

Systèmes logiques séquentiels

Objectifs du cours : Après avoir étudié ce cours, vous devez être capable de :

- modéliser un système logique séquentiel,
- proposer un programme sous forme de grafcet, répondant à un cahier des charges donné.

1 Définition

Un système *séquentiel* est un système dont les sorties S_i dépendent de l'histoire des entrées $E_i(t)$.

Exemple : commande d'un moteur électrique par un système séquentiel (figure 1). On remarque sur le chronogramme de droite que la sortie S peut présenter une valeur différente (0 ou 1) pour une configuration identique des entrées m et a .

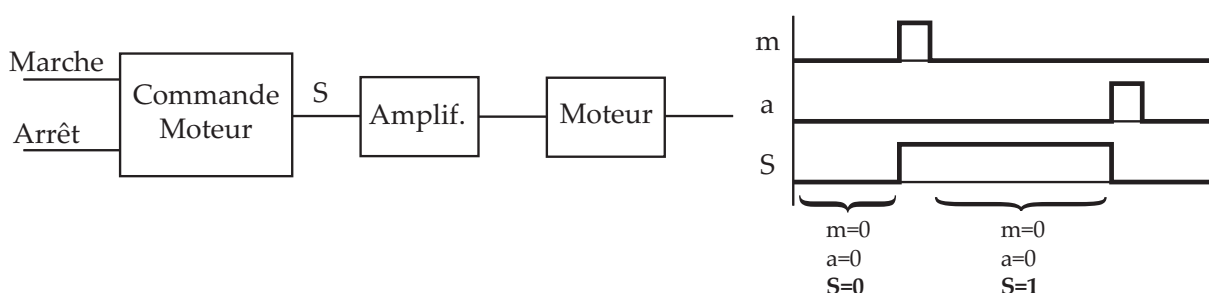


FIGURE 1 – Commande d'un moteur électrique.

Le système est capable de *mémoriser* de l'information. Cette information mémorisée est *l'état du système*, qui peut être représenté par un vecteur d'état booléen : $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

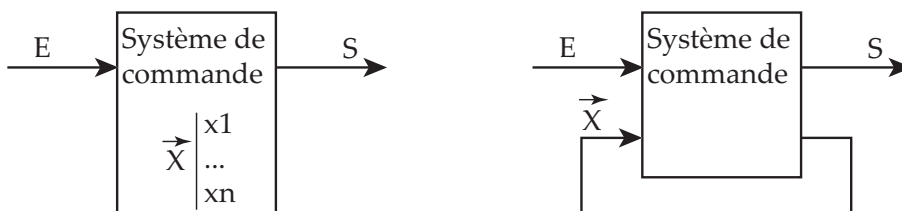


FIGURE 2 – Représentation d'un système séquentiel par un système combinatoire muni d'une variable d'état.

Connaissant \vec{X} et \vec{E} , la sortie \vec{S} peut être déterminée comme une fonction booléenne (figure 2) de \vec{X} et de \vec{E} : $\vec{S} = f(\vec{X}, \vec{E})$. L'état interne \vec{X} à l'instant t dépend de $E(t)$ et de l'état interne immédiatement précédent : $\vec{X}(t) = f(\vec{E}(t), \vec{X}(t - \Delta t))$.

Les tableaux de Karnaugh ne permettent plus de décrire l'évolution de S en fonction de E . On utilise alors les *chronogrammes* (aussi appelés *diagrammes de Gantt*, figure 3). On représente l'évolution chronologique des entrées et sorties avec changements d'états instantanés et simultanés.

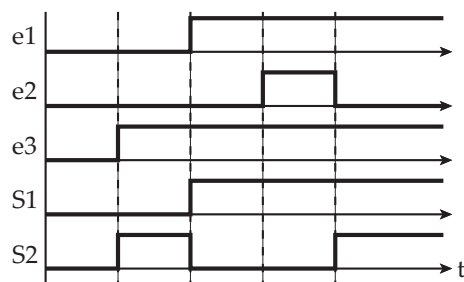


FIGURE 3 – Exemple de chronogramme.

2 Mémoires

2.1 Principe de réalisation d'une mémoire

Idée : utiliser la sortie comme entrée pour maintenir l'information. Un exemple simple est donné figure 4.

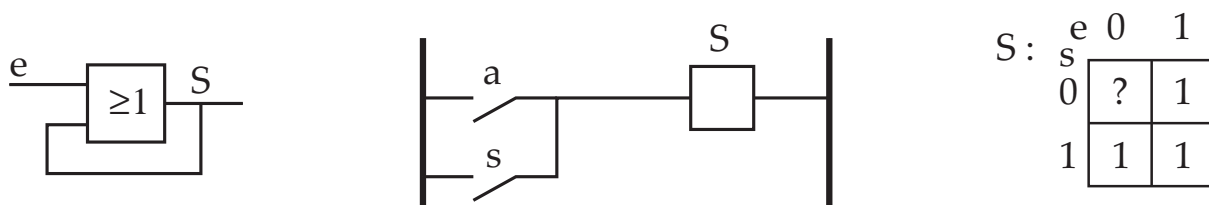


FIGURE 4 – Exemple de réalisation d'une mémoire élémentaire.

Si initialement e et s sont à zéro, un passage de e à 1 à un instant t_0 conduit à $S = 1$ pour $t > t_0$, quelle que soit la valeur de e après t_0 . S mémorise si e est passé à 1 au cours du temps.

L'inconvénient de cette mémoire élémentaire est qu'il est impossible de la remettre à zéro !

2.2 Mémoire à déclenchement prioritaire

La figure 5 montre la réalisation par logigramme et par schéma à contact d'une mémoire à déclenchement prioritaire. La variable s (set) permet de mettre la mémoire à 1 (sortie $Q2$), la variable r (reset) permet de mettre la mémoire à 0 tandis qu'une action simultanée sur les deux variables s et r met la mémoire à zéro : il s'agit du déclenchement prioritaire.

