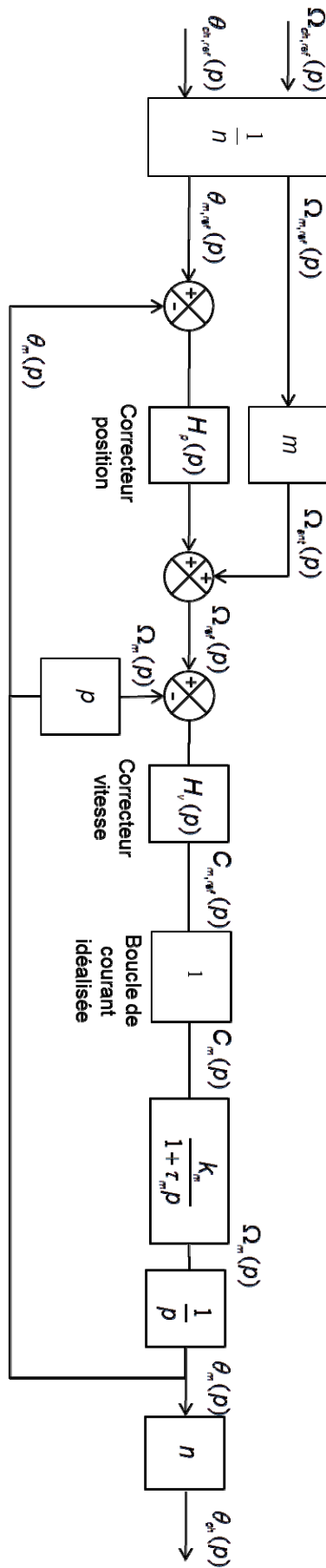


Figure 15 – Structure d'asservissement d'un axe du robot usinant.

### Troisième partie

## Étude de l'entraînement de l'axe vertical du robot cartésien : vérification du dimensionnement moteur

Un robot cartésien (situé en zone 4 de la cellule) assure la palettisation des carters d'alternateurs usinés sur la plateforme (cf. Document ressource 1 ; les carters d'alternateur en attente de conditionnement sont détectés par le capteur Cpal16, en phase d'attente le robot se situe à l'aplomb de la zone d'attente de conditionnement). La palettisation se réalise dans des caisses de conditionnement à 9 emplacements. Dans cette partie on cherche à dimensionner l'entraînement électrique (MSAP – Machine Synchrone Autopilotée- et variateur) à implanter et comparer avec le choix réalisé par l'intégrateur (MSAP XV-8022 ; cf. Document ressource 3). La masse en mouvement de l'axe vertical à motoriser vaut  $Mz = 20\text{kg}$  (la masse du carter d'alternateur sera considérée comme négligeable). Cet axe est motorisé à l'aide d'un système poulies-courroies cranté et réducteur. L'équipage mobile support de la pince de préhension est fixé sur la courroie. On considère dans cette partie de dimensionnement que la chaîne cinématique est parfaite avec masse négligeable. Les poulies ont un rayon primitif  $r_p = 40\text{mm}$ . Le réducteur inséré entre la MSAP et le système poulies-courroie à un rapport de réduction  $k_{red} = 6$ . La course pour la montée du carter d'alternateur dans la zone d'attente de conditionnement est  $z_1 = 50\text{mm}$ . La course pour la descente du carter d'alternateur dans la zone de conditionnement est  $z_2 = 160\text{mm}$ . La vitesse de déplacement de l'axe vertical devra se situer dans l'intervalle :  $v_z \in [-1\text{m/s} ; 1\text{m/s}]$ .

**Question III.1 – Déterminer le couple  $C_g$  que doit fournir la MSAP pour compenser l'effet de la gravité sur l'axe vertical.**

Le chronogramme du cycle de prise/transfert/dépose du carter par le robot cartésien se décompose en phases comme suit :

Descente de l'axe $t_d = 0,2\text{s}$	Préhension du carter	Montée du carter $t_m = 0,2\text{s}$	Transfert du carter à l'aplomb de l'emplacement dans la caisse de conditionnement	Descente du carter $t_d = 0,2\text{s}$	Dépose du carter	Montée de l'axe $t_m = 0,2\text{s}$	Transfert de l'axe à l'aplomb du poste d'attente de conditionnement
Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6	Phase 7	Phase 8

$t$

L'allure des profils des différents déplacements de l'axe vertical seront soit des mouvements uniformément accélérés soit des déplacements à vitesse constante.

**Question III.2 – Déterminer l'allure de l'évolution de la vitesse  $v_z$  de l'axe vertical en fonction du temps pendant la phase 1 en minimisant la complexité du profil (accélérations constantes ou nulles). On précisera les points caractéristiques dans le plan (temps, vitesse).**

**Question III.3 – Déterminer l'allure de l'évolution de la vitesse  $v_z$  de l'axe vertical en fonction du temps pendant la phase 7 en minimisant la complexité du profil (accélérations constantes ou nulles). On précisera les points caractéristiques dans le plan (temps, vitesse).**

**Question III.4 – Déterminer les vitesses caractéristiques de rotation de la MSAP en  $\text{tr}/\text{min}$  sur le cycle de prise/transfert/dépose.**

**Question III.5 – Après avoir définies les valeurs numériques des différents couples à fournir par la MSAP sur un cycle de prise/transfert/dépose du carter, tracer l'allure de l'évolution de la vitesse  $n$  et du couple  $C$  de la MSAP en fonction du temps sur le document-réponse 1.**

On désire avoir une représentation du couple moyen que devra fournir la MSAP.

La définition des conditions d'utilisations, services, déclassements des machines électriques s'appuie sur la norme IEC 60034-1.

La durée de vie d'une machine électrique est intimement liée à son état thermique.

Le respect des grandeurs nominales d'utilisation d'une machine lui permettent d'avoir une durée de vie (TL –Thermal Life-) respectant la norme.

Cependant une machine électrique peut fournir des couples supérieurs au couple nominal. Ces couples sont liés aux courants circulant dans la machine. En première approximation, on peut considérer une relation linéaire reliant couple et courant :  $C=kt.I$  avec  $I$  valeur efficace du courant dans le cas des machines alternatives (Cas de la MSAP).

Une augmentation du couple génère donc une augmentation des pertes joules (de type  $r.I^2$ ) donc une augmentation de la température de la machine néfaste à sa durée de vie.

Afin d'avoir une bonne image de l'état thermique de la machine, plutôt que de déterminer la valeur efficace du courant  $I$ , on détermine la valeur efficace du couple sur un cycle noté  $C_{th1}$ .

Cette valeur efficace devra être inférieure ou égale au couple nominal de la machine ( $C_n$ ) afin de garantir sa durée de vie nominale sous réserve de respecter le critère :

$$\text{Temps de cycle} \leq 5\% \cdot \text{constante de temps thermique de la machine}$$

**Question III.6 – Que cherche à respecter le critère Temps de cycle  $\leq 5\%$ .constante de temps thermique de la machine ?**

On considère le cycle permettant de remplir complètement une caisse de 9 emplacements.

La somme des temps des phases 2, 4, 6 et 8 pour les 9 cycles a été évaluée à 45s.

**Question III.7 – Déterminer le temps de cycle  $T$ .**

**Question III.8 – Déterminer le couple thermique  $C_{th1}$ .**

**Question III.9 – Choisir dans le document ressource 3 une MSAP. On précisera les critères utilisés pour le choix. Si des critères sont manquants dans le document ressource 3 les préciser.**

Amélioration du modèle « couple thermique »  $C_{th2}$ :

- suite au choix de la MSAP on prend en compte l'effet de l'inertie de son rotor.
- les MSAP sont des machines électriques à puissances massiques élevées. Un effet de saturation intervient pour les fortes valeurs de courants (donc de couples). Pour tenir compte de cette saturation, on décompose la relation linéaire reliant le couple au courant en 2 fonctions linéaires :

$$\text{si } C_i \leq C_n \text{ alors } C_i = kt.I ,$$

$$\text{si } C_i > C_n \text{ alors } C_i = kt'.I .$$

Soit le fabricant de la machine fourni les valeurs de  $kt$  et  $kt'$  soit il est d'usage de prendre  $kt' / kt = \alpha = 0,9$ .

**Question III.10 – Re-déterminer le graphe des vitesses et des couples à fournir par la MSAP avec prise en compte de l'inertie du rotor sur un cycle de prise/transfert/dépose du carter sur le document-réponse 1.**

**Question III.11 – Déterminer le couple thermique  $C_{th2}$  avec prise en compte de l'inertie du rotor de la MSAP et de l'effet de saturation.**

**Question III.12 – Le choix de la MSAP est-il toujours correct ?**

**Question III.13 – Afin d'optimiser l'utilisation de la MSAP dans le plan (couple,vitesse) quelle modification pourrait-on apporter à la chaîne cinématique de l'axe vertical ? Qu'en résulterait-il quant au choix de la MSAP ?**

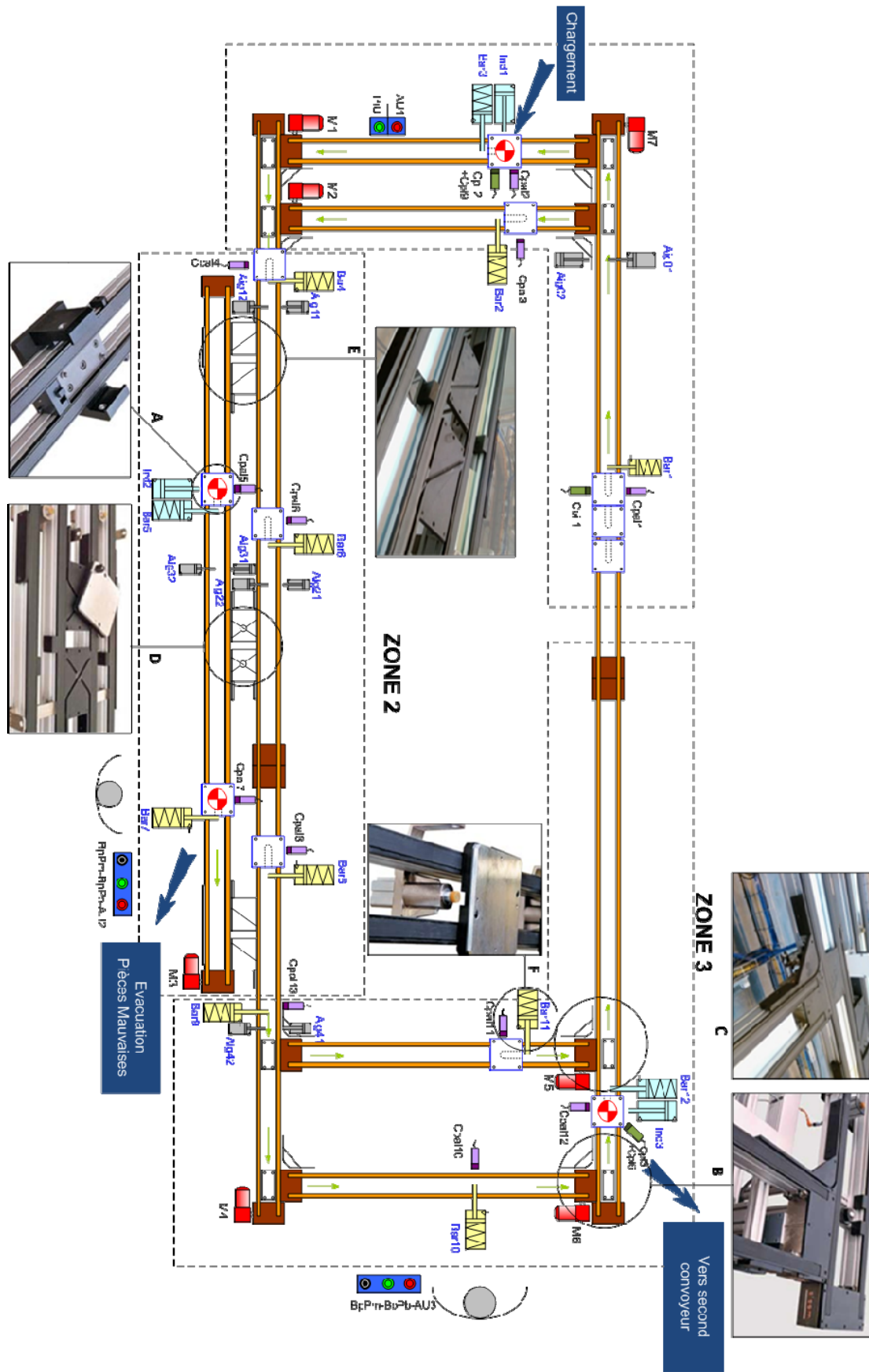
Un critère déterminant la capacité dynamique d'un axe consiste à comparer l'inertie équivalente à la charge ramenée sur l'axe de la MSAP  $J_{chr}$  avec l'inertie du rotor de la MSAP  $J_{MSAP}$ .

On cherche à respecter :  $J_{chr} \leq 4 \cdot J_{MSAP}$ .

**Question III.14 – Vérifier si ce critère est validé dans le cas de l'axe vertical. En cas de non-respect du critère, proposer des pistes permettant d'atteindre la valeur cible. Comparer avec le choix réalisé par l'intégrateur (XV-8022 ; cf. Document ressource 3).**

