

SESSION 2009

---

**CONCOURS INTERNE  
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS  
ET CONCOURS D'ACCÈS A L'ÉCHELLE DE RÉMUNÉRATION**

**Section : MÉCANIQUE**

**ÉPREUVE PORTANT SUR UN PROBLÈME D'AUTOMATISATION**

Durée : 6 heures

---

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

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

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

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

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

**Tournez la page S.V.P.**

A

# ENCARTONNEUSE DE FROMAGES

## Introduction

La Fromagerie Milleret est spécialisée dans la fabrication de fromages à pâtes molles.

La production est entièrement traitée à Charcenne en Franche Comté.

La collecte des laits de producteurs locaux se fait sans intermédiaire dans un rayon de 100 km autour de la Fromagerie.

La production annuelle est de 5.400 tonnes, soit plus de 25 millions d'unités. La gamme de produits est distribuée partout en France et à l'export.

L'outil de production permet d'optimiser la gestion des matières premières et de garantir un niveau constant dans la qualité des produits. Les contrôles Qualité interviennent systématiquement aux étapes suivantes de la fabrication : collecte, traitement du lait, production, emballage, conditionnement, stockage. Ce sont ainsi plus de 350 analyses qui sont réalisées par un laboratoire, sur place, tous les jours.

L'entreprise est certifiée ISO 9001, une démarche ISO 14001 est en place.

Le processus de fabrication des fromages *Ortolan* est donné en **Annexe 1**.

Une salle « blanche » est un local requis pour la réalisation d'une étape cruciale de fabrication d'un produit agroalimentaire. L'air est filtré et mis sous pression pour éviter l'entrée des poussières. Le nettoyage et la désinfection sont approfondis. Le personnel doit porter un suréquipement et y accéder par un sas.

Une salle « grise » est un local spécialement adapté pour le conditionnement agroalimentaire. La température est régulée selon l'usage (entre 7°C et 20°C). Le taux d'humidité est maintenu à 50 %. La salle est équipée d'un sas d'entrée de marchandise et d'une porte piétonne.

Le sujet de l'épreuve porte sur l'encartonneuse automatique intégrée dans la ligne de conditionnement des *Ortolan* en fin de processus. Voir **Annexe 2**.

Cette machine est conçue et réalisée par la société franc-comtoise ACRI Concept d'Arc-Lès-Gray.

## Éléments caractéristiques de l'encartonneuse

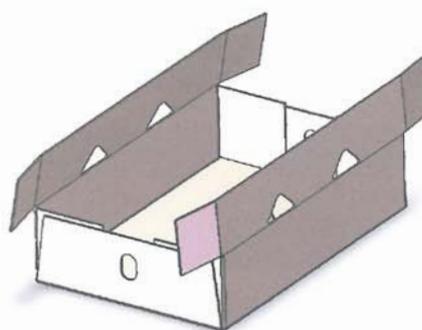
### LES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES :

- Cadence : 15 000 fromages par heure ;
- Taux de disponibilité constructeur : 95% ;
- Alimentation électrique: 400 VCA ;
- Alimentation pneumatique : 6-8 bars ;

### LE PRODUIT :

Le produit fini est constitué d'un carton formé, d'un lot de 12 fromages et de 4 points de colle à chaud.

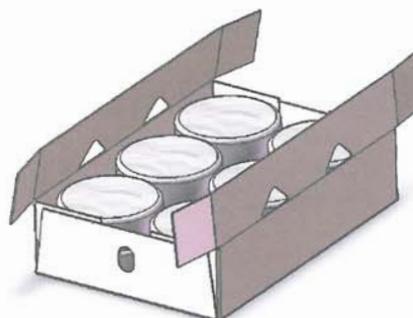
- Le carton formé et ouvert. Dimensions du volume enveloppe du carton LxlxH : 450 x 230 x 140 mm. Ce composant est réalisé en amont par la formeuse.



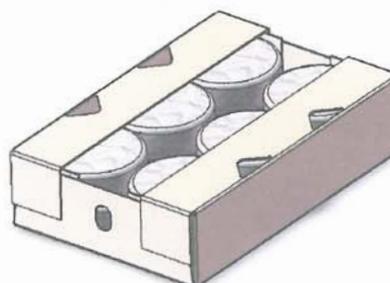
- Un lot de 12 fromages emballés arrivant de la salle d'emballage sur des bandes transporteuses. Dimensions du fromage : Ø 110 mm, H 35 mm.



- Le carton rempli de 12 fromages (2 couches de 6 fromages). Cette opération est réalisée par un opérateur en amont de l'encartonneuse. C'est le produit entrant de l'encartonneuse.



- Le carton fermé et collé avec 4 points de colle à chaud. Dimensions extérieures du carton fermé LxlxH : 330 x 230 x 80 mm. C'est le produit sortant de l'encartonneuse.



## L'ÉQUIPEMENT (voir Annexes 2, 3 et 4) :

La machine comporte un convoyeur motorisé pour l'aménagement des cartons pleins en entrée de machine jusqu'à la position 1 (repère en rouge sur l'Annexe 4). Pendant le convoyage, des déflecteurs ferment les rabats supérieurs du carton. Remarque : ce convoyeur n'est pas représenté sur les Annexes 2 et 3.

Le carton est ensuite poussé au poste de collage en position 2 (repère en rouge sur l'Annexe 4) qui est équipé d'une centrale d'adhésif ProBlue de Nordson, des tuyaux et de 4 pistolets, le tout constituant un système de dépose de colle thermofusible comme le montre la figure 1 ci-dessous.

