Réseaux de Petri
IN310 - Modèles des SE

Charles Lesire-Cabaniols (ONERA / DCSD)
charles.lesire@onera.fr

3A-SEM - 2010-2011

Introduction

- 1962, Carl Adam Petri : Communication et composition entre automates
- Outil de modélisation de systèmes dynamiques : permet de raisonner sur les objets, les ressources et leur changement d'état
- Outil mathématique (formel) et outil graphique
  - permet de représenter le vrai parallélisme, la concurrence, contraintes de précédence,
  - analyse de bonnes propriétés (vivacité, borné, etc.) et propriétés structurelles : aide efficiente durant les phases de conception
  - peut être simulé et implémenté directement par un joueur de RdP

Introduction

- Applications :
  - évaluation de performances,
  - analyse et vérification formelles,
  - protocoles de communication,
  - contrôle de systèmes de production,
  - systèmes d'information (organisation d'entreprises),
  - gestion de bases de données,
  - IHM, etc.

Introduction

- Etat : les différentes *phases* par lesquelles passe le système ;
- Variables d'état : ensemble de variables qui permettent de connaître l'état du système.
  - Système continu : les variables d'état évoluent continuellement dans le temps ;
  - Système à événements discrets : les variables d'état changent *brusquement* à certains instants
- Evénement : son occurrence fait changer l'état du système
- Activité : *boîte noire* représente lŽévolution du système entre 2 événements
- Processus : séquence dŽévénements et d'activités $\leadsto$ coopération, compétition, parallèle

Présentation informelle

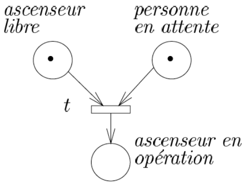
Éléments de base

- Place : interprétée comme condition, état partiel, ensemble de ressources
- Transition : associée à un événement qui a lieu dans le système
- Jeton : indique que la condition associée à la place est vérifiée (ou le nombre d'éléments qui la vérifient)

Présentation informelle

Comportement dynamique

- état : répartition des jetons dans les places,
- occurrence d'un événement : tir de la transition,
    - enlever les jetons des places d'entrée,
    - mettre les jetons dans les places de sortie.



Définitions

- Modèle formel, peut être caractérisé par :
  - graphe avec comportement dynamique ; représentation naturelle pour le concepteur,
  - ensemble de matrices d'entiers : comportement dynamique décrit par un système linéaire : représentation naturel pour l'ordinateur ;
  - système de règles : peut être utilisé avec les techniques d'I.A ;
- Validation par analyse et simulation ;
- Représente : parallélisme, synchronisme, séquence, conflit, concurrence.

Définitions

Réseaux de Petri $R =< P, T, Pre, Post >$

- P est un ensemble fini de places de dimension n ;
- T est un ensemble fini de transitions de dimension m ;
- $Pre : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est l'application d'*entrée* (places précédentes),
- $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est l'application de *sortie* (places suivantes),

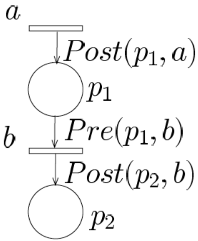
Réseau de Petri marqué $N =< R, M >$

- R est un réseau de Petri,
- $M : P \rightarrow \mathbb{N}$ est le marquage initial
  (distribution de jetons dans les places)

Définitions

Exemple

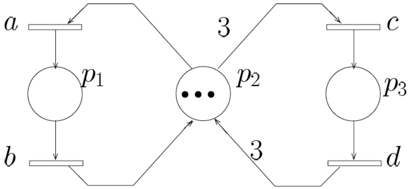
- $R =< P, T, Pre, Post >$
- $P = \{p_1, p_2, p_3\}$
- $T = \{a, b, c, d\}$
- $Post(p_1, a) = 1,\ Pre(p_1, b) = 1,$
  $Post(p_2, b) = 1$



Graphe et notation matricielle

Réseau de Petri marqué $N = < R, M >$

$$P = \{p_1, p_2, p_3\}, \qquad T = \{a, b, c, d\}$$



$$Pre = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Post = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$${}^tM = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 0 \end{pmatrix}$$

