Génie Logiciel M2Pro-GL
Methodes Formelles pour Protocoles et Architectures

Burkhart Wolff

(basée sur le materiel
de Fatiha Zaïdi & Marie-Claude Gaudel)

wolff@lri.fr

Plan du Cours

- Préliminaires sur les modèles du parallélisme
- Les langages de spécification, généralités sur le langage LOTOS
- Lotos de base
- Lotos complet
- Test de Protocoles
- Model-Checking

Chap.1 : Sémantique du parallélisme

- Bibliographie : *"Vérification de logiciels : techniques et outils du model-checking"*, chap. 1 et 2, ouvrage collectif, Vuibert Informatique, Paris, 1999
- Ensemble de *processus* qui :
  - exécutent des *actions* indépendamment les uns des autres, donc changent d'*état*
  - coopérent ; donc se *synchronisent* avec des actions d'autres processus
  - indépendance => *non-déterminisme*

1 - Variété des systèmes => variété des modèles

- *Deux grands mécanismes de coopération :*
- - messages (réseaux)
- - variables partagées (machines parallèles ou clients-serveurs)

- *Deux grands types de systèmes :*
- - synchronisés (=> horloge commune)
- - asynchrones (notions locales de temps ≠)

Difficultés dues à la répartition

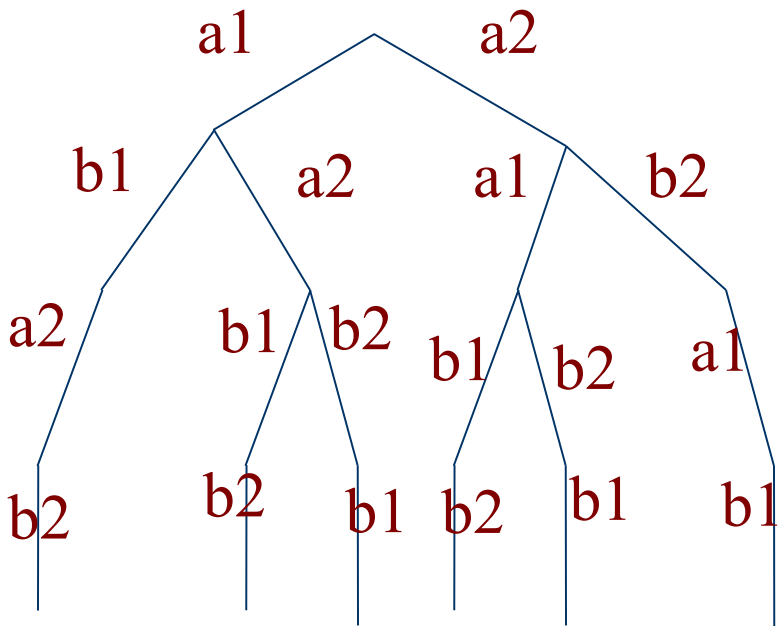
- Difficulté à percevoir l'état global (observer les autres prend du temps, et pendant ce temps-là l'état global évolue…)
- Nécessité de tolérer les fautes de transmissions (messages perdus, processeurs ou serveurs défaillants)
- Possibilité de blocage, spécialement pour les systèmes asynchrones
- non abordé dans ce cours par manque de temps : performances, goulots d'étranglement

Exécutions, comportements

- Localement, dynamiquement : traces, i.e. suite des actions, parfois infinie, exécutées par un processus
- Localement, statiquement : arbre des traces possibles d'un processus
- Globalement : dépend du modèle de parallélisme considéré. Dans ce cours, entrelacement des traces

Exemple

- Comportement de P1 :
  a1 b1
- Comportement de P2 :
  a2 b2
- Comportements de P1 en parallèle avec P2, sans interactions : a1a2b1b2, a1a2b2b1, a1b1a2b2, a2a1b2b1, etc

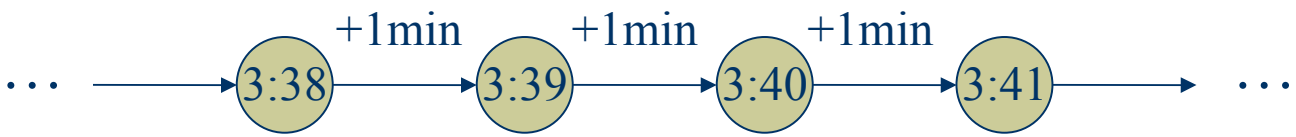


Modèle d'entrelacement

- Les actions sont *atomiques* et *non superposables*
- Un comportement de plusieurs processus parallèles indépendants est UNE trace où sont entrelacées les actions des processus
- L'ensemble des comportements possibles est l'ensemble des entrelacements (*non déterminisme*)
- Modèle simple, et suffisant pour décrire et vérifier la plupart des protocoles. Mais ce n'est qu'un modèle…