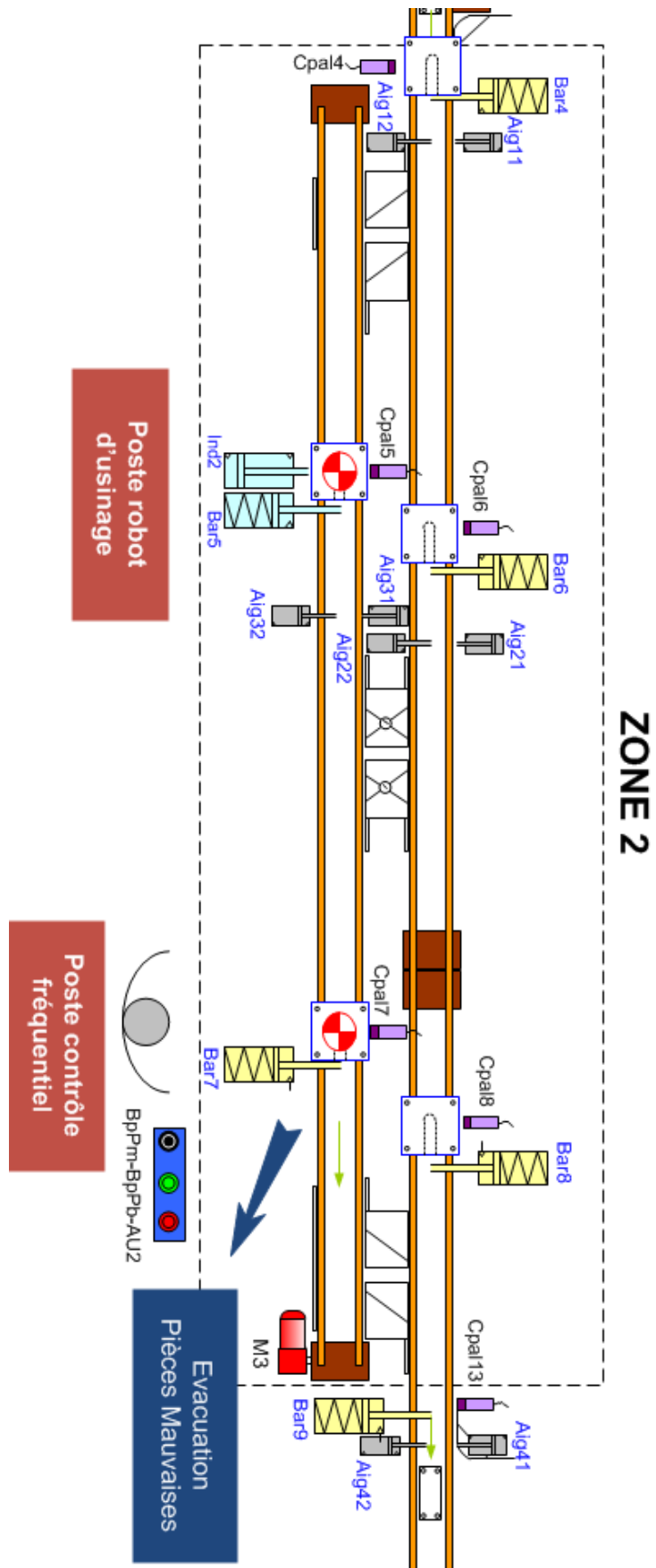


# Document ressource 1 – Vues des composants de convoyage





## Document ressource 2 – Vue détaillée de la zone 2



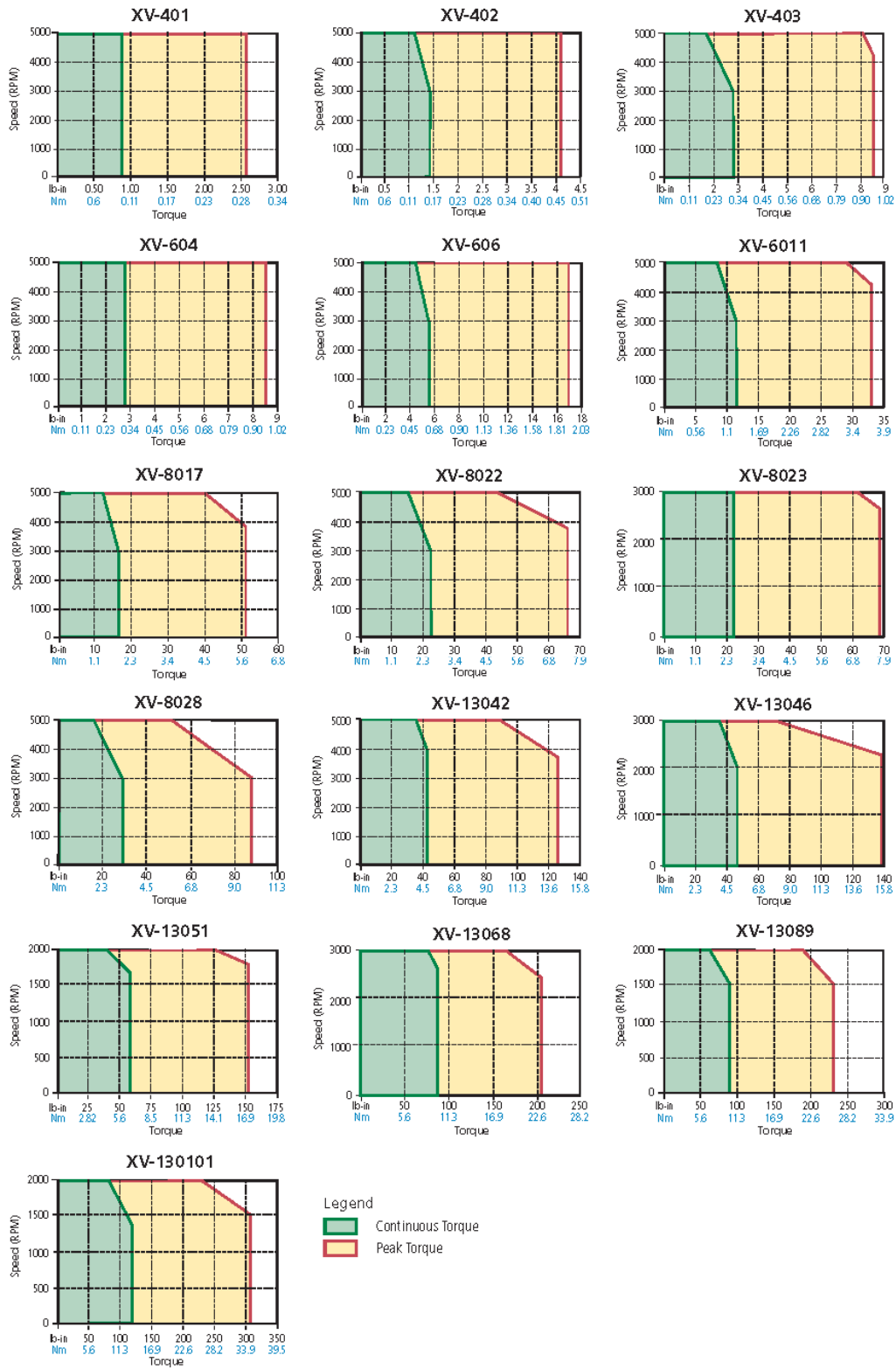
## Document ressource 3



**XV Motor Specifications**

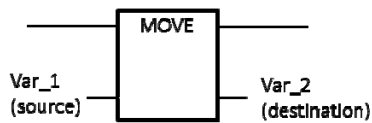
Motor Model	Rated Torque lb-in (Nm)	Peak Torque lb-in (Nm)	Rated Power (KW)	Stall Current (Arms)	Motor Resistance (Ohms)	Motor Inductance (mH)	Operating Speed (RPM) Max	Inertia (lb-in-sec <sup>2</sup> ) (kg-cm <sup>2</sup> )	Motor Ke (Vrms/ krpm)	Motor Kt (lb-in/Arms) (Nm/Arms)	Motor Weight lb kg
XV-401	0.84 0.095	2.39 0.27	0.03	1.07	11.69	8.54	5000	0.0000097 0.011	7.8	0.89 0.10	0.70 0.32
XV-402	1.41 0.159	3.98 0.45	0.05	1.20	9.43	8.27	5000	0.0000186 0.021	10.6	1.28 0.14	0.84 0.38
XV-403	2.81 0.318	7.70 0.87	0.1	1.38	6.89	6.73	5000	0.0000398 0.045	12.7	2.24 0.25	1.10 0.50
XV-604	2.81 0.318	8.41 0.95	0.1	1.65	2.50	7.37	5000	0.0001009 0.114	13.6	1.86 0.21	1.81 0.82
XV-606	5.64 0.637	16.1 1.82	0.2	1.63	4.15	15.21	5000	0.0001611 0.182	29.2	3.76 0.42	2.38 1.08
XV-6011	11.3 1.27	32.3 3.65	0.4	2.89	1.64	7.32	5000	0.0002841 0.321	29.5	4.15 0.47	3.48 1.58
XV-8017	16.9 1.91	48.6 5.49	0.6	3.58	1.43	9.18	5000	0.0009664 1.092	35.2	5.00 0.57	5.55 2.52
XV-8022	22.6 2.55	62.8 7.10	0.8	4.83	0.87	5.94	5000	0.0013355 1.509	35.6	4.94 0.56	7.00 3.18
XV-8023	23.3 2.63	67.1 7.58	0.55	3.82	1.29	9.10	3000	0.0013355 1.509	44.6	6.32 0.71	7.00 3.18
XV-8028	28.2 3.19	81.1 9.16	1	5.37	0.75	5.04	5000	0.0017054 1.927	39.2	5.57 0.63	8.59 3.90
XV-13042	42.2 4.77	123.0 13.90	1.5	8.23	0.41	4.11	5000	0.0106112 11.99	38.6	5.35 0.61	16.6 7.54
XV-13046	46.5 5.25	137.2 15.50	1.1	6.28	0.77	7.76	3000	0.0106112 11.99	53.1	7.71 0.87	16.6 7.54
XV-13051	50.6 5.72	147.8 16.70	0.6	4.15	1.87	20.10	2000	0.0106112 11.99	85.8	12.87 1.45	16.6 7.54
XV-13068	67.5 7.63	199.1 22.50	1.6	9.23	0.47	5.27	3000	0.0152040 17.18	54.2	7.59 0.86	21.3 9.68
XV-13089	88.8 10.0	260.2 29.40	0.9	5.78	1.41	15.99	2000	0.0152040 17.18	94.6	15.57 1.76	21.3 9.68
XV-130101	101 11.5	296.5 33.50	1.2	7.63	0.87	10.67	2000	0.0200718 22.68	90.00	13.88 1.57	25.9 11.8

**XV- Servomotor Speed Torque Curves**

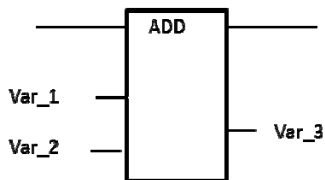


## Document ressource 4

### Quelques blocs fonctions et actions Ladder génériques

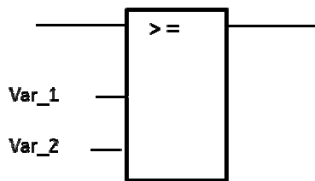


Déplace ou affecte la valeur (source) en mémoire (destination)



ADD : réalise l'addition des valeurs de Var\_1 et Var\_2, le résultat est affecté à Var\_3.

Les opérations mathématiques disponibles sont : DIV (division), SUB (soustraction), MUL (Multiplication), NEG (changement de signe)



Permet la comparaison de deux expressions numériques. Si  $Var_1 \geq Var_2$  alors le fil de sortie est égal au fil d'entrée

—( S )—

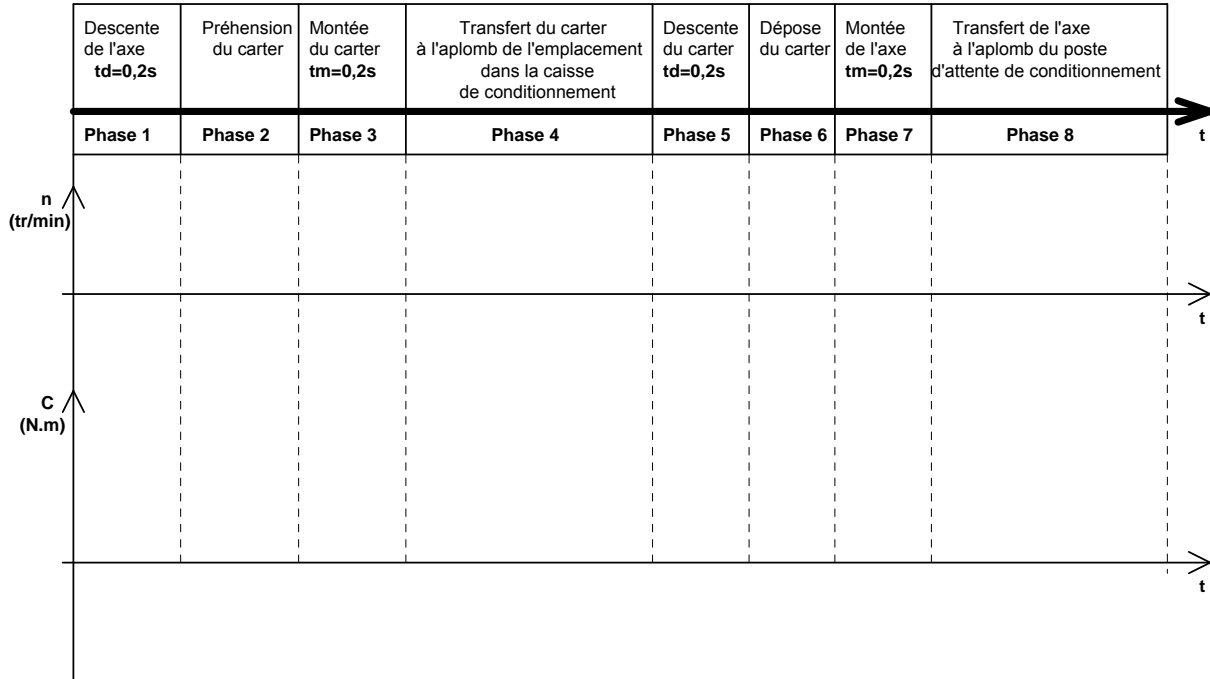
—( R )—

—( JMP )—

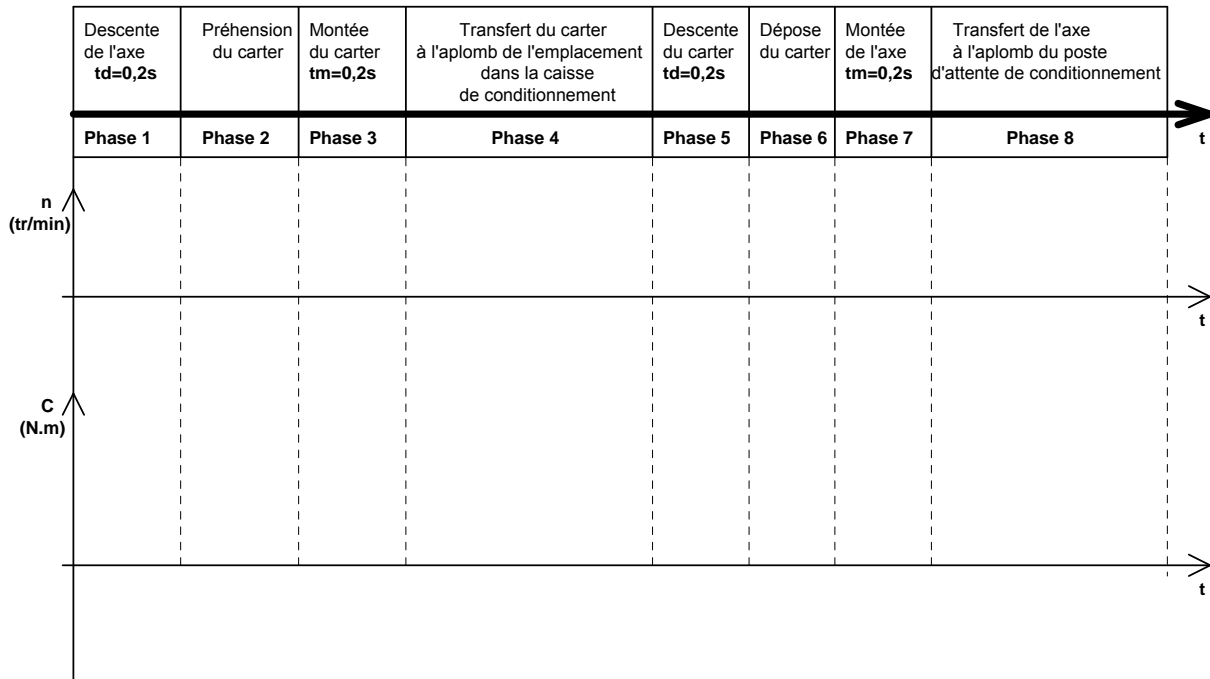
Action Set, Reset et JMP (saut vers un sous programme)

## Document réponse 1

**Question III.5 – Allure de l'évolution de la vitesse  $n$  et du couple  $C$  de la MSAP en fonction du temps.**



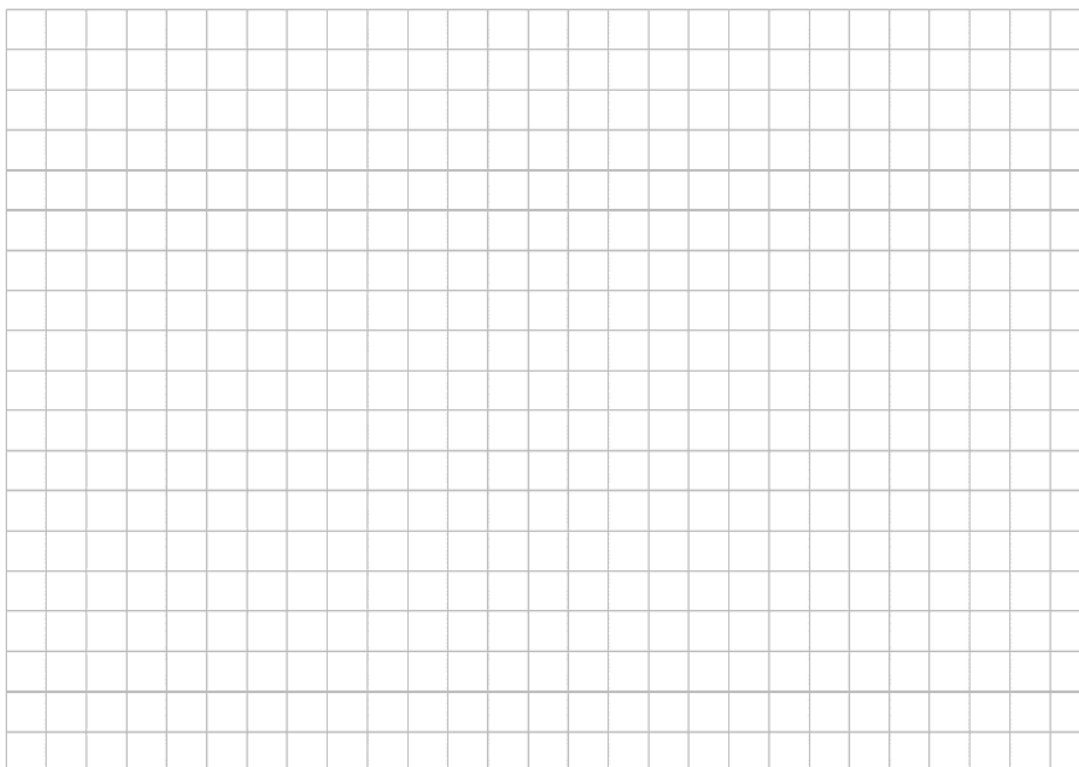
**Question III.10 – Allure de l'évolution de la vitesse  $n$  et du couple  $C$  de la MSAP en fonction du temps.**



## Document réponse 2

Question II.16 – *Tracé de la courbe de  $i(t)$ .*

Question II.28 – *Tracé de la courbe de  $i(k)$ .*



## **SESSION 2012**

---

### **Concours externe de recrutement de professeurs agrégés**

Sections : Génie Mécanique / Mécanique

**Épreuve d'Automatique et d'Informatique Industrielle**

Eléments de corrigé

## Première partie

# Maitrise dimensionnelle du produit : Mise en œuvre d'un contrôle fréquentiel sur la zone 2

**Question I.1 – Donner la signification de l'expression  $\overline{1s/X202.0,5s/X202}$  utilisée dans le grafcet d'entrée de zone 2. Préciser le rôle de l'étape 219 dans le grafcet de sortie de zone 2 et indiquer quelle gestion de priorité a été mise en œuvre.**

### Réponse

Il s'agit d'une action retardée et limitée dans le temps. La sortie associée à l'étape est donc assignée à la valeur vraie que 0,5s après l'activation de l'étape et reste active pendant 0,5 s.

L'étape 219 représente une « ressource commune » physique (portion de convoyeur) partagée entre deux séquences utilisatrices exclusives. Une priorité logique est indispensable dans l'écriture des réceptivités afin d'éviter tout conflit. Ici, si une palette est en cours de sortie, cette étape est désactivée et bloque tout autre transfert tant que la palette n'est pas détectée en zone 3. La priorité est donnée aux palettes sortant du poste de contrôle.

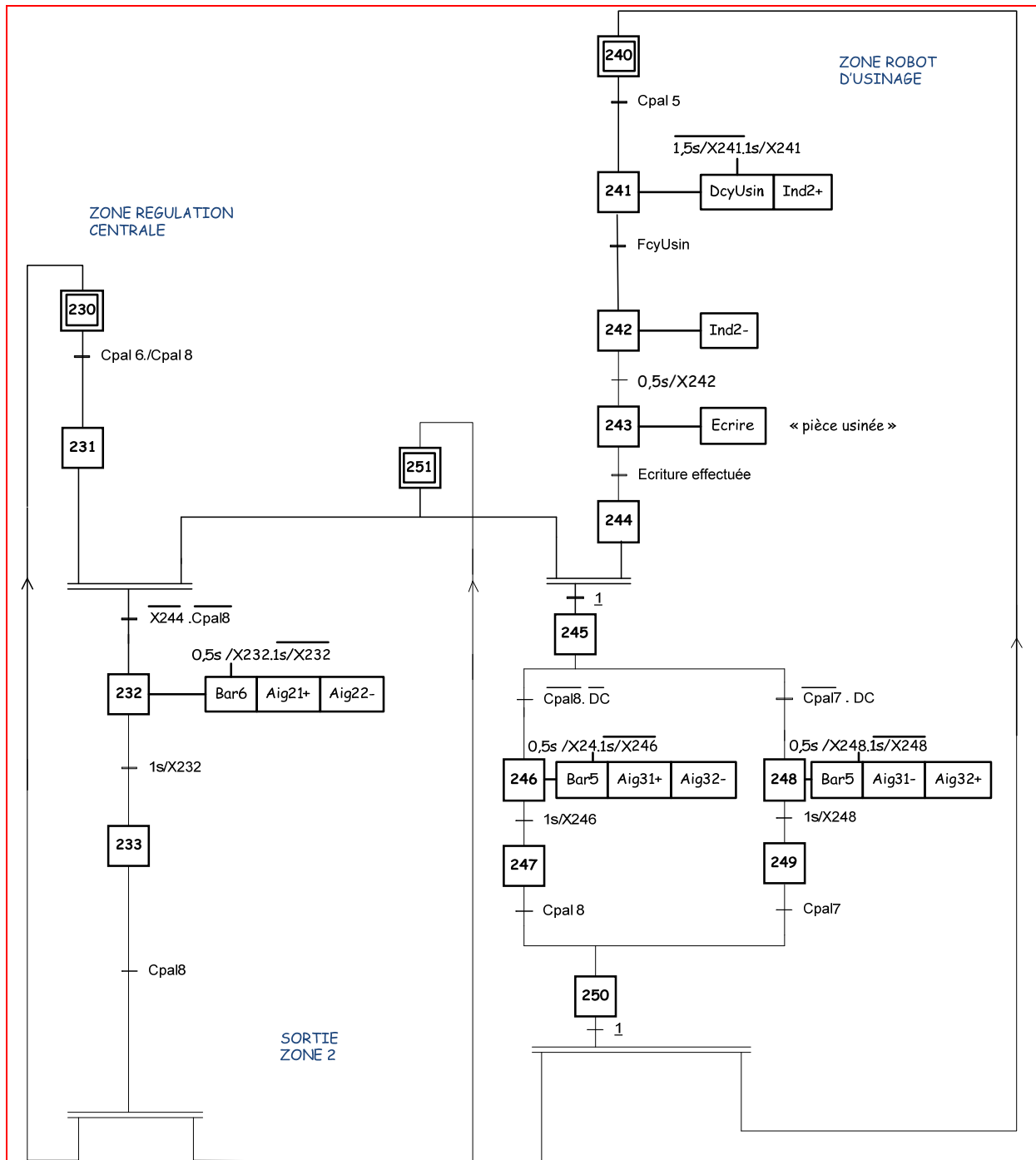
**Question I.2 – Compléter l'amorce de grafcet de la zone médiane afin d'intégrer la gestion du poste d'usinage et des demandes de contrôle. On notera que la priorité est donnée aux palettes sortantes du poste d'usinage.**

### Réponse

La réponse n'est pas unique. Les éléments de réponse permettant de quantifier celle-ci sont :

La prise en compte de la priorité, la gestion de la synchronisation (repris sur l'exemple précédent) et la gestion de la demande de contrôle pour les pièces usinées.





**Question 1.3 – Donner les probabilités de procéder à un réglage par erreur du processus pour deux valeurs de moyenne calculées. On distinguera le cas où la moyenne est hors des limites  $Lc1$  et  $Lc2$  et le cas où la moyenne calculée se situe entre les bornes  $Ls$  et  $Lc$ .**

**Réponse**

0,3 % de probabilité d'être hors des limites  $Lc$ , donc d'identifier un dérèglement dès la première moyenne calculée (3 chances sur mille de procéder au réglage par erreur).

Si la première valeur est entre les bornes  $Ls$  et  $Lc$ , il y a donc 95,4% de chance que le processus soit dérèglé. On procède à un second relevé et si ce dernier confirme la valeur de la moyenne, la probabilité d'un dérèglement sera de  $0,954+0,954-0,954^2= 0,998$  soit **2 chances sur mille** de procéder au réglage par erreur. Si la valeur de la seconde moyenne dépasse les bornes  $Lc$ , il y a moins d'**une chance sur dix milles** de procéder au réglage par erreur.