Règle de fonctionnement

Transition sensibilisée à partir de M

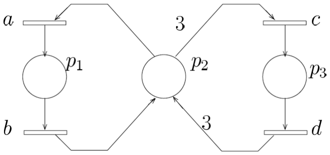
- il y a un numéro suffisant de jetons dans les places d'entrée,
- $\forall p \in P, \quad M(p) \geq Pre(p, t)$
- $M \geq Pre(\,.\,, t)$

Tir d'une transition à partir de M

- $\forall p \in P, \quad M'(p) = M(p) - Pre(p, t) + Post(p, t)$
- $M' = M - Pre(\,.\,, t) + Post(\,.\,, t) = M + C(\,.\,, t)$

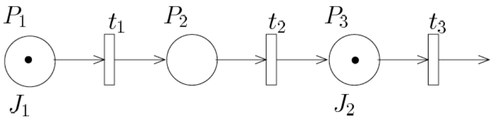
Règle de fonctionnement

- Enlève $Pre(p, t)$ jetons de chaque place précédente p (poids de l'arc d'entrée), et met $Post(p, t)$ jetons à chaque place de sortie p,
- Représente le changement d'état dû à l'ocurrence de l'événement associé à t.



Différentes interactions entre les processus

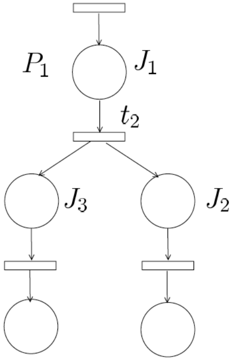
Séquence



- séquence d'un processus de fabrication :
  - P_i : phase i de l'opération sur la pièce,
  - t_i : passage d'une phase à une autre ;
- portion de l'itinéraire d'un système de transport :
  - P_i : chariot traverse la section i,
  - t_i : passage d'un chariot d'une section à une autre ;

Différentes interactions entre les processus

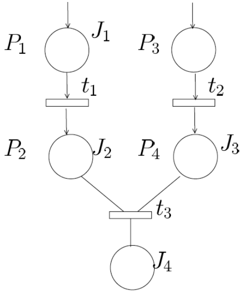
Fork



- à partir de l'activité J_1, deux activités sont crées (J_2 et J_3),
- J_2 et J_3 évoluent de façon indépendante.

Différentes interactions entre les processus

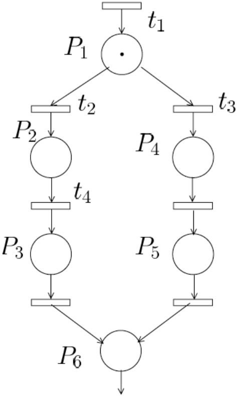
Join



- évolution indépendante de t_1 et t_2 (évolution asynchrone),
- synchronisme en t_3.

Différentes interactions entre les processus

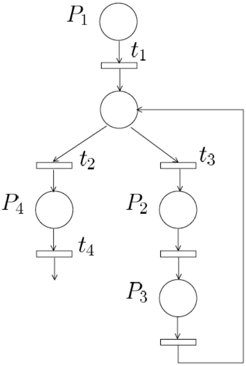
Choix



- choix entre t_2 (seq. P_2P_3) et t_3 (seq. P_4P_5) : seulement une peut être tirée ;
- les 2 séquences exécuteront P_6.

Différentes interactions entre les processus

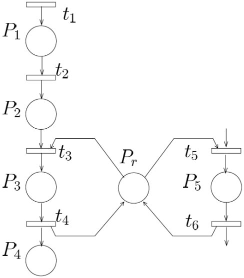
Répétition



- choix entre t_2 e t_3,
- répéter la séq. $P_2 P_3$ un certain nombre de fois avant de exécuter P_4.

Différentes interactions entre les processus

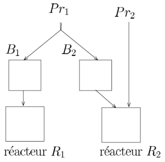
Allocation de ressources

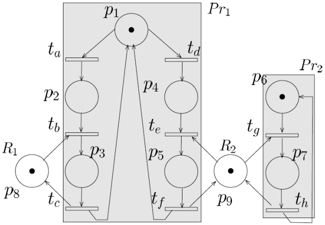


- un même chariot doit servir différentes machines,
- un opérateur doit exécuter différentes activités (une à la fois).

