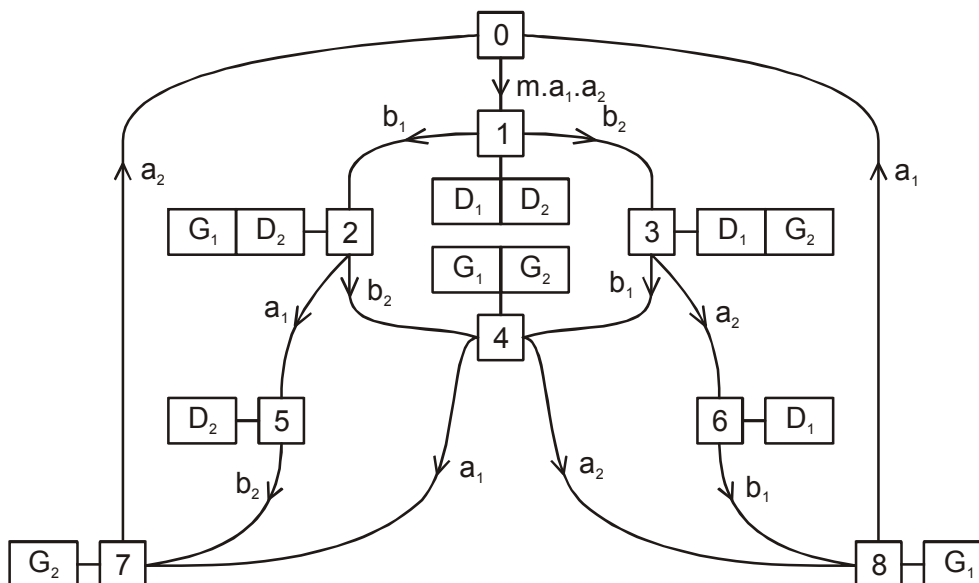


Exemple 3 : Deux chariots sans rendez-vous

Comme pour l'exemple 2, mais les chariots ne quittent plus simultanément B_1 et B_2 .

On peut tracer un graphe de 8 états :



Il reste à préciser certaines ambiguïtés, comme la possible apparition de simultanités d'informations provenant des capteurs.

Afin de mieux représenter les parallélismes apparaissant dans le fonctionnement du système et les synchronisations qui en découlent inévitablement, on utilise un nouvel outil : le langage GRAFCET

6 – Le GRAFCET (norme EN 60848 Août 2002)

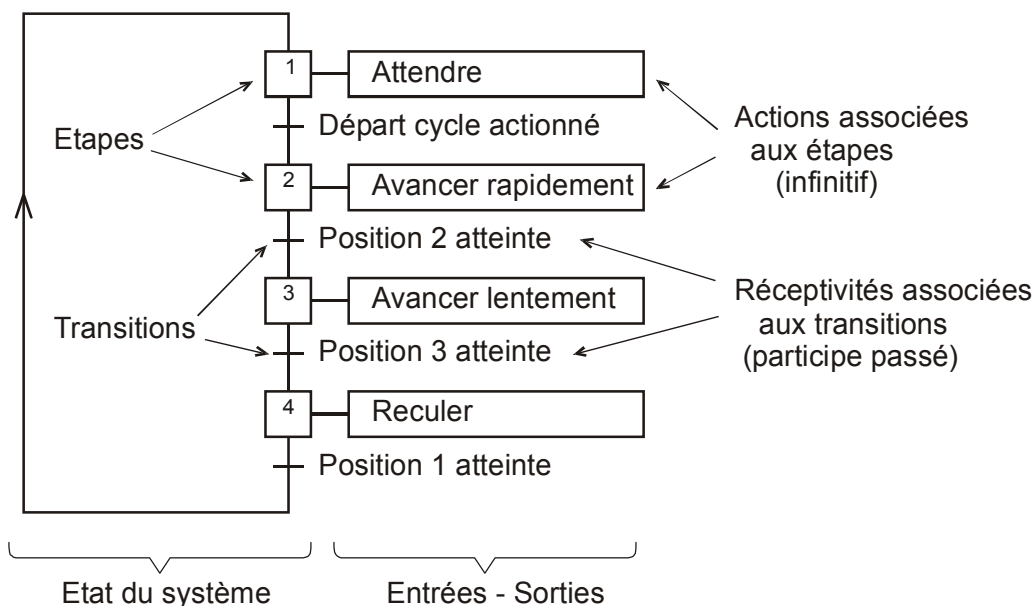
En 1977, le premier rapport de l'AFCEC (Association Française pour la Cybernétique Economique et Technique) présenta le GRAFCET (GRAPhe Fonctionnel de Commande Etapes – Transitions). Cet outil fit son entrée dans les programmes français de formation technique en 1979. Il est devenu une norme internationale en 1987.

Dans le langage GRAFCET, on trouve :

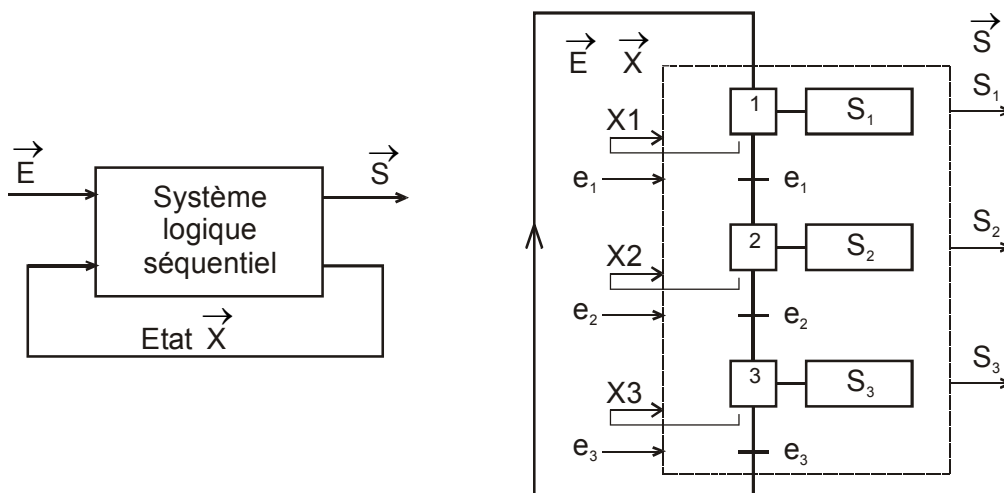
- des éléments graphiques de base : étapes, transitions, liaisons orientées, ...
- une interprétation associant des expressions logiques :
 - les actions associées aux étapes ;
 - les réceptivités associées aux transitions ;
- des règles d'évolution définissant formellement le comportement dynamique de la partie commande ainsi décrite.