**Question I.4 – Préciser la condition de lancement de l'organigramme de contrôle fréquentiel (figure 8).**

**Réponse**

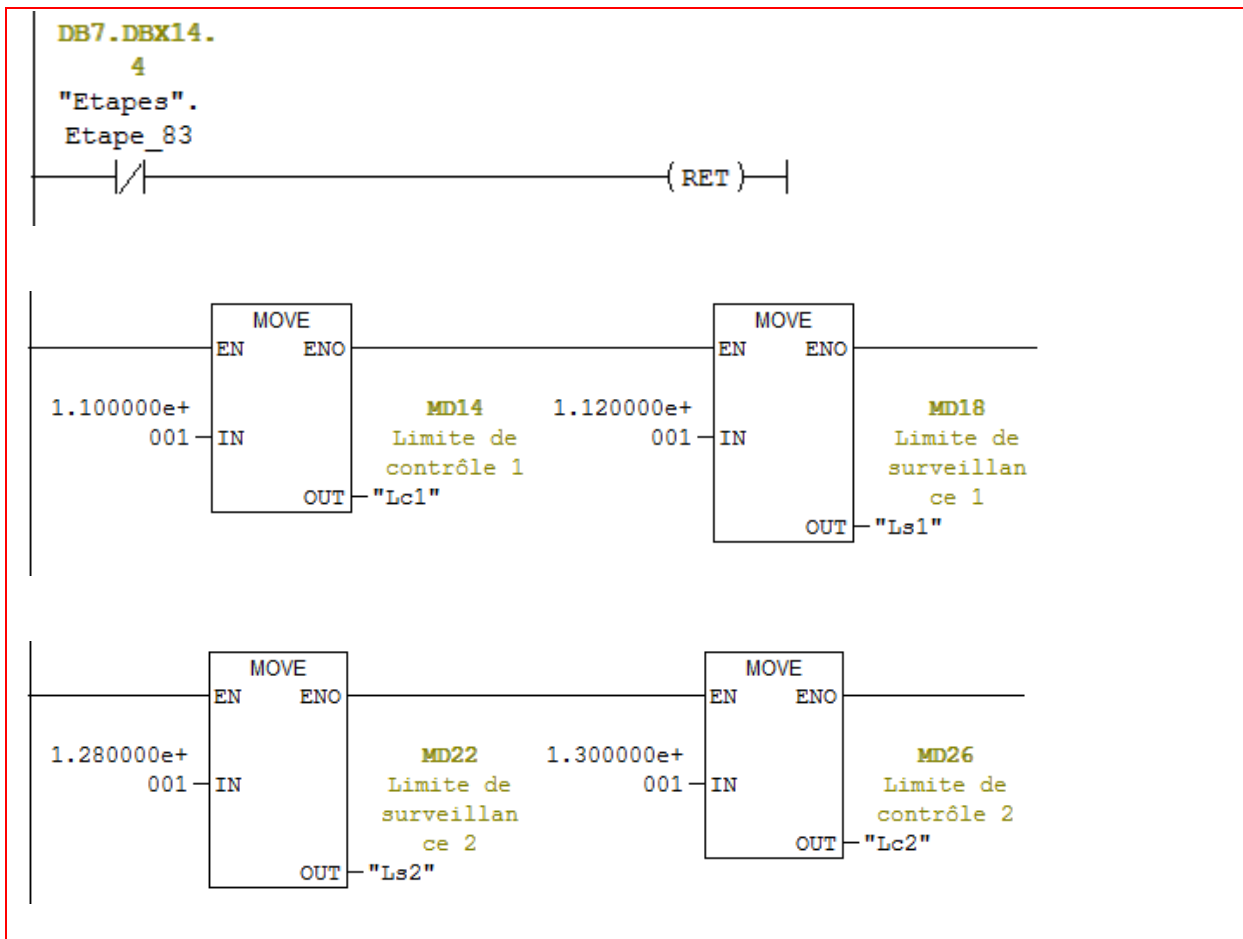
D'après le grafcet figure 7, la condition de lancement du calcul de la moyenne sera vraie une fois les 5 mesures effectuées : la condition de lancement est X83.

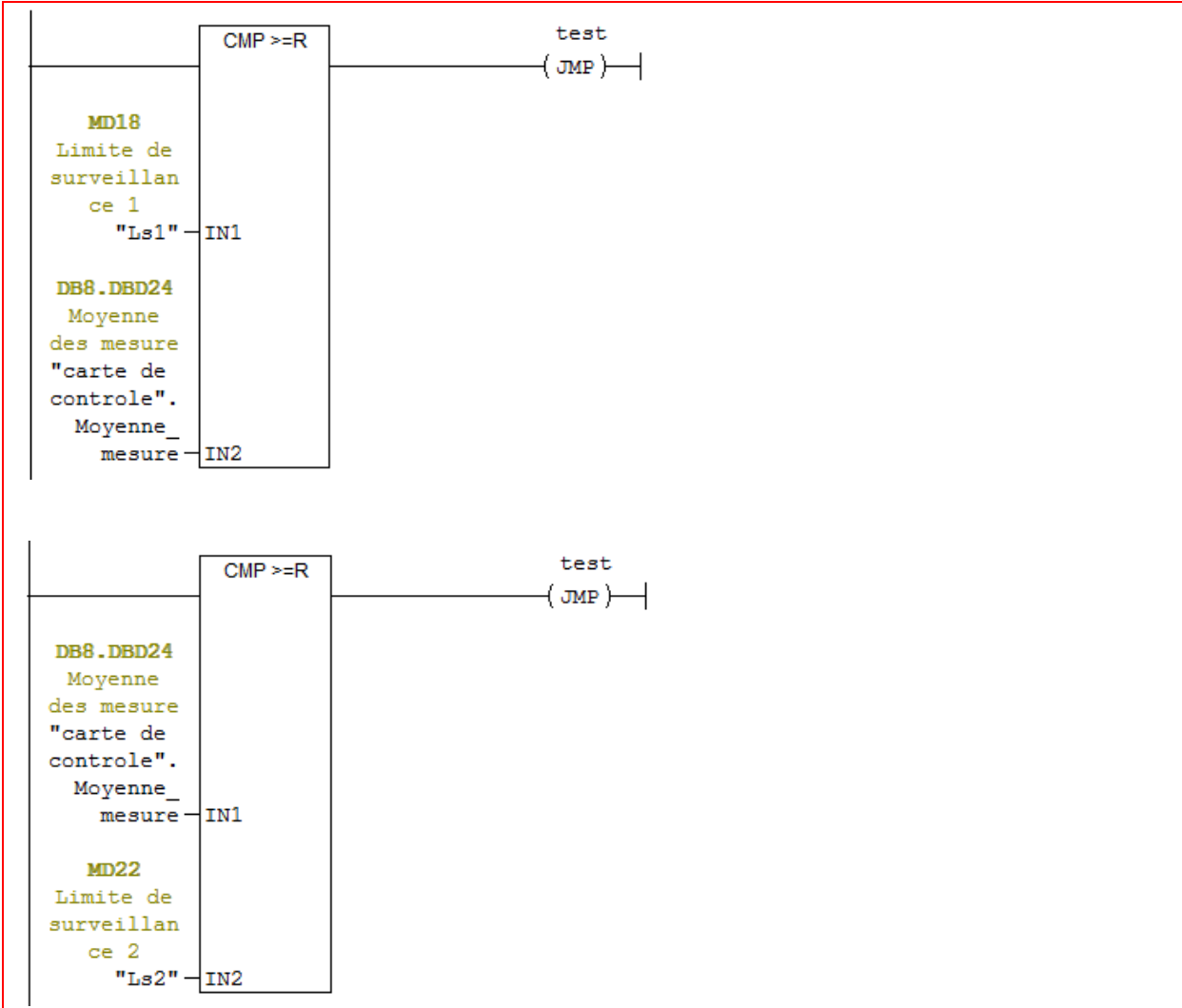
**Question I.5 – Proposer une méthode et un langage de traduction permettant de calculer la moyenne du lot de pièces contrôlées.**

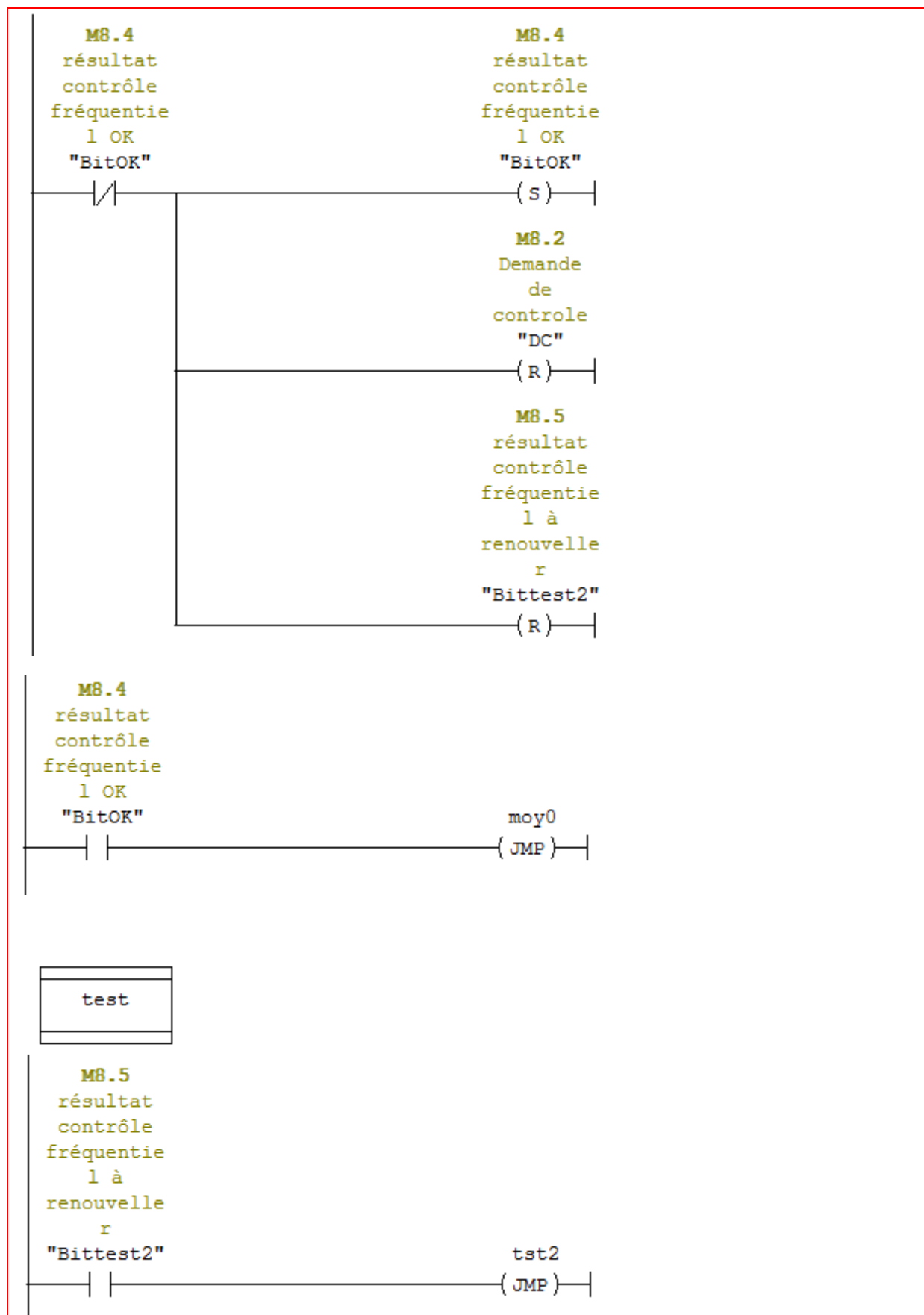
**Réponse**

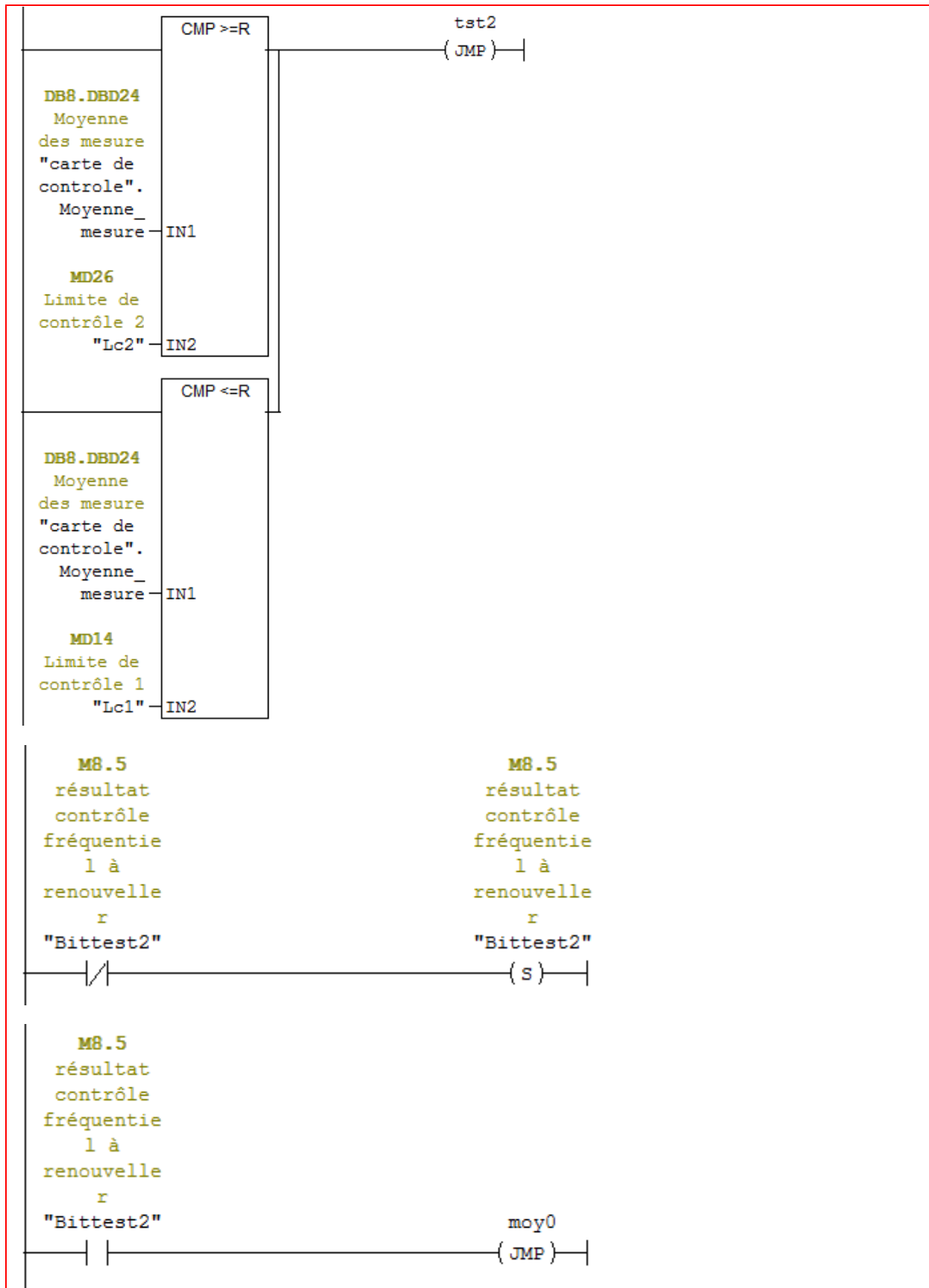
On peut facilement traduire l'algorithme à l'aide d'un des 5 langages de la norme CEI 61131-3. En langage Ladder (4 blocs sommateur et 1 bloc diviseur). Certaines suites logicielles proposent des fonctions statistiques directement intégrées dans des blocs fonctions (dans ce cas un seul bloc de filtre moyenneur de longueur 5

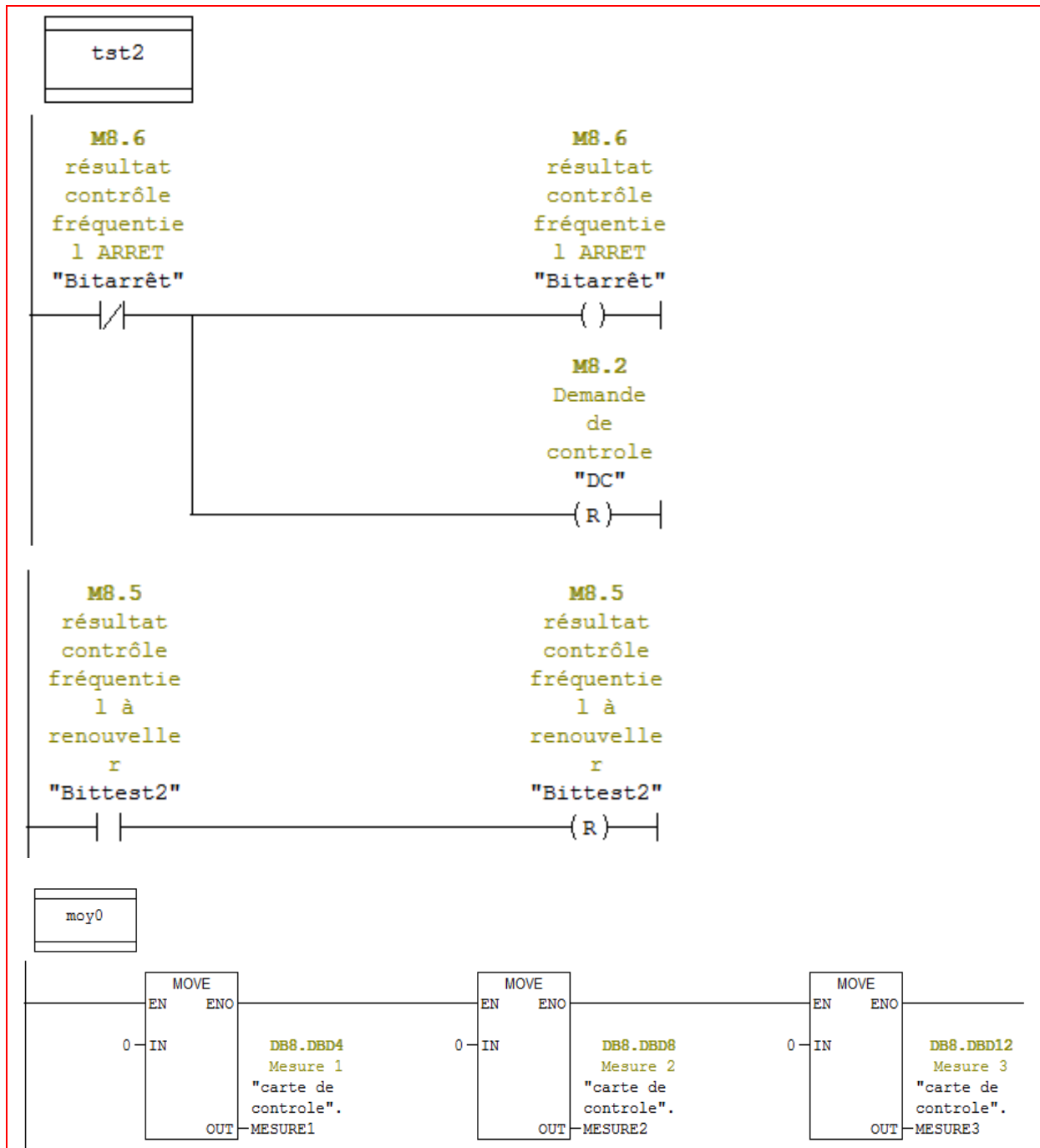
**Question I.6 – Rédiger dans un langage normalisé (en vous aidant du document ressource 2) le programme permettant d'interpréter la valeur de la moyenne, en respectant l'organigramme et le choix des mnémoniques de la figure 8.**











## Deuxième partie

## Etude du robot d'usinage 6 axes

**Question II.1 - Calculer le couple exercé par les ressorts de compensation de l'axe 2, noté  $C_r$ , en fonction de l'angle  $\theta_2$ ,  $k$ ,  $L$ ,  $r$  et  $F_p$ . En comparant ce couple à celui exercé par la gravité sur l'axe 2, noté  $C_g$ , pour la configuration  $\theta_i = 0$  avec  $i=\{1,3,4,5,6\}$ , en déduire les valeurs de précontrainte et de raideur qui permettent de compenser les effets de la gravité.**

## Réponse

Le couple exercé par les ressorts sur l'axe 2 peut s'écrire :

$$C_r = -F \cdot \overline{O_2 O_{31}} \cdot \sin \gamma = F \cdot (L + r) \cdot \sin \gamma$$

avec  $\gamma$  l'angle entre  $O_{12}O_{31}$  et  $O_2O_{31}$  et  $F$  l'effort des ressorts dirigé suivant  $O_{31}O_{12}$ , que l'on peut également noter :  $F = k \cdot x + F_p$  avec  $x = O_{31}O_{12} - L$ .

