Introduction

IGL502/IGL752 – Techniques de vérification et de validation

Automne 2022

Enseignant

Michael Blondin

@ michael.blondin@usherbrooke.ca

info.usherbrooke.ca/mblondin

bureau D4-1024-1 au 1er étage

Horaire

Cours magistraux	**Cours magistraux** (+ exercices)
Jeudi	Vendredi
15h30 – 17h20	11h30 – 12h20
D4-2021	D4-2021

But du cours

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

Atouts

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

Cours connexes

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

Contenu

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

Contenu

0. Introduction **2h**

- Motivation
- Vérification formelle
- Exemples

Contenu

1. Systèmes de transitions **1h**

- Systèmes de transitions
- Exécutions
- Exemples

Contenu

2. Logique temporelle linéaire (LTL) **6h**

- Syntaxe
- Sémantique
- Spécifier des propriétés
- Équivalences

Contenu

3. Automates de Büchi **3h**

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

Contenu

4. Automates de Büchi et LTL **3h**

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

Contenu

5. Logique temporelle arborescente (CTL) 6h

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

Contenu

6. Vérification symbolique **3h**

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

Contenu

7. Systèmes à pile **3h**

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

Contenu

8. Systèmes à compteurs **3h**

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

Contenu

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

Matériel

- 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

Évaluation

Devoirs	60% $(5 \times 12\%)$
Examen final	40%

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

Devoirs

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

Rétroaction non officielle vers la mi-session

Calendrier

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	

Calendrier

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	—

Disponibilités

Sur **rendez-vous**: bureau ou en ligne

et

1h / semaine

Page Web

 info.usherbrooke.ca/mblondin/igl752

Introduction

Motivation

– Systèmes informatiques omniprésents

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

Motivation

– Systèmes informatiques omniprésents

– Fiabilité de plus en plus cruciale

- Systèmes critiques (voitures, médical, centrales, etc.)
- Failles de sécurité
- Systèmes de masse, etc.

Motivation

– Systèmes informatiques omniprésents

– Fiabilité de plus en plus cruciale

– Systèmes de plus en plus complexes

- Systèmes concurrents
- Systèmes distribués
- Grande quantité de composantes, etc.

Motivation

– Systèmes informatiques omniprésents

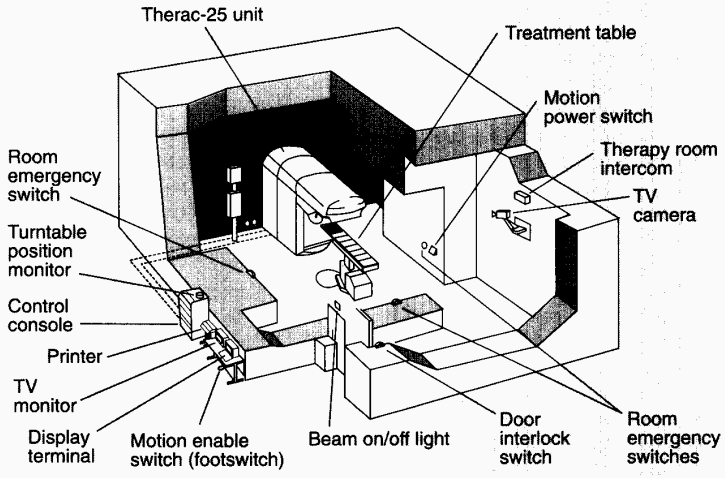
– Fiabilité de plus en plus cruciale

– Systèmes de plus en plus complexes

– Erreurs peuvent être coûteuses

- Systèmes critiques: vies, sécurité, environnement, etc.
- Production de masse: $$$, temps