Dans le langage GRAFCET on retrouve les notions présentées pour le graphe d'états. Les états sont maintenant appelés étapes. Le graphe d'états devient le « diagramme grafcet » (appelé plus simplement « grafcet » et écrit en minuscules), utilisant le langage GRAFCET (écrit en majuscules). Dans le langage GRAFCET, à chaque étape peut être associée une (ou plusieurs) action(s) : le verbe utilisé pour décrire cette action doit être à l'infinitif. A chaque transition sera associée une réceptivité : le verbe utilisé pour décrire cette réceptivité doit être au participe passé.

Exemple de « diagramme grafcet » (dit « grafcet ») utilisant le langage GRAFCET



Retour sur la présentation des systèmes automatisés (paragraphe 1 chapitre 2)



Le vecteur d'état \vec{X} a comme composantes des variables d'étapes binaires X_i représentant l'état de l'étape i . Par exemple : $X_3 = 1$ quand l'étape 3 est active. Le vecteur de sortie \vec{S} et le vecteur \vec{X} sont confondus dans le grafcet ci-dessus. Le vecteur d'entrée \vec{E} a comme composantes les réceptivités associées aux transitions.

Points de vue

Le grafcet point de vue système décrit les opérations constatées par un observateur extérieur aux parties commande et opérative (voir définitions au chapitre 2).

Le grafcet point de vue partie opérative décrit les opérations constatées par un observateur impliqué dans le bon fonctionnement de la partie opérative. Les actions décrivent le fonctionnement des effecteurs et les réceptivités sont des informations sur l'évolution de la partie opérative. On peut aussi décider que les actions décrivent la mise en œuvre des actionneurs et les réceptivités sont des informations en provenance des capteurs.

Le grafcet point de vue partie commande décrit les opérations constatées par un observateur impliqué dans le bon fonctionnement de la partie commande. La technologie employée permet d'établir des grafquets qui peuvent être différents.

6.1 – Eléments graphiques de base

Les étapes

Une étape caractérise un état. Elle est représentée par un carré et un nom « i ». Elle est associée à la variable binaire X_i , dite variable d'étape. Une étape est soit active, soit inactive.

Le nom de l'étape est inscrit dans le carré (au milieu de la partie haute). Un point peut caractériser une étape active (on peut aussi griser le carré). Un cercle dans une étape peut indiquer qu'elle vient d'être désactivée ($X_i = 0$).

Etape 4 inactive
($X_4 = 0$)



Etape 4 active
($X_4 = 1$)



Etape 4 venant
d'être désactivée



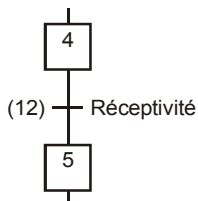
Etape initiale, active
à l'initialisation
du système



Les étapes encapsulantes et les macro-étapes seront vues plus loin.

Les transitions

Une transition est représentée par un petit trait horizontal coupant une liaison verticale : la réceptivité de cette transition est placée à droite. Une transition peut être exceptionnellement représentée par un petit trait vertical sur une liaison horizontale.

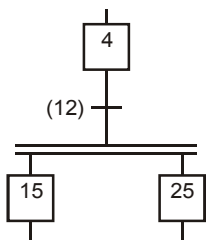


Une transition indique une et une seule possibilité d'évolution entre deux ou plusieurs étapes. Cette évolution s'accomplit par le franchissement de la transition si la réceptivité est vraie : la partie commande change alors de situation.

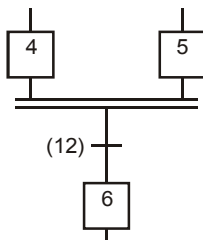
La transition est ici identifiée par (12).

Exemples

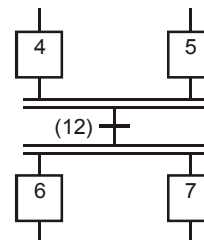
« Divergence en ET » ou
« Activation de séquences
parallèles »



« Convergence en ET » ou
« Synchronisation de
séquences parallèles »



Synchronisation et
activation de séquences
parallèles

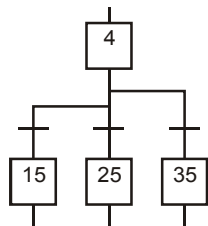


Pour les convergences et divergences en OU : voir plus loin.

Les liaisons orientées

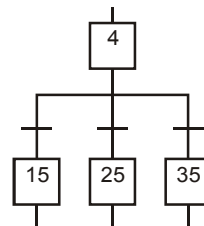
- Par convention, les évolutions se font du haut vers le bas. Dans le cas contraire, il est nécessaire d'indiquer le sens de l'évolution par une flèche.
- Les lignes obliques peuvent exceptionnellement être utilisées.
- Si une ligne horizontale croise une ligne verticale, il n'y a aucune relation entre elles. Dans le cas de divergences ou convergences en OU, il faut donc :

UTILISER



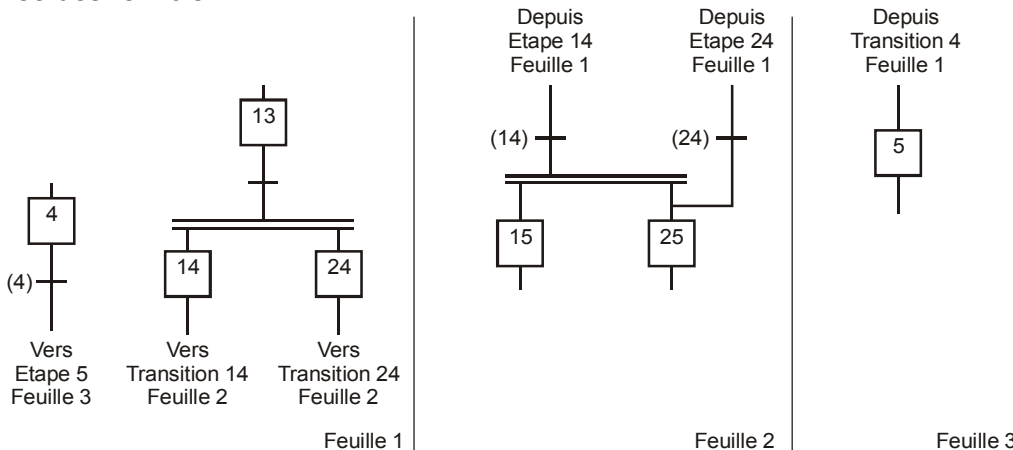
Pas de confusion possible

NE PAS UTILISER



Risque de confusion avec un croisement.

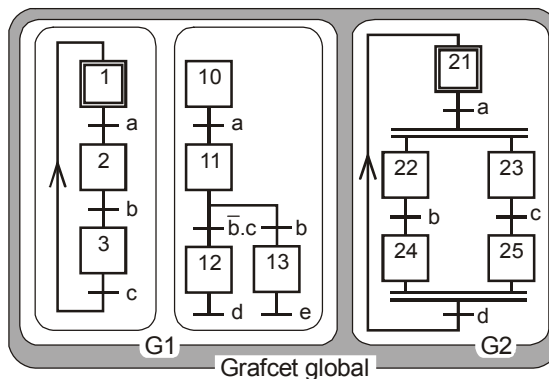
- Lorsqu'un grafcet est de taille trop importante pour être inscrit sur une seule feuille, on utilise des renvois :



Partition d'un grafcet

Un grafcet global peut être composé de plusieurs grafcets partiels qui seront notés G_i , par convention. La variable d'état d'un grafcet partiel G_i est notée XG_i : elle vaut 1 quand au moins une des étapes du grafcet partiel G_i est active.

