

Introduction

IGL502/IGL752 – Techniques de vérification et de validation

Automne 2024



Michael Blondin

@ michael.blondin@usherbrooke.ca

 info.usherbrooke.ca/mblondin

 bureau D4-1024-1 au 1^{er} étage

1^{er} cycle (8 personnes)

- 6 × informatique
- 1 × sciences de l'information quantique
- 1 × sciences du multimédia et du jeu vidéo

2^{ème} cycle (4 personnes)

- 2 × maîtrise en génie logiciel
- 1 × maîtrise en informatique
- 1 × microprog. en sciences

| Cours magistraux | Cours magistraux (+ exercices) |
|-------------------------|---------------------------------------|
| Mardi | Jeudi |
| 13h30 – 14h20 | 15h30 – 17h20 |
| D3-2029 | D3-2033 |

Notamment:

- S'initier aux fondements de la vérification formelle algorithmique
- Savoir modéliser des systèmes simples
- Être en mesure de spécifier des propriétés en logique temporelle
- Pouvoir vérifier algorithmiquement qu'un système satisfait sa spécification

MAT115 – Logique et mathématiques discrètes

- Connaissances élémentaires en logique
- Automates finis et expressions régulières

IFT436 – Algorithmes et structures de données

- Notions élémentaires d'algorithmique
- Parcours de graphes

- IGL501/710 – Méthodes formelles en génie logiciel
- IFT313 – Introduction aux langages formels
- IFT503/711 – Théorie du calcul
- Liens avec la planification en IA

0. Introduction
1. Systèmes de transitions
2. Logique temporelle linéaire (LTL)
3. Automates de Büchi
4. Automates de Büchi et LTL
5. Logique temporelle arborescente (CTL)
6. Vérification symbolique
7. Systèmes à pile
8. Systèmes à compteurs
9. Systèmes probabilistes

0. Introduction

2h

- Motivation
- Vérification formelle
- Exemples

1. Systèmes de transitions

1h

- Systèmes de transitions
- Exécutions
- Exemples

2. Logique temporelle linéaire (LTL)

6h

- Syntaxe
- Sémantique
- Spécifier des propriétés
- Équivalences

3. Automates de Büchi

3h

- Mots infinis
- Langages ω -réguliers
- Automates de Büchi déterministes et non déterministes
- Automates de Büchi généralisés

4. Automates de Büchi et LTL

3h

- Produit d'automates
- Algorithmes de test du vide
- Vérification de formules LTL

5. Logique temporelle arborescente (CTL)

6h

- Syntaxe
- Sémantique
- Spécifier des propriétés
- Équivalences
- Vérification de formules CTL

6. Vérification symbolique

3h

- Diagrammes de décision binaire (DDB)
- Manipulation de DDB
- Vérification symbolique de formules CTL

7. Systèmes à pile

3h

- Modélisation de la récursion avec automates à piles
- Calcul de configurations accessibles
- Vérification basée sur l'accessibilité

8. Systèmes à compteurs

3h

- Modélisation de systèmes infinis avec réseaux de Petri
- Propriétés de réseaux de Petri
- Graphes de couverture

9. Systèmes probabilistes

3h

- Modélisation de systèmes proba. avec chaînes de Markov
- Accessibilité
- Logique temporelle probabiliste

Cours à saveur théorique

- Pas de programmation
- Quelques démos d'outils de vérification

- Aujourd'hui: premier et dernier cours avec diaporama
- Notes électroniques disponibles en ligne
- Références complémentaires:
 - CHRISTEL BAIER ET JOOST-PIETER KATOEN: *Principles of Model Checking*. The MIT Press, 2008.
 - Articles scientifiques pour certains thèmes
 - Vidéos de 2020

| | |
|--------------|---------------|
| Devoirs | 60% (5 × 12%) |
| Examen final | 40% |

< 25% à l'examen \Rightarrow échec au cours

- 5 devoirs
- 1^{er} cycle: équipe de deux ou individuel
- 2^e/3^e cycles: individuellement
- ~2-3 semaines par devoir

Pas de retards permis:

- Solutions présentées en classes
- Calendrier clairement annoncé
- Charge de travail testée depuis plusieurs années