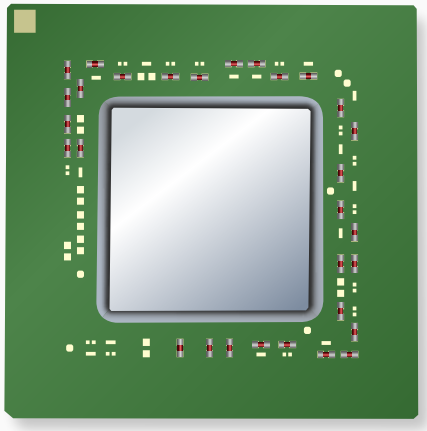
Motivation



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

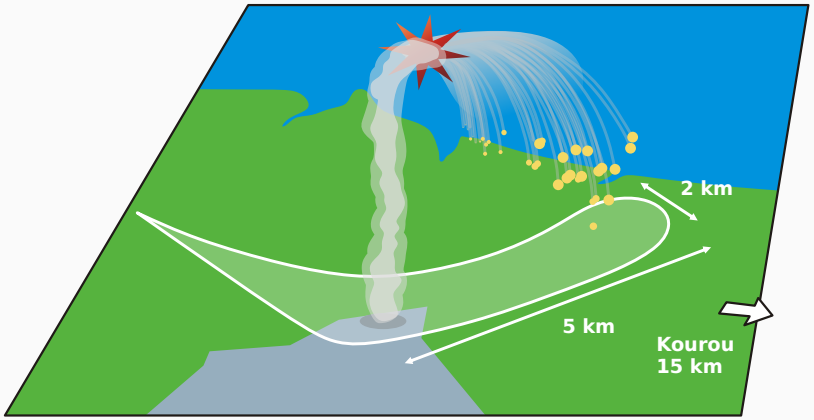
Motivation



Bogue FDIV du Pentium (1994)

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

Motivation



Vol 501 du lanceur Ariane 5 (1996)

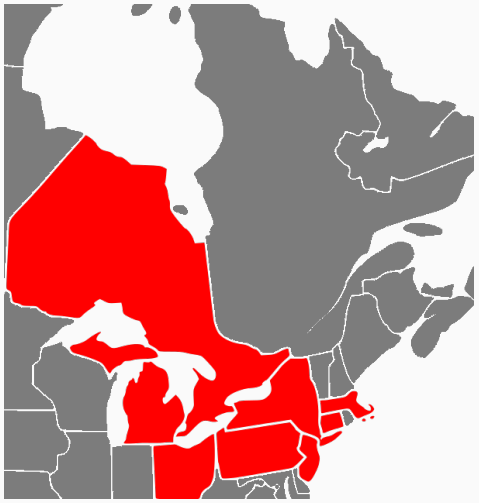
- Détruit après 36 secondes de vol
- Conversion de nombres en virgule flottante de 64 bits vers des entiers 16 bits (code réutilisé d'Ariane 4)
- Centaines de millions d'euros

Motivation

Mars Pathfinder (1997)