Dans le triangle  $O_{12}O_{31}O_2$  on trouve :

$$\begin{aligned} \overline{O_{31}O_{12}} &= \sqrt{\overline{O_{31}O_2}^2 + \overline{O_2O_{12}}^2 - \overline{O_{31}O_2} \cdot \overline{O_2O_{12}} \cdot \cos(\theta_2)} \\ &= \sqrt{(L+r)^2 + r^2 - 2(L+r)r \cos(\theta_2)} \end{aligned}$$

Et dans le même triangle  $\sin \gamma = r \sin \theta_2 / \overline{O_{31}O_{12}}$

$$\Rightarrow C_r = - \frac{(k(\overline{O_{31}O_{12}} - L) + F_p) \cdot (L+r)r \sin \theta_2}{\overline{O_{31}O_{12}}}$$

Le couple exercé par la gravité dans la configuration imposée (bras tendu) est :

$$C_g = (m_2 \cdot \overline{O_2 G_2} + m_3 \cdot \overline{O_2 G_3} + m_4 \cdot \overline{O_2 G_4} + m_5 \cdot \overline{O_2 G_5} + m_6 \cdot \overline{O_2 G_6}) g \cdot \sin \theta_2$$

$$C_g = (m_2 \cdot d_2 + m_3 \cdot (a_3 + e_3) + m_4 \cdot (a_3 + c_4 + d_4) + (m_5 + m_6) \cdot (a_3 + c_4 + a_5 + e_5)) g \cdot \sin \theta_2$$

D'où l'on déduit la raideur et la précontrainte permettant d'égaliser les couples :

$$k = \frac{(m_2 \cdot d_2 + m_3 \cdot (a_3 + e_3) + m_4 \cdot (a_3 + c_4 + d_4) + (m_5 + m_6) \cdot (a_3 + c_4 + a_5 + e_5)) g}{r(L+r)}; \quad F_p = k \cdot L$$

On ne discute pas ici de la valeur de précontrainte obtenue, mais elle n'est en pratique pas atteignable.

**Question II.2 - Calculer la position d'équilibre statique du bras 2 (dans la configuration  $\theta_i = 0$  avec  $i=\{1,3,4,5,6\}$ ) pour une charge embarquée de 15 Kg (broche et support).**

Le couple exercé par la gravité dans la configuration imposée (bras tendu) avec la charge est :

$$C_g = (m_2 \cdot d_2 + m_3 \cdot (a_3 + e_3) + m_4 \cdot (a_3 + c_4 + d_4) + (m_5 + m_6 + 15) \cdot (a_3 + c_4 + a_5 + e_5)) g \cdot \sin \theta_2$$

On cherche l'angle  $\theta_2$  tel que :

$$C_g + C_r = 0$$

A.N :

$$C_g = 2978 Nm \Rightarrow \theta_2 = 108^\circ$$

**Question II.3 – Donner la ou les hypothèses qui permettent de négliger l'influence de la partie électrique des actionneurs (asservissement en courant) sur la dynamique globale de l'axe.**

**Réponse**

Dynamique électrique  $\gg$  à la dynamique mécanique (hypothèse qui sera naturellement vérifiée par la mise en œuvre d'une structure d'asservissement par boucles en cascade)

**Question II.4 – Expliciter le principe de fonctionnement du résolveur.**

**Réponse**

Le principe tient dans le mouvement d'une bobine dont la tension à ses bornes est induite par une bobine fixe alimentée en courant alternatif. L'amplitude de la tension obtenue est directement liée à la variation du couplage des deux bobines et donc à l'angle entre les deux axes magnétiques.

**Question II.5 – Donner les relations temporelles décrivant le comportement dynamique du système.**

**Réponse**

$$\begin{cases} (J_m + J_r) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \Omega_m = C_m - C_1 \\ \frac{dC_2}{dt} = K_t (\Omega_2 - \Omega_{ch}) \\ J_{ch} \frac{d\Omega_{ch}}{dt} = C_2 - C_{ch} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \Omega_2 = \frac{C_1}{C_2} = n \end{cases}$$

**Question II.6 – Les opérations d'usinages réalisées par le robot se font dans le cadre de l'Usinage Grande Vitesse. Justifier cette stratégie d'usinage en décrivant les implications de l'UGV sur la dynamique du système.**

**Réponse**

UGV = efforts de coupe faibles comparativement à un usinage conventionnel. Donc à priori moins contraignant pour cette structure sérielle souple (de ce fait  $C_{ch}$  est réduit, voire parfois négligeable)

**Question II.7 – En négligeant le couple de perturbation  $C_{ch}$  sur l'axe, déterminer sous forme canonique les fonctions de transfert  $\Omega_{ch}(p)/C_m(p)$  et  $\Omega_m(p)/C_m(p)$  ( $p$  étant l'opérateur de Laplace dans le domaine d'étude continu).**

**Réponse**

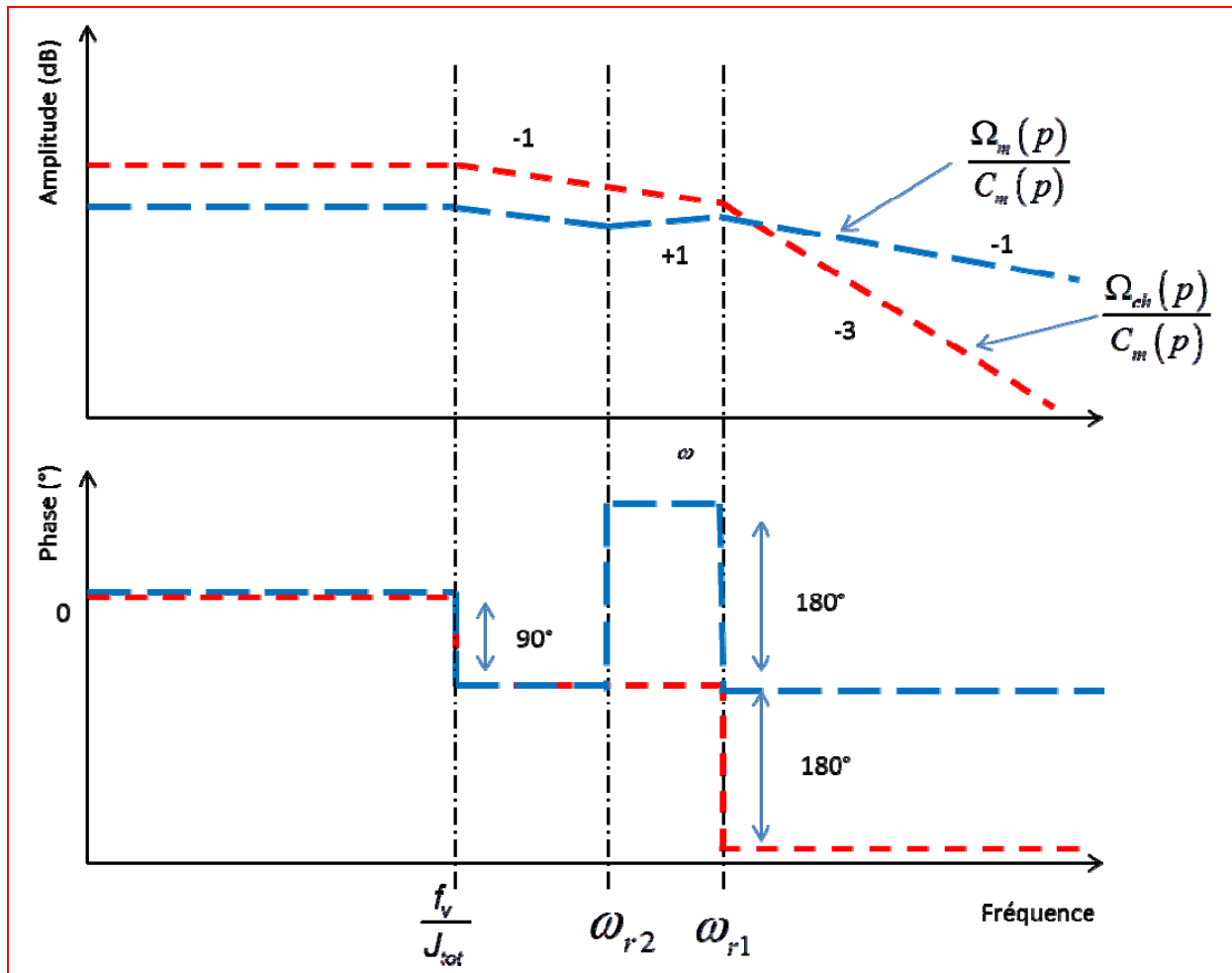
$$\frac{\Omega_{ch}(p)}{C_m(p)} = \frac{K_t n}{J_{ch} (J_m + J_r) p^3 + J_{ch} f_v p^2 + K_t (J_m + J_r + n^2 J_{ch}) p + K_t f_v}$$

$$\frac{\Omega_m(p)}{C_m(p)} = \frac{K_t \left( 1 + \frac{J_{ch}}{K_t} p^2 \right)}{J_{ch} (J_m + J_r) p^3 + J_{ch} f_v p^2 + K_t (J_m + J_r + n^2 J_{ch}) p + K_t f_v}$$

**Question II.8 – Tracer l'allure des diagrammes de Bode asymptotiques des deux fonctions de transfert précédentes.**

**Réponse**





**Question II.9 – En vous appuyant sur les diagrammes de Bode des deux fonctions, argumenter sur le choix de placement du capteur qui vous semble judicieux au regard des différents critères recherchés classiquement pour un asservissement (stabilité, rapidité et précision).**

**Réponse**

Dans les 2 cas, la mesure (donc l'asservissement) sera sensible à la résonance mécanique. Dans le cas de la mesure indirecte (mesure sur l'arbre moteur), l'antirésonance introduit un défaut local dont les avantages sont : pente normalisée de 1<sup>er</sup> ordre en haute fréquence (3<sup>ème</sup> ordre dans l'autre cas) donc meilleure rapidité et phase équivalente à un 1<sup>er</sup> ordre en haute fréquence, donc pas de limite de stabilité si bouclage par un simple gain.

**Question II.10 – Déterminer le modèle idéalisé de la transmission mécanique  $\Omega_{ch}(p)/C_m(p)$  en considérant une transmission parfaitement rigide ( $K_i \rightarrow \infty$ ).**

**Réponse**

$$\frac{\Omega_{ch}(p)}{C_m(p)} = \frac{n}{(J_{tot}p + f_v)} = \frac{n/f_v}{1 + \frac{J_{tot}}{f_v}p}$$

**Question II.11 – Déterminer les valeurs de  $K_p$  sous forme littérale assurant un système bouclé stable.**

**Réponse**

$$FTBF_i(p) = \frac{I(p)}{I_{ref}(p)} = \frac{K_i.K_{can}.K_p.K_{cna} \cdot \frac{K}{1 + \tau_e.p}}{1 + K_p.K_{cna} \cdot \frac{K}{1 + \tau_e.p} \cdot K_i.K_{can}} = \frac{K_p.K_t}{1 + \tau_e.p + K_p.K_t}$$

$$FTBF_i(p) = \frac{I(p)}{I_{ref}(p)} = \frac{\frac{K_p.K_t}{1 + K_p.K_t}}{1 + \frac{\tau_e}{1 + K_p.K_t} \cdot p}$$

Le système est stable ssi :  $K_p > -\frac{1}{K_t}$

**Question II.12 – Déterminer le gain statique du système bouclé  $G_{sc}$  sous forme littérale.**

Réponse

$$G_{sc} = \frac{K_p.K_t}{1 + K_p.K_t}$$

**Question II.13 – Quelle serait l'action à rajouter à l'action proportionnelle pour obtenir un gain statique unitaire indépendant des fluctuations du gain statique du processus (MSAP+onduleur)?**

Réponse

Une action intégrale

**Question II.14 – Déterminer la valeur numérique de  $K_p$  notée  $K_{pa}$  telle que le gain statique en boucle fermée soit égal à 95%.**

Réponse

$$G_{sc} = \frac{K_p.K_t}{1 + K_p.K_t} = \frac{K_p.K_{cna}.K.K_i.K_{can}}{1 + K_p.K_{cna}.K.K_i.K_{can}} = \frac{K_p \cdot \frac{10}{32768} \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot \frac{4096}{10}}{1 + K_p \cdot \frac{10}{32768} \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot \frac{4096}{10}} = 95\%$$

$K_{pa}=1520$

**Question II.15 – Pour  $K_p=K_{pa}$ , quelle est la valeur numérique de la constante de temps en boucle fermée de l'asservissement notée  $\tau_{BF}$ . En déduire le temps de réponse à 5% :  $tr5\%$ .**

Réponse

$$\tau_{BF} = \frac{\tau_e}{1 + K_p.K_t} = \frac{\tau_e}{1 + K_p.K_{cna}.K.K_i.K_{can}} = \frac{0,002}{1 + 1520 \cdot \frac{10}{32768} \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot \frac{4096}{10}}$$

$\tau_{BF}=100\mu s.$

$tr5\%=3 \cdot \tau_{BF}=300\mu s.$

**Question II.16 – Pour  $K_p=1520$  déterminer l'original  $i(t)$  de  $I(p)$  en réponse à l'échelon unitaire avec une condition initiale nulle ( $i(t=0)=0$ ). Tracer sur le document réponse 2 la courbe de  $i(t)$**

Réponse

$$FTBFi(p) = \frac{I(p)}{I_{ref}(p)} = \frac{\frac{Kp.Kt}{1 + Kp.Kt}}{1 + \frac{\tau e}{1 + Kp.Kt} \cdot p}$$

$$i(t) = \frac{Kp.Kt}{1 + Kp.Kt} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau BF}})$$

$$i(t) = 0,95 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{0,0001}})$$

Courbe : Cf. Question II.28

**Question II.17 – A partir de la transmittance  $\frac{I(p)}{U(p)}$  en déduire une équation différentielle**

**littérale de la forme  $\frac{di(t)}{dt} + a.i(t) = b.u(t)$**

**Réponse**

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{K}{1 + \tau e \cdot p}$$

$$\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{\tau e} \cdot i(t) = \frac{K}{\tau e} \cdot u(t)$$

**Question II.18 – Déterminer la réponse du courant  $i(t)$  à un échelon sur  $u(t)$  d'amplitude  $u_k$  à partir de la condition initiale  $i_k$  sous forme littérale.**

**Réponse**

$$i(t) = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau e}} + K \cdot u_k$$

$$A = i_k - K \cdot u_k$$

$$i(t) = i_k \cdot e^{-\frac{t}{\tau e}} + K \cdot u_k (1 - e^{-\frac{t}{\tau e}})$$

**Question II.19 – En utilisant le résultat de la question II.18, déterminer l'équation de récurrence du processus sous la forme  $i(k+1) + f \cdot i(k) = g \cdot u(k)$ .**

**Réponse**

$$i(t) = i_k \cdot e^{-\frac{t}{\tau e}} + K \cdot u_k (1 - e^{-\frac{t}{\tau e}})$$

$$i(k+1) - e^{-\frac{T}{\tau e}} \cdot i(k) = K \cdot (1 - e^{-\frac{T}{\tau e}}) \cdot u(k)$$

$$i(k+1) + f \cdot i(k) = g \cdot u(k)$$

**Question II.20 – Montrer que le système bouclé peut se représenter sous la forme d'une équation de récurrence de la forme  $i(k+1) + f_{BF} \cdot i(k) = g_{BF} \cdot i_{ref}(k)$ .**

**Réponse**

$$i(k+1) + f \cdot i(k) = g \cdot K_{cn} \cdot K_p [K_i \cdot K_{can} \cdot i_{ref}(k) - K_{can} \cdot K_i \cdot l(k)].$$

$$i(k+1) + [f + g \cdot (Kt/K) \cdot Kp] \cdot i(k) = g \cdot (Kt/K) \cdot Kp \cdot iref(k)$$

$$i(k+1) + f_{BF} \cdot i(k) = g_{BF} \cdot iref(k).$$

**Question II.21 – Déterminer la solution de cette équation récurrente à partir de l'état initial de  $i(k=0)=I_0$  et d'un échelon de consigne  $iref(k)=Id$  en fonction de  $f_{BF}$ ,  $g_{BF}$ ,  $I_0$  et  $Id$ .**

Réponse

$$\text{SESSM : } I(k) = A \cdot (-f_{BF})^k$$

$$\text{Sol. Particulière: } I(k+1) = I(k) \text{ pour } k \rightarrow \infty; I(k) = \frac{g_{BF}}{1 + f_{BF}} \cdot Id$$

$$\text{Sol. Complète : } I(k) = A \cdot (-f_{BF})^k + \frac{g_{BF}}{1 + f_{BF}} \cdot Id \text{ et C.l.: } i(k=0) = I_0 \text{ donc } A = I_0 - \frac{g_{BF}}{1 + f_{BF}} \cdot Id$$

$$I(k) = \left( I_0 - \frac{g_{BF}}{1 + f_{BF}} \right) \cdot (-f_{BF})^k + \frac{g_{BF}}{1 + f_{BF}} \cdot Id$$

**Question II.22 – Déterminer le domaine de stabilité de l'asservissement dans le plan  $T, Kp$ . On présentera les résultats sous forme de 2 inégalités donnant  $Kp$  en fonction de la période d'échantillonnage  $T$  et des paramètres du processus sous forme littérale.**

Réponse

$$\text{L'équation récurrente converge ssi : } |-f_{BF}| = \left| e^{-\frac{T}{\tau e}} - Kt \cdot \left( 1 - e^{-\frac{T}{\tau e}} \right) \cdot Kp \right| < 1$$

$$-1 < e^{-\frac{T}{\tau e}} - Kt \cdot \left( 1 - e^{-\frac{T}{\tau e}} \right) \cdot Kp < 1$$

$$Kp > -\frac{1}{Kt} \text{ et } Kp < \frac{1 + e^{-\frac{T}{\tau e}}}{Kt \cdot \left( 1 - e^{-\frac{T}{\tau e}} \right)}$$

**Question II.23 – Déterminer le domaine tel que la réponse indicielle de l'asservissement ne présente pas d'oscillation dans le plan  $T, Kp$ . On présentera le résultat sous forme d'une inégalité donnant  $Kp$  en fonction de la période d'échantillonnage  $T$  et des paramètres du processus sous forme littérale.**

Réponse

$$\text{La réponse n'oscille pas ssi : } -f_{BF} = e^{-\frac{T}{\tau e}} - Kt \cdot \left( 1 - e^{-\frac{T}{\tau e}} \right) \cdot Kp > 0$$

$$Kp < \frac{e^{-\frac{T}{\tau e}}}{Kt \cdot \left( 1 - e^{-\frac{T}{\tau e}} \right)}$$

**Question II.24 – Déterminer  $Kp$  en fonction de la période d'échantillonnage  $T$  et des paramètres du processus sous forme littérale tel que le système atteigne son régime permanent en une seule période d'échantillonnage (réponse pile). Discuter ce type de commande.**

Réponse

La réponse est de type pile ssi :  $-f_{BF} = e^{-\frac{T}{\tau e}} - Kt.(1 - e^{-\frac{T}{\tau e}}).Kp = 0$

$$Kp = \frac{e^{-\frac{T}{\tau e}}}{Kt.(1 - e^{-\frac{T}{\tau e}})}$$

C'est la limite d'oscillation

**Question II.25 – Quelles sont les éléments qui ont conduit à cette plage de choix de la période d'échantillonnage ?**

Réponse

Le régime transitoire du 1<sup>er</sup> ordre continu associé est de la forme  $e^{-\frac{t}{\tau_{BF}}}$ .

Un choix de période  $T > \tau_{BF}$  ne donnerait pas un suivi correct de la dynamique d'évolution des variables et le choix d'une période  $T < \tau_{BF}/4$  nécessiterait un calculateur ayant une vitesse d'échantillonnage (donc coût) élevé sans apport notable quant au suivi de l'évolution des variables.