Plagiat non toléré:

- Chaque équipe rédige sa propre copie
- 0% en cas de plagiat + avertissement
- Demandez de l'aide si vous êtes en difficulté

Rétroaction non officielle vers la
mi-session

| Sujets | Devoirs |
|--|----------------|
| 1: Introduction | — |
| 2: Logique temporelle linéaire (LTL) | Devoir 1 |
| 3: LTL et systèmes de transitions | |
| 4: Automates de Büchi | Devoir 2 |
| 5: Automates de Büchi et LTL | |
| 6: Logique temporelle arborescente (CTL) | Devoir 3 |
| 7: CTL et systèmes de transitions | |
| 8: Semaine sans cours | |
| 9: Relâche | |

| Sujets | Devoirs |
|---|----------------|
| 10: Vérification symbolique | Devoir 4 |
| 11: Systèmes à pile | |
| 12: Systèmes à compteurs | Devoir 5 |
| 13: Sys. à compteurs / sys. probabilistes | |
| 14: Systèmes probabilistes | |
| 15: Révision | — |
| 16: Examen final | — |
| 17: Examen final | — |

Sur **rendez-vous**: bureau ou en ligne
et
1h / semaine

 mblondin.espaceweb.usherbrooke.ca/igl752

Introduction

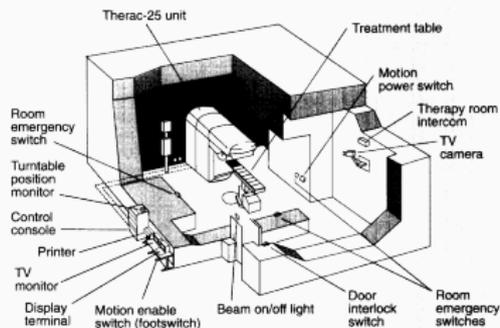
– **Systemes informatiques omniprésents**

- Logiciels
- Systemes embarqués
- Protocoles de communication, etc.

- **Systèmes informatiques omniprésents**
- **Fiabilité de plus en plus cruciale**
 - Systèmes critiques (voitures, médical, centrales, etc.)
 - Failles de sécurité
 - Systèmes de masse, etc.

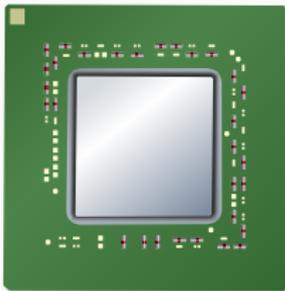
- **Systèmes informatiques omniprésents**
- **Fiabilité de plus en plus cruciale**
- **Systèmes de plus en plus complexes**
 - Systèmes concurrents
 - Systèmes distribués
 - Grande quantité de composantes, etc.

- **Systèmes informatiques omniprésents**
- **Fiabilité de plus en plus cruciale**
- **Systèmes de plus en plus complexes**
- **Erreurs peuvent être coûteuses**
 - Systèmes critiques: vies, sécurité, environnement, etc.
 - Production de masse: \$\$\$, temps



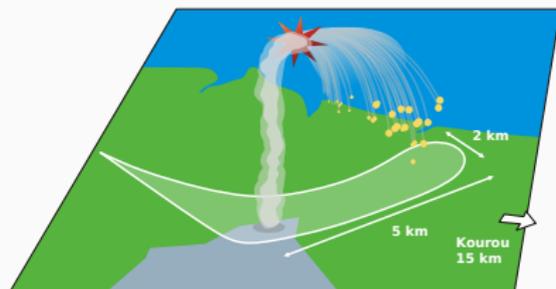
Therac-25 — radiothérapie (1985-87)

- Concurrence critique lors d'opérations trop rapides
- Doses 100 fois plus grandes de radiations
- Décès et blessures graves chez 6 personnes



Bogue FDIV du Pentium (1994)

- Bogue de l'unité à virgule flottante lors de divisions
- Dû à une table erronée de valeurs précalculées
- Coût d'environ 500 millions de dollars



Vol 501 du lanceur Ariane 5 (1996)