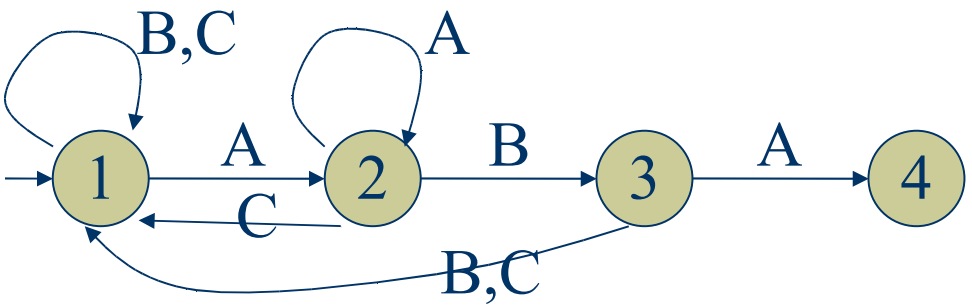
2 - Rappels sur les automates

- appelés aussi systèmes de transitions ou structures de Kripke
- États, qui ont un nom, et transitions, qui sont étiquetées
- Exemple : une montre, 24x60 = 1440 états, 1440 transitions



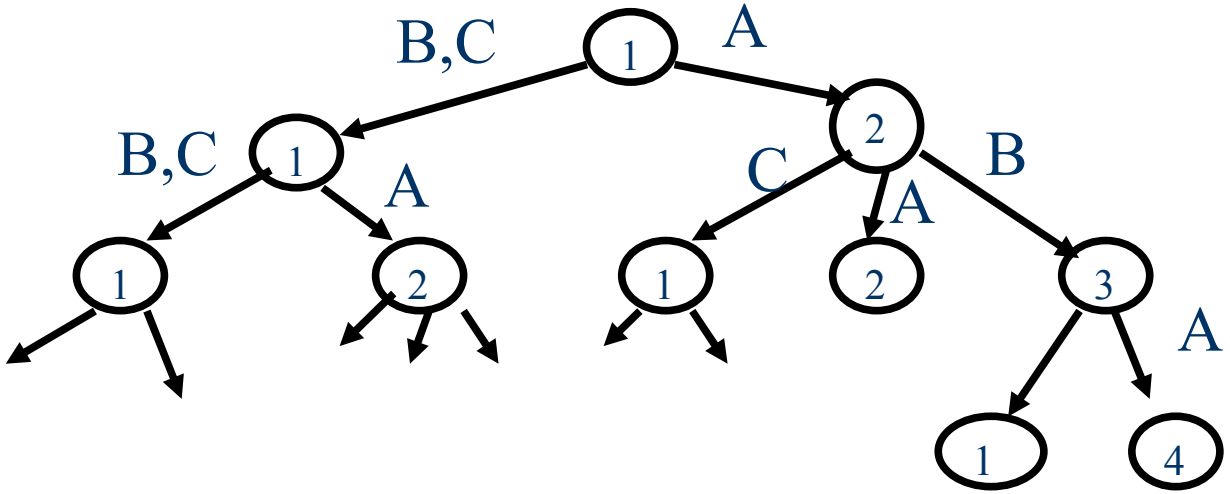
Exemple introductif

- Un digicode avec 3 touches ABC qui ouvre la porte quand on a tapé ABA



- 4 états, 9 transitions => automate fini
- exécutions : 1121,112223, …
- comportements 12234, 11231234, …
- il y a des exécutions infinies

Début de l'arbre des exécutions



Note : les sous-arbres de racine 1 (resp. 2, 3) sont toujours les mêmes car cet arbre est le développement d'un automate

Propriétés associées aux états de l'automate

- *"la porte est ouverte"* est vraie dans l'état 4, fausse dans les autres états *(spécification)*
- Propriétés structurelles
  - *"on vient de taper A"* (P_A) est vraie en 2 et 4, et fausse ailleurs,
  - *"on vient de taper B"* (P_B) est toujours vraie en 3
  - *"l'état précédent est forcément 2"* (P2) est vraie en 3 seulement
  - *"l'état précédent est forcément 3"* (P3) est vraie en 4 seulement, …