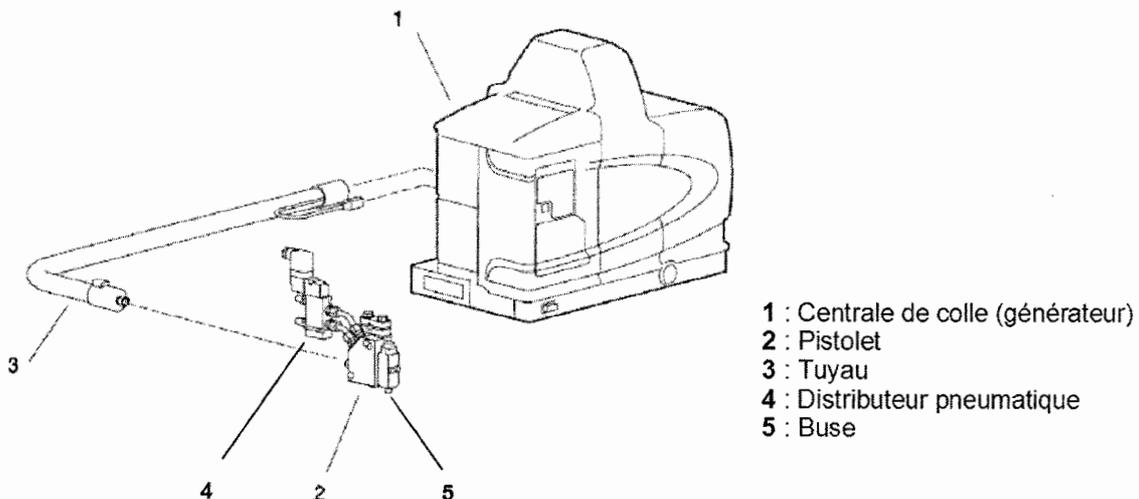


Figure 1 : système de dépose de colle thermofusible

La centrale de colle – placée au pied de la machine – liquéfie la colle thermofusible solide et la maintient à la température voulue. Quand les pistolets (2) sont activés grâce au distributeur pneumatique (4), le générateur (1) pompe la colle liquéfiée dans des tuyaux (3) qui l'amènent aux buses (5) des pistolets en vue de son application sur la surface de l'emballage.

Les pistolets éjectent une dose de colle chaude sur les points de collage du carton. Immédiatement après cela le carton est transféré verticalement dans la pile du stock de collage en position 3.

Pendant le mouvement, deux rouleaux plaqueurs appliquent les quatre oreilles du carton sur les points de colle. En fin de mouvement le carton est maintenu en position 3 grâce au quatre cliquets anti-retour. Le stock de cartons dans la pile, en positions 3, 4 et 5, crée une attente qui permet à la colle de durcir.

Lorsque le capteur pc3 détecte qu'une pile de 3 cartons est formée (en positions 6, 7 et 8), le vireur transfère cette pile devant l'éjecteur.

Enfin l'éjecteur pousse la pile de 3 cartons sur la rampe à rouleaux libres inclinée pour les diriger vers la sortie de la machine où un opérateur assure leur mise sur palette. Un capteur pc4 s'assure qu'il n'y a pas bourrage de la rampe de sortie, avant de l'éjecter.

## TRAVAIL DEMANDE

### Remarques importantes

1- le sujet comporte trois parties indépendantes :

- Une étude de l'automatisme séquentiel de la machine (durée conseillée : 2 h) ;
- Une étude de la régulation de température de la colle thermofusible. (durée conseillée : 2 h) ;
- Une séquence pédagogique dédiée au choix de détecteur de proximité T.O.R. (durée conseillée : 2 h.)

**Chacune des trois parties devra impérativement être rédigée sur des copies séparées**

2- Pour chaque question, le candidat peut émettre, s'il le juge nécessaire, des hypothèses complémentaires en les commentant et justifiant.

## Partie A : Étude de la commande séquentielle

**Rappel : cette partie est à rédiger sur copie(s) séparée(s)**

### A-1) OPTIMISATION DE LA CADENCE DE PRODUCTION

Une première version du fonctionnement normal de l'encartonneuse est donnée avec le grafocet (G7\_FN) en **Annexe 5**, ainsi que le bilan des Entrées/Sorties.

Voir si besoin l'**Annexe 6**.

L'estimation des temps d'actions est donnée dans le tableau A1 ci-après.

Actions	Durées estimées
P+ ou P-	0,5 s
V+ ou V-	0,7 s
COL	0,3 s
R+ ou R-	0,8 s
E+ ou E-	0,4 s

Tableau A1 : durées des tâches du G7\_FN

#### Hypothèses :

- le convoyeur motorisé d'entrée possède une vitesse de 0,3 m/s ;
- la cadence d'emballage des fromages est supérieure à celle de l'encartonneuse (conditionnement) ;
- la cadence de la formeuse de cartons est supérieure à celle de l'encartonneuse ;
- la cadence de l'opérateur pour le remplissage manuel est également supérieure à celle de l'encartonneuse.

**Question A1.1 :** Déterminer le temps de cycle de production d'un carton en régime permanent.

**Question A1.2 :** Déterminer la cadence horaire prévisionnelle de l'encartonneuse. Est-elle compatible avec les données du cahier des charges ?

Pour améliorer cette performance on décide de faire une analyse structurée du cycle de fonctionnement normal. Pour cela on adopte un découpage en tâches autonomes à coordonner. Cette proposition est donnée dans le tableau A2.

Mnémonique de la tâche	Désignation de la tâche	Séquence d'actions correspondantes
T1	Amenage d'un carton plein en pc1	KM1
T2	Pousser le carton au poste de collage	P+
T3	Retour du pousseur	P-
T4	Coller le carton	COL, V+
T5	Retour de l'ascenseur	V-
T6	Évacuer une pile de trois cartons collés	R+, E+ & R-, E- & R-

Tableau A2 : proposition de découpage en tâches

**Question A1.3 :** A partir du découpage en tâches proposé dans le tableau A2, construire le grafcet de coordination des tâches (G7\_CT\_FN), permettant d'optimiser la cadence de production.

**Remarque 1 :** on conservera l'utilisation des étapes encapsulantes 4 et 6 pour les tâches T4 et T6, comme il est fait dans le G7\_FN en **Annexe 5**.