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

Motivation



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

Motivation

```
// ...
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

Méthodes classiques

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

Méthodes classiques

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.)

Méthodes classiques

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

Méthodes formelles

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

Méthodes formelles

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*

Méthodes formelles

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

Méthodes formelles

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

Model checking

Ensemble de méthodes qui:

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

Model checking

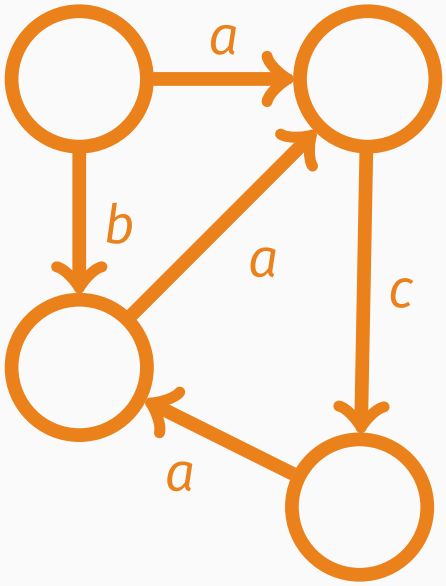
- **Système:** programme, circuit, protocole, etc.
- **Spécification:** ce que le système doit faire

- **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

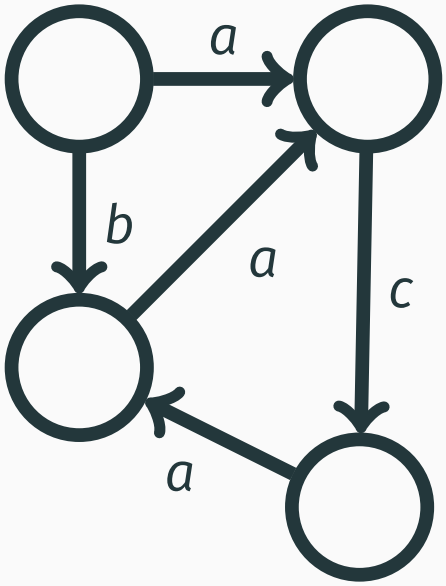


satisfait **spécification?**

Modélisation

Model checking

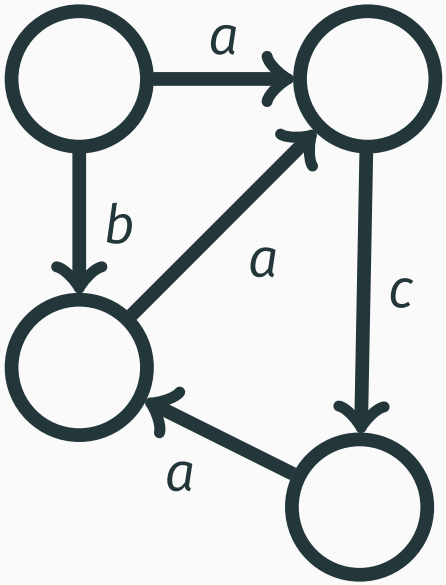
- **Système:** programme, circuit, protocole, etc.
- **Spécification:** ce que le système doit faire



$\models \varphi$?

Propriété logique

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



$\models \quad \varphi \quad ?$

Model checking: (dés)avantages

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!

Model checking: (dés)avantages

Désavantages

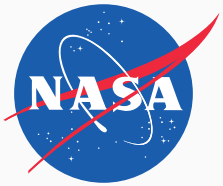
- moins approprié pour systèmes orientés «données» plutôt que «contrôle»
- vérifie un modèle du système, pas le système lui-même
- se bute à des problèmes de complexité/décidabilité pour les systèmes de grande taille ou infinis

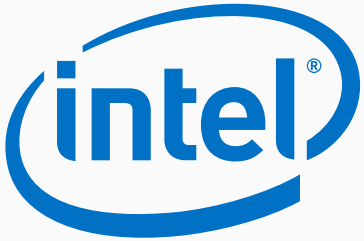
Model checking: usage et impact

- **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

Model checking: usage et impact

Outils: `SPIN`, `NuSMV`, `PRISM`, etc.





Infer:

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

Model checking: usage et impact

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?

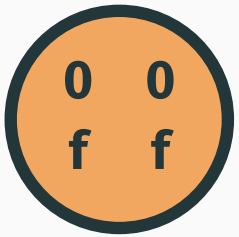
Un exemple

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
```



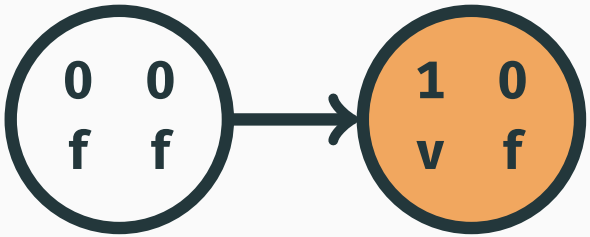
Un exemple

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
```



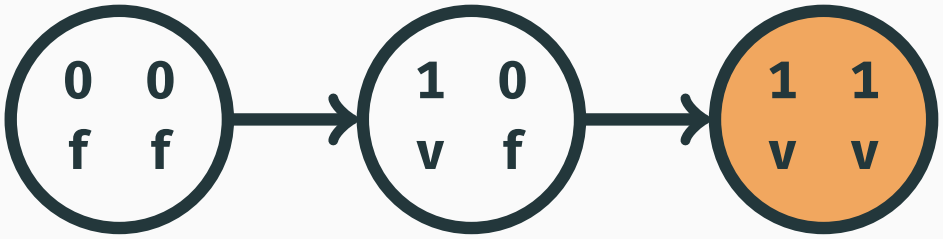
Un exemple

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
```