Propriétés de l'automate

- *"Si la porte s'ouvre, c'est que les trois dernières lettres tapées sont A, B, A"*
  - On ne peut atteindre l'état 4 qu'après 3 transitions étiquetées successivement par A, B, A
- *"Toute suite de lettres tapées finissant par ABA ouvre la porte"*
  - Quelque soit l'état de départ, après 3 transitions étiquetées successivement par A, B, A on est dans l'état 4
- Se démontrent à partir des propriétés associées aux états

Définitions de base sur les automates

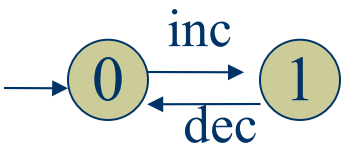
- **Automate** : $\mathcal{A} = <Q, E, T, q_0, \ell>$
  - Q ensemble des états
  - E ensemble des étiquettes des transitions
  - $T \subseteq Q \times E \times Q$ ensemble des transitions
  - $q_0 \in Q$, état initial
  - ℓ application de Q dans Prop= {P1, …}
- **Digicode** :
  - Q = {1, 2, 3, 4}, E = {A, B, C}, T = {(1, A, 2), (1, B, 1), (1, C, 1), etc}, $q_0 = 1$,
  - ℓ = (1 ->¬ouvert, 2 ->¬ouvert, 3 ->¬ouvert, 4 ->ouvert)

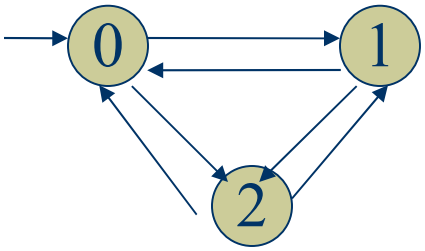
Chemins et exécutions

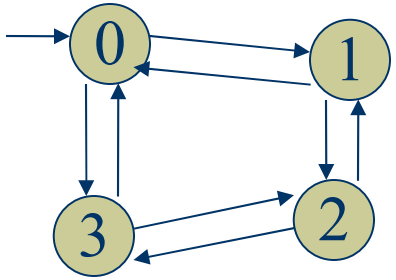
- *chemin d'un automate*
  - $\sigma = \ldots (q_i, e_i, q'_i) \ldots$ avec $q'_i = q_{i+1}$
  - **Notation :** $q_1 \text{ -}e_1\text{->} \ q_2 \text{ -}e_2\text{->} \ q_3 \text{ -}e_3\text{->} \ \ldots$
- *exécutions*
  - *exécution partielle* : chemin partant de q_0
  - *comportement* : exécution partielle maximale (qu'on ne peut pas prolonger)
- Dans certains cas on distingue un sous-ensemble des *états « finaux »*, Q_f, sans successeurs. Un comportement qui atteint un état final « termine avec succès »
- *états atteignables* : ils apparaissent au moins dans une exécution

3 - Compositions d'automates : produits

- $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2 \times \ldots \times \mathcal{A}_n$
  - **Etats :** vecteurs d'états des automate composants
  - **Transitions** : vecteurs de transitions $t_1, \ldots, t_n$ tel que
    - chaque t_i est soit la transition "–", soit une transition de $\mathcal{A}_i$
    - il y a au moins un t_i qui n'est pas "–"
- Exemple : système de 3 compteurs indépendants, un modulo 2, un modulo 3, un modulo 4

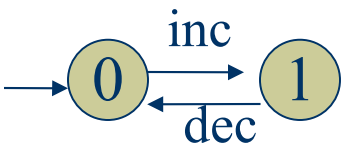


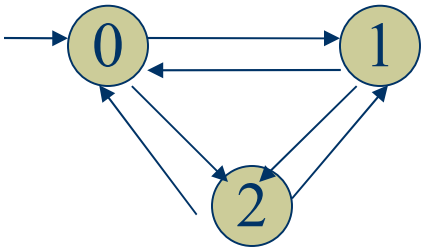


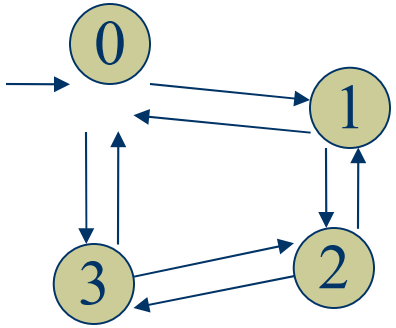


Exemple : 3 compteurs indépendants

- Les états sont les 24 vecteurs :
  - (0, 0, 0) … (1, 2, 3)
- Les transitions sont étiquetées par un des 26 vecteurs:
  - (inc, –, –), (dec,–, –), (–, inc, dec), etc
  - NB : ce n'est pas de l'entrelacement mais des multi-ensembles d'actions
- On a 24x26 = 624 transitions!