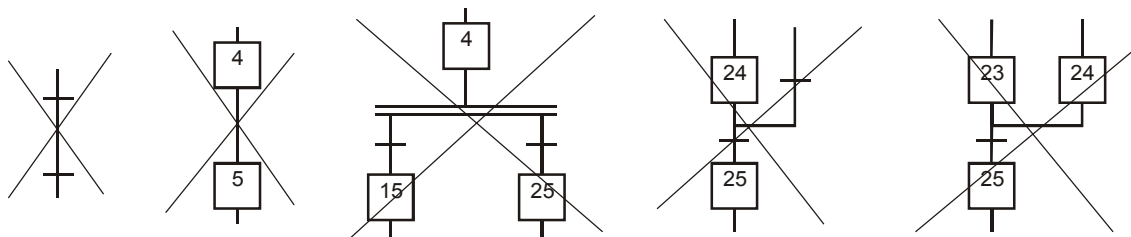
Un grafcet partiel peut être composé de plusieurs grafcets connexes (c'est à dire dont les étapes et les transitions sont liées par une liaison orientée). Le grafcet partiel G_1 est composé de deux grafcets connexes.



6.2 – Règles de syntaxe

Deux étapes ne doivent jamais être reliées directement : elles doivent être séparées par une transition. Deux transitions ne doivent jamais être reliées directement : elles doivent être séparées par une étape.

Erreurs de syntaxe fréquentes :



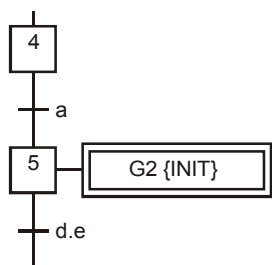
6.3 – Les 5 règles d'évolution

RÈGLE 1 : Situation initiale du GRAFCET

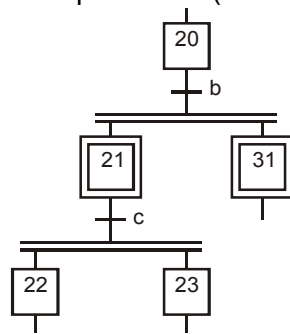
La situation initiale doit être précisée par une ou plusieurs étapes actives au début du fonctionnement, à la mise en énergie de la partie commande. Si cette situation initiale est toujours identique (cas des automatismes cycliques), elle sera caractérisée par les **étapes initiales**.

Dans le cas où cette situation initiale n'est pas provoquée par une mise en énergie, elle peut par exemple être provoquée par un ordre de **forçage**. Un ordre de forçage d'un grafcet partiel est représenté dans un double rectangle associé à une étape.

Grafcet partiel G1 (Maître)



Grafcet partiel G2 (Esclave)



Quelques exemples de situations du grafcet partiel G2 provoquées par le forçage

- G2 { } Situation où le grafcet partiel G2 est totalement désactivé.
- G2 {INIT} Situation où le grafcet partiel G2 est initialisé à ses étapes initiales.
- G2 {20, 22} Situation où les étapes 20 et 22 du grafcet partiel G2 sont actives et toutes les autres étapes sont désactivées.
- G2 { * } Situation où le grafcet partiel G2 est « figé » (maintien dans l'état).

N.B. : Tant que les ordres de forçage sont maintenus, aucune évolution du grafcet forcé n'est possible.

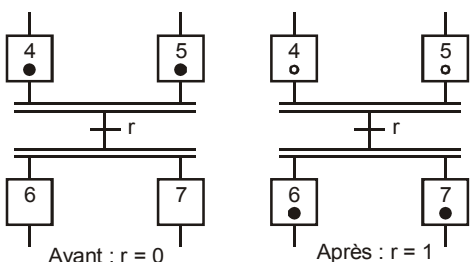
RÈGLE 2 : Transition franchissable

Une transition est franchissable si les deux conditions suivantes sont remplies :

- toutes les étapes qui précèdent immédiatement la transition sont actives ;
- la réceptivité associée à la transition est vraie.

N.B. : Toute transition franchissable est obligatoirement franchie (hors forçage).

RÈGLE 3 : Franchissement d'une transition



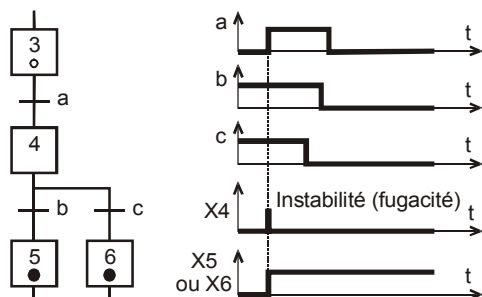
Le franchissement d'une transition entraîne simultanément la désactivation de toutes les étapes immédiatement précédentes et l'activation de toutes les étapes immédiatement suivantes.

Exemple ci-contre : avant $r = 0$, après $r = 1$

RÈGLE 4 : Franchissements simultanés

Plusieurs transitions simultanément franchissables sont simultanément franchies.

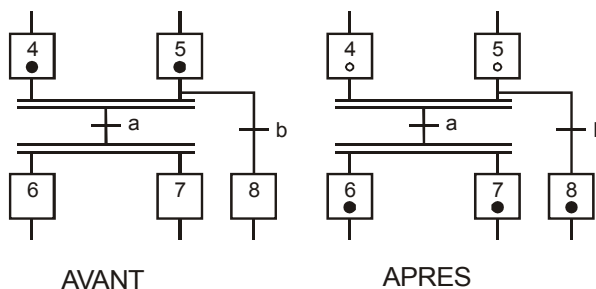
Exemple 1



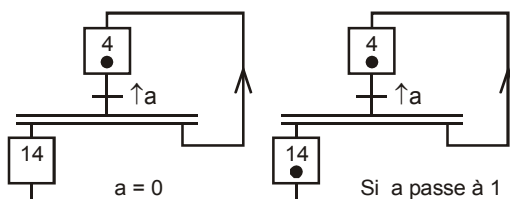
Notons ici une « évolution fugace »
Voir § 6.5.3

Exemple 2

On part de la situation stable $X4 = 1$, $X5 = 0$,
avec $a = 1$ et $b = 1$.
L'étape 5 devient active :



RÈGLE 5 : Activation et désactivation simultanées



Si au cours du fonctionnement d'un automate, une même étape doit être désactivée et activée simultanément, elle reste active.

Ci-contre l'étape 4 restera toujours active.