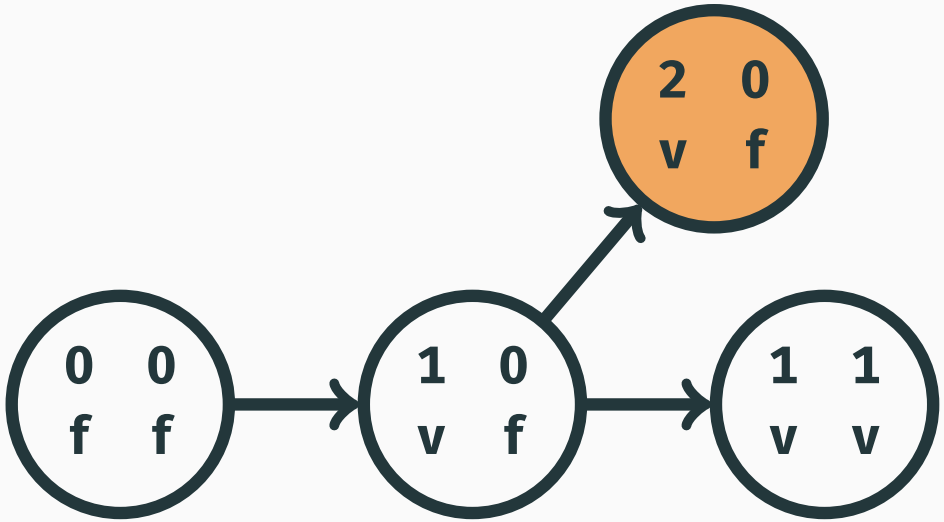
Un exemple

Processus A

```
0. tant que vrai:
1.    x = 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
```



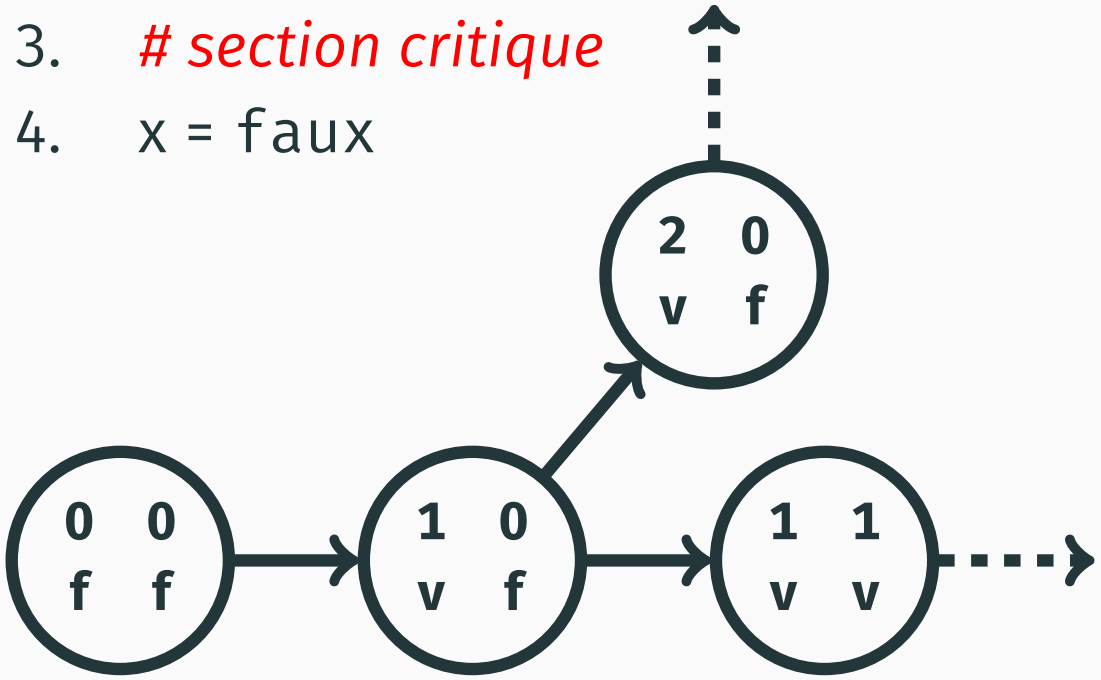
Un exemple

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
```

non accessible ?

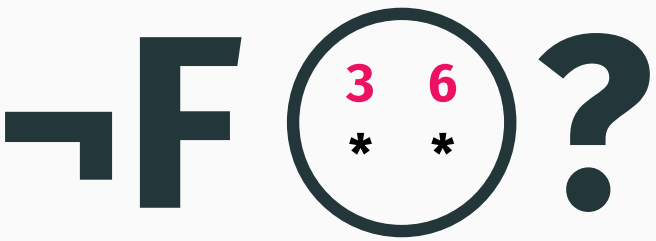
Un exemple

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
```