**Remarque 2 :** technologiquement, T6 peut débiter en fin de T4.

**Remarque 3 :** technologiquement, T4 peut débiter en fin de T2.

**Question A1.4 :** Construire le diagramme de Gantt correspondant à ce nouveau fonctionnement normal en complétant le document réponse DR1. En déduire le temps de cycle de production d'un carton en régime permanent.

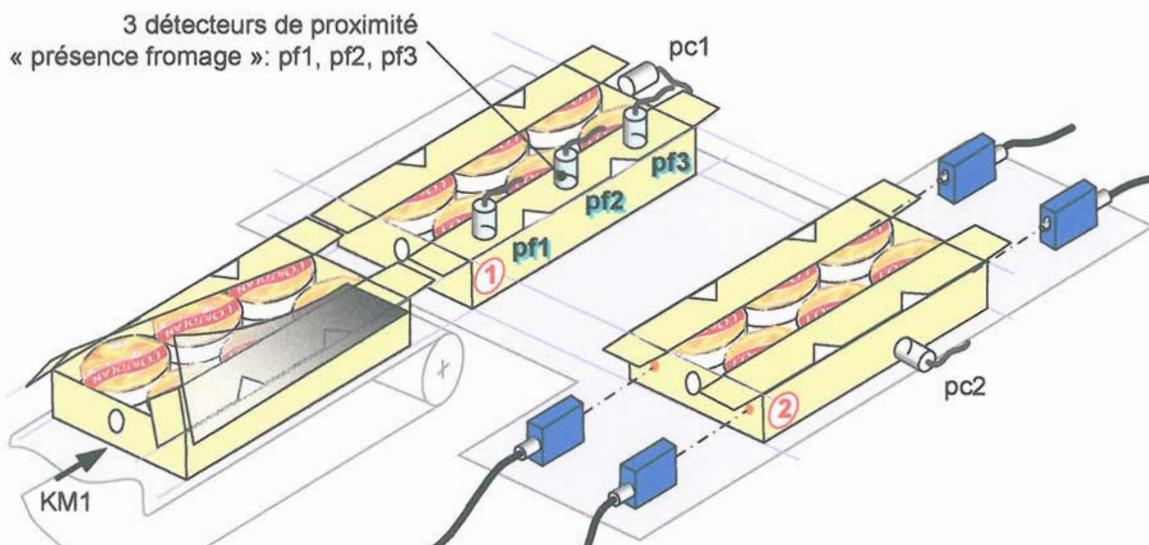
**Question A1.5 :** Déterminer la nouvelle cadence horaire prévisionnelle de l'encartonneuse et apporter vos conclusions.

## A-2) AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ

L'automatisation n'a pas pour seul objectif d'augmenter la productivité. Elle permet aussi d'effectuer des contrôles intégrés dans les processus de fabrication pour assurer la qualité et minimiser les pertes sur défautuosité.

On souhaite modifier la machine pour effectuer un contrôle à 100% de la présence des 12 fromages dans chaque carton. Le choix d'une solution économique se porte sur un principe qui utilise trois détecteurs de proximité T.O.R. (pf1, pf2, pf3) au dessus du carton en position 1, comme le montre la figure A3 ci-dessous.

**Remarque :** la position suggérée des 3 détecteurs sur la figure A3, n'est pas forcément exacte.

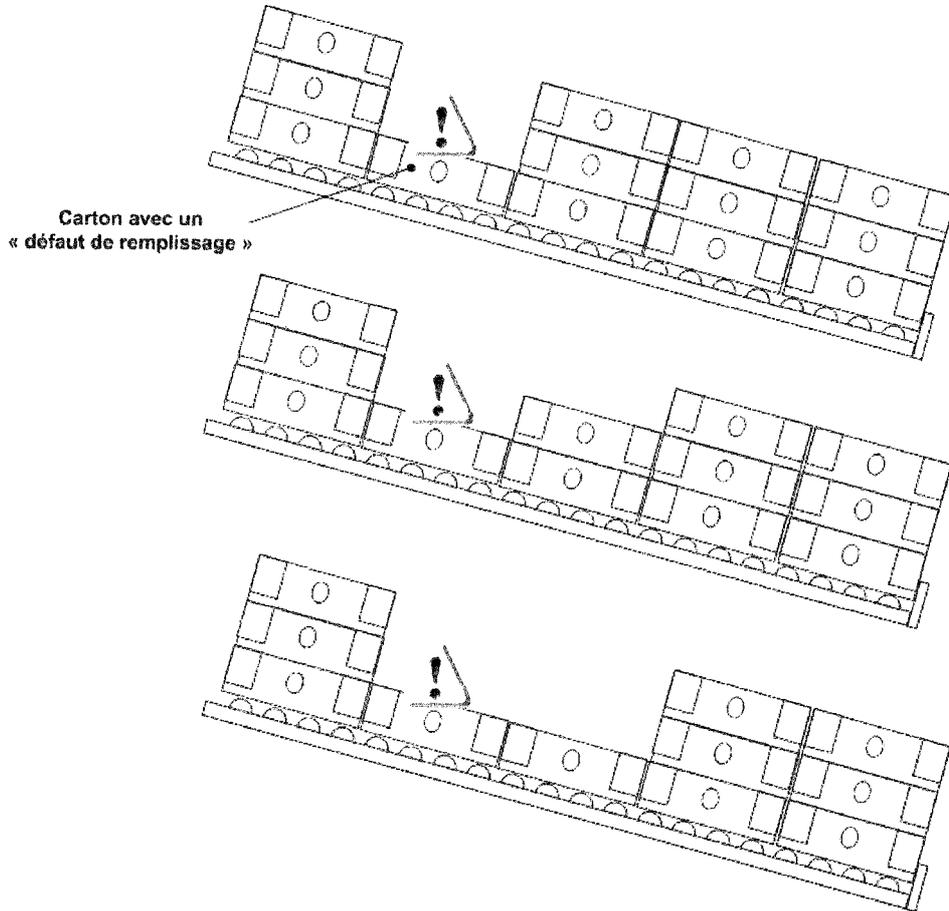


**Figure A3 :** implantation de trois détecteurs « présence fromage »

Le principe imaginé est le suivant : pendant le déroulement de la tâche T2 ces trois capteurs doivent contrôler la présence effective des 6 fromages de la couche supérieure. Si l'on détecte cette présence, il est alors possible de conclure que le conditionnement est complet.