**Question II.26 – Déterminer le domaine correspondant aux valeurs conseillées pour la période d'échantillonnage  $T$  du système bouclé. On présentera le résultat sous forme de 2 inégalités donnant  $Kp$  en fonction de la période d'échantillonnage  $T$  et des paramètres du processus sous forme littérale.**

Réponse

$$\frac{\tau_{BF}}{4} < T < \tau_{BF}$$

$$\frac{1}{4} < \frac{T}{\tau_{BF}} < 1$$

$$e^{-1} < e^{-\frac{T}{\tau_{BF}}} < e^{-\frac{1}{4}}$$

$$-e^{-\frac{1}{4}} < -e^{-\frac{T}{\tau_{BF}}} = f_{BF} < -e^{-1}$$

$$-e^{-\frac{1}{4}} < -e^{-\frac{T}{\tau e}} + Kt.(1 - e^{-\frac{T}{\tau e}}).Kp < -e^{-1}$$

$$Kp < \frac{e^{-\frac{T}{\tau e}} - e^{-1}}{Kt.(1 - e^{-\frac{T}{\tau e}})}$$

$$Kp > \frac{e^{-\frac{T}{\tau e}} - e^{-\frac{1}{4}}}{Kt.(1 - e^{-\frac{T}{\tau e}})}$$

**Question II.27 – Déterminer la valeur numérique de Kp notée Kpn. Comparer le résultat avec la valeur Kpa obtenue à la question II.14.**

**Réponse**

$$-f_{BF} = e^{-\frac{T}{\tau BF}} = e^{-\frac{T}{\tau e}} - Kt.(1 - e^{-\frac{T}{\tau e}}).Kp$$

$$Kp = \frac{e^{-\frac{T}{\tau e}} - e^{-\frac{T}{\tau BF}}}{Kt.(1 - e^{-\frac{T}{\tau e}})} = \frac{e^{-\frac{0,0001}{0,002}} - e^{-1}}{Kcna.K.Ki.Kcan.(1 - e^{-\frac{0,0001}{0,002}})}$$

$$Kp = \frac{e^{-\frac{0,1}{2}} - e^{-1}}{\frac{10}{32768} . 0,1 . 1 . \frac{4096}{10} . (1 - e^{-\frac{0,1}{2}})}$$

Kpn=957

Cette valeur est inférieure à celle de Kpa=1520. Cette limitation est liée à la période d'échantillonnage qui n'est pas infiniment faible.

**Question II.28 – Pour Kp = 957, déterminer la réponse du système numérique en réponse à l'échelon unitaire et condition initiale nulle (i(k=0)=0). Tracer sur le document réponse 2 la courbe de i(k). Comparer cette courbe avec celle de i(t) obtenu à la question II.16, conclure. Conclure quant au respect du cahier des charges fonctionnelles.**

## Réponse

$$I(k) = \left( I_0 - \frac{Kt.Kp}{1 + Kt.Kp} \right) \cdot \left( e^{-\frac{T}{\tau e}} - Kt \cdot \left( 1 - e^{-\frac{T}{\tau e}} \right) \cdot Kp \right)^k + \frac{Kt.Kp}{1 + Kt.Kp} \cdot Id$$

$$I(k) = \left( I_0 - \frac{Kt.Kp}{1 + Kt.Kp} \right) \cdot \left( e^{-\frac{T}{\tau BF e}} \right)^k + \frac{Kt.Kp}{1 + Kt.Kp} \cdot Id$$

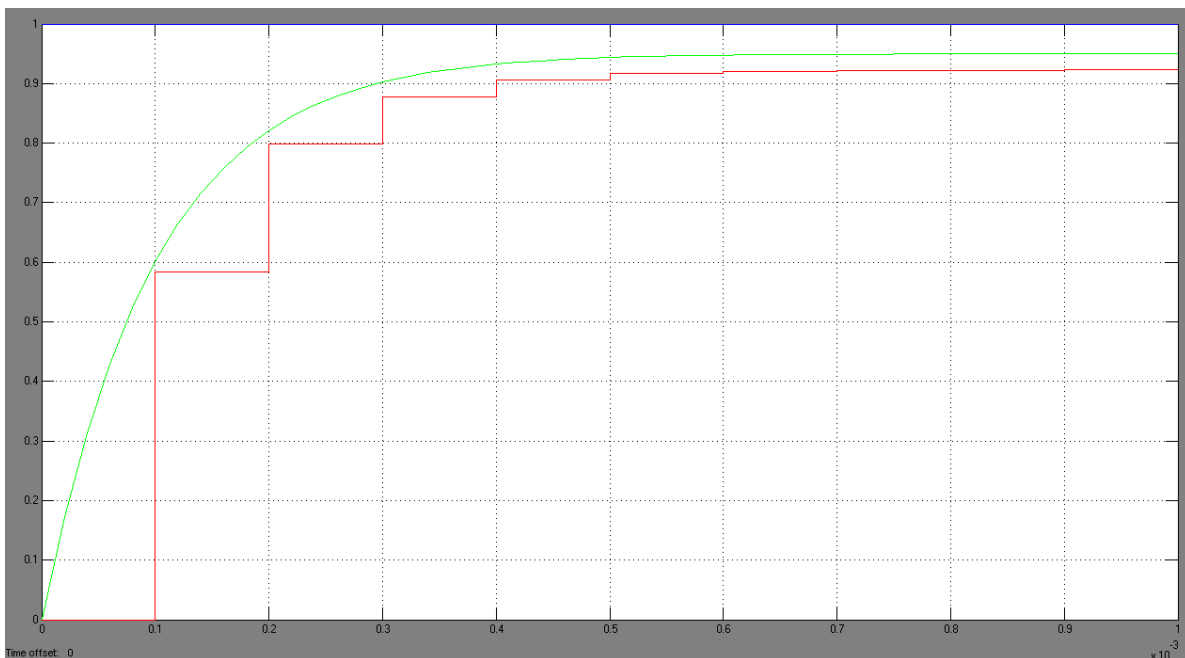
$$Kt = Kcna \cdot K \cdot Ki \cdot Kcan = \frac{10}{31768} \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot \frac{4096}{10} = \frac{409,6}{31768}$$

$$I(k) = \left( 0 - \frac{\frac{409,6}{31768} \cdot 0,957}{1 + \frac{409,6}{31768} \cdot 0,957} \right) \cdot \left( e^{-\frac{0,0001}{0,0001}} \right)^k + \frac{\frac{409,6}{31768} \cdot 0,957}{1 + \frac{409,6}{31768} \cdot 0,957} \cdot 1$$

$$I(k) = \frac{\frac{409,6}{31768} \cdot 0,957}{1 + \frac{409,6}{31768} \cdot 0,957} \cdot [1 - (e^{-1})^k]$$

$$I(k) = \frac{\frac{409,6}{31768} \cdot 0,957}{1 + \frac{409,6}{31768} \cdot 0,957} \cdot [1 - e^{-k}]$$

$$I(k) = 0,923 \cdot [1 - e^{-k}]$$



La dynamique est respectée mais pas le gain statique (95%) : Un seul paramètre Kp réglable.

Le réglage par des méthodes classique de l'automatique continue est acceptable.

CdCF : D1%=0 vérifié

$tr_{5\%} < 0,5ms$  vérifié

$\varepsilon_S < 10\%$  vérifiée

**Question II.29 – Dans le plan  $Kp, T$  la réponse est-elle stable ? Avec ou sans oscillation ? Respectant la période conseillée d'échantillonnage ?**

**Réponse**

Système stable ( $f_{BF} < 1$ ); sans oscillation ( $f_{BF} > 0$ ) ; respectant la période d'échantillonnage  $\tau_{BF}/4 \leq T \leq \tau_{BF}$  car  $T = \tau_{BF}$

**Question II.30 – Justifier le choix d'un tel correcteur pour la boucle de vitesse.**

**Réponse**

Le correcteur de vitesse agit sur un simple premier ordre de gain statique non unitaire. En élevant la classe du système, l'action intégrale garantira la précision en régime permanent. Le réglage proposé permet de plus d'obtenir une boucle fermée du 1<sup>er</sup> ordre. L'action proportionnelle permettra un réglage direct du temps de réponse en vitesse.

**Question II.31 – Expliciter la fonction de transfert de la boucle de vitesse  $\frac{\Omega_m(p)}{\Omega_{ref}(p)}$  sous forme canonique. Donner littéralement la bande passante à -3dB de cet asservissement, notée  $Bp$ . Réaliser l'application numérique pour  $k_m = 1000$ ,  $k_v = 11$  et  $\tau_m = 6$  s.**

**Réponse**

$\frac{\Omega_m(p)}{\Omega_{ref}(p)} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_m}{k_m k_v} p}$ , la bande passante à -3dB est  $\frac{k_m k_v}{2\pi \cdot \tau_m}$  Hz. A.N :  $Bp = 295$  Hz

**Question II.32 – Justifier le choix d'un tel correcteur pour la boucle de position.**

**Réponse**

La chaîne directe de position contient un intégrateur pur, donc pas besoin d'action intégrale. D'après le choix de réglage, la dynamique de vitesse (bande passante) sera très supérieure à celle de position, ce qui permet de négliger la boucle de vitesse lors du calcul de la dynamique en position.

**Question II.33 – Calculer la fonction de transfert en position de l'axe  $\frac{\theta_{ch}(p)}{\theta_{ch,ref}(p)}$  en émettant une hypothèse simplificatrice au regard de  $\frac{1}{k_p} \ll Bp$ .**

**Réponse**

$\frac{\theta_{ch}(p)}{\theta_{ch,ref}(p)} = \frac{1 + \frac{m}{k_p} p}{1 + \frac{1}{k_p} p}$

**Question II.34 – Le paramètre  $m$  permet d'activer ou non (0 ou 1) la fonction dite « d'anticipation » sur l'axe. Comparer dans les deux cas, les performances en termes de suivi de trajectoire et de rapidité pour une référence de position en rampe ( $\theta_{ch,ref}(t) = 0,8t$ ). Conclure quant à l'intérêt de cette fonction d'anticipation dans le cas de l'usinage.**

**Réponse**

Anticipation non validée  $m = 0$



$$\frac{\theta_{ch}(p)}{\theta_{ch,ref}(p)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_p} p} ; \text{ erreur de poursuite en } 0,8/k_p$$

Anticipation validée  $\theta_{ch}(p) = \theta_{ch,ref}(p)$  suivi théorique parfait !

**Question II.35 – Affiner les conclusions précédentes en considérant le modèle d'axe développé dans la partie II.1 (intégrant la souplesse du réducteur).**

**Réponse**

Les hypothèses faites sur les dynamiques relatives aux boucles de courant et de vitesse vont déjà entraîner dans la pratique des erreurs de poursuite. L'ordre de grandeur de cette erreur va s'amplifier si le système est souple, d'autant que la mesure se fera au niveau de l'arbre moteur. La charge se comportera alors comme un oscillateur harmonique induisant une dégradation du suivi (oscillations, dégradation de l'état de surface).

**Question II.36 –Présenter de manière synthétique la démarche de résolution de réglage des différentes boucles asservies, les hypothèses retenues, leurs validités dans ce cas d'étude. Une valeur de l'action proportionnelle de la boucle de position réalisant un comportement de l'axe du robot est évaluée à 200. Conclure quant au respect du cahier des charges fonctionnelles.**

**Réponse**

3 boucles imbriquées Position/Vitesse/Courant associée à 3 constantes de temps éloignées les unes des autres :

$$\tau_{BF\theta} = 1/k_{p\theta} = 1/200 = 5\text{ms} \gg \tau_{BF\Omega} = \tau_m / (k_m \cdot k_v) = 6 / (1000 \cdot 11) = 545\mu\text{s} \gg \tau_{BFi} = 100\mu\text{s}.$$

Le découplage des modes est donc recevable.

La validité d'approximation numérique équivalent continu a été démontrée sur la boucle de courant qui se trouve être la plus rapide donc valide pour les 2 autres boucles externes.

CdCF : D1%=0 vérifié (1<sup>er</sup> ordre)

$$tr_{5\%} < 20\text{ms} \text{ vérifié } (tr_{5\%} = 3 \times \tau_{BF\theta} = 3 \times 5\text{ms})$$

$\varepsilon_s = 0$  vérifiée (système de classe 1)

$\varepsilon_p = 0$  vérifiée (anticipation)

Aux approximations du modèle près.

## Troisième partie

## Etude de l'entraînement de l'axe vertical du robot cartésien : vérification du dimensionnement moteur

Question III.1 – Déterminer le couple  $C_g$  que doit fournir la MSAP pour compenser l'effet de la gravité sur l'axe vertical.

Réponse

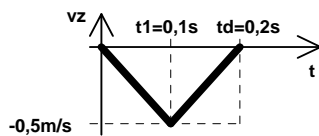
$$C_g = Mz.g.r.\frac{1}{k} = 20.9,81.0,04.\frac{1}{6}$$

$$C_g = 1,31N.m$$

Question III.2 – Déterminer l'allure de l'évolution de la vitesse  $v_z$  de l'axe vertical en fonction du temps pendant la phase 1 en minimisant la complexité du profil (accélérations constantes ou nulles). On précisera les points caractéristiques dans le plan temps,vitesse.

Réponse

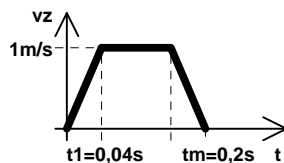
$$z = -25mm = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_z}{0,1} \cdot 0,1^2 \Rightarrow v_z(t1 = 0,1s.) = 0,5m/s$$



Question III.3 – Déterminer l'allure de l'évolution de la vitesse  $v_z$  de l'axe vertical en fonction du temps pendant la phase 7 en minimisant la complexité du profil (accélérations constantes ou nulles). On précisera les points caractéristiques dans le plan temps,vitesse.

Réponse

$$z = 80mm = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{t1} \cdot t1^2 + 1 \cdot \left(\frac{tm}{2} - t1\right) \Rightarrow t1 = 0,04s$$



Question III.4 – Déterminer les vitesses caractéristiques de rotation de la MSAP en tr/min sur le cycle de prise/transfert/dépose.

Réponse

$$n = \frac{vz}{r} \cdot k \cdot \frac{60}{2\pi}$$

$$n_{\max \text{ phase } 1,3} = \frac{0,5}{0,04} \cdot 6 \cdot \frac{60}{2\pi} = 716 \text{ tr / min}$$

$$n_{\max \text{ phase } 5,7} = \frac{1}{0,04} \cdot 6 \cdot \frac{60}{2\pi} = 1432 \text{ tr / min}$$

**Question III.5 – Après avoir défini les valeurs numériques des différents couples à fournir par la MSAP sur un cycle de prise/transfert/dépose du carter, tracer l'allure de l'évolution de la vitesse  $n$  et du couple  $C$  de la MSAP en fonction du temps sur le document-réponse 1.**

Réponse

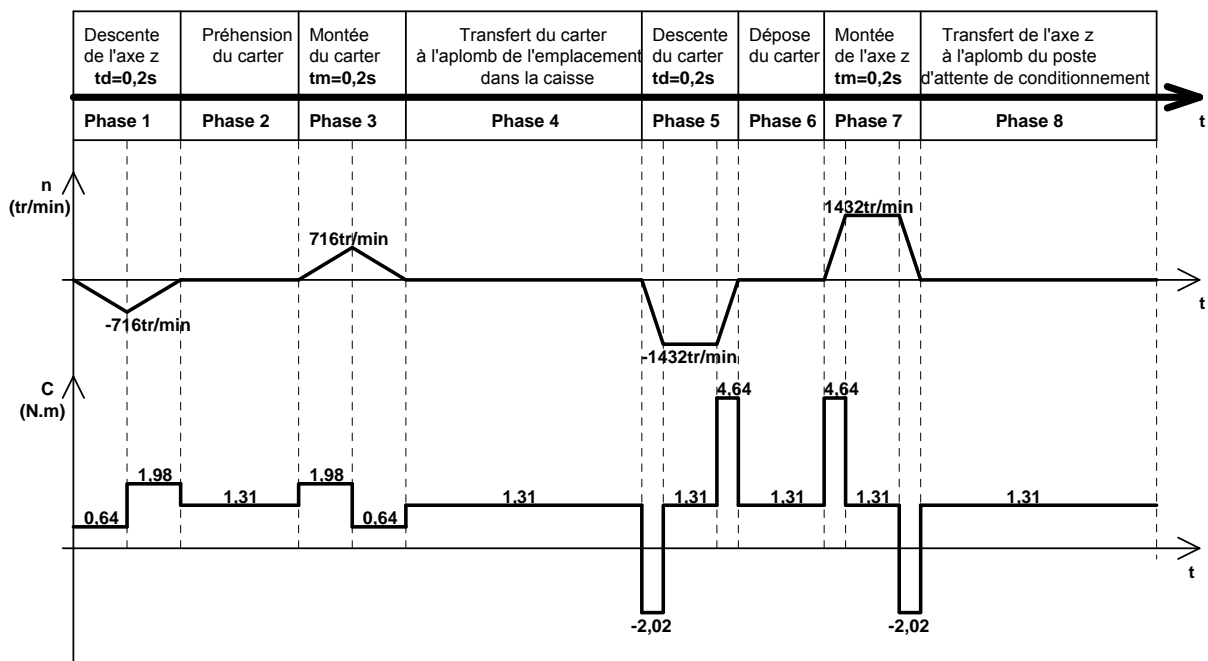
Effet de la gravité :  $C_g = 1,31 \text{ N.m}$

Effet de l'inertie ramenée sur les phases 1 ou 3 :

$$|C_j| = r \cdot \frac{1}{k} \cdot (Mz \cdot \frac{0,5}{0,1}) = 0,04 \cdot \frac{1}{6} \cdot 20 \cdot \frac{0,5}{0,1} = 0,67 \text{ N.m}$$

Effet de l'inertie ramenée sur les phases 5 ou 7 :

$$|C_j| = r \cdot \frac{1}{k} \cdot (Mz \cdot \frac{1}{0,04}) = 0,04 \cdot \frac{1}{6} \cdot 20 \cdot \frac{1}{0,04} = 3,33 \text{ N.m}$$



**Question III.6 – Que cherche à respecter le critère Temps de cycle  $\leq 5\%$  constante de temps thermique de la machine ?**

Réponse

Evolution de la température dans la machine suffisamment faible pour négliger son impact sur la durée de vie de la machine ( $\Delta\theta=\pm 1^\circ\text{C}$ ).