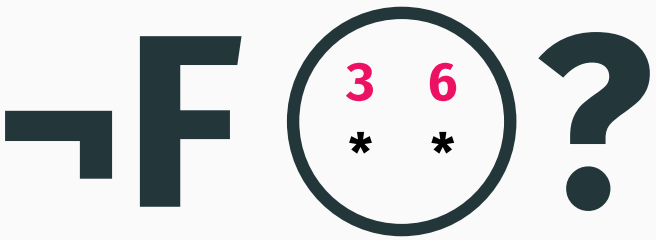
Un exemple

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
```



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?

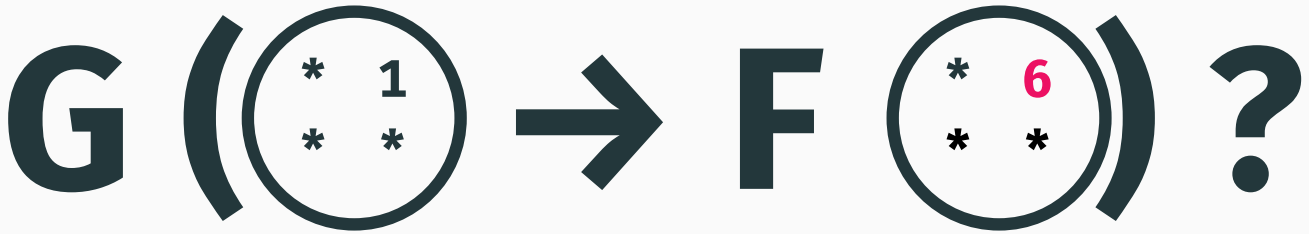
Un exemple

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

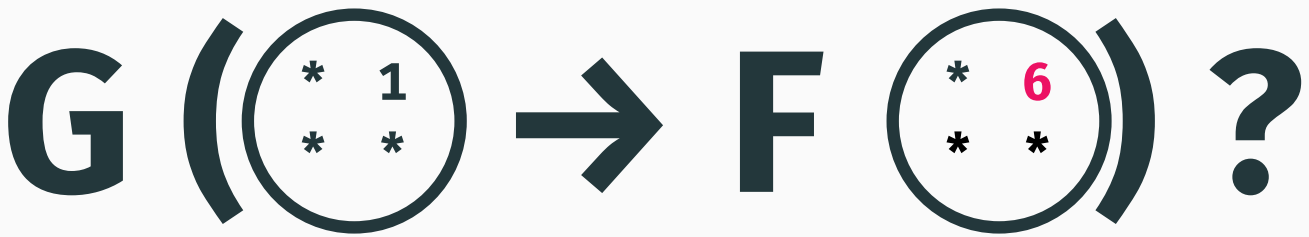
Processus A

```
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

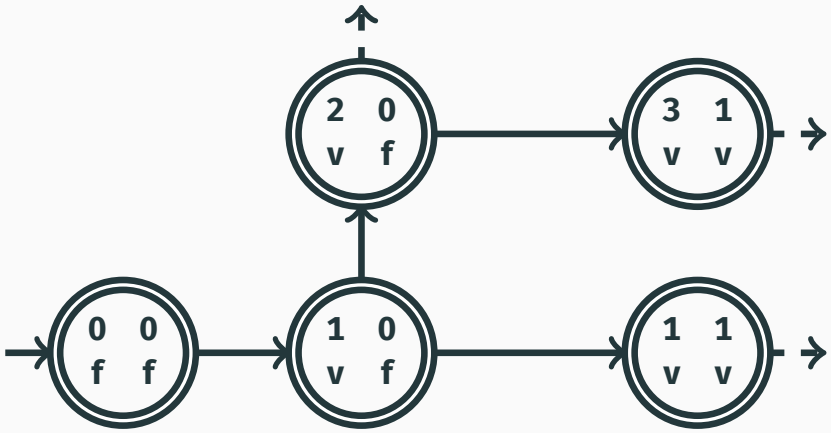
```
0. tant que vrai:
1.     x = vrai
2.     tant que y: pass
3.     # section critique
4.     x = faux
```