Quelques transitions à partir de l'état (0, 0, 0)

Produit => explosion de la taille de l'automate

Définition formelle du produit

- $\mathcal{A}_i = <Q_i, E_i, T_i, q_{0,i}, \ell_i>$ avec $i = 1, \ldots, n$
- $Q = Q_1 \times \ldots \times Q_n$
- $E = \prod_{1 \le i \le n} (E_i \cup \{-\})$
- $T=\{((q_1, \ldots, q_n),(e_1, \ldots, e_n) ,(q'_1, \ldots, q'_n)) \mid$ pour tout i, soit $e_i =$ "–" et $q'_i = q_i$, soit $(q_i, e_i, q'_i) \in T_i\}$
- $q_0 = (q_{0,1}, \ldots, q_{0,n})$
- $\ell((q_1, \ldots, q_n)) = \cup_{1 \le i \le n} \ell_i(q_i)$

Cas particulier de l'entrelacement

- $\mathcal{A}_i = <Q_i, E_i, T_i, q_{0,i}, \ell_i>$ avec i = 1, …, n
- $Q = Q_1 \times \ldots \times Q_n$
- $E = \prod_{1 \le i \le n} (E_i \cup \{-\})$
- $T = \{((q_1, \ldots, q_n),(e_1, \ldots, e_n) ,(q'_1, \ldots, q'_n)) \mid$ il existe i tel que $(q_i,e_i,q'_i) \in T_i$ et pour tout $j \neq i$, $e_j =$ "–" et $q'_j = q_j\}$
- $q_0 = (q_{0,1}, \ldots, q_{0,n})$
- $\ell((q_1, \ldots, q_n)) = \cup_{1 \le i \le n} \ell_i(q_i)$
- Notation : $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 ||| \mathcal{A}_2 ||| \ldots ||| \mathcal{A}_n$

Autre cas particulier : produit synchronisé

- Certains automates doivent effectuer certaines actions simultanément
  - Seules certaines combinaisons d'étiquettes sont autorisées
- Exemple : on synchronise les incrémentations et les décrémentations des 3 compteurs
  - Sync = *{(inc, inc, inc), (dec, dec, dec)}*
  - Certains états ne sont plus atteignables
  - cf figure 19 : seule la transition de (000) à (111) demeure

Vue globale du produit synchronisé

La détermination des états atteignables est un problème difficile ☹

Définition formelle du produit synchronisé

- La même que pour le produit, mais
  - $T_{Synch}=\{((q_1, , q_n),(e_1, \ldots, e_n) ,(q'_1, , q'_n)) \mid (e_1, \ldots, e_n) \in Synch$, et pour tout i, soit $e_i =$ "–" et $q'_i=q_i$, soit $(q_i,e_i,q'_i) \in T_i\}$
  - On se restreint aux états atteignables
- Notation :
  - $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \| \mathcal{A}_2 \| \ldots \| \mathcal{A}_n$ avec Synch = {…}

4 - Synchronisation par messages

- Étiquettes spéciales : !m, ?m
- Si un n-uplet de Synch contient !m, il contient ?m, et vice versa
- Intuition (un peu fausse) : envoi de m et attente de réception de m
- Exemple : verrou d'une porte et contrôleur