Exemple : Système par lot

- peut produire deux produits (Pr_1 et Pr_2), utilisant 2 réacteurs (R_1 e R_2) de façon concurrente,
- produit Pr_1 : est produit par R_1 ou R_2 ; doit être, au préalable, stocké dans le *buffer* B_1 ou B_2 (respectivement).
- produit Pr_2 : est produit par le réacteur R_2.





Conflit et parallélisme

- Conflit structurel : ssi t_1 et t_2 ont au moins une place d'entrée en commun

$$\exists p \in P, \quad Pre(p, t_1)\, Pre(p, t_2) \neq 0$$

- Conflit effectif : ssi t_1 et t_2 sont en conflit structurel et sont sensibilisées par le marquage M

$$M \geq Pre(., t_1) \text{ et } M \geq Pre(., t_2)$$

- Parallélisme structurel : si t_1 et t_2 ne possèdent pas de place d'entrée en commun

$$\forall p \in P \quad Pre(p, t_1)\, Pre(p, t_2) = 0 \text{ ou } Pre(., t_1)^T \times Pre(., t_2) = 0$$

- Parallélisme effectif : t_1 et t_2 sont parallèles structurellement et

$$M \geq Pre(., t_1) \text{ e } M \geq Pre(., t_2)$$

Séquence de tir

$$\underset{M_0}{\begin{pmatrix}0\\3\\0\end{pmatrix}} \xrightarrow{a} \underset{M_1}{\begin{pmatrix}1\\2\\0\end{pmatrix}} \xrightarrow{a} \underset{M_2}{\begin{pmatrix}2\\1\\0\end{pmatrix}} \xrightarrow{b} \underset{M_1}{\begin{pmatrix}1\\2\\0\end{pmatrix}}$$

- M' accessible à partir de M : $M \xrightarrow{t} M'$
- $M_0 \xrightarrow{a} M_1$, $M_1 \xrightarrow{a} M_2$, $M_2 \xrightarrow{b} M_1$,
- si $M \xrightarrow{t_1} M'$, et $M' \xrightarrow{t_2} M''$, on a $s = t_1 t_2$ et $M \xrightarrow{t_1 t_2} M''$
- dans l'exemple, $M_0 \xrightarrow{s} M_1$, avec $s = aab$, s est dite séquence de tir

$$\begin{aligned} \mathrm{s} : \quad T &\rightarrow \mathbb{N} \\ t &\mapsto \text{nombre d'occurrences de } t \text{ dans } s \end{aligned}$$

Séquence de tir

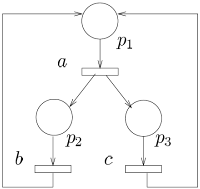
- Équation fondamentale : $\boxed{M' = M + C\mathbf{s}}$
- Etant donné M et une sequence s, existe-t-il M' t.q. $M \xrightarrow{s} M'$?
- Etant donné M et M', existe-t-il s t.q. $M \xrightarrow{s} M'$?

Réseau borné

- Place k-bornée : le nombre maximal de jetons de la place, pour tout marquage accessible, est plus petit que k

$$\forall M' \in \mathcal{A}(\mathcal{R}, M_0), \quad M'(p) \leq k$$

- Si $k = 1$, la place est dite binaire,
- Un réseau marqué est k-borné ssi toutes ses places le sont
- Un réseau marqué est binaire ssi toutes ses places le sont



Réseau vivant

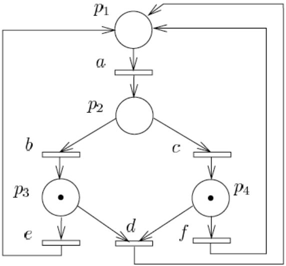
- Transition quasi-vivante :

$$\exists s \; / \; M_0 \xrightarrow{s} M \quad \text{et} \quad M \xrightarrow{t}$$

- Transition vivante :

$$\forall M \in \mathcal{A}(\mathcal{R}, M_0), \; \exists s \; / \; M \xrightarrow{st}$$

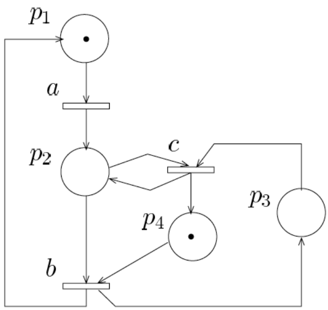
- Réseau vivant ssi toutes ses transitions sont vivantes