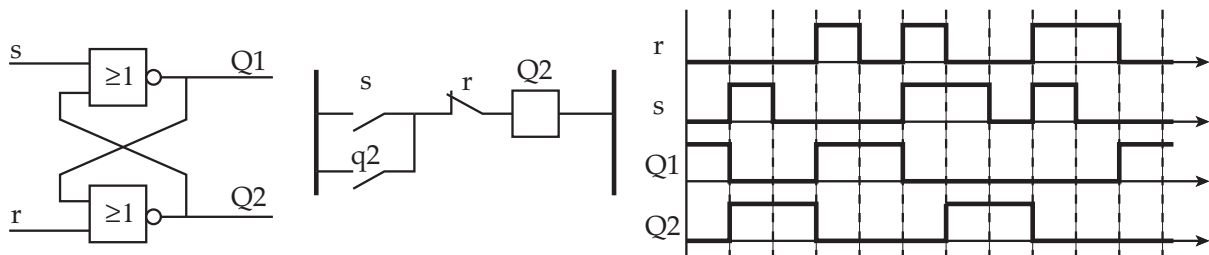


FIGURE 5 – Architecture d'une mémoire à déclenchement prioritaire.

$$\begin{cases} Q_1 = \overline{s + Q_2} = \overline{s + r + Q_1} = \bar{s} \cdot (r + Q_1) \\ Q_2 = \overline{s + Q_1} = \bar{r} \cdot (s + Q_2) \end{cases}$$

Remarque : $Q_2 \neq \overline{Q_1}$.

2.3 Mémoire à enclenchement prioritaire

La figure 6 montre la réalisation par logigramme et par schéma à contact d'une mémoire à enclenchement prioritaire. La variable s (set) permet de mettre la mémoire à 1 (sortie Q_1), la variable r (reset) permet de mettre la mémoire à 0 tandis qu'une action simultanée sur les deux variables s et r met la mémoire à 1 : il s'agit de l'enclenchement prioritaire.

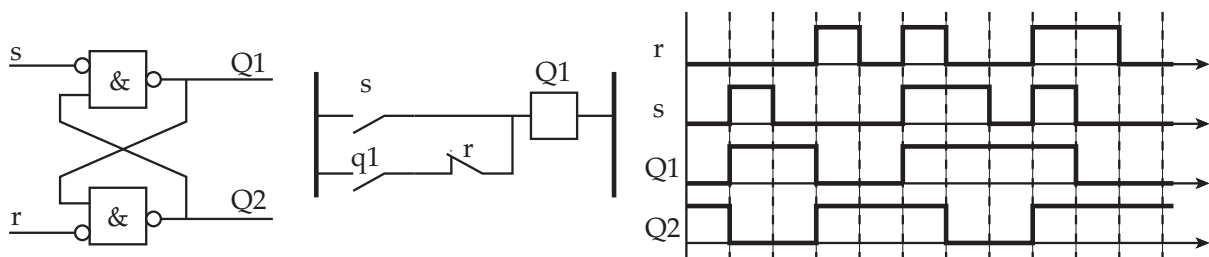


FIGURE 6 – Architecture d'une mémoire à enclenchement prioritaire.

$$\begin{cases} Q_1 = \overline{\bar{s} + Q_2} = s + (\bar{r} \cdot Q_1) \\ Q_2 = \overline{\bar{r} + Q_1} = r + (\bar{s} \cdot Q_2) \end{cases}$$

Remarque : $Q_2 \neq \overline{Q_1}$.

2.4 Mémoire à entrée simultanée passive

La figure 7 montre la réalisation par schéma à contact d'une mémoire à entrée simultanée passive. La variable s (set) permet de mettre la mémoire à 1, la variable r (reset) permet de mettre la mémoire à 0 tandis qu'une action simultanée sur les deux variables s et r ne change pas la valeur de la mémoire.

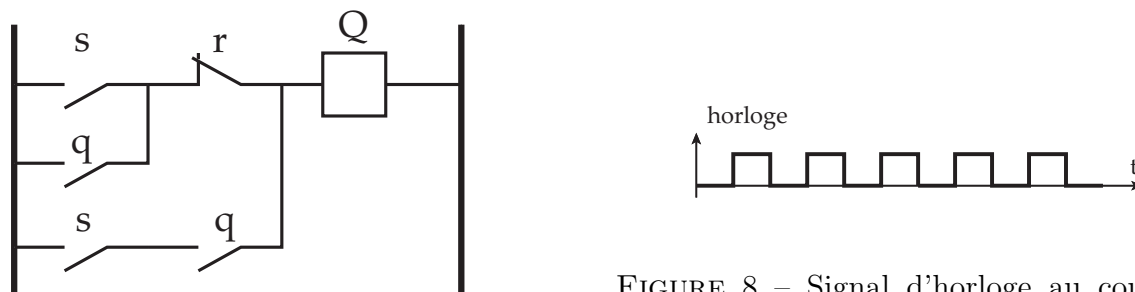


FIGURE 8 – Signal d'horloge au cours du temps.

FIGURE 7 – Architecture d'une mémoire à entrée simultanée passive.

2.5 Problèmes technologiques des mémoires

- Ce type de mémoire nécessite de l'énergie : ce n'est pas un stockage passif de l'information.
- Les changements d'états ne sont jamais instantanés et l'information n'est pas infiniment rapide. Ce temps de traitement de l'information peut générer des fonctionnements non prévus.
- L'informatique utilise des mémoires synchronisées : les entrées s et r ne sont lues qu'à chaque temps d'horloge (figure 8). Le temps de propagation de l'information dans les portes et les fils limite la fréquence de l'horloge.

3 Le GRAFCET

3.1 Introduction

Le GRAFCET est un modèle de comportement dynamique séquentiel d'un système logique, associé à une représentation graphique normalisée (CEI 61131-3).

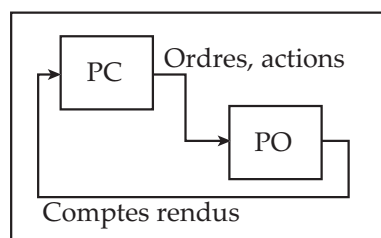


FIGURE 9 – Échange d'information entre la partie commande et la partie opérative.

Il est adapté à l'étude des *parties commandes logiques séquentielles* dont l'objet est de commander une partie opérative par une suite d'actions avec vérifications de fin de tâche.