- Détruit après 36 secondes de vol
- Conversion de nombres en virgule flottante de 64 bits vers des entiers 16 bits (code réutilisé d'Ariane 4)
- Centaines de millions d'euros



Mars Pathfinder (1997)

- Mission compromise due à un bogue concurrent
- Bogue corrigé à distance en deux semaines



Panne d'électricité généralisée (2003)

- Concurrence critique qui a coupé une alarme d'urgence
- 10 millions personnes en Ontario et 45 millions aux É.-U.
- De 2 à 14 jours pour corriger la panne

```
// ...
if ((err = SSLFreeBuffer(&hashCtx)) != 0)
    goto fail;
if ((err = ReadyHash(&SSLHashSHA1, &hashCtx)) != 0)
    goto fail;
// ...
if ((err = SSLHashSHA1.update(&hashCtx, &signedParams)) != 0)
    goto fail;
    goto fail;
if ((err = SSLHashSHA1.final(&hashCtx, &hashOut)) != 0)
    goto fail;
err = sslRawVerify(...);
// ...
```

Bogue SSL d'Apple (2014)

- Bogue de gestion d'erreurs
- Vulnérable à des attaques

Éviter les bogues

- Choix du langage de programmation
- Méthodes de travail
- Bonnes pratiques de développement

+ **Avantages:** règle le problème à la source

– **Désavantages:** ne détecte pas les bogues, ne garantit pas l'absence de bogues

Relecture par les pairs

- Analyse statique et *manuelle* du code
- Détecte 31% à 93% des erreurs (médiane: 60%)
- Utilisé dans ~80% des projets

- + **Avantages:** simple, trouve la plupart des bogues
- **Désavantages:** difficile de détecter les erreurs dynamiques (systèmes concurrents, algorithmes, etc.)

Test

- Test dynamique du code
- 30% à 50% des coûts de développement
- Utilisé dans essentiellement tous les projets

- + **Avantages:** simple, trouve la plupart des bogues
- **Désavantages:** incomplet, généralement manuel, s'applique difficilement aux systèmes concurrents

Permet de raisonner **rigoureusement** sur des systèmes à l'aide de notions mathématiques comme la logique

Permet de raisonner **rigoureusement** sur des systèmes à l'aide de notions mathématiques comme la logique

« Formal methods should be part of the education of every computer scientist and software engineer, just as the appropriate branch of applied maths is a necessary part of the education of all other engineers. »

— Rapport de la NASA et FAA

Vérification déductive

- correction décrite en énoncés mathématiques
- on prouve *formellement* ces énoncés
- à l'aide d'outils: assistants de preuve, solveurs logique

+ **Avantages:** complet

– **Désavantages:** fastidieux, en bonne partie manuel, difficile pour les systèmes concurrents

Model checking

- système représenté par un modèle mathématique
- exploration de *tous* les comportements du système
- fait de façon algorithmique

+ **Avantages:** automatique, trouve les bogues et prouve leur absence

– **Désavantages:** plus difficile avec les systèmes de grande taille (ou infinis), dépend de la validité du modèle

Model checking

- système représenté par un modèle mathématique
- exploration de *tous* les comportements du système
- fait de façon algorithmique

Sujet de ce cours

Ensemble de méthodes qui:

- vérifient si un système satisfait sa spécification
- fonctionnent automatiquement
- prouvent la correction ou identifient un contre-exemple

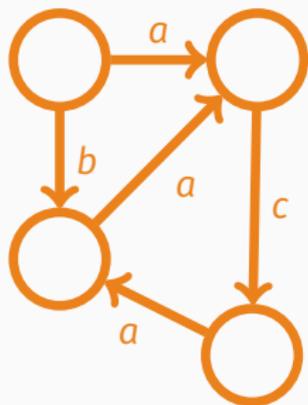
- **Système:** programme, circuit, protocole, etc.
- **Spécification:** ce que le système doit faire

- **Système:** programme, circuit, protocole, etc.
- **Spécification:** ce que le système doit faire

Système satisfait **spécification?**

Model checking

- **Système:** programme, circuit, protocole, etc.
- **Spécification:** ce que le système doit faire

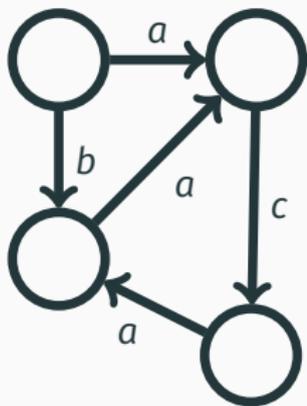


satisfait

spécification?