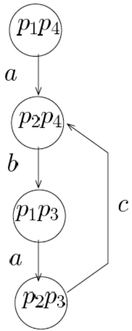


Réseau réinitialisable

- Réseau marqué réinitialisable s'il est possible de revenir au marquage initial à partir de n'importe quel marquage :

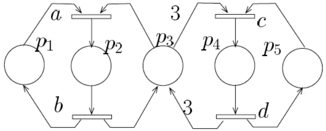
$$\forall M \in \mathcal{A}(\mathcal{R}, M_0), \quad \exists s \,/\, M \xrightarrow{s} M_0$$





Composantes conservatives

- circuit formé par p_1, p_2, a, b : $M(p_1) + M(p_2)$ est constant
  - $M_0 = {}^t\begin{pmatrix}1 & 0 & 3 & 0 & 1\end{pmatrix}$
  - $M_0 \xrightarrow{a} M' = {}^t\begin{pmatrix}0 & 1 & 2 & 0 & 1\end{pmatrix}$
  - $M' \xrightarrow{b} M'' = M_0$



- Marquage obtenu après une séquence de tir : $M' = M + Cs$
- Composante conservative : $f \,/\, {}^tf\ C = 0$
- dans l'exemple :

$${}^tf^1 = \begin{pmatrix}1 & 1 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix}, {}^tf^2 = \begin{pmatrix}0 & 1 & 1 & 3 & 0\end{pmatrix}, {}^tf^3 = \begin{pmatrix}0 & 0 & 0 & 1 & 1\end{pmatrix}$$

Invariants de place

- Invariant de place = composante conservative + marquage
- ${}^t f\ C = 0 \Rightarrow {}^t f\ M = {}^t f\ M_0 \quad \forall M \in \mathcal{A}(\mathcal{R}, M_0)$
- $M(p_1) + M(p_2) = M_0(p_1) + M_0(p_2) = 1$
- $M(p_2) + M(p_3) + 3.M(p_4) = 3$
- $M(p_4) + M(p_5) = 1$

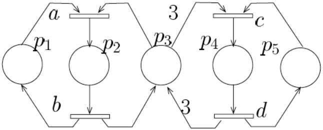
Remarque

- composante conservative : dépend seulement de la structure !
- invariant de place : dépend de la structure et du marquage

Composantes répétitives stationnaires

- Sous-réseau formé par c et d, et places p_3, p_4 et p_5 : le tir de $s = cd$ à partir de M_0 ramène au même marquage
- Transitions c et d forment une composante répétitive stationnaire
- $M' = M \Rightarrow C\,s = 0 \quad s$ composante répétitive
- Dans l'exemple :

$$s^1 = {}^t\begin{pmatrix}1 & 1 & 0 & 0\end{pmatrix},\ s^2 = {}^t\begin{pmatrix}0 & 0 & 1 & 1\end{pmatrix}$$



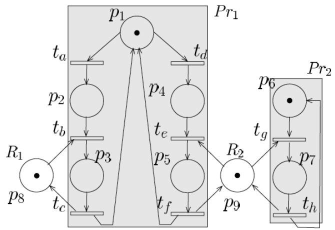
Invariants de transition

- Séquences s_i obtenues à partir du vecteur s
- Pour s_1 on peut avoir les invariants $s_{11} = ab$ et $s_{12} = ba$
- Il faut calculer $M \xrightarrow{ab}$ et $M \xrightarrow{ba}$ pour vérifier !

Remarque

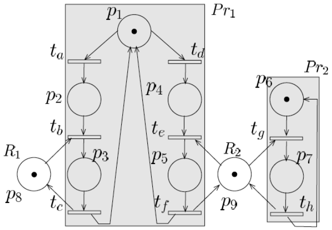
- Composante répétitive : dépend seulement de la structure !
- Invariant de transition : dépend de la structure et du marquage