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
```

$\models$ Processus B peut toujours atteindre sa section critique

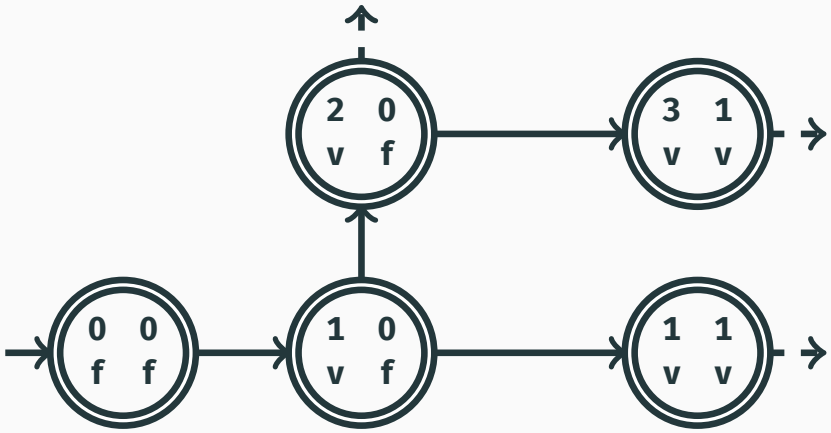
Un exemple



$\models$

Processus B peut toujours atteindre sa section critique

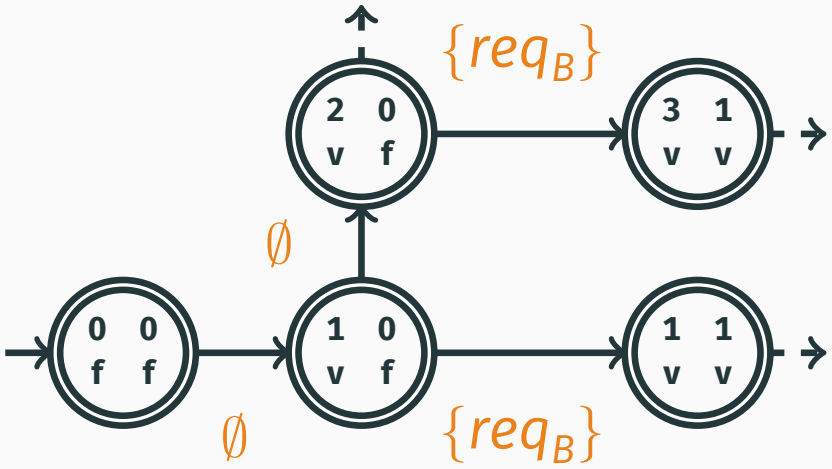
Un exemple



$\models$ Processus B peut toujours atteindre sa section critique

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

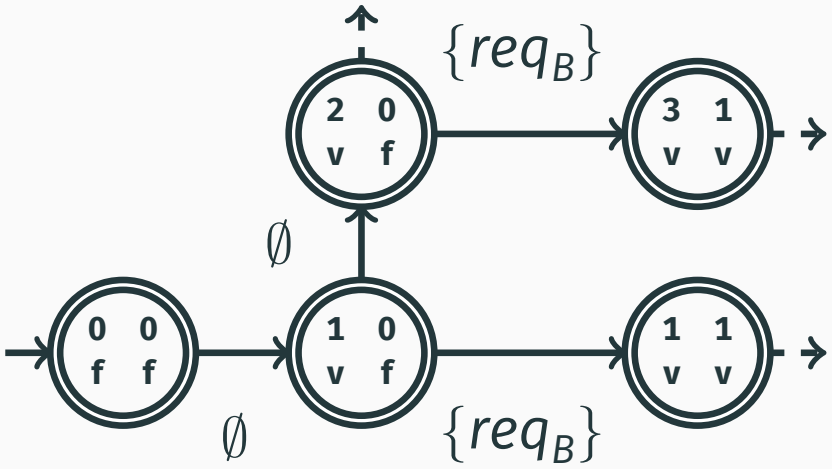