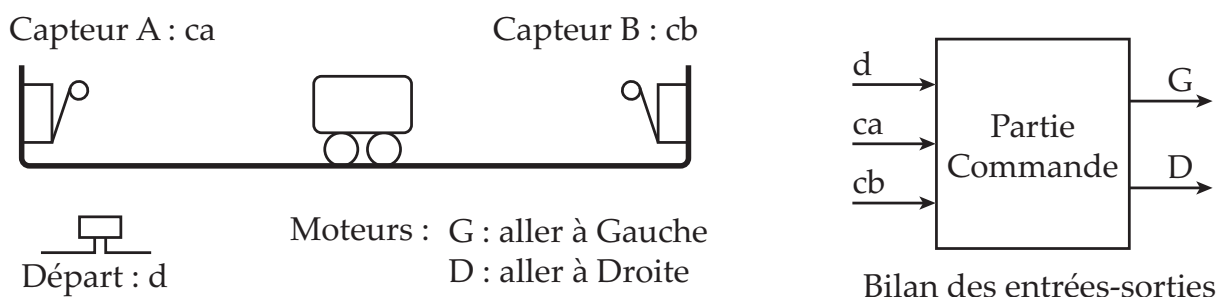


FIGURE 10 – Exemple de partie opérative : un chariot motorisé muni d'un bouton et de capteurs.

Exemple : Chariot motorisé.

Le chariot initialement en A fait un aller-retour à la demande d'un bouton poussoir d . Lorsque l'utilisateur presse le bouton de départ d , le chariot part vers la droite (sortie D). Lorsque le capteur cb détecte l'arrivée du chariot, celui-ci est envoyé vers la gauche (sortie G) jusqu'au capteur ca où il s'arrête.

Le grafcet implanté dans la partie commande et assurant ce comportement est donné figure 11. Les configurations de A à D montrent l'évolution au cours du temps du grafcet.

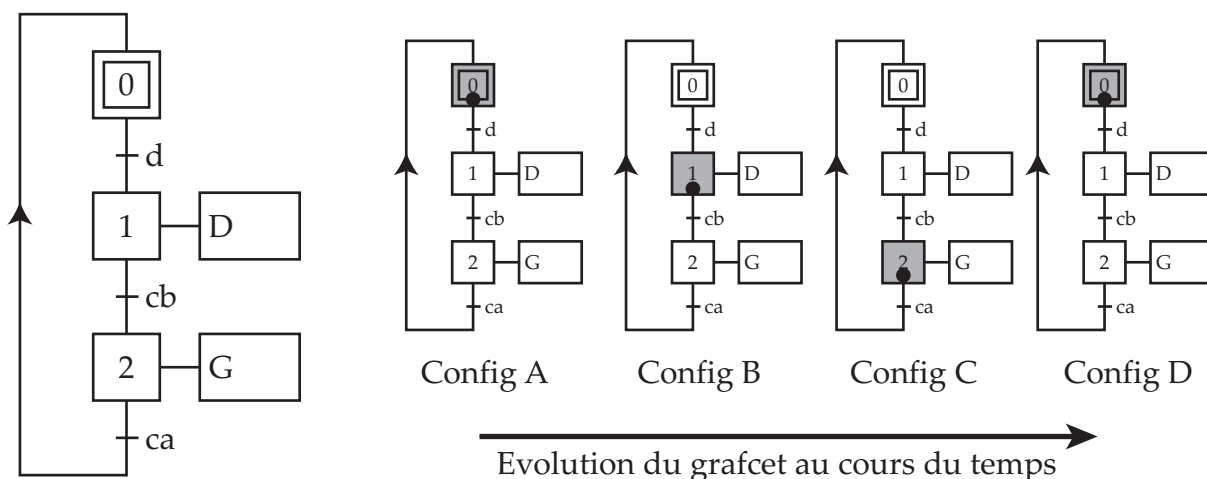


FIGURE 11 – Évolution du grafcet au cours du temps.

Le modèle GRAFCET fait l'hypothèse que la partie commande évolue infiniment rapidement par rapport à la partie opérative. De plus, si deux entrées sont indépendantes (non corrélées), on suppose qu'elles ne peuvent pas être simultanées à l'échelle de la partie commande.

3.2 Le code graphique du GRAFCET

3.2.1 Les étapes

Une *étape* est un état stable de la partie commande (figure 12). Chaque étape n est associée à une variable Xn :

- $X12 = 1$: l'étape 12 est active,
- $X12 = 0$: l'étape 12 est inactive.

Le *vecteur d'état* X est constitué de l'ensemble des Xn . Une étape en double carré représente une *étape initiale*. Lorsque le grafcet est représenté dans une situation particulière à l'instant t , on note par un point les étapes actives à cet instant.

Les actions à réaliser durant le temps d'activité de l'étape sont notées à droite. Par défaut, l'action D est réalisée uniquement lorsque l'étape est active. Pour réaliser l'action durant plusieurs étapes, il faut l'indiquer à chaque étape ou la mémoriser à 1 en indiquant $D = 1$. L'action sera réalisée jusqu'à ce qu'il soit précisé $D = 0$.



FIGURE 12 – Syntaxe graphique des étapes.

3.2.2 Les transitions

Une transition définit la condition de passage de l'étape amont vers l'étape aval, sous la forme d'une expression logique.

Un numéro peut être associé à gauche de la transition.

L'étape 2 devient active si l'étape 1 est active et la réceptivité vraie.

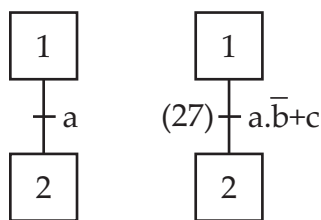


FIGURE 13 – Synthaxe graphique des transitions.

3.2.3 Convergences et divergences en OU et ET

1. Convergences et divergences en OU : figure 14.

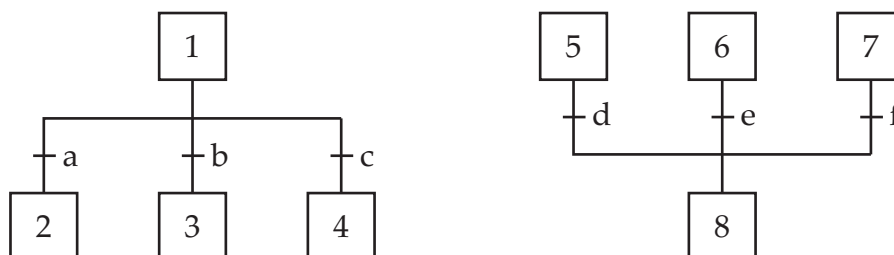


FIGURE 14 – Convergence et divergence en OU.