**Tournez la page S.V.P.**

En cas d'apparition d'un « défaut de remplissage », et pour ne pas ralentir la production, on décide de ne pas arrêter la machine mais d'isoler le carton défectueux afin que l'opérateur en fin de ligne le repère facilement. Ce faisant il pourra aisément le compléter le remplissage du carton à la main afin de supprimer le défaut. La technique retenue pour isoler le carton défectueux est présentée sur la figure A4.



**Figure A4** : procédure d'isolement d'un carton avec un « défaut de remplissage »

Dès qu'un carton défectueux arrive en haut de la pile du stock de collage (position 5), on évacue la pile supérieure en cours de formation. Cette pile peut avoir 3, 2 ou 1 carton(s). Les trois situations sont illustrées dans la figure A4. Au cycle suivant, quand le défaut arrive au niveau 1 de la pile supérieure (position 6), on l'évacue pour ainsi l'isoler.

- Question A2.1** : A partir du document ressource sur la technologie des détecteurs de proximité en **Annexe 7**, sélectionner le ou les capteurs capables et choisir celui qui vous semble le plus approprié pour assurer la fonction. Justifier vos choix.
- Question A2.2** : A l'aide d'un croquis d'intention, montrer l'implantation exacte des trois capteurs choisis en question précédente, en cotant leur positions par rapport au carton et à la machine. Expliciter le mode détection du défaut.
- Question A2.3** : Elaborer le grafcet (G7\_MEMODEF) de traitement des signaux pf1, pf2 et pf3 pour mémoriser l'information « défaut remplissage ».

**Question A2.4 :** *Elaborer le grafcet du registre à décalage (G7\_REGDEF) pour décaler l'information « défaut remplissage » mémorisée, en position 5 et position 6.*

**Question A2.5 :** *Modifier le grafcet de fonctionnement normal (G7\_FN) de l'Annexe 5, afin d'assurer la fonction d'isolement d'un carton défectueux suivant la procédure décrite en figure A4.*

### A-3) RÉALISATION PROGRAMMÉE DE LA COMMANDE

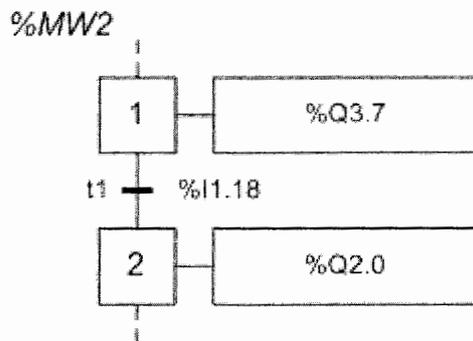
Pour l'implémentation des grafkets dans l'automate il est fait le choix d'utiliser la méthode d'interprétation numérique du modèle Grafket.

L'interprétation numérique consiste à :

- Associer un mot (exemple %MW1) à chaque grafket dont la propriété est d'être un graphe d'état ; c'est-à-dire qu'à tout instant sa situation ne possède qu'une et une seule étape active ;
- Programmer en langage littéral le grafket de manière à traduire les règles 2 et 3 d'évolution du Grafket.

En considérant la portion de grafket ci-dessous, auquel on associe le mot %MW2, le franchissement de t1 s'interprète numériquement de la manière suivante :

**si %MW2 vaut 1 et si %I1.18 est vraie, alors mettre le mot %MW2 à la valeur 2.**



- Compléter cette programmation des évolutions sur franchissement de transitions par la prise en compte de la règle 1 sur la situation initiale. Pour cela on utilise un bit système de l'API. Ce bit %SYS normalement à l'état 0, est mis à 1 par le système durant le premier cycle, après la mise en mode RUN de l'automate. Il permet donc la mise en place d'une phase d'initialisation dans le programme, afin de traduire le marquage initial (l'activation des étapes initiales) des grafkets.

L'Annexe 8 donne un exemple de jeu minimal d'instructions d'automate pour le traitement numérique en langage littéral structuré.

L'Annexe 9 donne le grafket adressé du fonctionnement normal (G7\_FN).

**Question A3.1 :** *En utilisant et respectant scrupuleusement le langage ST présenté en annexe 8, écrire le programme du grafcet de fonctionnement normal (G7\_FN) afin de respecter les règles 1, 2 et 3 d'évolution du modèle Grafcet.*

**Remarque 1** : ne traiter que le graphe principal et l'encapsulation 6.

**Remarque 2** : ne pas omettre le marquage de la situation initiale (règle 1) ainsi que le lien d'activation de l'encapsulation (voir **Annexe 6**).

**Question A3.2 :** *Compléter le programme de la question précédente par la programmation des actions associées aux étapes.*

**Remarque** : ne traiter que les actions de l'encapsulation 6.

## Partie B : Étude de la régulation en température du générateur de colle

**Rappel : cette partie est à rédiger sur copie(s) séparée(s)**

**Remarque :** Les trois parties (B1, B2 et B3) constituant la partie B sont indépendantes. Il est conseillé cependant de prendre connaissance de l'ensemble du sujet avant de traiter l'une des parties.