Exemple : Système par lot



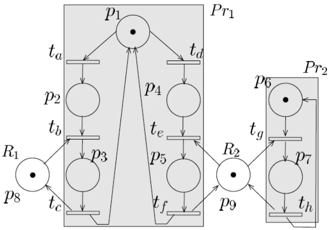
- $f^1 = {}^t\begin{pmatrix}1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix}$: fabrication de Pr_1
- $f^2 = {}^t\begin{pmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0\end{pmatrix}$: fabrication de Pr_1
- $f^3 = {}^t\begin{pmatrix}0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\end{pmatrix}$: état du réacteur R_1
- $f^4 = {}^t\begin{pmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1\end{pmatrix}$: état du réacteur R_2

Exemple : Système par lot



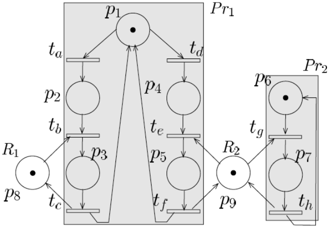
- $M(p_1) + M(p_2) + M(p_3) + M(p_4) + M(p_5) = 1$: un seul état pour Pr_1 (attente, B_1, B_2, R_1, R_2)
- $M(p_6) + M(p_7) = 1$: un seul état pour Pr_2 (attente ou R_2)
- $M(p_3) + M(p_8) = 1$: R_1 libre ou prod. Pr_1
- $M(p_5) + M(p_7) + M(p_9) = 1$: R_2 libre ou prod. Pr_1 ou Pr_2

Exemple : Système par lot



- $s^1 = {}^t\begin{pmatrix}1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix}$: Pr_1 passe par le *buffer* et est prod. par R_1 ; un nouveau cycle peut recommencer ;
- $s^2 = {}^t\begin{pmatrix}0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0\end{pmatrix}$: même comportement pour Pr_2 et R_2 ;
- $s^3 = {}^t\begin{pmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1\end{pmatrix}$: début de prod. de Pr_2 et fin

Exemple : Système par lot



Seules séquences effectivement réalisables :

- $s_1 = t_a t_b t_c$
- $s_2 = t_d t_e t_f$
- $s_3 = t_g t_h$

Analyse des propriétés

Analyse par énumération des marquages le graphe des marquages accessibles est calculé, vérifiant si le réseau est borné, vivant et réinitialisable.

Analyse structurelle calcul des composantes conservatives et répétitives stationnaires et des invariants correspondants ; ne permet pas toujours d'avoir une réponse, mais dans certains cas, permet d'obtenir une réponse simples et rapide des propriétés du réseau.

Analyse par réduction si le réseau est trop grand ou non borné, on peut réduire la taille du réseau, en utilisant certaines règles de réduction.

Analyse par énumération des marquages

Arbre de couverture

- On part du marquage initial M_0,
- On crée une branche pour chaque transition sensibilisée par M_0,
- La construction d'une branche est interrompue quand on rencontre un marquage
  - déjà calculé,
  - strictement supérieur à un marquage *de la branche qui est en train d'être explorée*.

Si le réseau est non borné, on introduit le symbole ω pour rendre l'arbre fini.

Analyse par énumération des marquages

Recherche des propriétés sur $\mathcal{A}(\mathcal{R}, M)$

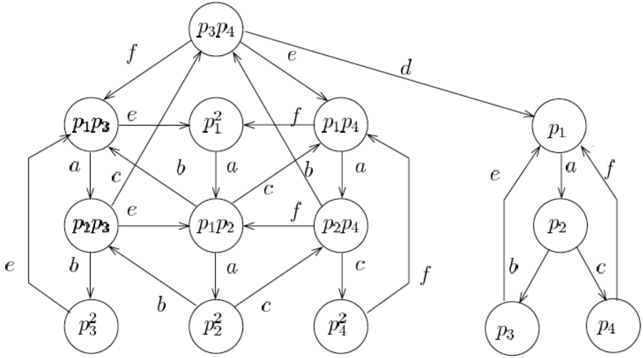
- Réseau *k*-borné $\Leftrightarrow \mathcal{A}(\mathcal{R}, M)$ borné
- Réseau réinitialisable $\Leftrightarrow \mathcal{A}(\mathcal{R}, M)$ fortement connexe

$$\forall M_i, M_j \in \mathcal{A}(\mathcal{R}, M),\ \exists s \,/\, M_i\ \overset{s}{M_j}$$