**Question III.7 – Déterminer le temps de cycle T.**

Réponse

$$T=45+9.(2.t_d+2.t_m)=45+9.(2.0,2+2.0,2)=52,2\text{s}$$

**Question III.8 – Déterminer le couple thermique Cth1.**

Réponse

$$C_{th1} = \sqrt{\frac{\sum C_i^2 \cdot t_i}{T}} = \sqrt{\frac{9.(2.0,64^2 \cdot 0,1 + 2.1,98^2 \cdot 0,1 + 2.2,02^2 \cdot 0,04 + 2.4,64^2 \cdot 0,04 + 2.1,31^2 \cdot 0,12) + 1,31^2 \cdot 45}{52,2}}$$

$$C_{th1}=1,43\text{N.m}$$

**Question III.9 – Choisir dans le document ressource 1 une MSAP. On précisera les critères utilisés pour le choix. Si des critères sont manquant dans le document ressource 1 les préciser.**

Réponse

XV-8017

$$C_n=1,91\text{N.m} \geq C_{th1}=1,43\text{N.m}$$

$$C_{max}=5,49\text{N.m} \geq C_{max\text{cycle}}=4,64\text{N.m}$$

$$N_{max}=5000\text{tr/min} \geq N_{max\text{cycle}}=1432\text{tr/min}$$

$$\sigma_{th} = ? \geq 20.T=20.52,2=17\text{min } 24\text{s}$$

**Question III.10 – Re-déterminer le graphe des vitesses et des couples à fournir par la MSAP avec prise en compte de l'inertie du rotor sur un cycle de prise/transfert/dépose du carter sur le document-réponse 1.**

Réponse

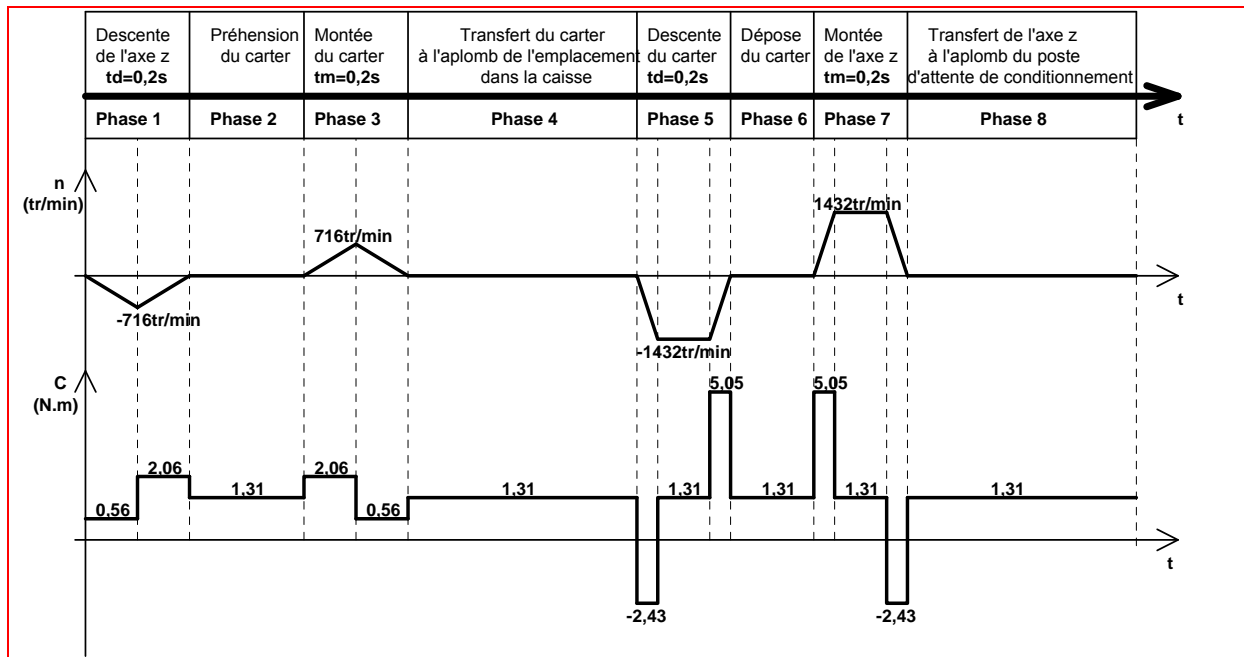
$$J_{MSAP}=1,092 \text{ kg.cm}^2$$

Effet de l'inertie du rotor de la MSAP ramenée sur les phases 1 ou 3 :

$$|C_{j_{MSAP}}| = J_{MSAP} \cdot \frac{d\omega_{MSAP}}{dt} = 1,092 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{716 \cdot \frac{2\pi}{60}}{0,1} = 0,08\text{N.m}$$

Effet de l'inertie du rotor de la MSAP ramenée sur les phases 5 ou 7 :

$$|C_{j_{MSAP}}| = J_{MSAP} \cdot \frac{d\omega_{MSAP}}{dt} = 1,092 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1432 \cdot \frac{2\pi}{60}}{0,04} = 0,41\text{N.m}$$



**Question III.11 – Déterminer le couple thermique  $C_{th2}$  avec prise en compte de l'inertie du rotor de la MSAP et de l'effet de saturation.**

Réponse

$$C_{th2} = \sqrt{\frac{\sum C_i^2 \cdot t_i}{T}} = \sqrt{\frac{9 \cdot (2,06^2 \cdot 0,1 + 2 \cdot (\frac{2,06}{0,9})^2 \cdot 0,1 + 2 \cdot (\frac{2,43}{0,9})^2 \cdot 0,04 + 2 \cdot (\frac{5,05}{0,9})^2 \cdot 0,04 + 2 \cdot 1,31^2 \cdot 0,12) + 1,31^2 \cdot 45}{52,2}}$$

$$C_{th2} = 1,51 \text{ N.m}$$

**Question III.12 – Le choix de la MSAP est-il toujours correct ?**

Réponse

Oui

XV-8017

$$C_n = 1,91 \text{ N.m} \geq C_{th2} = 1,51 \text{ N.m}$$

$$C_{max} = 5,49 \text{ N.m} \geq C_{max\text{cycle}} = 5,05 \text{ N.m}$$

$$N_{max} = 5000 \text{ tr/min} \geq N_{max\text{cycle}} = 1432 \text{ tr/min}$$

$$\sigma_{th} = ? \geq 20. T = 20.52,2 = 17 \text{ min } 24 \text{ s}$$

**Question III.13 – Afin d'optimiser l'utilisation de la MSAP dans le plan couple-vitesse quelle modification pourrait-on apporter à la chaîne cinématique de l'axe vertical ? Qu'en résulterait-il quant au choix de la MSAP ?**

Réponse

La MSAP XV-8017 (tout comme la majorité des MSAP) à une vitesse de rotation nominale (5000tr/min) bien supérieure à la vitesse maximale à obtenir sur le cycle (1432tr/min).

Une méthode d'optimisation consisterait à modifier le rapport de réduction  $k=6$  par  $k=18$ .

La MSAP XV-8017 deviendrait surdimensionnée en couple (d'un rapport quasiment équivalent à trois).

Un nouveau choix pourrait être une MSAP XV-606

$C_n=0,637\text{N.m}$  ;  $C_{\max}=1,82\text{N.m}$  ;  $N_{\max}=5000\text{tr/min}$

Attention la constante de temps thermique diminuant, elle peut devenir déterminante quant au choix.

**Question III.14 – Déterminer si ce critère est vérifié dans le cas de l'axe vertical. En cas de non-respect du critère, proposer des pistes permettant d'atteindre la valeur cible.**

**Réponse**

Critère non respecté.

$$J_{chr} = \frac{1}{k^2} \cdot r^2 \cdot M = \frac{1}{6^2} \cdot 0,04^2 \cdot 20 = 8,89\text{kg.cm}^2$$

$$J_{chr} = 8,89\text{kg.cm}^2 \leq 4 \cdot J_{MSAP} = 4 \cdot 1,092\text{kg.cm}^2 = 4,368\text{kg.cm}^2 \text{ non respecté}$$

Ce robot palettiseur n'a pas été dimensionné spécifiquement pour cette application. On retrouve cependant les mêmes ordres de grandeur. Le critère de capabilité dynamique n'est pas respecté ; ceci étant le système n'a pas vocation à réaliser du pick&place à forte dynamique

# RAPPORT DE L'ÉPREUVE DE LEÇON

J.J. BATON – J.J. DIVERCHY – C. GAMELON – V. PATELOUP

## **Objectifs**

---

A partir de connaissances relatives à l'ensemble des procédés et des processus utilisés dans la production de biens manufacturés ainsi qu'à leur automatisation, leurs contraintes d'applications et leurs performances technico économiques, l'épreuve de leçon de technologie vise à vérifier le potentiel pédagogique des candidats, leur aptitude à imaginer des scénarii de formation efficaces, à transmettre des connaissances justes et adaptées de façon motivante et structurée et à organiser les apports de connaissances dans un contexte de formation donné.

## **Déroulement de l'épreuve**

---

L'épreuve comporte une préparation d'une durée de 4 heures à l'issue de laquelle le candidat présente au jury sa leçon pendant une durée maximale de 45 minutes sans intervention du jury. Au terme de l'exposé, 15 minutes sont réservées à un entretien avec les membres du jury. Cet échange est destiné à apporter des précisions et des justifications relatives à la démarche pédagogique retenue mais également au fond technologique et scientifique.

Pendant la phase de préparation, le candidat a accès aux référentiels des principales formations de génie mécanique. Pour toutes les leçons, le dossier remis au candidat comporte l'ensemble des éléments nécessaires à la préparation de la leçon : ressources à caractère scientifique, pédagogique et industriel.

Un dossier numérique contenant les ressources informatiques identiques à celles fournies dans le dossier « papier » est à la disposition du candidat. D'autres documents peuvent être proposés, également sous forme numérique, sans être disponibles dans le dossier papier (séquences vidéo, animations, simulations...). Dans ce cas, les éléments fournis sous forme papier restent cependant suffisants pour répondre aux attentes de la leçon.

Le candidat dispose dès le début de la phase de préparation d'un micro-ordinateur portable lui permettant d'exploiter les documents numériques fournis et de préparer sa prestation devant les membres du jury. La salle d'interrogation dispose : d'un tableau blanc, d'un rétroprojecteur, d'un vidéo projecteur connectable sur le micro-ordinateur portable et de deux écrans de projection.

## **Attentes du jury et critères d'évaluation**

---

**Le jury désirent pouvoir vérifier les capacités globales du candidat à s'exprimer à l'écrit ainsi qu'à l'oral et à transmettre un message pédagogique de façon efficace, deux phases sont attendues au cours de l'exposé de la leçon :**

- **Une description de l'intégralité de la séquence pédagogique envisagée dans laquelle la séance développée sera clairement identifiée. Le positionnement de cette séquence dans le cursus de la formation choisi sera précisé.**

- **Une simulation d'une leçon devant élèves. Durant cette phase, le candidat utilisera le tableau blanc, et pourra utiliser le vidéoprojecteur et le rétroprojecteur en complément.**

La leçon de technologie est la seule épreuve du concours dont l'un des objectifs explicites est l'évaluation des capacités des candidats à être capables de transmettre des connaissances adaptées à un public considéré.

Pour cela, le jury prend en compte:

- les contenus scientifique, technique et méthodologique lié à la leçon;
- la dimension épistémologique et l'articulation des savoirs;
- la dimension didactique de la leçon proposée.

Les interrogations sont complétées par l'évaluation des capacités de communication orale et écrite des candidats durant la présentation ainsi que sa réactivité durant l'entretien lors d'un dialogue portant sur les aspects technique, scientifique et pédagogique de la leçon proposée.

Compte tenu du fait que les dossiers remis aux candidats contiennent la grande majorité des informations à caractère technique et scientifique nécessaires à la leçon, le contenu technique et scientifique ne devrait pas constituer un obstacle et le candidat doit pouvoir se concentrer sur la structure pédagogique de sa leçon. **Cependant, les candidats montrant de grandes lacunes sur le thème abordé dans la leçon sont inévitablement pénalisés.**

Sans attendre d'un candidat inexpérimenté un savoir-faire pédagogique qui ne s'acquiert qu'avec l'expérience, le jury sait apprécier des constructions de séquences rigoureuses, fondées sur l'analyse des phénomènes, l'expression de paramètres influents, l'exploitation de classifications amenant les élèves à découvrir et utiliser des modèles technologiques et scientifiques pertinents.

### **Thèmes des leçons proposées**

---

Pour chacun des thèmes, les leçons proposées portent sur un point du programme d'une classe précisée. Le dossier remis au candidat comprend quatre types d'informations:

#### § **Le niveau de formation auquel doit se situer la leçon.**

Les niveaux sont relatifs aux enseignements de Productique ainsi que d'Automatique et Informatique Industrielle dans les classes de première et terminale STI et SSI, dans les sections de techniciens supérieurs (Conception de Produits Industriels, Industrialisation des Produits Mécaniques, Etude et Réalisation des Outillages, Conception et Industrialisation Microtechniques, Mécanique et Automatique Industrielle, Maintenance Industrielle), dans les départements Génie Mécanique et Productique ou Qualité Logistique Industrielle et Organisation des IUT, ainsi que dans les classes préparatoires aux grandes écoles de type PTSI et PT. Les programmes officiels de ces formations sont fournis.

#### § **Les objectifs de la leçon attendue** accompagnés de recommandations générales aux candidats.

Chaque leçon est déclinée en un nombre limité **d'objectifs opérationnels à atteindre** dans le cadre d'une séquence pédagogique d'enseignement **à décrire et à justifier.**



Le jury rappelle qu'une séquence pédagogique est une suite structurée de séances de formation, positionnées dans le cursus de formation de la classe imposée, donnant lieu à des activités pédagogiques à préciser (travaux pratiques, cours, visites d'usines, activités de projet, travaux dirigés, évaluations, etc.), répondant à des objectifs de formation intermédiaires choisis pour leur pertinence et leur réalisme.

§ **Des extraits significatifs de bases de connaissances.**

L'épreuve de leçon ne s'appuyant pas exclusivement sur les connaissances propres de chaque candidat, des données sont fournies sous forme de documents photocopiés ainsi que sous forme numérique.

§ **Des données techniques et pédagogiques utilisables pour bâtir la leçon attendue.**

Ces documents proposent des supports techniques d'origines diverses (plans industriels, dossiers de formation, articles de revues techniques, sujets d'examens) choisis pour leur relation avec le sujet à traiter. Les candidats pourront les utiliser pour illustrer leur leçon.

Ces documents ne sont pas toujours utilisables directement et nécessitent parfois une adaptation de la part du candidat. C'est à ce dernier de trouver les bonnes conditions d'utilisation par rapport au niveau de formation concerné et aux objectifs visés.

De nombreuses images ou animations issues de simulations diverses sont parfois proposées aux candidats qui sont alors invités à les intégrer dans leurs présentations.

---

**Sur le plan technique, les thèmes des leçons proposées relèvent des catégories suivantes :**

§ L'automatique et l'informatique industrielle.

Les leçons proposées dans ce champ concernent essentiellement les concepts de base des systèmes à événements discrets et de l'automatique des systèmes continus linéaires. Les candidats doivent s'attacher à présenter clairement les concepts associés aux supports proposés **en évitant de longs développements mathématiques ou des leçons « catalogue »**.

Le candidat doit être capable d'aborder la modélisation des systèmes en s'efforçant de faire le lien entre les modèles proposés et la réalité.

*Exemples de leçons relatives à ce thème : systèmes asservis, capteurs et détecteurs...*

§ Les relations produit-matériau-procédé.

Le développement de l'ingénierie simultanée, la continuité et les performances de la chaîne informatique tout au long de la vie d'un produit industriel manufacturé et le développement du travail collaboratif imposent que chaque professeur de génie mécanique ait pris conscience des enjeux de la pré industrialisation des produits.

Cette phase, à l'interface entre la conception préliminaire et l'industrialisation, induit une étroite collaboration entre concepteurs et fabricants. Les récents logiciels d'aide au choix des matériaux, des procédés et de simulation de tous les procédés classiques, offrent de nouvelles possibilités qui intéressent directement les techniciens de la production.

Des leçons, en particulier en BTS Conception de Produits Industriels et Industrialisation des Produits Mécaniques, sont proposées sur ce thème. Elles traitent de la justification des formes d'une pièce selon un procédé donné ou du choix d'un procédé et de la définition de la pièce associée dans une logique de travail collaboratif avec les techniciens de conception.

*Exemples de leçons relatives à ce thème : obtention de pièces en moule métallique par gravité, obtention de pièces plastiques par injection...*

§ Les procédés primaires de mise en forme.

Il s'agit là de traiter des principaux procédés permettant d'aboutir aux formes primaires des pièces (forgeage, moulage, etc.).

Dans tous les cas les objectifs proposés sont relatifs aux principes fondamentaux régissant les procédés, aux classifications permettant des choix ultérieurs et aux règles et méthodes associées aux pièces produites. Le jury tient à vérifier que les connaissances du candidat lui permettent de dégager les points fondamentaux d'une formation technologique ouverte sur les contraintes technico économiques. Les candidats se doivent de proposer une leçon motivante et intéressante, fondée sur une dynamique de confrontation avec **des études de cas, plus que sur un inventaire juste mais stérile qui n'intéresse pas les élèves.**

*Exemples de leçons relatives à ce thème : le procédé de moulage au sable, le procédé d'estampage...*

§ Les procédés secondaires de transformation.

Si les leçons portant sur ce thème traitent essentiellement de l'usinage par enlèvement de matière, les candidats doivent être capables d'aborder précisément d'autres procédés, comme le découpage ou le pliage.

Les leçons peuvent aborder des sujets pointus tels « La production industrielle des filetages sur centre d'usinage » comme des thématiques plus générales sur des phases de préparation des usinages telles « Choix de stratégies d'usinage ».

*Exemples de leçons relatives à ce thème : choix et mise en œuvre des outils de coupe en tournage, étude de l'usinage de pièces sur centres d'usinage, mise en œuvre des machines à commande numérique, usinage grande vitesse...*

§ Les procédés tertiaires de transformation.

Il s'agit des procédés complémentaires (traitements thermiques, traitements de surface, assemblages) associés aux procédés primaires et secondaires.

Les leçons attendues sur ce thème ne portent pas sur la transmission de connaissances très spécialisées dans ces domaines particuliers que les élèves pourront approfondir s'ils sont un jour confrontés à ce besoin.

Il s'agit davantage **d'être capable de justifier un traitement, son processus associé et son intégration** dans la réalisation d'une pièce en vue d'obtenir un comportement attendu.

*Exemple de leçons relatives à ce thème :* Traitements thermiques dans la masse, intégration d'un traitement de ce type dans une gamme de fabrication, Traitements thermiques superficiels des alliages ferreux...

§ Le mesurage et le contrôle.

Sur ce thème, les leçons intègrent obligatoirement le décodage des spécifications géométriques (selon la norme ISO) et à leur mesurage. Le jury apprécie la rigueur de la lecture des spécifications ainsi que la mise œuvre d'une démarche de contrôle explicite.

*Exemples de leçons relatives à ce thème :* mesurage de la position relative de deux surfaces, métrologie des surfaces usinées – rugosité, maîtrise statistique des procédés, cartes de contrôle et critères de capabilité...

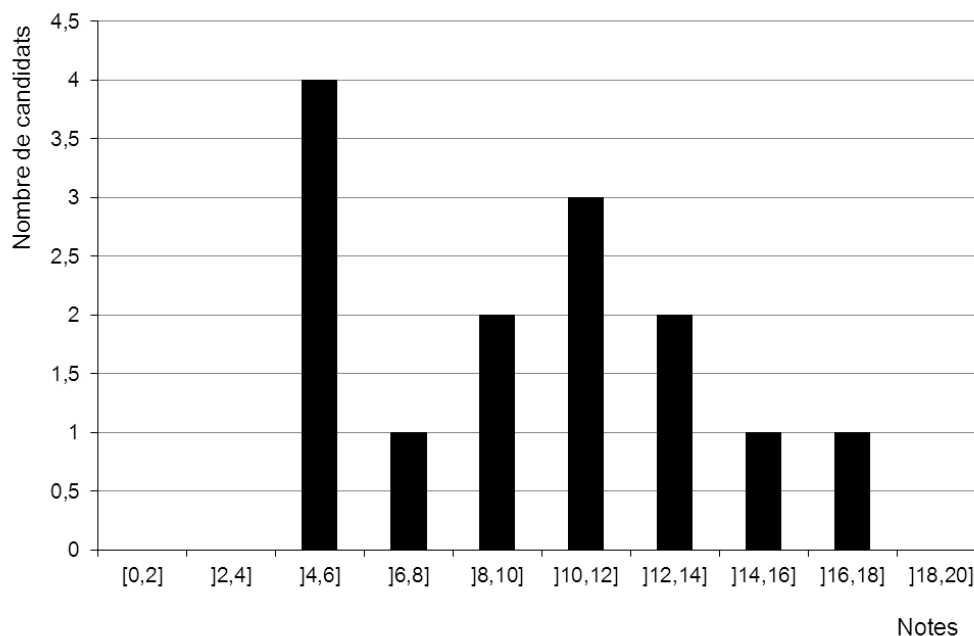
§ Organisation de la production.

Les leçons portant sur ce thème vont des aspects très techniques comme la mise en place d'une démarche SMED à des aspects plus organisationnels tels que l'implantation physique d'ateliers, l'ordonnancement d'ateliers, la gestion ou le suivi d'une production.

*Exemples de leçons relatives à ce thème :* gestion de production de type MRP – planification – ordonnancement, production en flux tiré,...

## Distribution des notes

---



La moyenne générale de l'épreuve est de 10,36 sur 20 et l'écart type de 4,07.

# RAPPORT DE L'ÉPREUVE DE SOUTENANCE D'UN DOSSIER INDUSTRIEL, INTERROGATION PORTANT SUR LA COMPÉTENCE « AGIR EN FONCTIONNAIRE DE L'ÉTAT DE FAÇON ETHIQUE ET RESPONSABLE »

M. RAGE - P. RAY - R. RIGAUD - O. ROSSI - A. DUGAS

Cette épreuve est constituée de deux parties distinctes, évaluées séparément.

La première impose aux futurs professeurs de s'engager, dès leur début de carrière, dans un processus de rapprochement avec le monde de l'entreprise. Elle doit amener le candidat à conduire personnellement une analyse technique et économique d'un problème industriel authentique relative à l'industrialisation et à la réalisation de produits mécaniques.

Cette analyse peut être soit à l'initiative de l'entreprise soit à celle du candidat mais dans les deux cas menée en coopération. Elle débouchera impérativement sur la résolution du problème technique industriel identifié ; la résolution de ce problème sera conduite par le candidat.

La deuxième partie, prend appui sur une problématique contextualisée tirée au sort qu'il s'agit pour le candidat d'analyser en fonction de textes et documents fournis.