6.4 – Exemples de franchissements

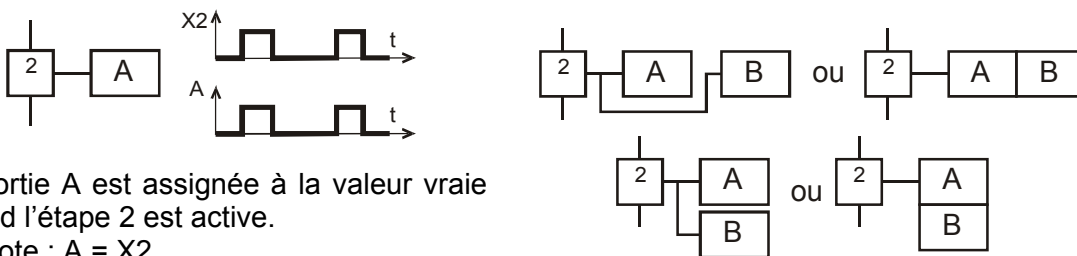
	Transition simple	« Convergence en ET » ou « Synchronisation de séquences »	« Divergence en ET » ou « Activation de séquences parallèles »	« Convergence en OU »	« Divergence en OU » ou « Sélection de séquences »
Avant $a = 0$					
Après $a = 1$					

Pour les convergences et divergences en OU, voir aussi § 6.3, règle 4, exemple 1.

6.5 – Les actions associées aux étapes

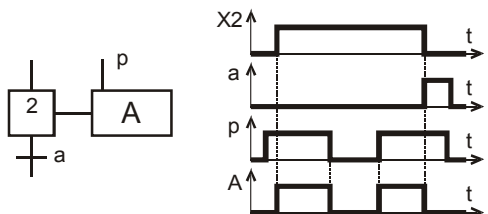
6.5.1 – Actions continues (assignation sur état)

L'action continue, associée à une étape, dure tant que l'étape est active si aucune condition d'assignation ne l'interdit. Les conditions d'assignation sont définies dans les actions conditionnelles ainsi que dans les actions retardées et/ou limitées dans le temps. Plusieurs actions peuvent être associées à une même étape. Dans les exemples ci-dessous, l'action « A » peut être remplacée par « Ouvrir vanne », « Monter », etc...



La sortie A est assignée à la valeur vraie quand l'étape 2 est active.
On note : $A = X2$

Actions conditionnelles

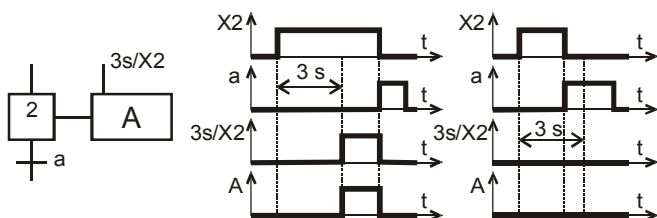


La sortie A est assignée à la valeur vraie quand l'étape 2 est active, à la condition que la variable p soit vraie.

On note : $A = X2.p$

La condition d'assignation p ne doit jamais être un front de variable.

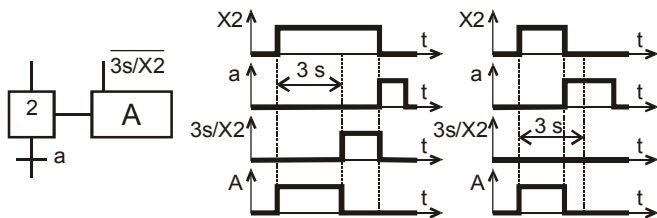
Actions retardées



La condition d'assignation est $3s/X2$. On note : $A = 3s/X2$

Si la durée d'activité de l'étape 2 est inférieure à 3s, la sortie A ne sera pas assignée à la valeur vraie.

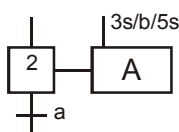
Actions limitées dans le temps



La condition d'assignation est $\overline{3s/X2}$. On note : $A = X2.3s/X2$

La sortie A sera assignée à la valeur vraie pendant au plus 3s, dès l'activation de l'étape 2.

Actions retardées et limitées dans le temps



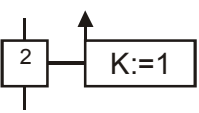
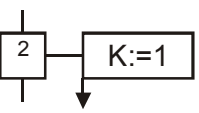
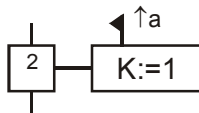
La condition d'assignation $3s/b/5s$ est vraie 3s après un front montant de b et 5s après le premier front descendant de b suivant. Si b passe à 0 avant 3s, alors la condition d'assignation ne peut pas être vraie : il faudra attendre le prochain $\uparrow b$.

On note : $A = X2.3s/b/5s$

6.5.2 – Actions mémorisées (affectation sur événement)

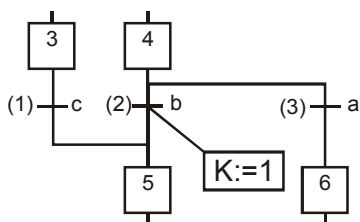
Une action mémorisée décrit comment affecter une valeur à une sortie qui la conserve. L'action mémorisée doit obligatoirement être associée à un événement interne (activation, désactivation, événement ou franchissement). A l'initialisation, la valeur de cette sortie est nulle.

- Exemples : « A:=1 » la valeur 1 est affectée à la variable booléenne A.
 « C:=C+1 » incrémentation de la variable numérique C.
 « K:=5 » la valeur 5 est affectée à la variable numérique K.

Action à l'activation	Action à la désactivation	Action sur événement
		
La valeur 1 est affectée à la variable booléenne K à l'activation de l'étape 2	à la désactivation de l'étape 2	quand l'étape 2 est active et que ↑ a se produit

L'expression décrivant l'événement (action sur événement) doit comporter au moins un front de variable(s) d'entrée(s). Exemples : ↑ b ou ↑ (a + b) ou X25.↑ b etc...

Action au franchissement

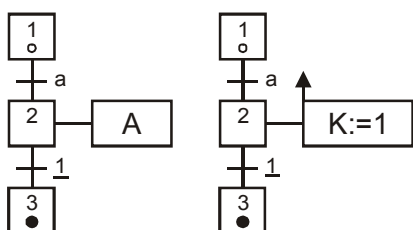


La valeur 1 est affectée à la variable booléenne K quand la transition (2) est franchie.

A noter qu'il est impossible d'obtenir le même résultat avec une action à l'activation de l'étape 5 ou avec une action à la désactivation de l'étape 4.

6.5.3 – Évolution fugace

Une évolution fugace se produit quand plusieurs transitions successives sont franchies sans événement d'entrée supplémentaire (voir l'exemple 1 de la règle 4 au § 6.3, « les compteurs » et « appel de tâche » au § 6.7). Les deux exemples ci-dessous mettent aussi en évidence une évolution fugace liée à l'instabilité de l'étape 2.