- Réseau vivant $\Leftrightarrow \mathcal{A}(\mathcal{R}, M)$ fortement connexe et chaque transition étiquette au moins un arc

$$\forall t \in T, \exists M_i, M_j \in \mathcal{A}(\mathcal{R}, M),\ / \ M_i \xrightarrow{t} M_j$$

Analyse par énumération des marquages



Analyse structurelle

Composantes conservatives

- Toute place qui appartient à une composante conservative est bornée
- Une place p qui n'appartient à aucune composante conservative ($f(p) = 0$) peut être bornée
- Une place non bornée n'appartient à aucune composante conservative

Un réseau de Petri pour lequel il existe une couverture de composantes conservatives ($f > 0$) est k-borné, *peu importe son marquage initial.*

Analyse structurelle

Invariants de place

${}^t f\ M = {}^t f\ M_0$ permet de calculer une limite pour chaque place p

$$f(p)M(p) \leq {}^t f\ M_0, \qquad M(p) \leq \frac{{}^t f\ M_0}{f(p)}$$

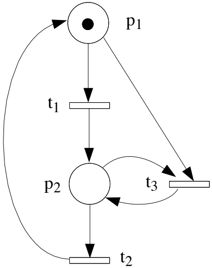
Analyse structurelle

Composantes répétitives

Réseau de Petri répétitif : il existe une couverture de composantes répétitives ($s > 0$)

- un réseau de Petri borné et vivant est répétitif
- un réseau non répétitif ($\exists t, s(t) = 0$) est non vivant ou non borné

Exemples



Caractéristiques de la représentation par RdP

- Modularité : est-il possible de décomposer un système complexe ?
- Composition : si les modules ont les bonnes propriétés, la composition de ces modules garde-t-elle les bonnes propriétés ? Ou est-il nécessaire d'analyser le système globale (composé) ?
- Calculabilité : existe-t-il des algorithmes pour l'analyse ?

Bloc bien-formé

un réseau de Petri avec :

- une transition d'entrée t_e et une transition de sortie t_s,
- réseau borné, vivant et réinitialisable si l'on rajoute une place p tel que $Pre(p, t_e) = Post(p, t_s) = 1$.
  Ex : séquence, if-then-else, do-while, fork-join.

Raffinement

Processus d'abstraction fait en deux temps :

- modélisation d'une première ébauche (*vision abstraite du système global*), avec des transitions *abrégées* (associées à des tâches complexes),
- à partir de ce RdP, remplacer les transitions *abrégées* par des blocs bien-formés représentant une vision détaillée de ces tâches complexes
- conception *top-down*
- analyse : si le réseau abstrait est un bloc bien formé, et les transitions sont représentées par des blocs bien formés, alors le réseau global est bien formé.

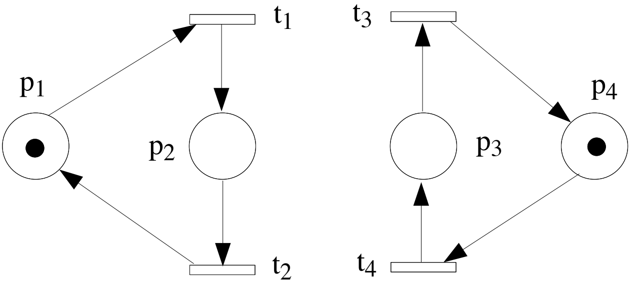
Composition

Processus "à objets" :

- modélisation détaillée de deux objets dès le départ
- construction du réseau global à partir de la composition de ces objets
  - Composition asynchrone (fusion des places)
  - Composition synchrone (fusion des transitions)
- conception *bottom-up*
- analyse : le réseau global composé ne conserve pas forcement les propriétés de chaque bloc

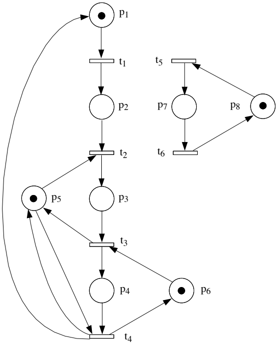
Composition synchrone

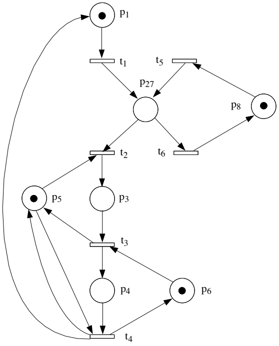
Fusion des transitions t_1 et t_3 (t_{13}) et de t_2 et t_4 (t_{24})



Composition asynchrone

Fusion des places p_2 et p_7 (p_{27})

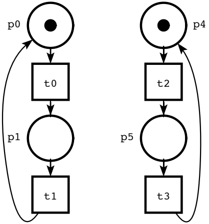




Communication par place

Deux processus A et B exécutant chacun une opération doivent se communiquer :

- A ne peut commencer qu'après la fin de B ;
- B doit attendre que A commence pour pourvoir commencer.