Modélisation

- **Système:** programme, circuit, protocole, etc.
- **Spécification:** ce que le système doit faire



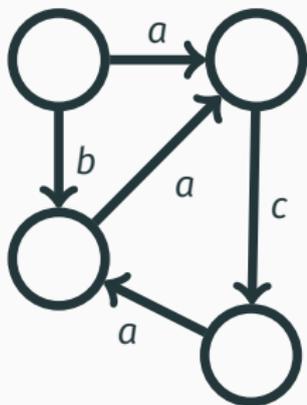
\models

φ

?

Propriété logique

Déterminer à l'aide d'un **algorithme**:



\equiv

\varnothing

?

Avantages

- s'applique à une grande variété de systèmes
- possible de vérifier seulement certaines propriétés
- ne considère pas seulement les erreurs probables
- contre-exemples lors de détection d'erreur
- automatique!

Désavantages

- moins approprié pour systèmes orientés «données» plutôt que «contrôle»
- vérifie un modèle du système, pas le système lui-même
- se bute à des problèmes de complexité/décidabilité pour les systèmes de grande taille ou infinis

- **Vérification du standard IEEE Futurebus+:** détection de bogues après plusieurs années de développement; modèle de plus de 10^{30} états
- **Outils de *model checking* pour C, C++, Java:** par ex. développés et utilisés par Microsoft et la NASA; utilisés pour vérifier des pilotes
- **Matériel:** par ex. 24% des erreurs d'un bus mémoire vérifié par IBM ont été découvertes par *model checking*; utilisé par d'autres grandes compagnies comme Intel

Outils: SPIN, NuSMV, PRISM, etc.



Infer:

« Without Infer, multithreading in News Feed would not have been tenable. » — 



Clarke



Emerson



Sifakis

Prix Turing 2007

Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. *# section critique*
4. x = faux

Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. y = faux

Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. *# section critique*
4. x = faux

Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. y = faux

**Possible d'atteindre les
deux sections critiques simultanément?**

Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. *# section critique*
4. x = faux

Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. y = faux



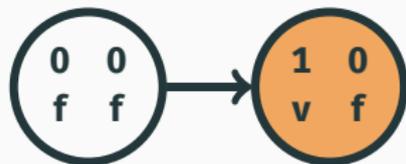
Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. *# section critique*
4. x = faux

Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. y = faux



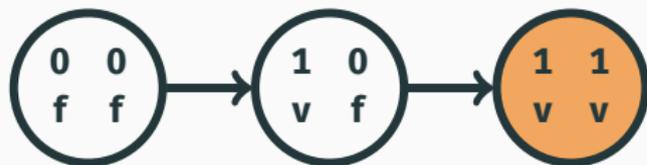
Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. *# section critique*
4. x = faux

Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. y = faux



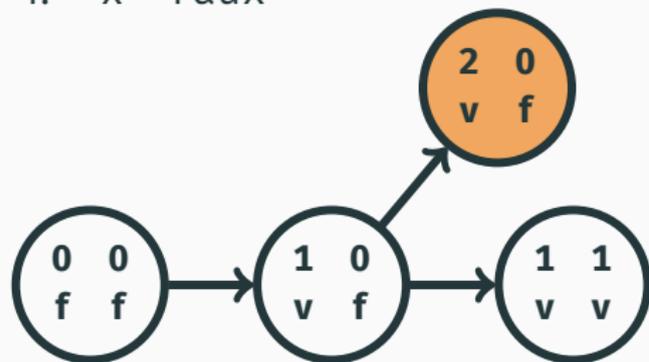
Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. $x = \text{vrai}$
2. tant que y : pass
3. *# section critique*
4. $x = \text{faux}$