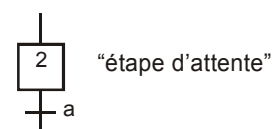
Si l'étape 1 est active et que la variable a passe de 0 à 1, l'étape 3 est directement activée. L'étape 2 est instable et les conséquences sont les suivantes :

Une action continue associée à une étape instable n'est pas assignée à la valeur 1 : A ne sera pas vraie.

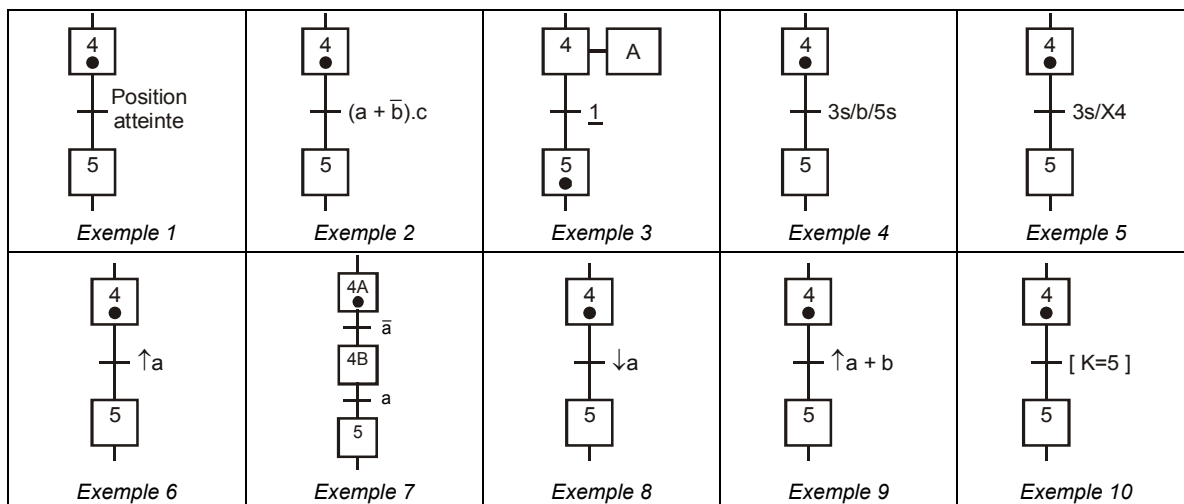
Une action mémorisée associée à une étape instable permet d'assigner la valeur à la variable : on a K = 1.

6.5.4 – Commentaire

Un commentaire entre guillemets peut être placé à la droite d'une étape, à la droite d'une action ou à la gauche d'une transition. Ce commentaire permet une lecture plus aisée du grafcet mais n'a aucune influence sur son fonctionnement. Ce n'est pas une action.



6.6 – Les réceptivités associées aux transitions



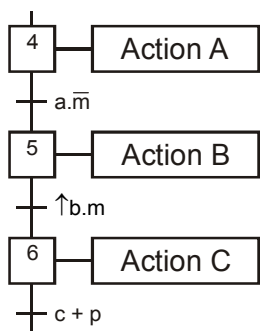
Les réceptivités sont inscrites de façon littérale (*Exemple 1*) ou symbolique (*Exemple 2*), à la droite de la transition. L'espace à gauche de la transition est réservé à une éventuelle identification ou numérotation, voire à un commentaire (voir §6.5.4). Si la réceptivité est toujours vraie (*Exemple 3*) elle est notée « 1 » (1 souligné), dans ce cas l'évolution est fugace et l'action continue A n'est pas exécutée (voir §6.5.3).

L'*exemple 4* utilise une réceptivité 3s/b/5s qui est vraie 3s après $\uparrow b$ et devient fausse 5s après $\downarrow b$: la variable b doit rester vraie pendant un temps supérieur ou égal à 3s pour que 3s/b/5s puisse être vraie. Le « /5s » n'est utile que si l'étape 4 devient active après un $\downarrow b$. Dans une simplification usuelle (*Exemple 5*), l'étape 4 sera active pendant 3 secondes : une autre façon de réaliser une action limitée dans le temps (voir §6.5.1). L'*exemple 6* utilise un « front montant de a » qui vaut 1 uniquement quand a passe de 0 à 1. L'*exemple 7* propose un fonctionnement similaire à celui de l'*exemple 6*, l'étape 4 est alors divisée en deux étapes 4A et 4B. L'*exemple 8* utilise un « front descendant de a » qui vaut 1 uniquement quand a passe de 1 à 0. L'*exemple 9* utilise une combinaison de variables de types différents. Enfin l'*exemple 10* utilise la valeur booléenne d'un prédicat : la réceptivité est vraie lorsque l'assertion « K=5 » est vérifiée. On peut aussi avoir : [K ≥ 5], [K ≠ 5], [t ≤ 20°C] + b, [Plus de 3 pièces], etc...

6.7 – Structures particulières

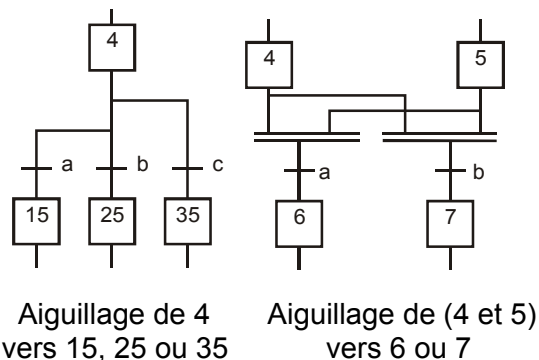
Séquence linéaire

Une séquence linéaire est composée d'une suite d'étapes et de transitions. La séquence est dite active lorsqu'elle comporte une ou plusieurs étapes actives.



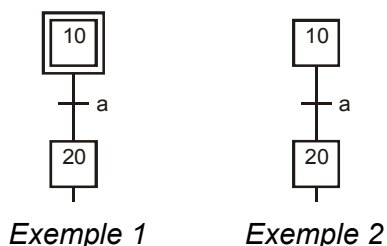
Sélection de séquence

Une sélection de séquence est un choix d'évolution entre plusieurs séquences à partir d'une ou plusieurs étapes.

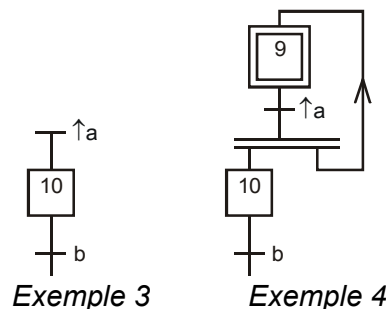


Les étapes et transitions sources ou puits

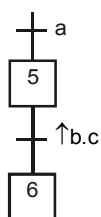
Les étapes sources sont souvent des étapes initiales (exemple 1, étape 10) par lesquelles le système ne repasse plus en fonctionnement cyclique. Elles peuvent également être des étapes simples, forcées à l'activation par un grafcet hiérarchiquement supérieur (exemple 2, étape 10).