Le formage des cartons est finalisé par application d'un adhésif délivré par un système d'encollage. Succinctement, le principe en est le suivant : grâce à l'action d'une unité de chauffage (voir **Annexes 10(a et b) et 11**), le générateur de colle liquéfie la matière thermo fusible solide et la maintient à la température de consigne dans un bac de stockage isotherme. Lorsque les pistolets sont commandés, la colle liquéfiée est mise en mouvement grâce à l'action d'une pompe volumétrique et est transférée sous pression, du bac vers des buses placées en bout des pistolets en vue de son application sur la surface cartonnée.

Le bon fonctionnement du système d'encollage nécessite de contrôler en permanence la température de la colle. En effet, si cette dernière est trop faible, la viscosité de la colle est trop importante contrariant son écoulement correct à travers les buses de sortie. Si au contraire la colle est maintenue à une température trop élevée, ses propriétés mécaniques s'en trouvent fortement altérées.

L'**Annexe 12** définit l'architecture simplifiée de la régulation en température de la colle. Afin de garantir une température de colle optimale, on dispose de trois unités de chauffage pouvant (si besoin) être commandées séparément. Deux thermo sondes identiques mesurent la température de la colle au sein du bac de stockage et en bout des pistolets avant diffusion.

Un générateur de consigne élabore les ordres à partir des différentes valeurs de température réglées. Bien qu'il soit possible d'imposer des températures différentes dans le bac et en bout des pistolets, on fait l'hypothèse que la température de consigne est identique et sera notée  $\theta_c$  (en °C). Comme le montre l'**Annexe 13**, le régulateur élabore un signal de commande en tenant compte des informations délivrées par les sondes et le générateur de consigne.

Cette partie B du sujet s'articule selon trois axes. Dans un premier temps, une étude de l'une des deux sondes de température sera menée dans le but de proposer une linéarisation de sa caractéristique comportementale. Dans un deuxième temps, à partir d'une identification du processus à commander, une structure de régulateur utilisant un prédicteur de Smith sera mise en place. Enfin, une analyse des performances de la structure de commande élaborée sera conduite.

## B-1) LINEARISATION DE LA SONDE DE TEMPERATURE

La mesure de température de la colle est effectuée grâce à deux thermo sondes identiques (principe de thermométrie par résistance). Dans le cadre de la commande linéaire, on cherche à imposer que la variation du signal de mesure délivré par la sonde et son conditionneur soit linéaire en fonction de la température  $\theta$ . La méthode de linéarisation la plus simple consiste à associer (ici en parallèle, voir **Annexe 14**) à la sonde de température une résistance fixe notée  $R_1$  dite 'de linéarisation'. En calibrant correctement la valeur de  $R_1$ , on impose que, autour de la température de fonctionnement (notée  $\theta_i$ ), la tension de mesure  $u_m(\theta)$  évolue quasi linéairement en fonction de la température  $\theta$ .

En référence au schéma de montage placée dans la figure de l'**Annexe 14**, un dipôle de résistance  $R(\theta)$ , alimenté par une source de courant  $i$  (en A), délivre à ses bornes une tension  $u_m$  (en V). Naturellement,  $u_m(\theta) = iR(\theta)$ . La linéarisation de la tension  $u_m(\theta)$  implique donc la linéarisation de la résistance  $R(\theta)$  du dipôle autour du point de fonctionnement  $\theta = \theta_i$ , ce qui peut se traduire par :

$$\frac{d^2R(\theta = \theta_i)}{d\theta^2} = 0 \quad (\text{Eq1})$$

**Question B1.1 :** Déterminer l'expression de la résistance équivalente  $R(\theta)$  en fonction des deux résistances (une variable et une fixe) montées en parallèle notées respectivement  $R_c(\theta)$  et  $R_1$  (voir **Annexe 14**).

**Question B1.2 :** En appliquant la condition de linéarisation définie par Eq1 à l'expression de la résistance équivalente  $R(\theta)$  déterminée précédemment, montrer que l'on obtient la condition suivante :

$$[R_1 + R_c(\theta_i)] \cdot \frac{d^2R_c(\theta = \theta_i)}{d\theta^2} - 2 \left[ \frac{dR_c(\theta = \theta_i)}{d\theta} \right]^2 = 0 \quad (\text{Eq2})$$

La sonde de température (thermo résistance métallique  $R_c(\theta)$ ) utilisée dans le générateur de colle est du type 'RTD Nickel'. Comme le montre la figure de l'**Annexe 14**, la relation  $R_c(\theta)$  peut être approchée par la relation suivante :

$$R_c(\theta) = R_{co}(1 + A \cdot \theta + B \cdot \theta^2) \quad (\text{Eq3})$$

**avec :**

$R_{co}$  : résistance à la température de référence,  $R_{co} = 120 \Omega$  à  $\theta = 0^\circ\text{C}$

$A = 6,2 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ ,  $B = 7,8 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}^2$

**Question B1.3 :** En utilisant les relations (Eq2 et Eq3), déterminer l'expression de la résistance de linéarisation  $R_1$  en fonction de  $R_{co}$ ,  $A$ ,  $B$  et  $\theta_i$ .

**Question B1.4 :** Déterminer la valeur numérique de  $R_1$  (en  $\Omega$ ) si la température de fonctionnement est fixée à  $\theta_i = 150^\circ\text{C}$ .

**Question B1.5 :** Déterminer alors la valeur numérique du gain (en  $\Omega / ^\circ\text{C}$ ) de la sonde linéarisée autour du point de fonctionnement défini.

Le modèle associé à la sonde de température couplée avec son conditionneur est précisé par le schéma bloc suivant :

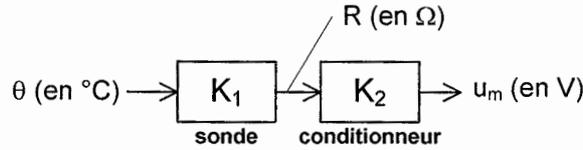


Figure B1 : modèle de la sonde et du conditionneur

La fonction du conditionneur est de délivrer une tension image  $u_m$  telle que :  $u_m(t) = K_2.R(\theta(t))$ . On impose que pour une variation de température de  $240^\circ\text{C}$ , la variation de la tension  $u_m$  soit au maximum de 24 V.