Ce compte rendu vise à mettre en évidence les caractéristiques de l'épreuve et les attentes du jury, afin de permettre aux candidats de conduire leur préparation dans les meilleures conditions.

## **Les textes réglementaires définissant l'épreuve**

---

Extrait de l'arrêté du 28 décembre 2009 fixant les sections et les modalités d'organisation des concours de l'agrégation (NOR: MENH0931284A).

*L'épreuve se déroule en deux parties. La première partie est notée sur 15 points, la seconde sur 5 points (durée de la préparation : une heure trente minutes ; durée de l'épreuve : une heure maximum ; coefficient 1.)*

**Première partie** : soutenance devant le jury d'un dossier technique et scientifique du domaine de la production mécanique industrielle préparé par le candidat, suivie d'un entretien (présentation du dossier : vingt minutes maximum ; entretien : vingt minutes maximum).

*Le dossier présenté par le candidat est relatif à une production industrielle, dont l'authenticité et l'actualité sont des éléments décisifs. Cette production industrielle, qui se caractérise par une compétitivité reconnue et par la modernité des méthodes et moyens mis en œuvre industriellement, répond à un cahier des charges d'industrialisation, présent dans le dossier, et à des spécifications dont la description est conforme aux normes en vigueur. Le programme du concours précise les éléments constitutifs du dossier.*

*En utilisant les moyens modernes de présentation (vidéoprojecteur et informatique associée en particulier), le candidat présente au jury le support et les*

*moyens techniques de production qu'il a choisis pour l'épreuve, et les investigations et développements qu'il a conduits pour s'en approprier totalement la structure, le fonctionnement et les évolutions potentielles. Lors de la présentation, le candidat doit indiquer brièvement les thèmes et niveaux d'exploitations pédagogiques pertinents qu'il serait possible, selon lui, de tirer des points remarquables du dossier.*

*Pendant l'entretien, le jury conduit des investigations destinées à se conforter dans l'idée que le dossier présenté résulte bien d'un travail personnel du candidat. Celles-ci peuvent conduire à explorer des pistes présentées dans le dossier mais qui n'ont pas fait l'objet d'une présentation orale suffisamment détaillée et à demander au candidat des explications relatives aux démarches utilisées dans les différentes phases des études techniques et scientifiques, voire des démonstrations liées à la mobilisation des outils informatiques exploités lors des études proposées dans le dossier.*

*Les candidats doivent impérativement déposer au secrétariat du jury le dossier qu'ils doivent présenter cinq jours francs au moins avant la date de début des épreuves d'admission.*

**Seconde partie** : interrogation portant sur la compétence « Agir en fonctionnaire de l'État et de façon éthique et responsable » (présentation : dix minutes ; entretien avec le jury : dix minutes).

*Le candidat répond pendant dix minutes à une question, à partir d'un document qui lui a été remis au début de l'épreuve, question pour laquelle il a préparé les éléments de réponse durant le temps de préparation de l'épreuve. La question et le document portent sur les thématiques regroupées autour des connaissances, des capacités et des attitudes définies, pour la compétence désignée ci-dessus, dans le point 3 « les compétences professionnelles des maîtres » de l'annexe de l'arrêté du 19 décembre 2006.*

*L'exposé se poursuit par un entretien avec le jury pendant dix minutes.*

## **Le déroulement de l'épreuve de la session 2012**

---

Avant la soutenance proprement dite, le candidat dispose d'une heure et demie pour préparer l'environnement nécessaire à son exposé. Un poste informatique avec vidéo projecteur et un rétroprojecteur sont mis à sa disposition.

A l'heure prévue pour la soutenance, le jury rejoint le candidat dans la salle ainsi préparée. Le candidat expose alors pendant une durée maximale d'une demi-heure. Cette demi-heure est composée de 20 minutes dédiées à l'exposé du dossier technique, et de dix minutes dédiées à l'exposé de la réflexion structurée du candidat sur le thème proposé pour l'épreuve « Agir en fonctionnaire de l'état de manière éthique et responsable ».

A l'issue de l'exposé, le jury s'entretient avec le candidat sur différents points qu'il aura pu exposer :

- Vingt minutes sont consacrées au dossier. Il s'agit pour le jury de s'assurer qu'il s'agit bien d'un travail personnel résultant d'un échange approfondi avec une entreprise industrielle sur un problème de production authentique.
- Dix minutes sont consacrées à l'épreuve « Agir en fonctionnaire de l'état de manière éthique et responsable ». Le jury s'assure de la connaissance des acteurs du système éducatif et des comportements attendus selon la situation-problème proposée.

# Épreuve de soutenance d'un dossier industriel

## Les attentes du jury, les critères d'évaluation

---

Le jury attend qu'au travers de l'épreuve de soutenance de dossier industriel les candidats démontrent leur capacité à conduire des investigations prenant en compte de réels problèmes techniques posés au sein d'un système de production.

Ces investigations doivent déboucher sur un travail personnel d'analyse sérieuse, de propositions de solutions techniques répondant aux problèmes posés, le tout démontrant la maîtrise d'une démarche scientifique pertinente complétée si cela est possible par des résultats d'expérimentation. Le niveau de confidentialité ne devra pas nuire à la constitution du dossier et au dialogue avec le jury.

Par ailleurs les éléments suivants sont déterminants pour un futur enseignant en sciences et techniques industrielles :

- aptitude à constituer un dossier avec les outils modernes de la PAO ;
- maîtrise des outils informatiques de simulation, de CAO et de FAO ;
- savoir faire en communication technique.

Le candidat s'attachera à produire des documents techniques conformes aux normes en vigueur.

L'évaluation s'adosse sur l'aptitude du candidat à :

- construire un dossier qui sera apprécié au travers de :
  - sa structuration autour du problème technique résolu ;
  - sa qualité rédactionnelle, notamment au travers de la maîtrise de la langue ;
  - la réalité industrielle du problème traité ;
  - la pertinence des développements techniques et scientifiques proposés ;
  - la rigueur technique et scientifique des analyses.
- exposer de manière claire et structurée la problématique retenue dans le dossier. Le jury appréciera ainsi :
  - sa démarche auprès de l'entreprise ;
  - le problème technique identifié ;
  - les axes de résolution choisis ;
  - l'engagement du candidat dans cette résolution ;
  - les étapes clés de la démarche ;
  - l'interaction avec l'entreprise à l'issue de l'étude.
- établir une proposition pédagogique succincte mais cohérente avec la problématique choisie.

Le jury appréciera en outre, la rigueur du vocabulaire et la qualité de l'expression orale du candidat, la pertinence des réponses aux questions qui lui seront posées.

## Typologie des dossiers présentés en 2012

---

Les différents dossiers soutenus à la session 2012 peuvent être classés en huit catégories, les deux premières correspondent au cadre de l'épreuve :

- Les dossiers traitant d'une problématique industrielle orientée "procédé ou/et processus" à l'initiative de l'entreprise ou du candidat.

Ces dossiers se caractérisent par un contexte industriel bien appréhendé par le candidat, les conduisant à une analyse et une étude pertinente d'un problème industriel authentique. Celui-ci concerne aussi bien la mise au point de procédé que la qualification ou l'optimisation de processus ou encore l'organisation de la production. Ce type de dossier, très apprécié par le jury, est celui qui est le plus conforme à la définition de l'épreuve.

- Les dossiers traitant d'une problématique industrielle orientée "automatisation en production" à l'initiative de l'entreprise ou du candidat.

Ces dossiers sont de même nature que les précédents, mais appliqués à un champ disciplinaire différent. Il est dommage que les problèmes liés à l'automatisation de procédé et processus ne soient pas plus abordés par les candidats alors que de nombreux problèmes de production mériteraient une investigation approfondie dans le domaine de l'automatique.

Celles qui suivent ne respectent pas la définition de l'épreuve et sont sévèrement sanctionnées par le jury :

- Les dossiers "scolaires" utilisant une pièce issue du monde industriel, pour faire valoir des savoirs et savoir-faire universitaires du champ de la discipline.

Il s'agit là de dossiers dans lesquels les candidats, ayant extrait une pièce d'un contexte industriel (avec une connaissance insuffisante de l'environnement), applique à cette pièce des démarches et procédures mobilisant des outils théoriques parfois de haut niveau sans mettre en relation calculs et conclusions avec la réalité d'un problème industriel authentique. L'absence fréquente d'éléments conclusifs pertinents a pénalisé ce type de dossier jugé artificiel sur le plan de la relation entre les mondes de l'entreprise et de la formation.

- Les dossiers portant sur la description ou l'optimisation des procédés ou processus ne développant pas d'approche scientifique avec le niveau requis pour le concours.

Le traitement complet d'un processus de production étudié en BTS IPM ou d'un thème de BTS MAI en est un exemple.

- Les dossiers des candidats surpris d'être admissibles à l'agrégation.

Il s'agit là de dossiers construits dans l'urgence, souvent prélevés d'un travail collectif, et dont l'adéquation à l'épreuve est bien souvent négative.

- Les dossiers « exposé technologique ou visite technique ».

Ces dossiers sans contenu scientifique ou technique présentent sous forme d'exposés des procédés originaux ou un processus industriel sans analyse associée à une problématique approfondie.

- Les dossiers des candidats ne répondant pas aux exigences de l'épreuve.

Une faible minorité de candidats construisent leur dossier à partir de problèmes de conception et non d'industrialisation ou de réalisation.

- Les dossiers déjà présentés lors d'une session précédente.

Compte tenu de l'effet mémoire, il est fortement conseillé aux candidats d'enrichir de façon conséquente leur dossier par le développement d'une nouvelle problématique ou par l'approfondissement réel de celle déjà abordée.

## **Constats et recommandations du jury**

---

### **A propos de la problématique**

Une des lacunes récurrentes constatée par le jury concerne l'absence de problème technique et de traitement associé. Identifier une problématique industrielle ne consiste pas à dérouler un schéma type : diagramme des interacteurs, FAST, description relation Produit – Procédé - Matériau, description d'une réalisation (gamme d'usinage etc...).

La compréhension de la problématique passe bien sûr par une mise en situation qui doit éviter au candidat de ne rien savoir sur l'environnement du produit, situation qui témoigne d'un manque de curiosité peu apprécié. La relation entre le produit associé à son environnement et les contraintes de l'industrialisation a permis à plusieurs candidats de bien clarifier leur présentation. De même, les éléments les plus pertinents du dossier d'industrialisation de l'entreprise doivent être mis en valeur par le candidat. Ces éléments, nécessaires à la compréhension du dossier ne sauraient en aucun cas en constituer le corps principal.

L'articulation "produit-procédé-matériau" est souvent fort importante pour une bonne compréhension de la problématique. Malgré tout, elle ne doit pas systématiquement conduire à des développements importants où l'artifice prend le pas sur la logique et la cohérence, par l'utilisation d'indices de performance dénués de sens.

Le jury ne considère pas que le prélèvement d'une pièce lors d'un passage en entreprise soit suffisant pour dégager un problème industriel authentique : l'entretien a largement confirmé ce point de vue par l'ignorance dans laquelle se trouvait le candidat des conditions de l'industrialisation et de la réalisation de la pièce étudiée. De même, un exposé simplement descriptif d'un processus ou d'un procédé ne peut être en aucun cas un niveau de réponse suffisant aux exigences de cette épreuve.

### **La construction du dossier**

La majorité des dossiers sont bien présentés et leur construction est assez souvent cohérente. Cependant, ils souffrent parfois d'une structure archétypique qui ôte trop de liberté aux développements. Il n'y pas de modèle unique tant les préoccupations, et donc les poids relatifs des parties, peuvent être différents.

Les candidats doivent veiller à proposer des documents graphiques aux normes en relation avec l'étude menée. Le jury pourra toutefois être amené à demander les documents originaux de l'entreprise. En cas d'informations mentionnées « confidentielles » le jury s'engage à ne pas les reproduire ou les divulguer à des personnes extérieures pour que cet aspect ne constitue pas un obstacle pour le candidat.

Les candidats veilleront à ne pas rechercher de procédé ou de système technologique trop original conduisant à une prestation purement descriptive et sans apport personnel.

Quel que soit le sujet analysé procédé ou processus, les éléments de définition du produit et de la pièce étudiée (cahier des charges fonctionnel du produit, dessin de définition, documents graphiques descriptifs du ou des outillages...) doivent être associés au dossier.



Les fichiers informatiques font partie du dossier. Ils ne peuvent donc pas se limiter au dossier proprement dit. S'ils peuvent aider à une présentation du contexte, ils doivent aussi contribuer à une bonne perception des études et des simulations avec les conditions de leur réalisation.

Dans sa courte partie pédagogique, le dossier doit présenter des propositions. Celles-ci, outre la situation calendaire et la conformité aux référentiels et programmes, doivent mettre en situation la ou les activités proposées et leurs finalités pédagogiques. La pertinence de l'application pédagogique au regard du support proposé et du problème technique associé est appréciée par le jury.

L'exploitation pédagogique doit mettre en évidence :

- les objectifs de formation en conformité avec les référentiels et programmes ;
- l'identification des connaissances à acquérir par l'apprenant ;
- la mise en évidence de l'adéquation entre l'utilisation de la problématique développée dans le dossier avec les objectifs de formation et les connaissances visées.

### **La soutenance**

La soutenance est un exercice particulier qui ne peut se concevoir comme un simple affichage des pages du dossier. La plupart des exposés sont de bonne facture pour ce qui concerne les outils de présentation. Les candidats ont bien compris qu'il ne fallait pas perdre de temps dans une recopie au tableau des informations qui figurent dans les diaporamas, le jury disposant du dossier et donc d'une mémoire de la structure de la présentation.

Les nombreuses simulations proposées par les candidats ont montré que si l'outil informatique est bien maîtrisé, les modèles qui régissent les comportements ou les conditions aux limites sont quelques fois absents des interprétations. Une grande sagacité s'impose donc dans leur mise en œuvre comme dans leur exploitation.

Par ailleurs, les candidats doivent être attentifs à ne pas donner d'informations non justifiables ou dont ils ignorent la réalité, tout comme ils doivent éviter d'utiliser des mots dont le contenu leur est étranger. Nombre d'entre eux ont reçu en retour une question demandant des précisions qui ont bien sûr manqué !

### **Les réponses aux questions du jury et la communication**

Les questions posées par le jury permettent d'approfondir quelques-unes des informations données par le candidat, dans le dossier autant que dans l'exposé et à renforcer au sein du jury la conviction que le dossier présenté résulte bien d'un travail personnel.

Les réponses absentes ou évasives relatives au contexte de l'industrialisation, de la réalisation ou de l'automatisation sont peu appréciées car elles témoignent d'un réel manque d'investigation au sein de l'entreprise.

# Interrogation portant sur la compétence « Agir en fonctionnaire de l'état de manière éthique et responsable ».

## Typologie des sujets proposés en 2012

---

Les sujets sont classés en quatre grands domaines :

- 1- la vie de l'établissement,
- 2- la gestion de la classe,
- 3- la gestion de l'élève (cf exemple de sujet),
- 4- la pédagogie.

## Exemple de sujet

---

**Référence :** La gestion de l'élève : L'orientation

### Présentation de la situation :

Un professeur assurant les enseignements d'exploration CIT et SI en classe de seconde de lycée doit apporter son aide à la résolution d'un conflit entre un élève et ses parents sur son projet professionnel.

### Questions :

- Quelle aide à la réflexion peut-on apporter à l'élève au sein de l'établissement et quel dialogue peut-on établir avec la famille ?

### Documents à disposition :

*Texte « Les missions du professeur » ; circulaire 1997 du 23 mai 1997*

Le professeur exerce le plus souvent dans un établissement public local d'enseignement, ou bien dans un établissement privé sous contrat d'association. Il est placé sous l'autorité du chef d'établissement.

[...]

Le professeur doit pouvoir établir un dialogue constructif avec les familles et les informer sur les objectifs de son enseignement, examiner avec elles les résultats, les aptitudes de leurs enfants, les difficultés constatées et les possibilités de remédiation, conseiller, aider l'élève et sa famille dans l'élaboration du projet d'orientation.

Il participe au suivi, à l'orientation et à l'insertion des élèves en collaboration avec les autres personnels, d'enseignement, d'éducation et d'orientation. Au sein des conseils de classe, il prend une part active dans le processus d'orientation de l'élève.

Il connaît les responsabilités dévolues aux professeurs principaux.

## Constats et recommandations du jury

---

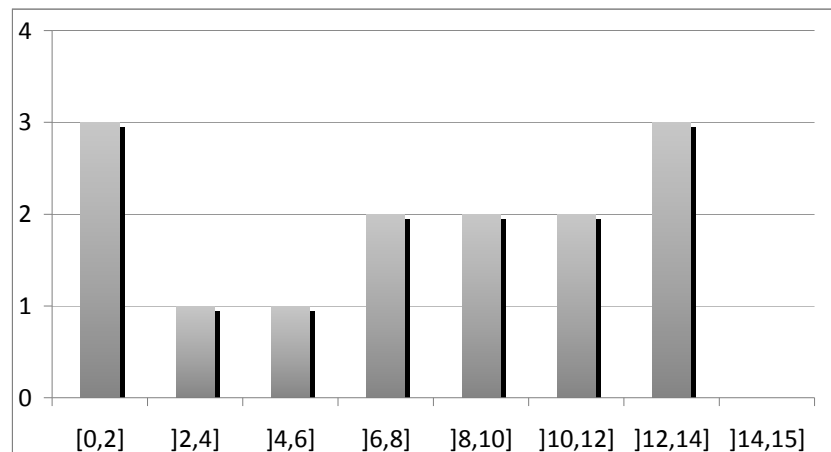
Les connaissances suivantes apparaissent comme un préalable à tout exposé de qualité :

- la structure d'un EPLE ;
- le fonctionnement d'un EPLE ;
- l'organisation du système éducatif et des voies de formation du second degré.

Le jury attend que le candidat contextualise sa réponse par rapport à la situation-problème proposée. Ce dernier doit s'abstenir de la pure citation des textes législatifs ou réglementaires mis à disposition. Il doit se positionner d'un point de vue personnel tout en étant capable de justifier sa posture auprès des membres du jury.

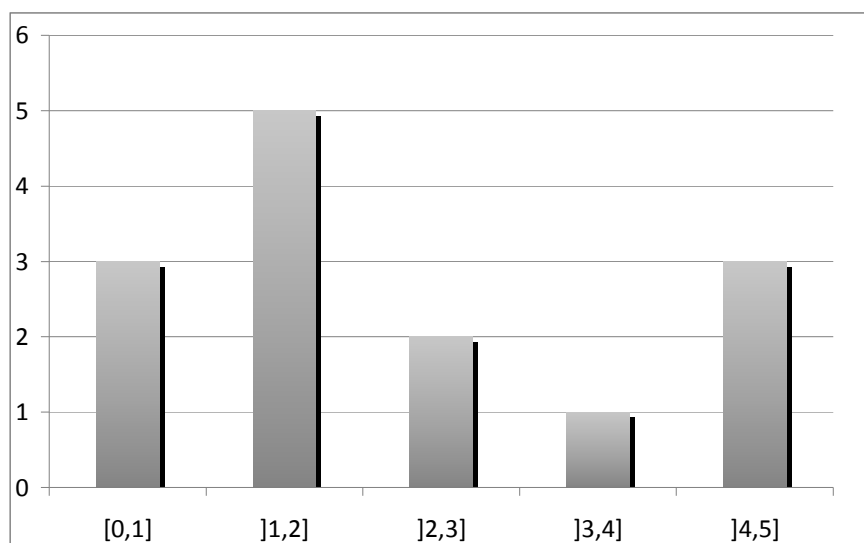
### Histogramme des résultats

---



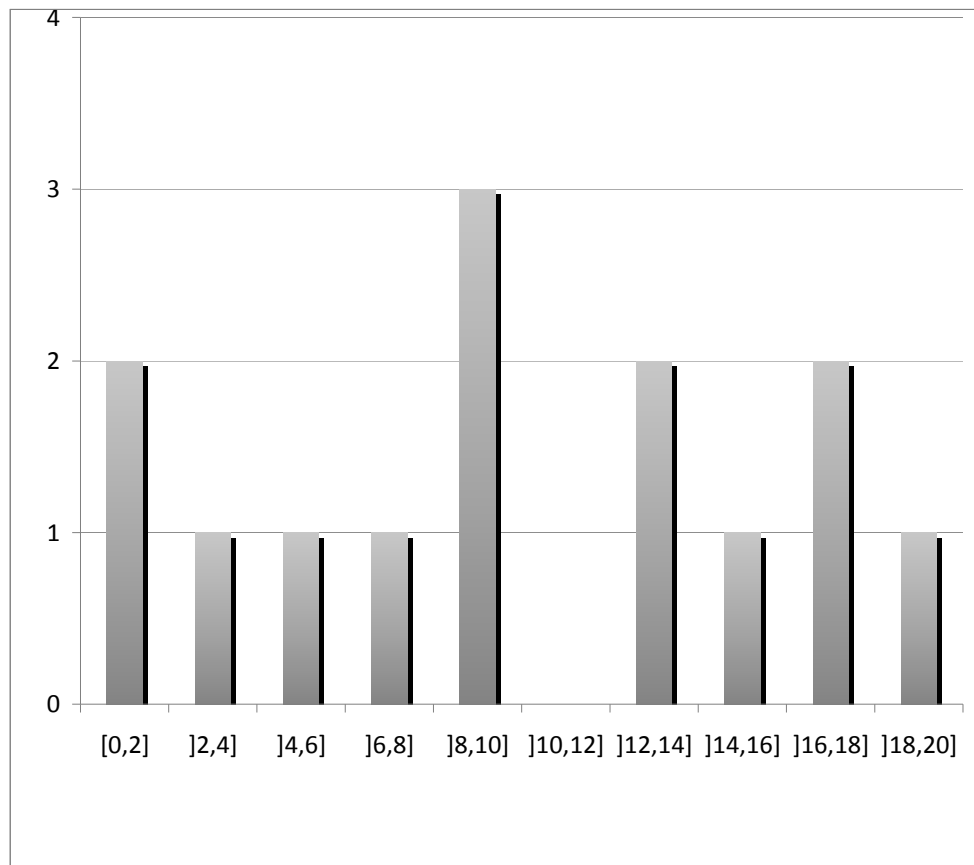
**Histogramme des notes obtenues pour l'épreuve de soutenance du dossier industriel**

La moyenne obtenue pour cette épreuve est de **7,7/15**.