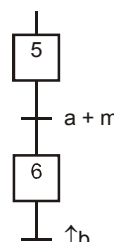
Les transitions sources (exemple 3) correspondent à des entrées provoquant l'activation d'une étape du système (voir §6.3 règle 1) à un moment quelconque du fonctionnement. Les exemples 3 et 4 ont un fonctionnement équivalent.



Les étapes puits sont des étapes qui une fois activées, ne peuvent être désactivées que par un grafcet hiérarchiquement supérieur (ordre de forçage) ou par une mise hors énergie du système.

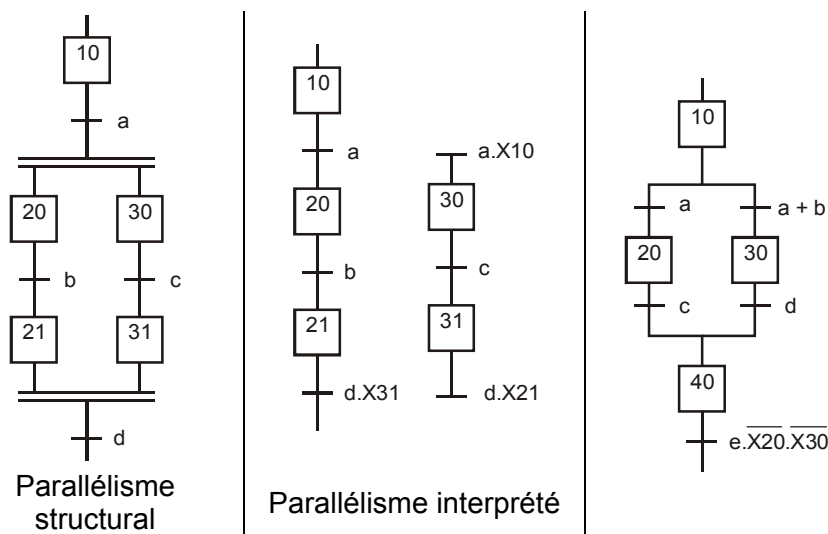


Les transitions puits sont des transitions qui désactivent une séquence sans conséquence sur la suite du fonctionnement du système.



Parallélisme structural et parallélisme interprété

Le parallélisme structural est plus évident à comprendre, mais la structure interprétée allège l'écriture et permet de mettre en évidence certaines séquences en les détachant dans un grafcet connexe.

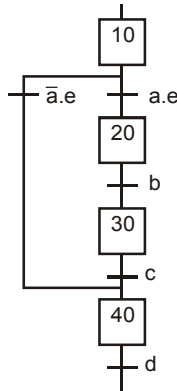


Autre forme de parallélisme interprété : à éviter à cause du risque d'erreur lié à la dernière réceptivité (écriture délicate)

On retrouvera du parallélisme interprété dans le paragraphe « Appel de tâche ».

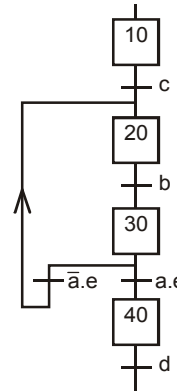
Saut d'étapes

Si l'étape 10 est activée, il y aura saut à l'étape 40 si la réceptivité « $\bar{a}.e$ » est vraie.



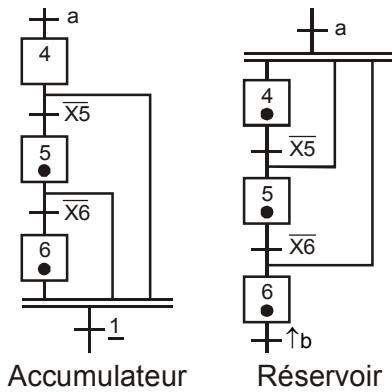
Reprise de séquence

Lorsque l'étape 30 est activée, il y aura reprise de séquence 20-30 si la réceptivité « $\bar{a}.e$ » est vraie.



Il est prudent de prévoir des réceptivités complémentaires pour la divergence en OU. Sinon, pour les exemples ci-dessus, les étapes 20 et 40 pourraient être activées simultanément, après l'étape 10 (saut d'étapes) ou après l'étape 30 (reprise de séquence).

Accumulateur et réservoir

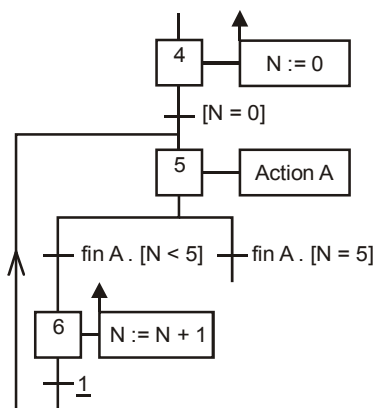


Dans notre exemple d'accumulateur il faut attendre trois franchissements de la transition de réceptivité « a » avant que la transition de réceptivité « 1 » soit franchie. Ici les étapes 5 et 6 sont activées, l'accumulateur est en attente de l'activation de l'étape 4 pour « se vider ».

Dans notre exemple de réservoir le franchissement de la transition de réceptivité « a » provoque l'activation simultanée des étapes 4, 5 et 6. Il faudra trois $\uparrow b$ pour que le réservoir « se vide ». Attention : une réceptivité « b » au lieu de « $\uparrow b$ » peut vider le réservoir en une seule fois.

Les compteurs

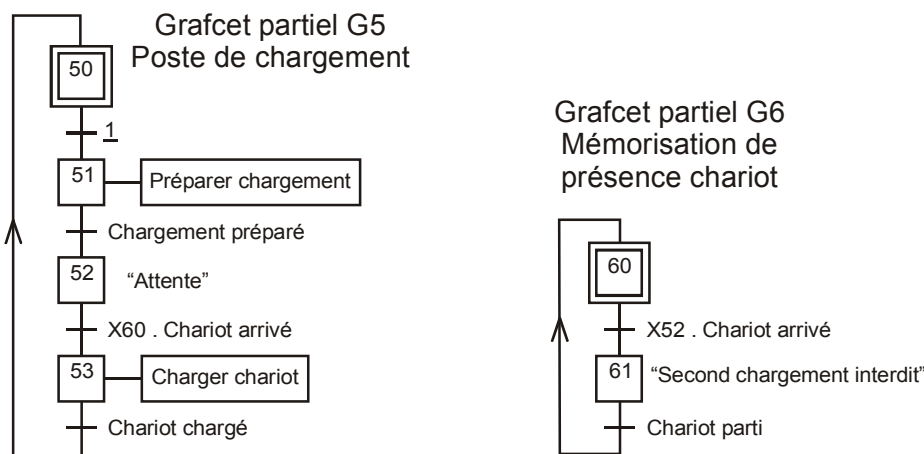
Un réservoir peut permettre d'exécuter une action plusieurs fois, mais cette répétition peut aussi se réaliser à l'aide d'un compteur. Ici l'action A est exécutée 6 fois avant de poursuivre.