**Question B1.6 :** Déterminer la valeur numérique du gain  $K_2$  défini sur la figure B1. Indiquer son unité.

### B-2) PREDICTEUR DE SMITH

Comme le synthétise la figure B2 suivante, le modèle de commande proposé se compose principalement d'un processus à commander et d'un régulateur. La fonction de transfert du correcteur  $C_1(p)$  reste à déterminer. Le gain  $K_c$  modélise le comportement de l'ensemble 'sonde + conditionneur' (objet de la partie B1).

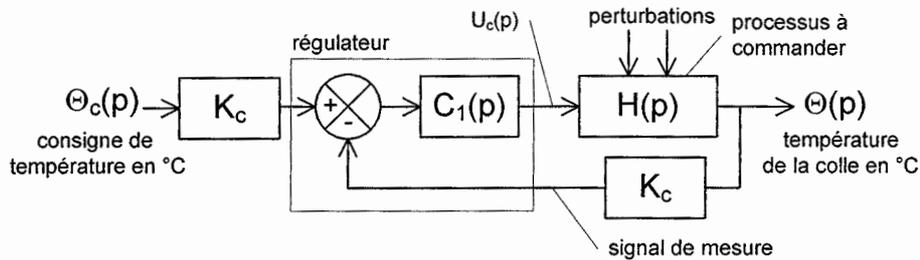


Figure B2 : modèle simplifié de la commande

Bien que les équations modélisant les différents transferts d'énergie présents au sein du processus de génération de la colle liquide soient en toute rigueur non linéaires, certaines hypothèses simplificatrices (notamment une linéarisation des modèles autour d'une température de fonctionnement), nous autorisent à utiliser les transformées de Laplace et l'outil schéma bloc.

#### Notations :

On adopte les notations suivantes entre le domaine temporel et celui de Laplace. Ainsi, si la fonction  $\theta(t)$  possède une transformée de Laplace, elle sera notée :  $\Theta(p) = \mathcal{L}[\theta(t)]$

Un enregistrement temporel d'un essai pratiqué uniquement sur le processus à commander est présenté sur l'Annexe 15. On suppose que le signal de commande est de la forme  $u_c(t) = U_0.u(t)$  avec  $u(t)$  : échelon unitaire et  $U_0$  : tension de

commande (en V). L'allure de la réponse temporelle nous incite à proposer un modèle comportemental de la forme :

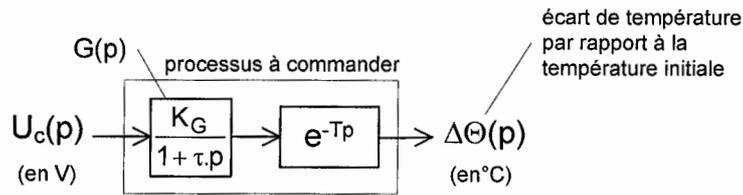


Figure B3 : modélisation du processus à commander

**Question B2.1 :** En utilisant le tracé de l'Annexe 15, identifier les valeurs de différentes constantes du modèle de  $H(p)$  soient  $K_G$ ,  $T$  et  $\tau$ . Préciser les unités. On suppose que  $U_0 = 24 \text{ V}$ .

**Question B2.2 :** Préciser le phénomène physique modélisé par le terme  $e^{-Tp}$ .

**Question B2.3 :** Tracer, en le justifiant, la réponse fréquentielle du terme  $e^{-Tp}$  dans le plan de Black. Discuter alors des effets (positifs ou négatifs) de ce terme sur la stabilité en boucle fermée du modèle de commande (voir Figure. B2).

Dans la pratique industrielle, on cherche à calibrer le correcteur  $C_1(p)$  afin d'atteindre des performances définies par le cahier des charges fonctionnel. Toutefois, on se trouve devant un écueil : la présence du retard pur présent dans le processus à commander perturbe considérablement l'analyse et le réglage du régulateur. Une des solutions à ce problème est l'intégration d'un prédicteur de Smith. Lors de la phase d'ajustement (objet de la partie B3), par construction (objet de la partie B2) le retard est rejeté hors de la boucle d'asservissement et n'est donc pas pris en compte (voir Figure B4). Un changement de variable nous permet de nous affranchir de la notion de température initiale non nulle. Ainsi, en toute rigueur  $\Theta_c$ ,  $\Theta_m$  et  $\Theta$  représentent des écarts de température.

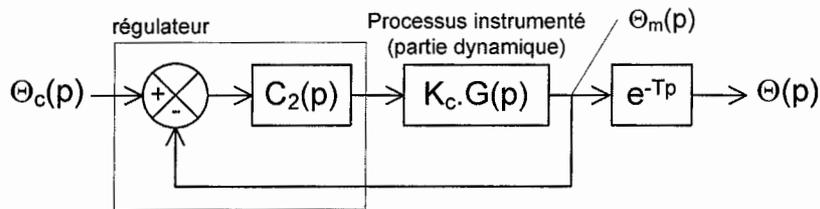


Figure B4 : modèle de commande équivalent

**Question B2.4 :** Déterminer l'expression de  $C_1(p)$  en fonction de  $C_2(p)$ ,  $K_c$ ,  $G(p)$  et  $e^{-Tp}$  de manière à obtenir l'équivalence entre les deux schémas blocs (voir Figure B2 et B4).

**Question B2.5 :** En le reprenant sur votre feuille, compléter (en couleur) le schéma bloc (voir Figure B5) du prédicteur de Smith. On respectera obligatoirement la structure proposée, les signes seront impérativement indiqués.