2. Convergences et divergences en ET : figure 15.

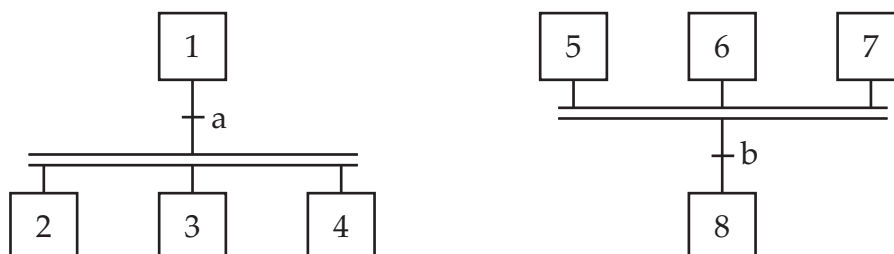


FIGURE 15 – Convergence et divergence en ET.

3.2.4 Liens orientés

Un grafcet se lit de haut en bas. Si un lien est décrit du bas vers le haut, le sens doit être indiqué (voir figure 10).

3.3 Les lois d'évolution du modèle GRAFCET

3.3.1 Règle 1 : situation initiale du grafcet

La situation initiale caractérise le comportement initial de la partie commande vis-à-vis de l'extérieur. Elle est définie par les étapes initiales, activées à la mise sous tension de la partie commande. Elle traduit généralement un comportement de repos.

3.3.2 Règle 2 : franchissement d'une transition

Une transition est dite valide si toutes les étapes amont sont actives.

Le franchissement de la transition se produit lorsque :

- la transition est validée,
- la réceptivité associée est vraie.

Une transition franchissable est obligatoirement franchie.

3.3.3 Règle 3 : évolution des étapes actives

Le franchissement d'une transition entraîne simultanément l'activation de toutes les étapes aval et la désactivation de toutes les étapes amont.

3.3.4 Règle 4 : évolution simultanée

Plusieurs transitions simultanément franchissables sont simultanément franchies.

3.3.5 Règle 5 : activation et désactivation simultanée

Si une même étape doit être activée et désactivée simultanément, elle reste active.

3.4 Quelques éléments particuliers

3.4.1 Sortie conditionnelle

Une sortie conditionnelle $S1$ est à 1 si l'étape est active et si la réceptivité c associée à l'action est vraie (figure 16). Il faut veiller à ne pas abuser de cet élément.

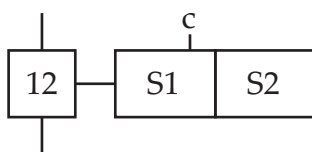


FIGURE 16 – Sortie conditionnelle.

3.4.2 Temporisation

Une temporisation permet de retarder la montée et/ou la descente d'une variable (figure 17).

3.4.3 Fronts montants et descendants

Si a est une variable logique, le front montant de a , noté $\uparrow a$, est une variable valant 0 sauf à l'instant où a monte de 0 à 1 où $\uparrow a$ vaut 1 durant un temps infiniment court (figure 18).

De même, le front descendant $\downarrow a$ vaut 1 au moment où a passe de 1 à 0.

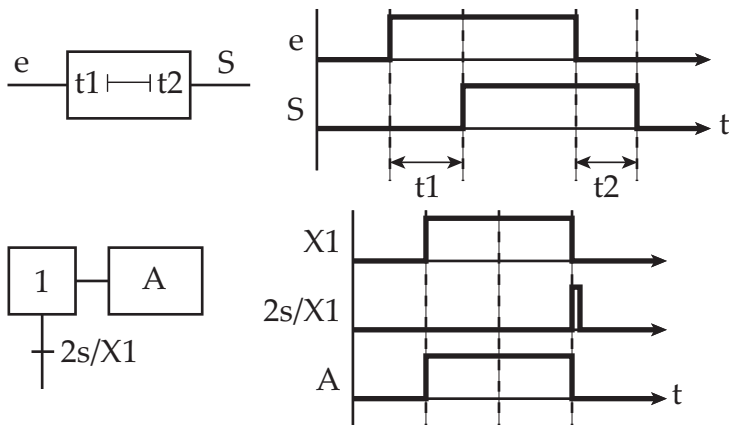


FIGURE 17 – Temporisation

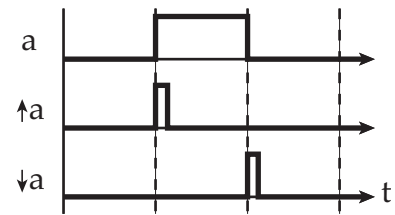


FIGURE 18 – Chronogramme d'un front montant et d'un front descendant.

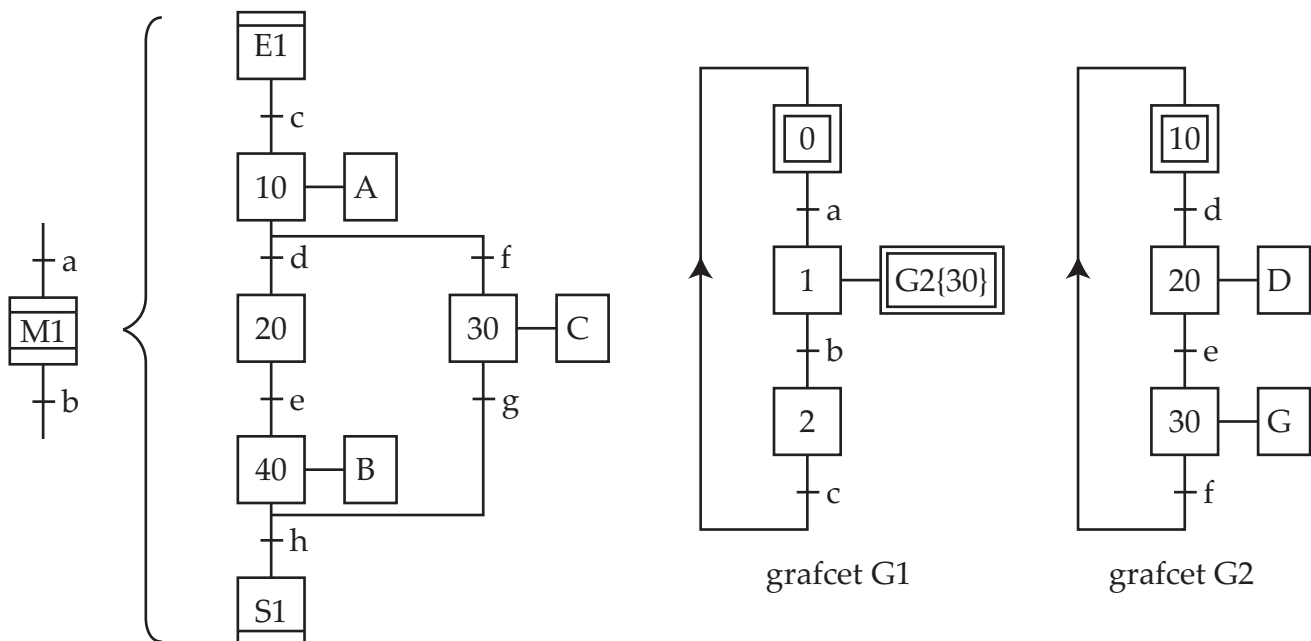


FIGURE 19 – Macro-étape.