Processus B

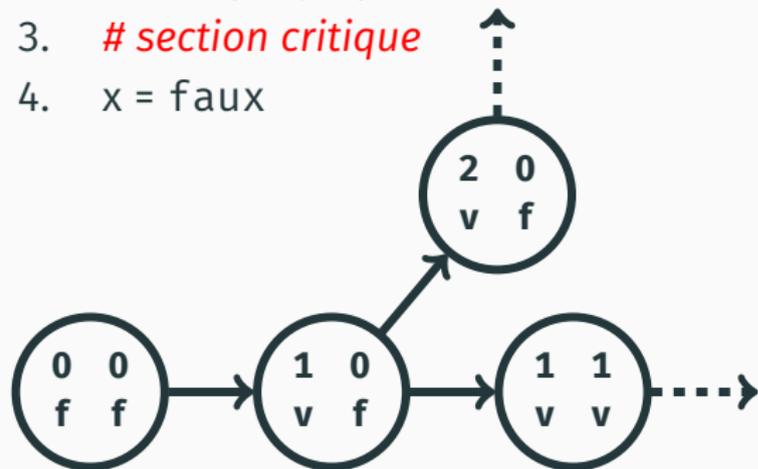
0. tant que vrai:
1. $y = \text{vrai}$
2. si x alors:
3. $y = \text{faux}$
4. tant que x : pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. $y = \text{faux}$



Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. *# section critique*
4. x = faux



Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. y = faux

Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. *# section critique*
4. x = faux

Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. y = faux



non accessible ?

Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. *# section critique*
4. x = faux

Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. y = faux



Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. *# section critique*
4. x = faux

Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. y = faux



Oui!

Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. *# section critique*
4. x = faux

Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. y = faux

**Processus B peut toujours
atteindre sa section critique?**

Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. *# section critique*
4. x = faux

Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. *# section critique*
7. y = faux



Un exemple

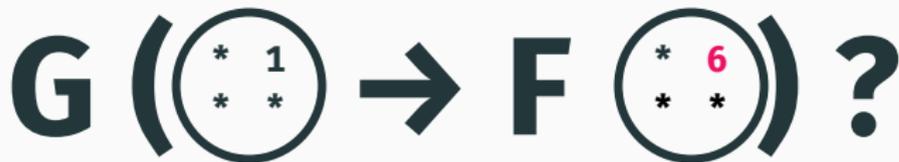
Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. # section critique
4. x = faux

Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. # section critique
7. y = faux

Non...



Un exemple

Processus A

0. tant que vrai:
1. x = vrai
2. tant que y: pass
3. # section critique
4. x = faux

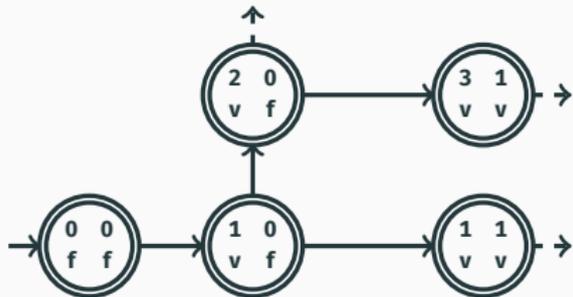
Processus B

0. tant que vrai:
1. y = vrai
2. si x alors:
3. y = faux
4. tant que x: pass
5. goto 1
6. # section critique
7. y = faux