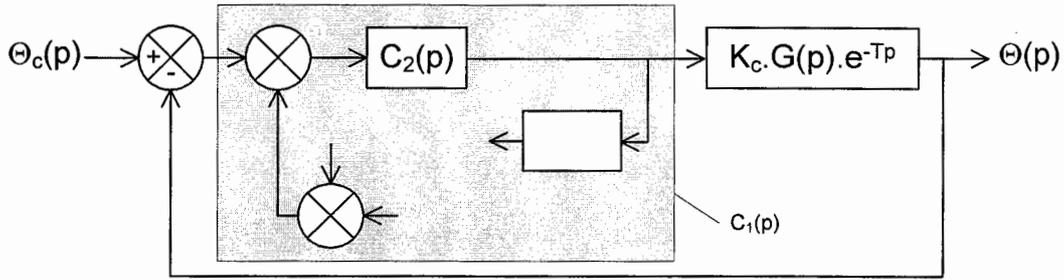


Figure B5 : modèle du régulateur  $C_1(p)$

Toutefois, comme le montre les différents schéma blocs (voir Figure B5 et/ou B6), la réalisation (par compensation de temps mort CTM) du correcteur  $C_1(p)$  nécessite obligatoirement la connaissance d'un modèle (aussi représentatif que possible) du processus que l'on cherche à commander. On pose donc  $G_m(p)$  : modèle de la partie dynamique du processus à commander et  $T_m$  : temps caractéristique (en s). La structure classique du régulateur que l'on trouve dans la littérature est présentée sur la figure B6. On remarque qu'elle fait notamment apparaître un signal 'erreur de prédiction' notée  $\varepsilon_p(p)$ .

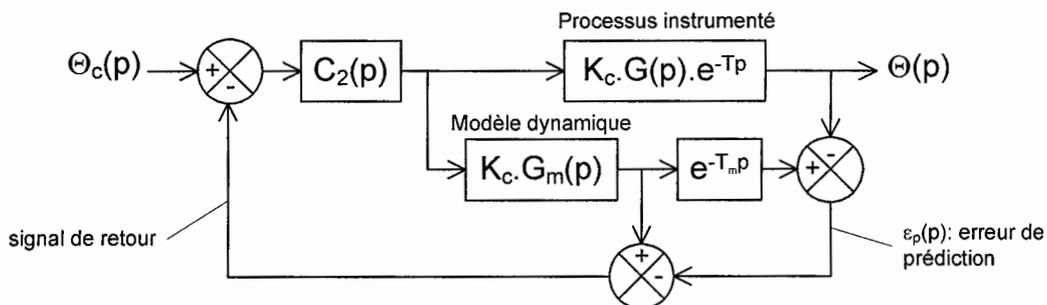


Figure B6 : modèle du prédicteur de Smith

**Question B2.6 :** Montrer que les deux schéma blocs (voir Figure B5 et B6) sont strictement équivalents dès lors que l'on dispose d'un modèle exact du processus à commander. Dans ces conditions, donner la valeur de l'erreur de prédiction  $\varepsilon_p(p)$ .

**Question B2.7 :** Indiquer alors ce que représente le signal de retour (voir Figure B6). Conclure en quelques lignes sur les avantages/inconvénients ainsi que sur le domaine d'utilisation d'un tel régulateur.

En référence à la figure B6, on cherche à quantifier l'erreur de prédiction  $\varepsilon_p(p)$  dès lors que l'on ne dispose pas d'un modèle exact du processus à commander.

**Question B2.8 :** Déterminer l'expression de l'erreur de prédiction  $\varepsilon_p(p)$  en fonction de  $G_m(p)$ ,  $G(p)$ ,  $K_c$ ,  $C_2(p)$ ,  $T_m$ ,  $T$  et du signal de consigne  $\Theta_c(p)$ .

On impose une entrée en température de la forme  $\theta_c(t) = \theta_c \cdot u(t)$  avec  $u(t)$  : échelon unitaire et  $\theta_c$  : température de consigne (en °C).

On suppose que :

$$G(p) = \frac{K_G}{1 + \tau \cdot p}, \quad G_m(p) = \frac{K_{GM}}{1 + \tau_m \cdot p} \quad \text{avec } K_G \neq K_{GM}, \quad \tau \neq \tau_m \quad \text{et } T \neq T_m$$

Dans un premier temps, la fonction de transfert du correcteur est  $C_2(p) = K_r$ .

**Question B2.9 :** Déterminer la valeur finale de l'erreur de prédiction  $\varepsilon_p(\infty)$ . Montrer que cette dernière est d'autant plus petite que le gain en boucle ouverte  $K_{bo}$  est grand.

Dans un deuxième temps, on choisit  $C_2(p) = K_r \cdot \left(1 + \frac{1}{T_r \cdot p}\right)$ .

**Question B2.10 :** Déterminer la valeur finale de l'erreur de prédiction  $\varepsilon_p(\infty)$ . Montrer qu'elle ne dépend que de  $K_G$ ,  $K_{GM}$  et  $\theta_c$ . Conclure.

### B-3) REGLAGE DU REGULATEUR

Compte tenu des développements théoriques précédents, on adopte comme modèle de commande celui représenté sur la figure B4, dont on donne l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte, soit :

$$H_{bo}(p) = C_2(p) \cdot \frac{1}{2 + 600 \cdot p}$$

On confirme comme fonction de transfert du correcteur  $C_2(p) = K_r \cdot \left(1 + \frac{1}{T_r \cdot p}\right)$ . On cherche à déterminer les deux constantes  $K_r$  et  $T_r$ . Afin de contrôler correctement la température de la colle, la boucle de régulation doit être précise et rapide. Le cahier des charges (définissant les qualités de la boucle fermée  $H_{bf}(p) = \frac{\Theta_m(p)}{\Theta_c(p)}$ ) est le

suivant :

- erreur statique nulle ;
- erreur de traînage inférieure à 10% ;
- temps de réponse à 5% inférieur à 1 s.

**Question B3.1 :** Donner la désignation du correcteur  $C_2(p)$ . Par rapport à l'emploi d'un correcteur proportionnel simple, expliquer pourquoi il permet d'obtenir une commande plus précise.