FIGURE 20 – Forçage d'un grafcet $G2$.

3.4.4 Macro-étape

Une macro-étape est une représentation condensée d'un sous-grafcet permettant d'améliorer la lecture (figure 19). Il ne s'agit pas d'une étape et il ne peut y avoir d'actions associées.

La macro-étape $M1$ se décompose en un sous-grafcet commençant par l'étape $E1$ et se terminant par l'étape $S1$. L'activation ou la désactivation de $M1$ se fait en raisonnant sur les étapes $E1$ et $S1$.

3.4.5 Forçage de grafcet

Soit un grafcet global composé de deux grafcet partiels $G1$ et $G2$ (figure 20). Un forçage permet à un grafcet partiel $G1$ d'imposer une situation spécifique à un autre grafcet partiel $G2$.

Les étapes indiquées dans les accolades seront activées dès l'activation de l'étape 1 tandis que les autres étapes du grafcet $G2$ seront désactivées. Pour désactiver totalement le grafcet, il

faut indiquer $G2\{\}$. Il est possible de figer le grafcet dans sa situation actuelle ($G2\{*\}$) ou de le forcer à sa situation initiale ($G2\{INIT\}$).

3.5 Performances d'un système logique séquentiel

On peut décliner les performances d'un système continu (précision, rapidité et stabilité) pour un système séquentiel :

- Le grafcet doit respecter *précisément* tous les aspects d'un cahier des charges de commande en fonction des entrées.

Il s'agit de vérifier chaque spécification du cahier des charges au cours du fonctionnement normal.

- Le grafcet doit être *rapide* en réduisant au minimum les temps de cycle, ce qui permet d'augmenter la cadence du système complet.

Le calcul du temps de cycle se fait en estimant le temps nécessaire à chaque opération de la partie opérative. En décrivant le grafcet, une simple somme permet d'obtenir le temps de cycle. Le jeu consiste alors à effectuer certaines tâches en temps masqué.

- Le grafcet doit être *stable* : la partie commande ne doit jamais aboutir à une situation non prévue et conduisant à un blocage ou à un fonctionnement dégradé.

Il faut envisager tous les chemins possibles à travers le grafcet. Ce type de vérification est complexe à mettre en œuvre.

4 Illustration : Chaîne de conditionnement de barres de céréales

La cellule de conditionnement présentée figure 21 participe à l'emballage de barres de céréales. La cellule se charge de répartir les barres de céréale arrivant en flux continu sur un convoyeur à taquets dans des godets contenant chacun 8 barres. Le contenu des godets est ensuite transféré dans les emballages cartons, eux même ensuite mis en cartons puis palettisés.

La chaîne de conditionnement de barres de céréales permet d'effectuer des campagnes de « packaging » différentes en fonction des commandes.

Le cas traité dans le sujet concerne le regroupement de barres par paquets de huit (deux couches de trois et une couche de deux barres), pour un conditionnement en boîtes de huit.

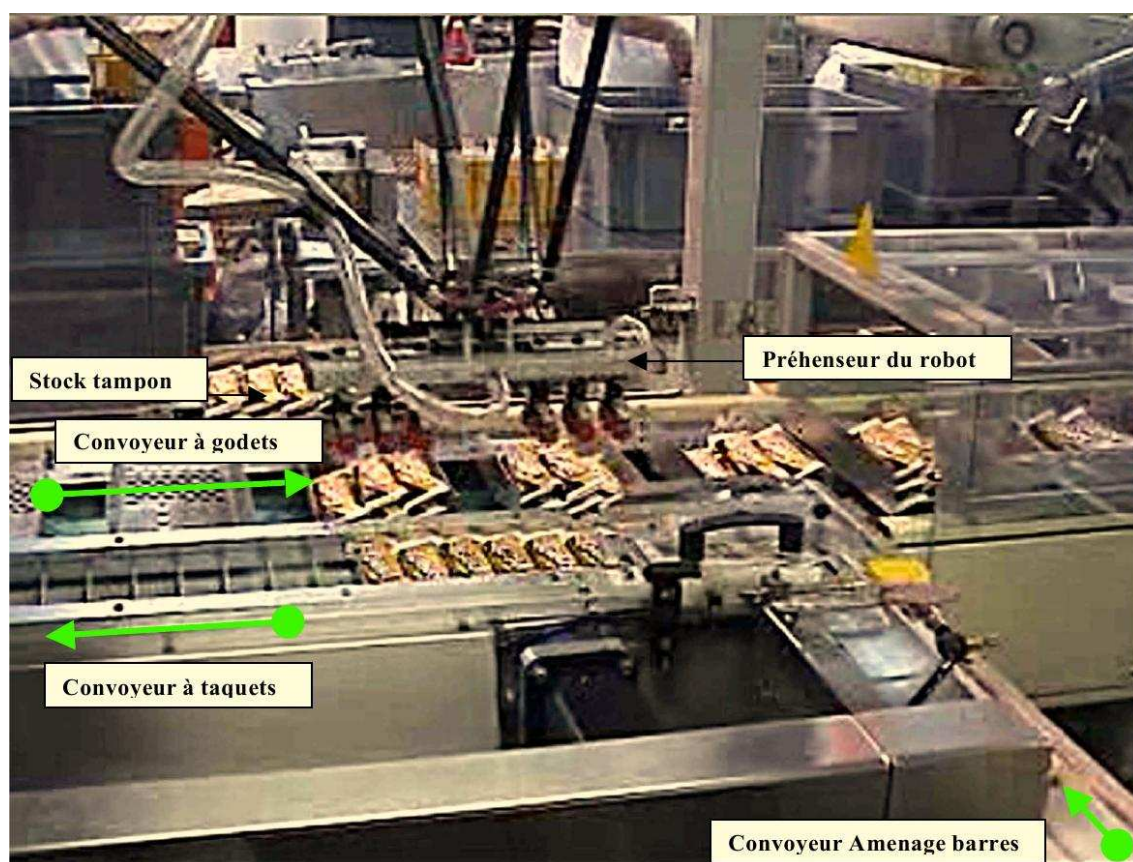


FIGURE 21 – Chaîne de conditionnement.