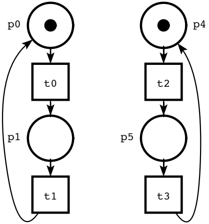


processus
indépendants

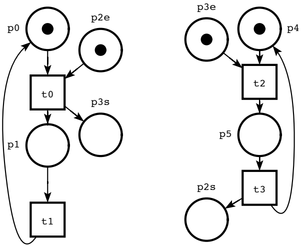
Communication par place

Deux processus A et B exécutant chacun une opération doivent se communiquer :

- A ne peut commencer qu'après la fin de B ;
- B doit attendre que A commence pour pourvoir commencer.



processus indépendants

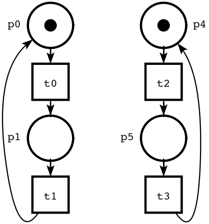


modèle local

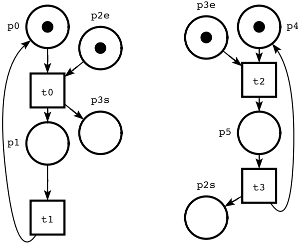
Communication par place

Deux processus A et B exécutant chacun une opération doivent se communiquer :

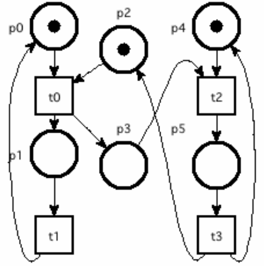
- A ne peut commencer qu'après la fin de B ;
- B doit attendre que A commence pour pourvoir commencer.



processus indépendants



modèle local



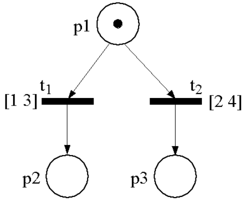
modèle global

Réseau de Petri et le temps

Plusieurs extensions de RdP pour prendre en compte le temps :

- temps associé aux arcs,
- temps associé aux places,
- temps associé aux transitions (RdP temporel, RdP temporisé)

Réseaux de Petri temporels (Merlin, 1974)



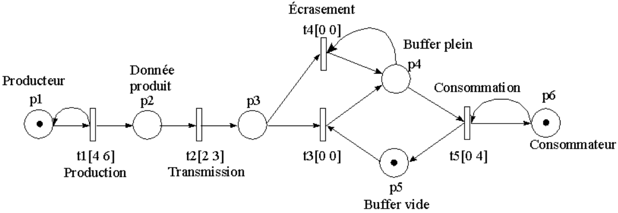
Réseaux de Petri t-temporels

Un réseau de Petri t-temporel $< N, M_0, I >$ est défini par :

- un réseau de Petri $N =< P, T, Pre, Post >$,
- un marquage initial M_0,
- une fonction intervalle statique I :

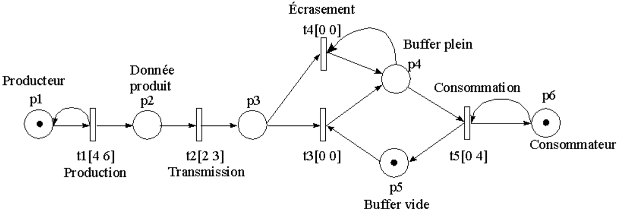
$$I : T \rightarrow (Q^+ \cup 0) \times (Q^+ \cup \infty)$$

Protocole unidirectionnel de transfert de données :



Réseaux de Petri t-temporels

Intervalle temporel $I(t_i) = [a_i, b_i]$: dates de tir possibles de t_i à partir de sa date de sensibilisation.



- date de sensibilisation d'une transition t_i
- date de début et de fin de l'intervalle de tir,
- date de franchissement effectif de t_i.