Processus B peut toujours
atteindre sa section critique

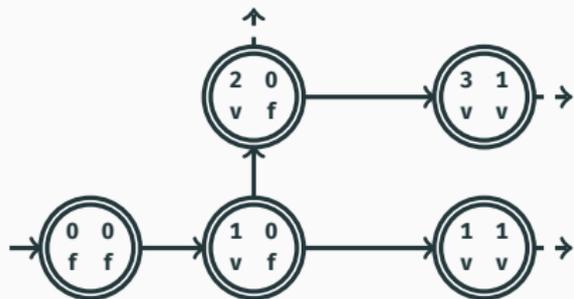
Un exemple



≡

Processus B peut toujours
atteindre sa section critique

Un exemple

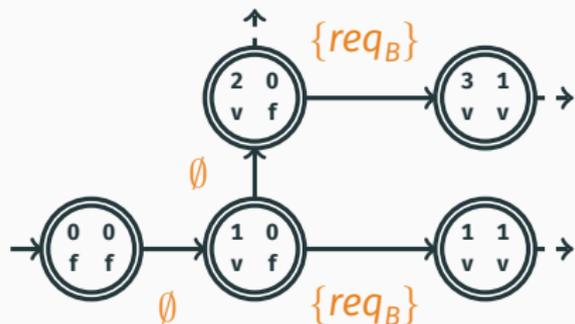


\equiv

Processus B peut toujours
atteindre sa section critique

$$P = \{req_B, crit_B\}$$

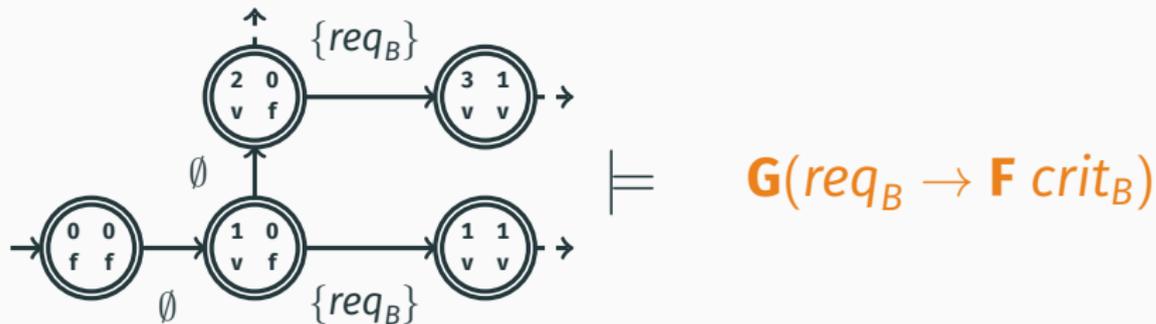
Un exemple



Processus B peut toujours
atteindre sa section critique

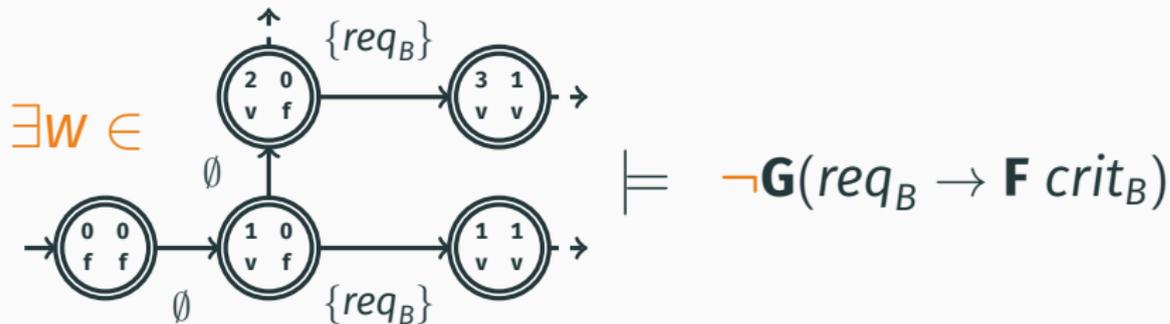
$$P = \{req_B, crit_B\}$$

Un exemple



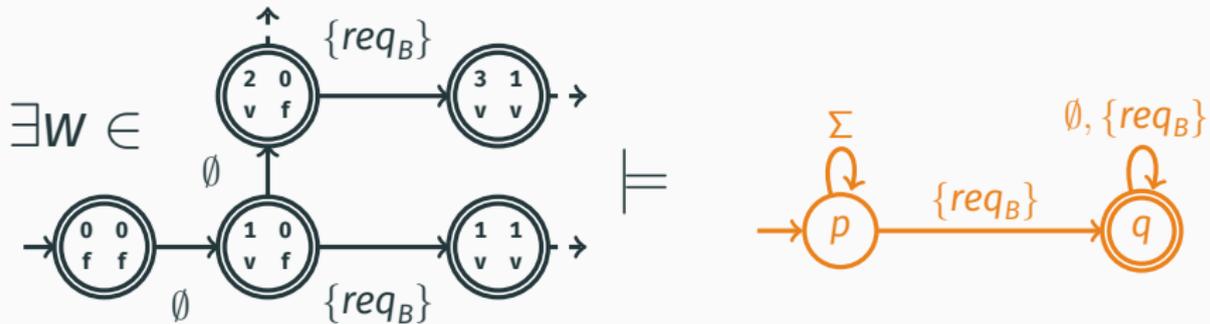
$$P = \{req_B, crit_B\}$$

Un exemple



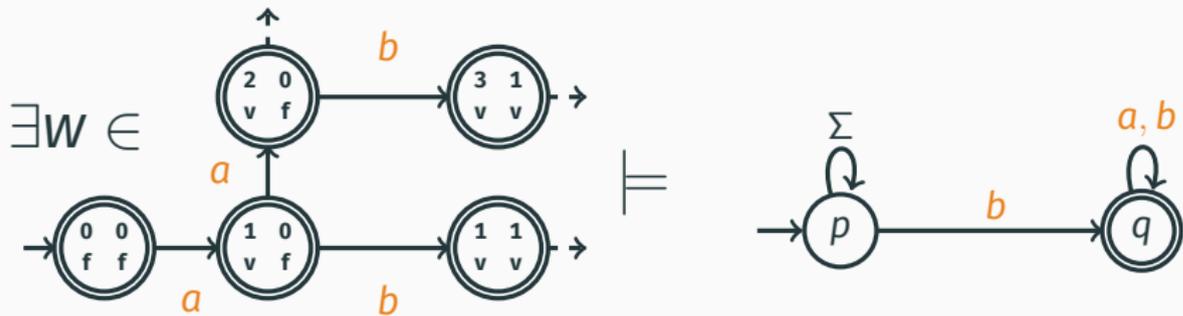
$$P = \{req_B, crit_B\}$$

Un exemple



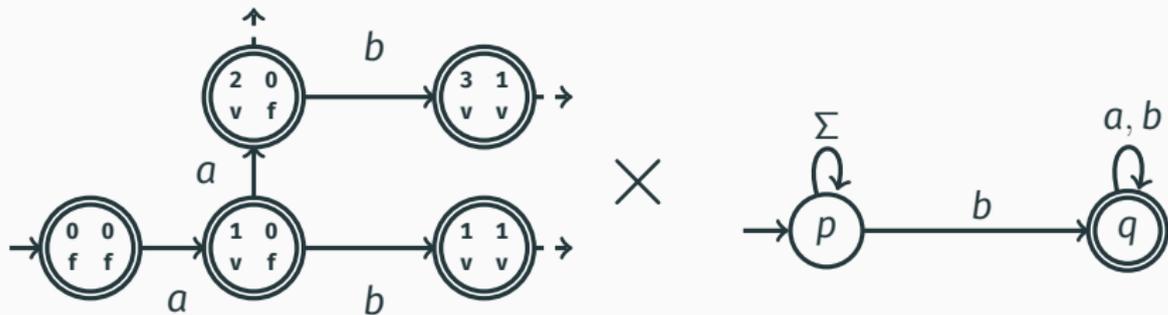
$$\Sigma = \{\emptyset, \{req_B\}, \{crit_B\}, \{req_B, crit_B\}\}$$

Un exemple



$$\Sigma = \{a, b, c, d\}$$

Un exemple



Systeme ne satisfait pas la propriété



Les deux automates acceptent un mot en commun

Démonstration

- **Modélisation:** systèmes de transitions (sem. 2), sys. à pile (sem. 11), réseaux de Petri (sem. 12–13), sys. proba. (sem. 13–14)
- **Spécification:** LTL (sem. 2–3), CTL (sem. 6–7), PCTL (sem. 15)
- **Vérification:**
 - **Algorithmes:** LTL via automates de Büchi (sem. 4–5), CTL via saturation (sem. 7), sys. à piles (sem. 11), réseaux de Petri (sem. 13–14), chaînes de Markov (sem. 14–15)
 - **Struct. de données:** diagrammes de décision binaire (sem. 10)

À mardi prochain!