Un robot parallèle « Quattro » (figure 22), particulièrement adapté aux applications de transfert rapide de charges légères, constitue l'actionneur principal de la cellule.

Sa structure parallèle lui permet d'atteindre des performances dynamiques très élevées. Il est en effet capable de produire des accélérations de 200 m/s^2 . Les hautes vitesses qu'il peut atteindre et sa précision font qu'il équipe de plus en plus de lignes de conditionnement flexibles.

Le cycle de référence (figure 24) pour déterminer les temps de cycles du robot permet de déterminer les caractéristiques et de garantir une précision de position de $\pm 0,1 \text{ mm}$, et angulaire de $\pm 0,4^\circ$.

La **partie opérative** de la machine est agencée autour des équipements suivants présentés figure 21 :

- Le robot « Quattro ».

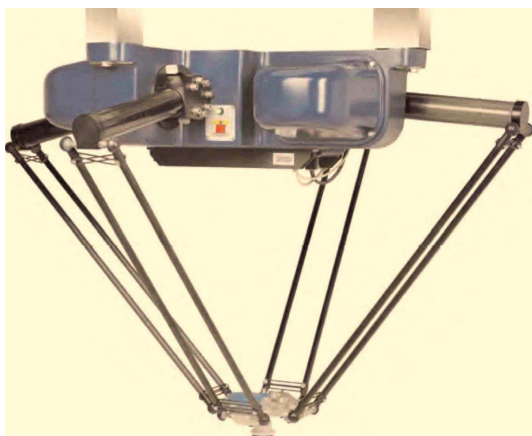


FIGURE 22 – Robot manipulateur *Quattro*.

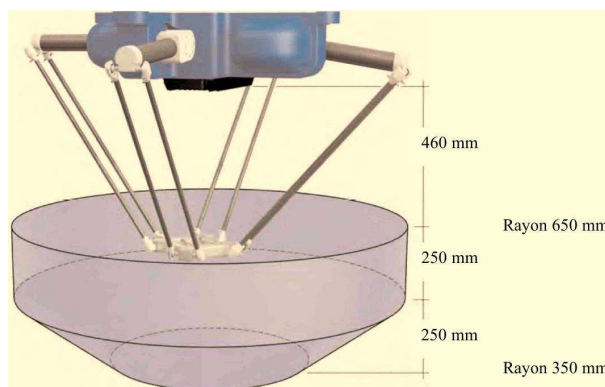


FIGURE 23 – Espace de travail.

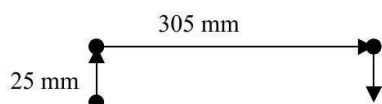


FIGURE 24 – Performances dynamiques.

Masse embarquée (kg)	Temps de cycle (s)
0,1	0,25
0,5	0,29
1,5	0,32
2,0	0,50

- Le préhenseur du robot « Quattro ».
- Un convoyeur d'amenage des barres depuis la ligne de production.
- Un convoyeur à taquets d'entrée des barres à conditionner (avance pas à pas synchronisée sur la cadence d'amenage)
- Un convoyeur à godets de sortie à vitesse constante (barres regroupées par 8).
- Une zone de stockage tampon.

La figure 25 présente le robot « Quattro » en cours de transfert depuis le convoyeur à taquets de la ligne d'entrée des barres de céréales vers le convoyeur à godets de la ligne de sortie. Le mouvement du convoyeur de sortie impose au robot de synchroniser son déplacement à celui du convoyeur.

Le préhenseur monté en bout de bras déplace six barres de céréales qui se positionneront dans les godets noté $G1$ et $G2$.

La commande de la cellule est conçue de façon à assurer que les godets de sortie ne soient pas partiellement remplis. Si le flux de barre de céréales en entrée est insuffisant pour remplir tous les godets, la cellule laisse passer des godets vides, qui seront facilement gérés par la suite.

Un *stock tampon* permet de placer six barres de céréales accessibles dans la zone de travail du robot pour compléter le godet en cours de remplissage en cas de manque de barres en entrée.

La zone d'évolution du robot (cercle bleu de diamètre 1 300 mm sur la figure 26) est organisée autour des trois postes de chargement/déchargement que sont le convoyeur à taquets, le convoyeur à godets et le stock tampon.

Les caractéristiques des barres de céréales sont : 130 x 30 x 20 mm masse : 25 grammes.

Le point O représente les coordonnées fixes de prise et dépose de barres de céréales dans le stock tampon.

X_p représente la variable de prise des barres de céréales sur le tapis d'entrée.

X_d représente la variable de dépose des barres de céréales sur le tapis de sortie.