On constate ici une évolution fugace, due à la réceptivité « 1 » qui rend instable l'étape 6. L'étape 5 étant active, l'événement « fin A . [N < 5] » conduit directement à activer l'étape suivante l'étape 6. L'étape 5 devant alors être successivement désactivée et activée, reste active, suivant la règle 5 d'évolution du GRAFCET (voir § 6.3). L'action mémorisée liée à l'étape 6 incrémente la valeur de N (voir § 6.5.3).

La réceptivité « [N = 0] », très sécuritaire, peut être remplacée par « 1 ».

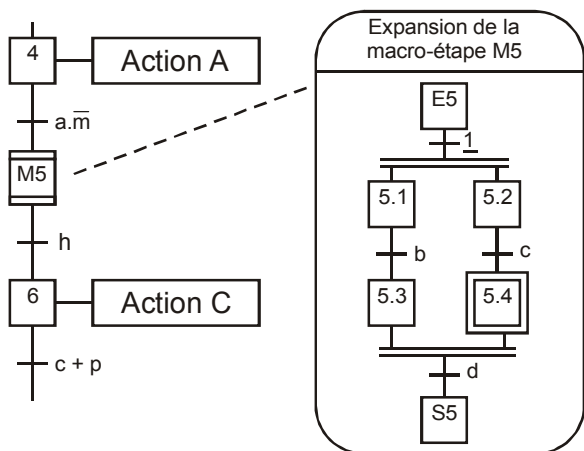
Mémorisation d'une information



Dans cet exemple il faut attendre l'arrivée d'un chariot vide pour effectuer le chargement, mais il ne faut pas charger deux fois le même chariot. Le grafcet de mémorisation de présence chariot permet de réaliser le bon fonctionnement, en mémorisant le départ du chariot chargé.

N.B. : Le grafcet qui commande le mouvement du(des) chariot(s) n'est pas représenté. Le chariot doit être vide à la mise en énergie. Les transitions 52-53 et 60-61 seront franchies simultanément.

Macro-étapes

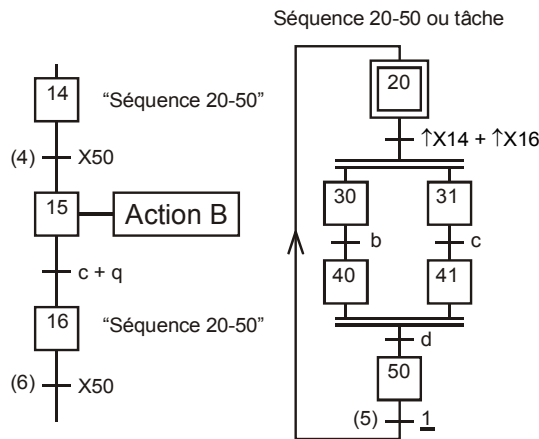


L'expansion d'une macro-étape décrit finement les détails du fonctionnement d'une macro-étape exprimant la fonction à remplir sans se soucier des détails.

Il faut $X4 = 1$ et $a.\bar{m} = 1$ pour activer la macro-étape M5 (variable d'état $XM5 = 1$). L'étape d'entrée E5 est alors activée. Il faudra attendre l'activation de l'étape de sortie S5 et avoir $h = 1$ pour voir s'activer l'étape 6 et se désactiver la macro-étape M5 (la variable d'état $XM5$ passe à 0).

A noter la présence possible d'étapes initiales, voire de macro-étapes, dans une expansion de macro-étape.

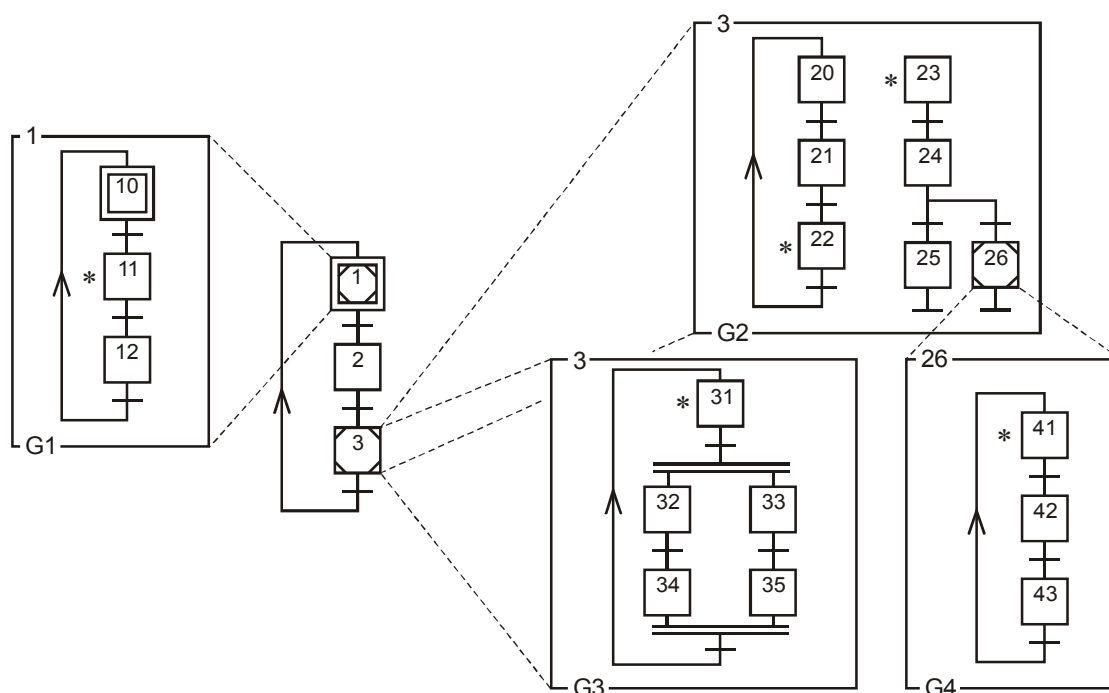
Appel de tâche



Le principe de fonctionnement est basé sur celui des macro-étapes. Une tâche peut être appelée plusieurs fois par un grafcet. Contrairement à la macro-étape, la tâche doit avoir un fonctionnement cyclique avec une(des) étape(s) initiale(s), ou une(des) transition(s) source(s).

On constate une évolution fugace au niveau de l'étape 50 : l'affectation de la valeur 1 à la variable interne X50 se fait de façon fugace. Les transitions 4 et 5 (comme les transitions 6 et 5) sont franchies simultanément.

Encapsulation



L'utilisation de macro-étapes ou d'appels de tâches, la partition en grafquets partiels assortis d'ordres de forçage de situation, sont des moyens de structurer de manière hiérarchique un grafcet et d'en améliorer la compréhension. Pour ce faire, on peut aussi utiliser l'encapsulation.