Un exemple



$\models$ Processus B peut toujours atteindre sa section critique

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

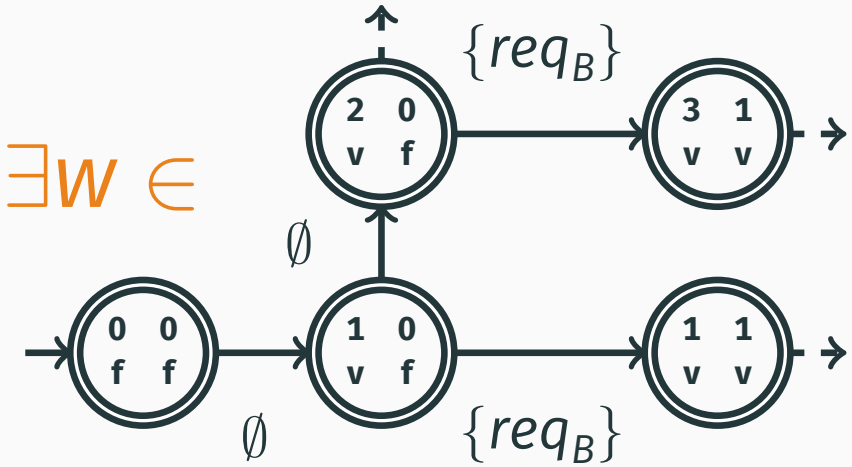
Un exemple



$\models$ $\mathbf{G}(req_B \rightarrow \mathbf{F}\ crit_B)$

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

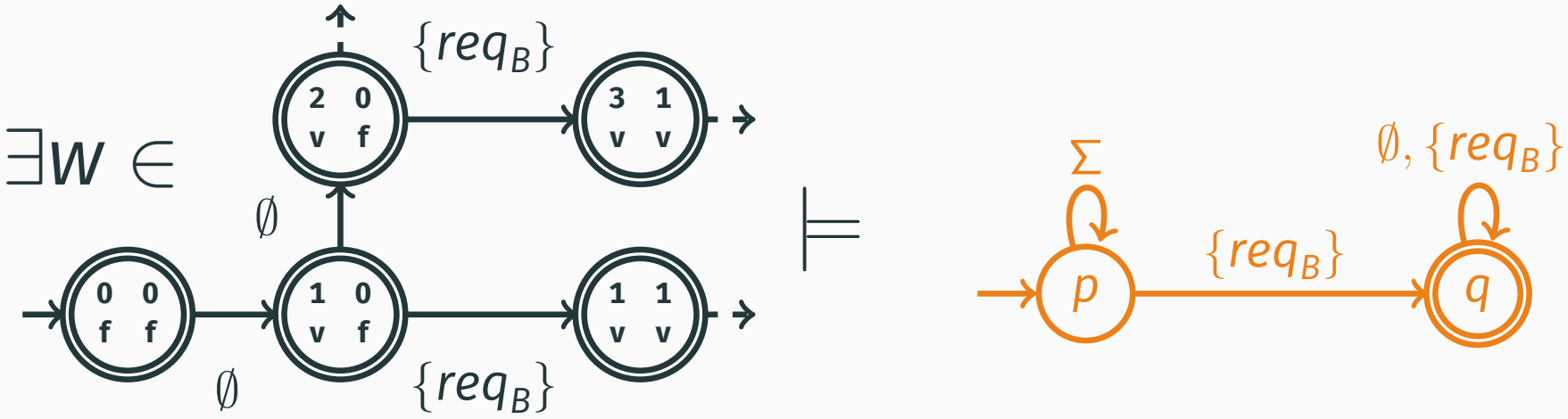
Un exemple



$$\models \quad \neg \mathbf{G}(req_B \rightarrow \mathbf{F}\, crit_B)$$