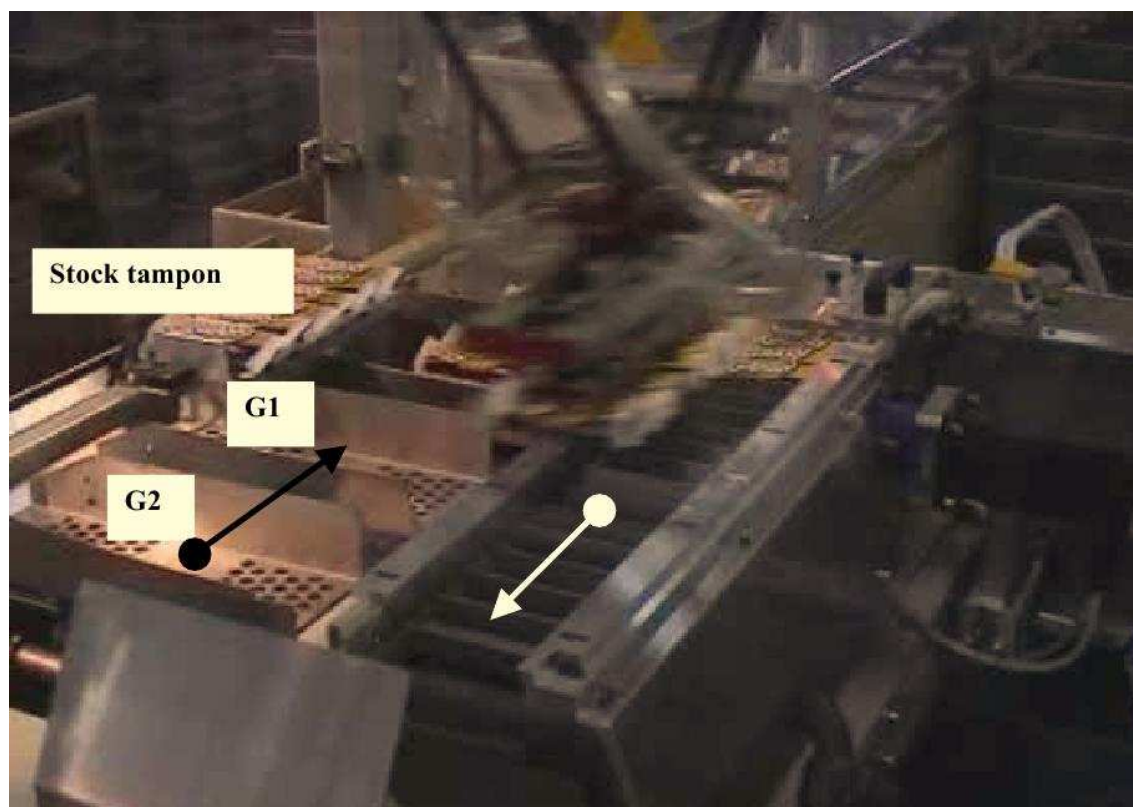


FIGURE 25 – Robot en cours de transfert convoyeur à taquets/convoyeur à godets.

Lors des phases de prise et dépose, le robot synchronise sa vitesse avec le convoyeur à godets lors de la dépose et le convoyeur à taquets lors de la prise.

La prise et la dépose de quatre ou six barres de céréales dans le stock tampon se fait toujours à $Z_3 = 100 \text{ mm}$. La dépose en sortie se fait à Z_0 , Z_1 ou Z_2 . Le déplacement horizontal des barres se fait à $Z_4 = 120 \text{ mm}$.

La valeur de A est égale à 140 mm , B à 200 mm , C à 800 mm , D à 905 mm , E à 40 mm , F à 75 mm , G à 155 mm , H à 130 mm et I à 25 mm .

La prise et la dépose de la première couche de six barres de céréales se fait à Z_0 .

La prise de la deuxième couche de six barres de céréales se fait à Z_0 et sa dépose à $Z_1 = 20 \text{ mm}$.

La prise de la troisième couche de quatre barres de céréales se fait à Z_0 et sa dépose à $Z_2 = 40 \text{ mm}$.

La **partie commande** est constituée d'un Automate Programmable Industriel (API) coordonnant l'ensemble de la cellule, d'un boîtier de commande du robot, dédié au pilotage des mouvements du robot, et d'un boîtier de commande des convoyeurs, dédié aux asservissements et mesures des mouvements.

Commande du robot : L'API envoie les consignes de position du robot. L'ordre $Robot(0, A, Z_4)$ demande au robot de rejoindre le point de coordonnées $(0, A, Z_4)$ à partir de la position actuelle par une commande optimale en terme de position, vitesse et accélération.

Lors du fonctionnement normal, le calculateur du robot connaît à tout instant les valeurs X_p et X_d . La commande $Robot(X_d, A, Z_4)$ par exemple permet de synchroniser le robot sur le convoyeur de sortie.

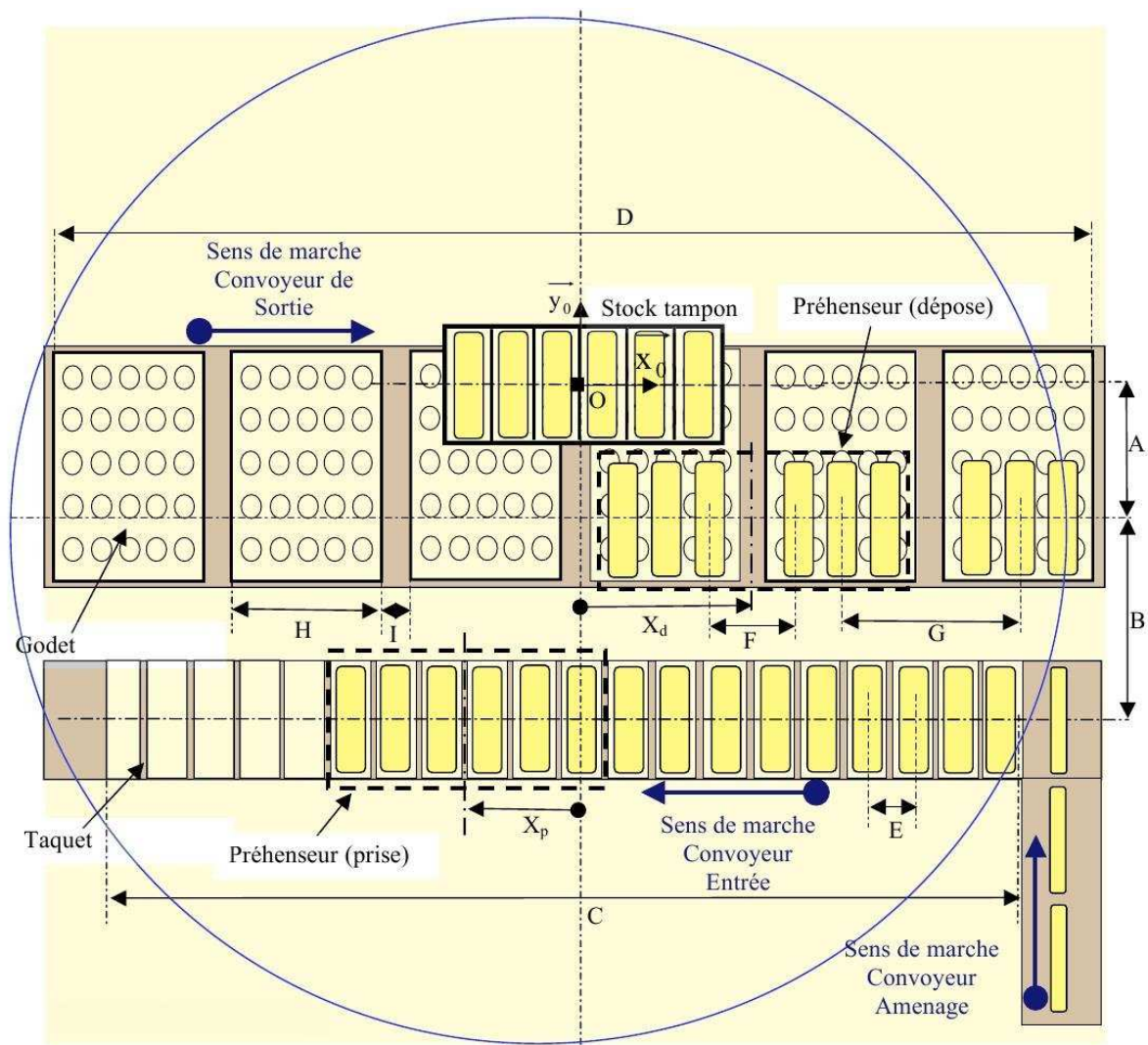


FIGURE 26 – Poste de conditionnement.