Dans l'exemple ci-dessus, l'étape 3 est une étape encapsulante qui contient deux encapsulations : les grafquets partiels G2 et G3. Chaque encapsulation est ceinte d'un cadre comportant en haut à gauche le nom de l'étape encapsulante (ici 3) et en bas à gauche le nom de l'encapsulation (ici G2 ou G3). Une encapsulation peut comporter une ou plusieurs étapes encapsulantes : le grafcet partiel G4 est encapsulé dans l'étape encapsulante 26 du grafcet partiel G2.

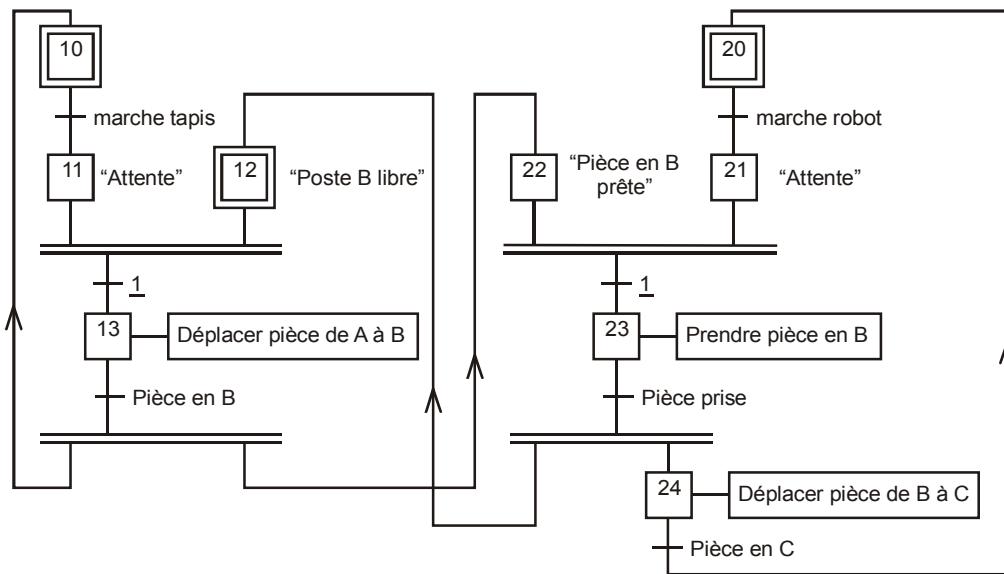
Quand l'étape encapsulante 3 est inactive, aucune étape des encapsulations G2 et G3 n'est active. Quand l'étape encapsulante 3 s'active, les étapes 22, 23 et 31 s'activent et les règles d'évolution s'appliquent immédiatement aux grafquets G2 et G3 : les liens d'encapsulation sont représentés par un astérisque. La désactivation de l'étape 3, due au franchissement de sa transition aval ou à tout autre moyen de désactivation comme le forçage ou l'encapsulation de niveau supérieur, provoque la désactivation de toutes les étapes de G2 et G3 (et donc de G4).

L'encapsulation G2 de l'étape 3 peut être désignée par X3/G2. L'étape 24 peut être désignée par X3/X24. L'étape 42 peut être désignée par X3/X26/X42.

L'étape 1 est une étape encapsulante initiale. Une au moins des étapes encapsulées dans chaque encapsulation doit être une étape initiale (ici 10). A la mise en énergie, les étapes 1 et 10 sont activées, les étapes 11 et 12 sont inactives. Lors d'un forçage de l'étape initiale 1 de type {INIT}, les étapes 1 et 10 sont activées, les étapes 11 et 12 sont inactives. Quand l'étape encapsulante 1 est inactive, aucune étape de l'encapsulation G1 n'est active. Quand l'étape encapsulante 1 s'active, autrement que par une mise en énergie ou par un forçage à l'étape initiale 1 de type {INIT}, l'étape 11 s'active et les règles d'évolution s'appliquent immédiatement au grafcet G1.

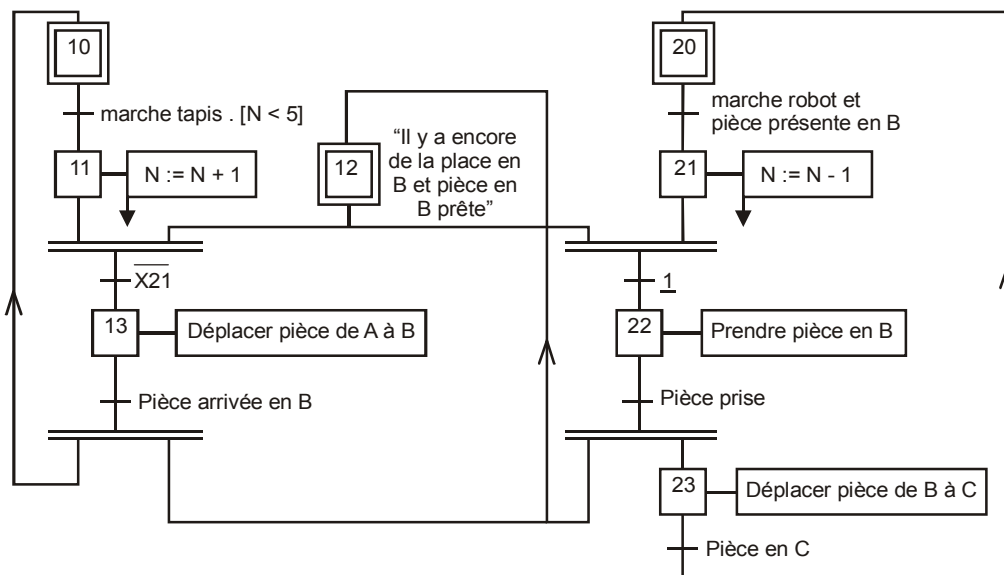
6.8 – Ressource commune ou partage de ressource

Séquences alternées



Un tapis roulant déplace des pièces d'un poste A à un poste B. Un robot prend les pièces en B pour les transporter au poste C. Le poste B est un poste commun. Le tapis ne pourra déposer une pièce en B que quand le robot aura pris la pièce précédente. Le robot ne pourra prendre une pièce en B que quand le tapis en aura placée une. A la mise en énergie, le poste B est libre, le tapis place une pièce, le robot la prend, puis le tapis pose une pièce,... Ce sont des séquences alternées. Ce partage de ressource est géré par les étapes 12 et 22.

Séquences exclusives



Le poste B peut maintenant accepter 5 pièces. Le tapis ne peut toujours pas fonctionner quand le robot prend une pièce en B et le robot ne prendra pas de pièce en B si le tapis fonctionne : les deux séquences sont dites exclusives. L'étape 12, ressource commune, évite ce fonctionnement simultané en donnant la priorité au robot (réceptivité $\overline{X21}$). A la mise en énergie, on a $N = 0$ (voir § 6.5.2) et on impose qu'il n'y ait pas de pièce en B. Les étapes 11 et 21 peuvent avoir des activités fugaces.