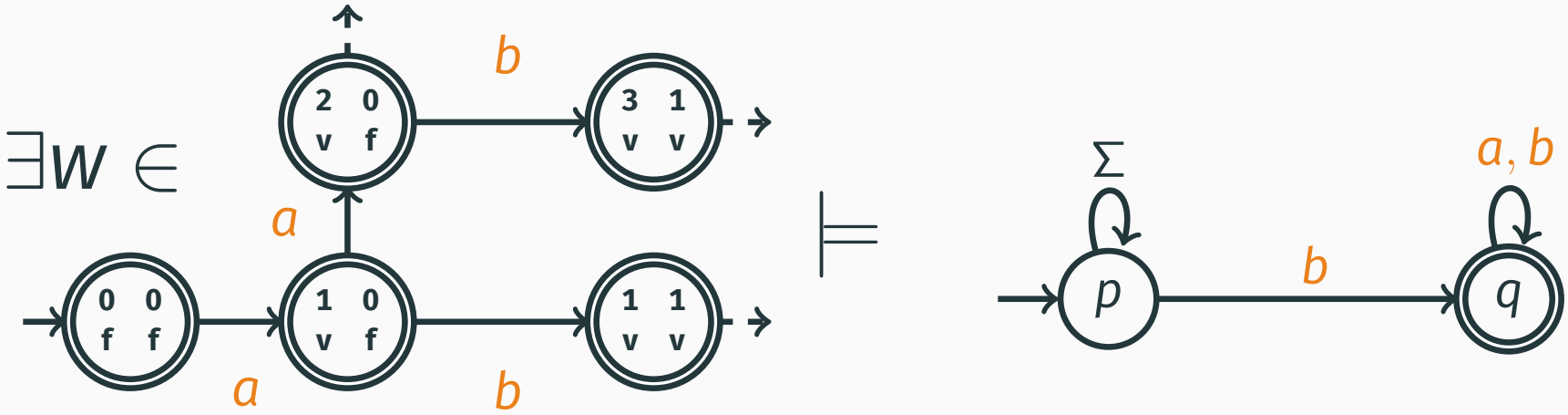
$$P = \{req_B, crit_B\}$$

Un exemple



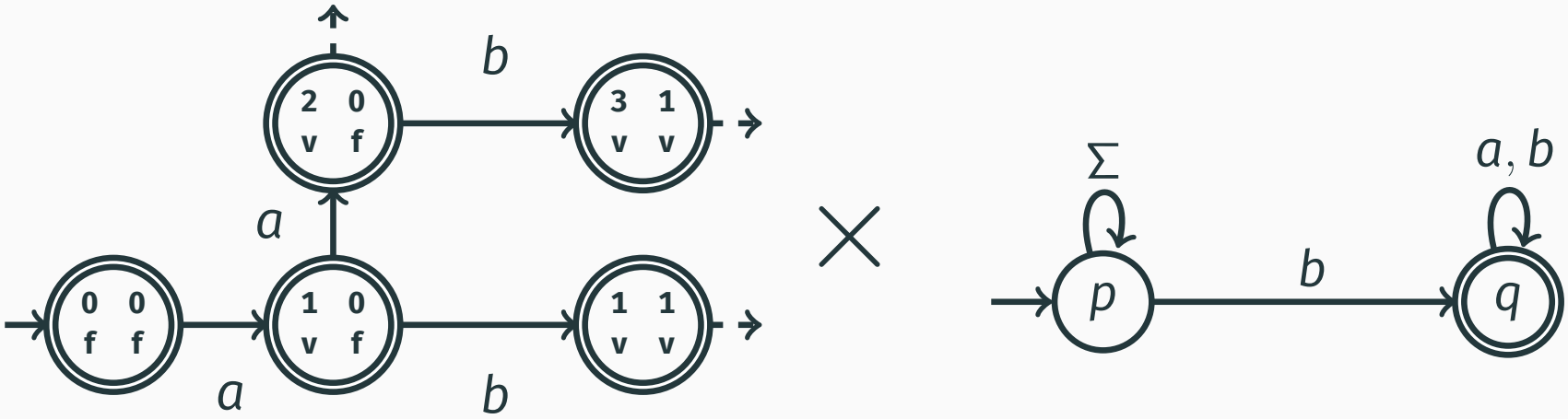
$$\Sigma = \{\emptyset, \{req_B\}, \{crit_B\}, \{req_B, crit_B\}\}$$

Un exemple



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

Un exemple



Système ne satisfait pas la propriété

$\Longleftrightarrow$

Les deux automates acceptent un mot en commun

Démonstration

Aspects couverts

- **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)