**Histogramme des notes obtenues pour l'épreuve « Agir en fonctionnaire de l'état de manière éthique et responsable ».**

La moyenne obtenue pour cette épreuve est de **2,6/5**.



**Histogramme des notes obtenues cumulées pour les deux épreuves**

## Conclusions générales

### *Épreuve de dossier*

Pour réussir cette épreuve, il y a lieu de s'appuyer sur une étude authentique issue du milieu industriel, dans laquelle un ou plusieurs problèmes techniques ou économiques sont appréhendés.

A travers la résolution totale ou partielle d'un ou plusieurs de ces problèmes, le candidat doit mobiliser ses connaissances avec rigueur scientifique et technique.

Au cours de la présentation devant le jury, il doit faire apparaître sa maîtrise de l'étude, la part de sa réflexion personnelle et faire preuve de qualité de conviction et de communication.

Le dossier qui caractérise cette épreuve s'inscrit dans la démarche que doit conduire tout enseignant de génie mécanique pour lui permettre d'exploiter, à des fins d'enseignement, des supports industriels réels, faire apparaître les problèmes techniques et économiques soulevés et les solutions retenues pour les résoudre.

### *Interrogation portant sur la compétence « Agir en fonctionnaire de l'état de manière éthique et responsable ».*

Il est nécessaire d'insister sur l'aspect personnel du traitement de la problématique dans un cadre réglementaire permettant au jury de juger cette compétence qui ne peut pas s'évaluer au travers d'une simple description de textes. Dans cette partie le candidat doit également faire preuve de qualité de conviction et de communication.

# RAPPORT RELATIF A L'ÉPREUVE DE TRAVAUX PRATIQUES

R. BÉARÉE - M. BERÇOT- H. CHANAL - S. CHARLAT  
A. DACUNTO - J.M. DESPREZ - C VELUT

## 1. RAPPEL DES CONDITIONS DE L'ÉPREUVE DE TP

L'épreuve de Travaux Pratiques (TP) est une épreuve de mise en œuvre de différents moyens de production et/ou d'automatisation :

- Durée de la préparation : 7 heures
- Durée de l'épreuve : 1 heure maximum, décomposée comme suit
  - exposé à l'initiative du candidat : 30 minutes maximum ;
  - entretien avec les membres de jury : 30 minutes maximum ;
- Coefficient 2

Pour la préparation de l'épreuve, un dossier technique est remis au candidat, contenant les éléments nécessaires à la résolution du problème posé, notamment, un cahier des charges, les données utiles, la présentation et les caractéristiques du matériel à utiliser, tout ou partie de «documents constructeurs», tout ou partie des procédures de mise en œuvre des matériels, tout ou partie de ressources numériques associées à la problématique du TP.

A la fin de la préparation, le candidat expose ses travaux au jury.

L'exposé porte sur la présentation des résultats de l'activité expérimentale. Le candidat dispose des moyens de communications usuels de présentation (notamment tableaux et rétroprojecteur). A cette présentation doivent être associées une analyse critique des résultats obtenus, la justification des méthodes utilisées et celle des solutions proposées.

Cet exposé technique et scientifique est suivi d'un entretien.

## 2. REMARQUES GENERALES SUR LA SESSION 2012

Les problématiques techniques et scientifiques sont généralement relatives au comportement d'une pièce ou d'un outillage dans son environnement de transformation et relatives à la mise en œuvre d'une production, à la nature des éléments constitutifs d'une chaîne d'action ou relatives à l'analyse et la conduite d'un système automatisé. L'épreuve de TP de la session 2012, au travers d'activités pratiques à caractères industriels, techniques et scientifiques, a pris appui sur différents supports et procédés proposés disponibles au sein du plateau technique de l'école d'ingénieurs de Clermont Ferrand (IFMA), centre des épreuves d'admission du concours.

L'épreuve a permis d'évaluer les aptitudes de chaque candidat à construire une réflexion technique et scientifique dans le cadre d'une mise en œuvre de moyens et de périphériques techniques associés.

En fonction et dans le contexte du TP proposé au candidat, l'épreuve de Travaux Pratiques a permis d'évaluer les capacités des candidats à : (tout ou partie)

- appréhender un procédé ou un système par l'observation attentive des conditions technico-économiques de sa mise en œuvre ;
- identifier les problèmes techniques ;
- mobiliser des connaissances scientifiques et techniques pour résoudre un problème réel ;
- analyser des données d'industrialisation, d'automatisme et/ou d'automatique ;
- analyser et s'approprier le contexte de mise en œuvre proposé ;
- formuler et valider des hypothèses et/ou un modèle ;
- définir, conduire une expérimentation, exécuter un programme ;
- réaliser des essais, des mesures ;
- analyser des résultats ;
- proposer des évolutions des conditions de réalisation ;
- valider des solutions proposées par une mise en œuvre finale ;
- présenter de façon synthétique et ordonnées les résultats obtenus, les justifier ;
- mettre en évidence la compréhension globale de l'objectif et des finalités du TP ;
- répondre à des questions en lien avec le problème à résoudre.

Ces capacités évaluées, associées aux critères d'exigence constituaient le cadre de la grille d'évaluation à la fois durant le TP et lors de la soutenance.

### **3. DEROULEMENT DE L'EPREUVE**

#### **3.1. Exécution du travail pratique, durée 7 heures**

Dans le cadre de la résolution d'un problème technique, le candidat a été amené à mettre en œuvre une démarche de pré-industrialisation, d'industrialisation, à mettre en œuvre des systèmes automatisés ou à mettre en œuvre des équipements relatifs à différents procédés de production.

La maîtrise des connaissances fondamentales dans les domaines de la fabrication, de la métrologie, de la mécanique, de l'automatisation et de l'automatique est indispensable pour mettre en œuvre les différents équipements proposés aux candidats et résoudre les problèmes techniques auxquels ils sont confrontés.

La maîtrise de démarches expérimentales structurées, de méthodes d'investigation et de résolution de problèmes et de traitements des données recueillies faisait partie des exigences de cette épreuve.

Un membre du jury a assuré pour chacun des candidats, un suivi tout au long des 7 heures de mise en œuvre afin :

- de lui présenter le matériel mis à sa disposition et les procédures de mise en œuvre si besoin ;
- de l'assister en cas de difficulté matérielle ;
- de l'aider à s'approprier l'étude et à rester dans le cadre du TP ;
- de procéder à une première évaluation entrant dans l'élaboration de la note finale.

La mise en œuvre totalement maîtrisée des machines et procédés, des aides et ressources logicielles n'était pas déterminante pour réussir cette épreuve. Selon la nature du matériel et des équipements proposés, une assistance technique a été systématiquement apportée au candidat au cours de sa préparation pour la mise en œuvre des supports et matériels.

Pour cette phase de préparation de 7 heures, les critères d'évaluation portaient sur les points suivants :

- Capacité à mobiliser des connaissances scientifiques et techniques :
  - validité des hypothèses formulées ;
  - pertinence des modèles utilisés ;
  - qualité du raisonnement et structuration de l'analyse ;
  - maîtrise des connaissances scientifiques et technologiques mobilisées ;
  - pertinence des expérimentations conduites ;
  - justesse de l'interprétation des résultats.
- Capacité à mettre en œuvre des équipements :
  - autonomie et dynamisme dans la mise en œuvre des matériels ;
  - qualité et pertinence de la mise en œuvre ;
  - qualité de l'organisation du poste de travail.

### ***Commentaires relatifs à la phase d'exécution du travail pratique***

*Lors de l'étude proposée au candidat, devaient être mobilisées des compétences relatives :*

- à la mise en œuvre et à la maîtrise des moyens ;
- à la définition d'un protocole d'expérimentation ;
- à l'exploitation et interprétation scientifique des résultats.

*Plusieurs candidats ont bien compris les objectifs de l'épreuve.*

*Parmi les candidats, ceux qui ont mieux réussi cette épreuve ont su, avant toute chose, s'approprier l'ensemble du dossier et l'environnement du TP proposé. Il appartenait au candidat de parcourir l'intégralité du dossier, de lire le travail demandé qui allait structurer sa démarche à venir. En effet à partir de l'inventaire et de l'analyse des données et des informations et/ou éléments externes apportés, le candidat devait construire sa démarche de résolution de problème. Dans un premier temps, il appartenait donc, au candidat, d'initier aussi une démarche d'investigation et de formaliser la problématique qu'il comptait résoudre.*

*A ces problématiques, devaient être formalisée et associée, une démarche (ou protocole) d'expérimentation qu'il fallait construire et mettre en œuvre durant le TP. Les candidats devaient prendre le temps d'identifier les critères et les indicateurs de performance du processus ou du procédé qui faisaient l'objet d'une analyse ou qui permettaient une comparaison aux attentes et critères du cahier des charges du TP. Les membres de jury ont constaté que les candidats, qui ne s'engageaient pas dans cette étape, perdaient beaucoup de temps durant le TP, prenant souvent l'initiative, au cours du TP et en fonction de résultats obtenus, d'initier de nouveaux essais et expérimentations qui n'étaient pas planifiés au départ.*

*Un manque d'analyse du problème technique a conduit généralement le candidat à mener des essais de façon désordonnée.*

*Lors de la mise en œuvre, les membres de jury ont observé trop souvent une ambition qui se limitait à la réalisation du travail demandé, (une pièce, un programme, un test ou des essais) sans se soucier des causes et effets de problèmes identifiés ou observés dans nombre de situations.*

*Les membres de jury attendaient des candidats qu'ils puissent exprimer les fondamentaux qu'ils avaient acquis dans le cadre de leur formation initiale, continue ou expérience personnelle : modélisation, mise en position, maintien en position, coupe, spécifications de fabrication, quantification des grandeurs de pilotage et de réglage, gammes d'usinage et de mesures, métrologie, qualité, optimisation en gestion de production, techniques d'implémentation des modèles de commande, spécification en automatisme, base de la statistique, .... etc.*

*Au moment de l'exploitation technique et scientifique des résultats, nombres de lacunes dans les connaissances théoriques de base n'ont pas permis aux candidats, de conduire une analyse pertinente des phénomènes et données obtenues. Les résultats annoncés méritaient d'être associés à leurs incertitudes. Les candidats ont éprouvé fréquemment des difficultés à justifier et mettre en place des actions ou modalités correctives.*

*La réussite de cette phase d'exécution du travail pratique reposait sur un équilibre entre ces trois composantes : mobilisation de fondamentaux, mise en œuvre ordonnée du travail demandé, analyse et interprétation des résultats.*

*Ces constats illustrent les problèmes que ces enseignants ou futurs enseignants seront amenés à résoudre pour concevoir et encadrer des séances de travaux pratiques à l'avenir*

### **3.2. Présentation des travaux réalisés et entretien avec le candidat, durée 1 heure**

Le candidat disposait de 30 minutes pour présenter l'investigation menée pendant le travail pratique. Il était attendu un exposé scientifique et technique de haut niveau qui devait mettre en évidence la démarche utilisée, exploiter les résultats des manipulations et proposer des interprétations et des conclusions.

À l'issue de l'exposé, les questions posées au candidat, pendant 30 minutes maximum, avait pour but essentiel d'aider le candidat à valoriser ses compétences. Le jury attendait des réponses claires et concises ; seuls les points contenus et/ou exposés dans le sujet, ainsi que les réponses du candidat, ont fait l'objet d'approfondissements lors de cette phase d'entretien.

Les critères d'évaluation pour l'exposé et l'entretien étaient les suivants :

■ Présentation de la problématique, justification de la démarche, exploitation des résultats :

- qualité du raisonnement et structuration des résultats de l'analyse ;
- justification des hypothèses formulées ;
- justification des modèles utilisés ;
- justesse de l'interprétation des résultats ;
- qualité de la communication et précision du vocabulaire employé.

■ Réponses aux questions posées :



- maîtrise des connaissances scientifiques et technologiques ;
- pertinence des réponses aux questions posées ;
- réactivité face au questionnement et précision de la réponse.

### **Commentaires relatifs à la phase de présentation (exposé) du Travail Pratique.**

*Les candidats devaient être en mesure de faire la démonstration de leur capacité à dégager les différents problèmes posés par le TP. L'exposé devait pouvoir démontrer leur capacité à confronter leur approche théorique avec les résultats de leur expérimentation, tout en gardant un esprit d'analyse critique.*

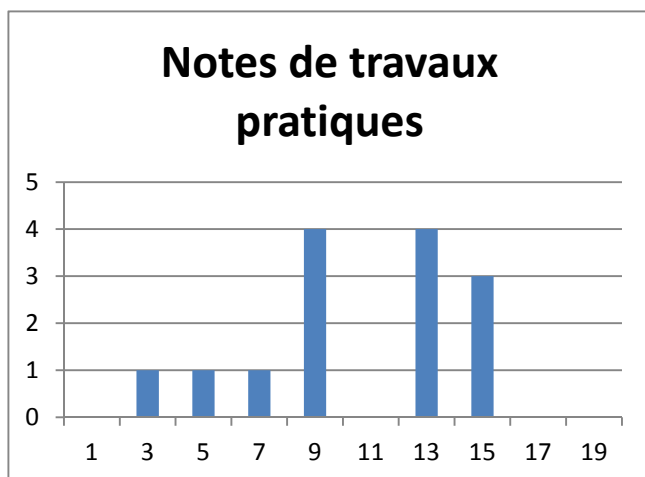
*Si la description du contexte de l'étude est nécessaire, il est important de rappeler que la présentation devait principalement porter sur la problématique abordée et sur la démarche mise en œuvre pour y apporter une réponse.*

*Les candidats devaient s'attacher à décrire, expliquer et justifier les actions conduites. Ils devaient être en mesure de formuler les conclusions de leurs expérimentations. Un manque d'expérimentation ou de mise en œuvre ne peut être remplacé par un exposé de manipulations supposées.*

*Trop de candidats se sont contentés lors de l'exposé de présenter une réponse à chacun des items de guidance proposés dans le texte du sujet. Cet exposé reste bien une synthèse. Le jury n'attendait pas pour cette épreuve la présentation d'un exposé (type leçon) sur le thème du TP.*

*Le jury attendait un exposé davantage structuré et synthétique, une plus grande qualité des documents projetés, des croquis et des écritures au tableau. Le jury a été sensible au dynamisme de certaines prestations et à des présentations d'une bonne qualité.*

### **3.3. Histogramme des résultats**



Remarque : 16 candidats étaient admissibles. 2 candidats ne sont pas présentés à l'épreuve. L'histogramme ci-contre ne prend pas en compte les candidats absents.

La moyenne de cette épreuve est de **09,6/20** pour cette session 2012.

### **4. THEMES D'ETUDES DES TRAVAUX PRATIQUES**

Pour chacun des thèmes abordés, décrits succinctement ci-dessous, plusieurs travaux pratiques ont été proposés aux candidats. La métrologie et/ou le contrôle font quasi systématiquement partie des activités proposées aux candidats, tout comme l'utilisation d'éléments logiciels de la chaîne numérique.

#### **4.1. Étude de pré-industrialisation**

L'adaptation du produit aux procédés ou processus de fabrication peut amener à la modification de sa définition - formes et spécifications géométriques ou mécaniques, adaptation du choix du matériau. La réalisation d'un prototype venait alors valider les hypothèses formulées.

#### **4.2. Étude des limites des procédures de réglages externes**

La mise au point d'une production impose de nombreux pré-réglages externes qui ne sont pas sans conséquences sur les résultats obtenus. Plusieurs activités permettaient d'apprécier, au travers de différentes simulations numériques ou essais, l'influence des différents éléments de la chaîne numérique, de la boucle machine/porte-outil/outil/porte-pièce/pièce ou des paramètres de définition et de configuration du procédé, et ainsi, d'en déduire des règles limitatives d'emploi de ces réglages externes.

#### **4.3. Optimisation sous contraintes technico-économiques**

En fonction d'un contexte technico-économique particulier, les candidats ont été amenés à définir et choisir les conditions optimales d'emploi des procédés, des outils et/ou des outillages. Le cas échéant cette recherche pouvait s'appuyer sur un plan d'expériences.

#### **4.4. Recherche et validation d'un processus sous contraintes géométriques ou de déformation**

Des spécifications géométriques et dimensionnelles, un environnement de production en évolution pouvaient amener des contraintes portant sur le processus, le choix d'outils, le choix de conditions de coupe, le choix des porte-pièces, la configuration des paramètres de production. Les comportements de la pièce ou de l'outil lors de l'usinage pouvaient entraîner des déformations ou des contraintes particulières qu'il est nécessaire de quantifier pour envisager des actions correctives. Elles nécessitaient la modélisation des efforts de coupe et de bridage puis la recherche des conditions aux limites permettant une approche par simulation.

Plusieurs travaux pratiques proposaient d'analyser l'effet de ces contraintes, de conduire des expérimentations et de conclure sur les valeurs des paramètres à utiliser et sur la validité du processus envisagé.

#### **4.5. Analyse et réglage d'un système asservi**

Pour les systèmes automatisés continus, les travaux pratiques étaient construits de telle manière à ne négliger aucune des parties constitutives d'un asservissement. Le candidat était amené à traiter des questions relatives à la chaîne d'acquisition (capteurs TOR, codeurs, résolveurs), aux éléments de sécurité, aux boucles d'asservissement, à la compensation des défauts mécaniques (jeux, frottement, défauts géométriques), notamment au travers de simulations du comportement dynamique des axes.

#### **4.6. Analyse et programmation d'un système séquentiel**

Pour les systèmes automatisés séquentiels, les travaux pratiques s'intéressent au développement de la commande. Les candidats ont été amenés à faire des études de gestion de modes de marches et d'arrêt pour différents postes en prenant en compte les aspects de sûreté de fonctionnement, puis à traduire les résultats de leurs analyses en « programmes automates » en utilisant les environnements de programmation mis à leur disposition.

Pour cette session, les travaux pratiques retenus pour la partie fabrication sur les procédés étaient les suivants :

- l'usinage par enlèvement de matière sur machines à commande numérique de 2 à 5 axes ;
- l'usinage grande vitesse sur centre d'usinage ;
- le décolletage sur tour multiaxes à alimentation automatique ;
- le soudage sur poste robotisé ;
- l'injection plastique.

Pour le domaine des automatismes industriels, les supports exploités sont les suivants :

- une unité d'assemblage ;
- une machine à commande numérique associée à un système de mesures externes (ballbar).