Lorsque le robot est à la position demandée, il revoie 1 dans la variable acq et 0 dans le cas contraire.

Commande des ventouses : Les ventouses sont commandées par 6 variables logiques V_1, V_2, \dots, V_6 , activant les distributeurs pneumatiques. Lorsque V_1 est à 1, de l'air comprimé à 4 bars est envoyé à un tube de Venturi qui crée une dépression de 0,8 bars (soit une pression absolue de 0,2 bars) dans la ventouse. 6 capteurs de dépression v_1, v_2, \dots, v_6 permettent de savoir la barre de céréale est bien plaquée à la ventouse (v_i est à 1 dans ce cas).

Lorsque seulement 4 barres sont déplacées, ce sont les ventouse 2 à 5 qui sont sélectionnées.

Les barres sont lâchées lorsque les ventouses sont dépressurisées. Lors de la dépose, il est néanmoins nécessaire d'attendre au moins 0,2 s que la dépression s'établisse dans les ventouses avant de remonter le robot.

Commande de la cellule : Le grafcet de coordination des tâches est proposé figure 27. Lorsque l'opérateur bascule le bouton *marche*, la cellule commence le travail de transfert des 3 trois couches, correspondant aux étapes 1, 2 et 3. Lorsque le bouton marche est désactivé, la machine s'arrête lorsque le godet en cours est rempli.

La disponibilité des barres de céréales sur le convoyeur d'entrée est surveillée par la carte de commande des convoyeurs, qui tient à jours deux variables *dispo4* et *dispo6*, dont l'état vaut 1 lorsque 4 barres ou 6 barres sont disponibles en entrée.

De même, la disponibilité d'un godet vide sur le convoyeur de sortie est définie par la variable *dispo_godet*. Cette variable est à 1 lorsqu'un godet vide est à une distance suffisante des limites pour que le robot ait le temps de transférer les 8 barres de céréales.

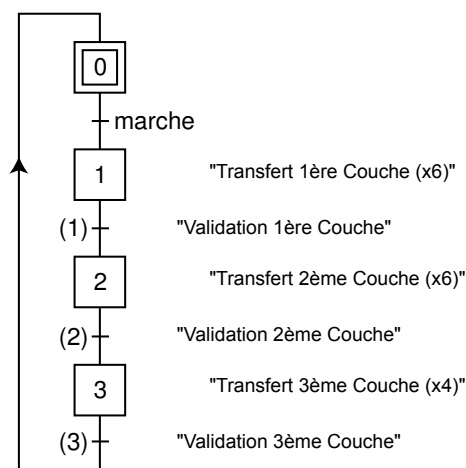


FIGURE 27 – Grafcet de coordination des tâches.

Aucune sortie n'est directement associée aux étapes 1, 2 et 3. Leur activation lance des grafquets séparés, qui sont à élaborer.

Q 1 : Proposer à partir de la description précédente un bilan des entrées et sorties de l'API (Automate Programmable Industriel) pilotant la cellule de conditionnement.

Cahier des charges de la tâche 1 : Le robot se place au dessus des barres et se synchronise avec le tapis de taquets, à l'altitude Z_4 . Il descend alors la ventouse contre les barres, dépressurise les ventouses et remonte à l'altitude Z_4 .

Il se positionne ensuite au dessus du godet et se synchronise. Il descend les barres et les lache. Il termine la tâche en remontant à l'altitude Z_4 .

Attention, le transfert ne peut débuter que si 6 barres sont disponibles. D'autre part, une fois positionné au dessus du godet, le robot ne descend les barres dans le godet qu'à partir du moment où il est sûr de pouvoir terminer le godet, c'est-à-dire quand il y a 4 ou 6 barres sur le convoyeur à taquets (le tampon étant toujours plein au lancement de la tâche).

Q 2 : Proposer le grafcet réalisant la tâche *transférer la première couche de 6 barres* dès que l'étape 1 s'active et en respectant le cahier des charges. Compléter la réceptivité (1) permettant de valider la fin de la tâche.

Cahier des charges des tâches 2 et 3 : Le cycle de transfert des 6 barres puis 4 barres de céréales des 2ème et 3ème couches sont similaires au précédent, sauf dans le cas où les barres de céréales manquent en entrée. Si il n'y a pas 6 barres en entrée pour la 2ème couche, les barres sont prise dans le stock tampon. Idem si il n'y a pas 4 barres en entrée pour la 3ème couche.

Q 3 : Proposer une modification du grafcet précédent de façon à réaliser la tâche *transférer la seconde couche de 6 barres* dès que l'étape 2 s'active et en respectant le cahier des charges (on utilisera au maximum le grafcet précédent pour éviter

de recopier des portions de grafcet à l'identique). Compléter la réceptivité (2) permettant de valider la fin de la tâche.

Lorsque des barres sont prises dans le stock tampon, celui-ci est immédiatement reconstitué une fois le godet complet.

Q 4 : Proposer le grafcet réalisant la tâche *transférer la seconde couche de 4 barres* dès que l'étape 3 s'active tout en reconstituant le stock tampon si nécessaire. Compléter la réceptivité (3) permettant de valider la fin de la tâche.

Q 5 : Le cahier des charges impose une cadence de 400 barres de céréales par minutes. Déterminer la vitesse minimale des convoyeurs et vérifier que la vitesse moyenne du robot est compatible pour assurer la synchronisation.

Q 6 : A partir du grafcet de commande proposé, déterminer le temps de cycle pour le remplissage d'un godet et valider la capacité de la cellule à assurer la cadence requise au cahier des charges.

Q 7 : Les grafcets proposés jusqu'à présent coordonnent le fonctionnement normal de la cellule de conditionnement. Néanmoins, la gestion des pannes et défauts au cours du fonctionnement devra aussi être implantée dans le grafcet. Proposez une liste des cas particuliers à prendre en compte en plus du fonctionnement normal.