**Question B3.2 :** Tracer les diagrammes asymptotiques de la réponse fréquentielle dans le plan de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte  $H_{bo}(j\omega)$  non corrigée. Faire apparaître les points caractéristiques sur tous les diagrammes (pentes, valeurs remarquables,...). L'utilisation de la couleur est fortement conseillée.

On cherche à calibrer le correcteur  $C_2(p)$ .

**Question B3.3 :** Déterminer  $T_r$  afin que le zéro du correcteur compense le pôle de la fonction de transfert en boucle ouverte  $H_{bo}(p)$  non corrigée. Faire l'application numérique.

**Question B3.4 :** Déterminer  $K_r$  afin de respecter la valeur maximale de l'erreur de traînage imposée par le cahier des charges. Faire l'application numérique.

**Question B3.5 :** Tracer les diagrammes asymptotiques de la réponse fréquentielle dans le plan de Bode de la fonction de transfert du correcteur  $C_2(p)$  seul. Faire apparaître les points caractéristiques sur tous les diagrammes (pentes, valeurs remarquables,...). L'utilisation de la couleur est fortement conseillée.

On impose une entrée en température de la forme  $\theta_c(t) = \theta_c \cdot u(t)$  avec  $u(t)$  : échelon unitaire et  $\theta_c$  : température de consigne (en °C).

**Question B3.6 :** Exprimer sous forme canonique la fonction de transfert en boucle fermée  $H_{bf}(p)$  avec et sans correction. Tracer alors dans les deux cas, la réponse temporelle  $\theta_m(t)$ . Faire clairement apparaître sur chaque tracé, l'erreur statique ainsi que le temps de réponse à 5%. Reprendre sur votre feuille le tableau de synthèse suivant et le compléter.

	Erreur statique (en %)	Temps de réponse à 5% (en min)
Non corrigée		
Corrigée		

Tableau B7 : tableau de synthèse

**Question B3.7 :** Analyser les résultats par rapport aux spécifications imposées par le cahier des charges. Conclure.

## Partie C : Étude pédagogique

**Rappel : cette partie est à rédiger sur copie(s) séparée(s)**

On se propose dans cette partie, de construire une séquence d'enseignement destinée à des élèves de STSMAI concernant le choix, le dimensionnement et l'implantation de détecteurs de proximité TOR industriels.

La compétence **CP43** visée – de l'unité U52 (Choix technologiques et description de la réalisation de la partie commande) – est donnée ainsi dans le référentiel du diplôme :

Compétence composante	Conditions de réalisation	Critère(s) et niveaux de performance
<p style="text-align: center;"><b>CP43</b></p> <p>Dimensionner évaluer les performances et choisir un constituant de commande</p>	<p>Un cahier des charges partiel, relatif à un constituant (ou à un ensemble de constituants) d'une chaîne fonctionnelle, est fourni, comportant :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- une caractérisation précise des fonctions et des spécifications (fonctionnelles, technologiques, opérationnelles) du (ou des) constituant(s) ;</li> <li>- une liste (éventuellement partielle) de critères de choix avec leur caractérisation précise (niveau, flexibilité).</li> </ul> <p>Des descriptions (solutions homologues existantes ou spécifications générales) sont disponibles sous forme de dossiers, de documents constructeurs,...</p> <p>Des choix potentiels de composants, de logiciels et des caractéristiques techniques sont éventuellement précisés.</p> <p>Des guides d'évaluation de performances, des guides de choix sont éventuellement fournis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identification du type (ou des) constituant(s) répondant aux fonctions : <i>types(s) conforme(s)</i>.</li> <li>• Listage exhaustif des évaluations à effectuer (spécifications dérivées permettant les comparaisons avec les caractéristiques ou performances de la solution) : <i>liste cohérente avec les spécifications et les caractéristiques des constituants adaptés au besoin</i>.</li> <li>• Evaluation des spécifications ou des performances : <i>la démarche d'évaluation est juste, la guidance éventuelle est respectée, les résultats sont d'ordre de grandeur correct</i>.</li> <li>• Sélection d'un constituant : <i>la démarche de choix est correcte, le choix est conforme aux spécifications imposées et évaluées (même si ces évaluations sont fausses !)</i>.</li> </ul>

Les contenus associés pour la partie des constituants industriels d'acquisition de données sont :

- Structure générale d'une chaîne de mesures (en relation avec le professeur de Physique) ;
- Caractéristiques métrologiques des capteurs : étendue de mesure, précision, sensibilité, temps de réponse, ... ;
- Les détecteurs industriels :
  - Limites, performances et comparaison technico-économique des principales solutions. Choix d'un détecteur industriel : arbres de décision.
- Les capteurs industriels :
  - Caractéristiques et choix de capteurs pour la commande.

**Question C1.1 :** *Proposer une séquence pédagogique cohérente visant l'objectif de : choix, dimensionnement et implantation de détecteurs de proximité TOR industriels.*

**Recommandations :**

- La séquence, qui peut comporter plusieurs parties (cours, TD, TP ou projet), doit être définie complètement – ordre, organisation, nature du contenu ou des activités – et justifiée;
- Pour la partie TD, si elle existe dans votre proposition de séquence, elle sera appliquée à l'encartonneuse. Pour ce faire il faut définir précisément le travail demandé aux élèves, donner les éléments essentiels de la résolution du problème et ne pas omettre de formuler toutes les hypothèses nécessaires ;
- Pour la partie cours (apport initial ou synthèse finale des connaissances), la structuration du contenu doit aborder au moins les points suivants :
  - 1- Les données du CdCF et les critères à prendre en compte ;
  - 2- La typologie des technologies de détection ;
  - 3- Un guide méthodologique de choix des détecteurs ;
  - 4- Les règles d'implantation des détecteurs dans la partie opérative de la machine automatique.