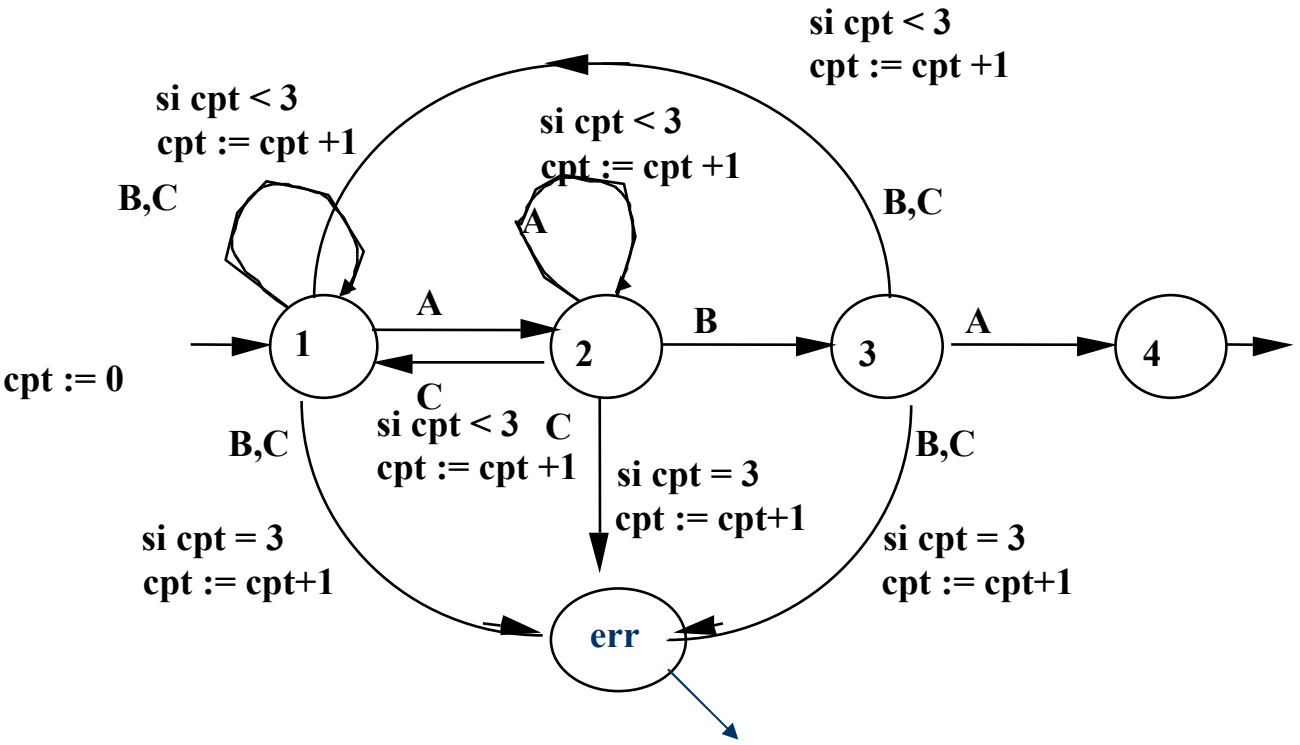
5 - Automates avec variables

- Notation plus compacte pour les automates complexes : *variables associées à un état*
  - une transition peut modifier la valeur d'une variable
  - une transition peut être conditionnée par la valeur d'une variable
- Un « état » d'un tel automate est un ensemble d'états sans variable
  - **Exemple** : état q avec B:Bool <=> 2 états, q_vrai et q_faux
- Même chose pour les « transitions »

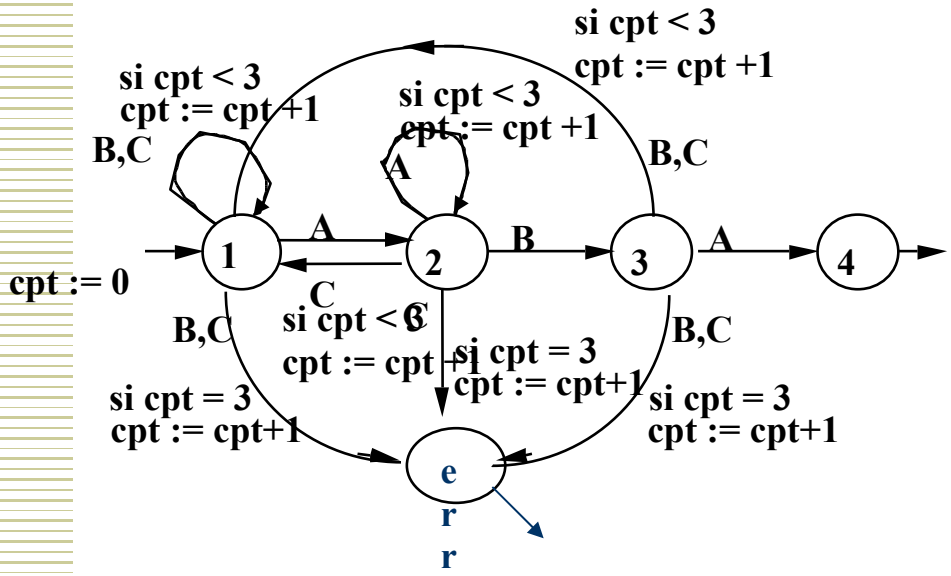
Exemple

- Digicode qui tolère au maximum 3 erreurs, puis se bloque
- Une variable « cpt » est incrémentée par les erreurs
- Si cpt<3, on effectue les transitions du digicode d'origine
- Si cpt=3 on va dans un état « err »

L'automate avec variable



Passage à l'automate sans variable



6 - Synchronisation par variable partagée

- Une même variable est utilisée par plusieurs automates
- **exemple** : système composé de 2 utilisateurs A et B qui partagent une imprimante

Produit des deux automates avec « tour » initialisée à A