

Modèles canoniques pour la théorie des automates

Antonio Casares

Concours 06/02 CNRS
12 mars 2025

2015 - 2018	Licence en mathématiques (<i>Prix fin d'études</i>) <i>projet : Valuations et corps de Hardy</i>	Valladolid 
2018 - 2019	M1 Algèbre et cryptographie	UVSQ Versailles 
2019 - 2020	M2 LMFI en logique (<i>Bourse PGSM-FSMP</i>) <i>stage avec T. Colcombet, N. Fijalkow</i>	Université Paris Cité 
2020 - 2023	Doctorat (<i>Prix de thèse sciences-technologies, Université de Bordeaux</i>) <i>avec N. Fijalkow, I. Walukiewicz</i>	Bordeaux 
2023 -	Postdoc <i>avec M. Bojańczyk</i>	Varsovie 

THÉMATIQUES DE RECHERCHE

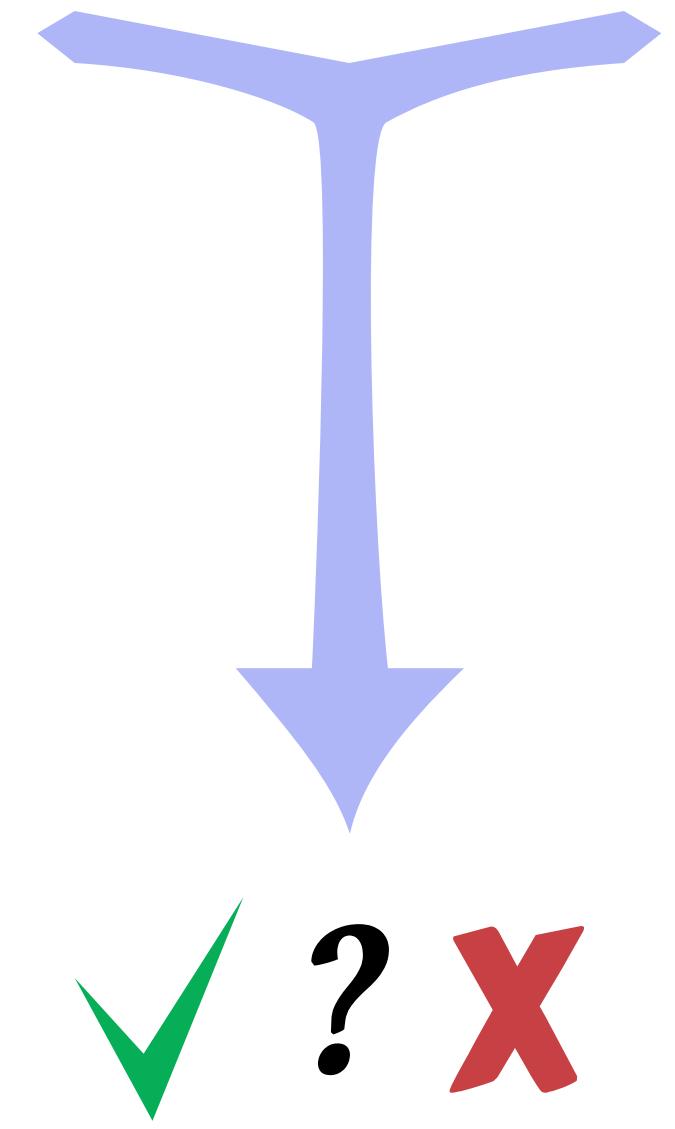
AUTOMATES, JEUX ET LOGIQUE
POUR LA VÉRIFICATION FORMELLE

Motivation

Model checking

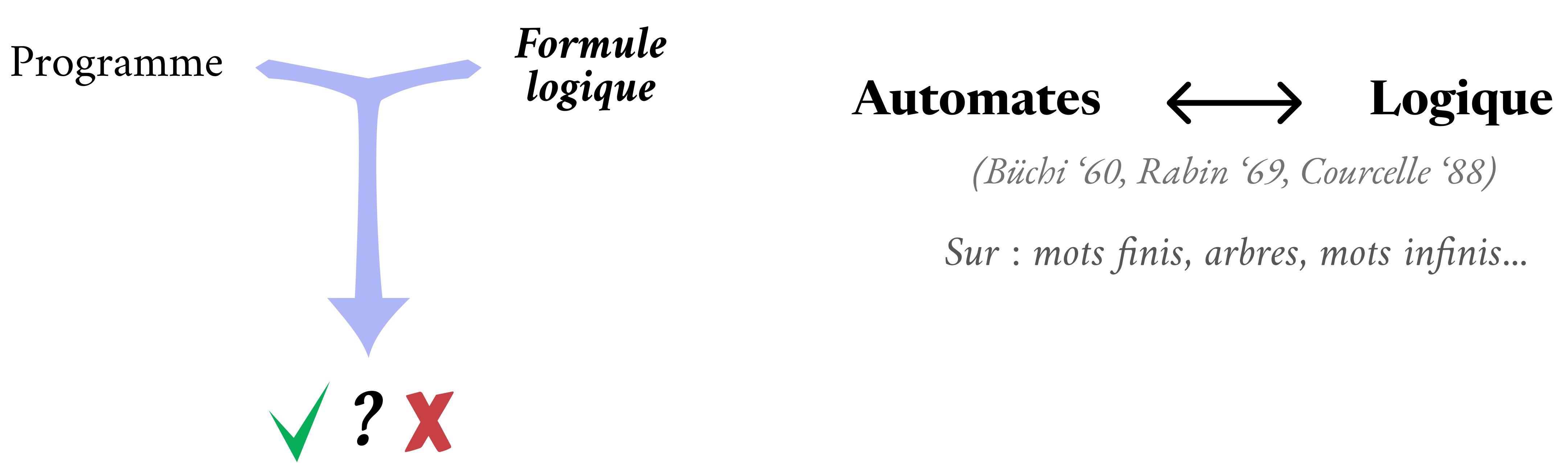
Programme

Spécification



Motivation

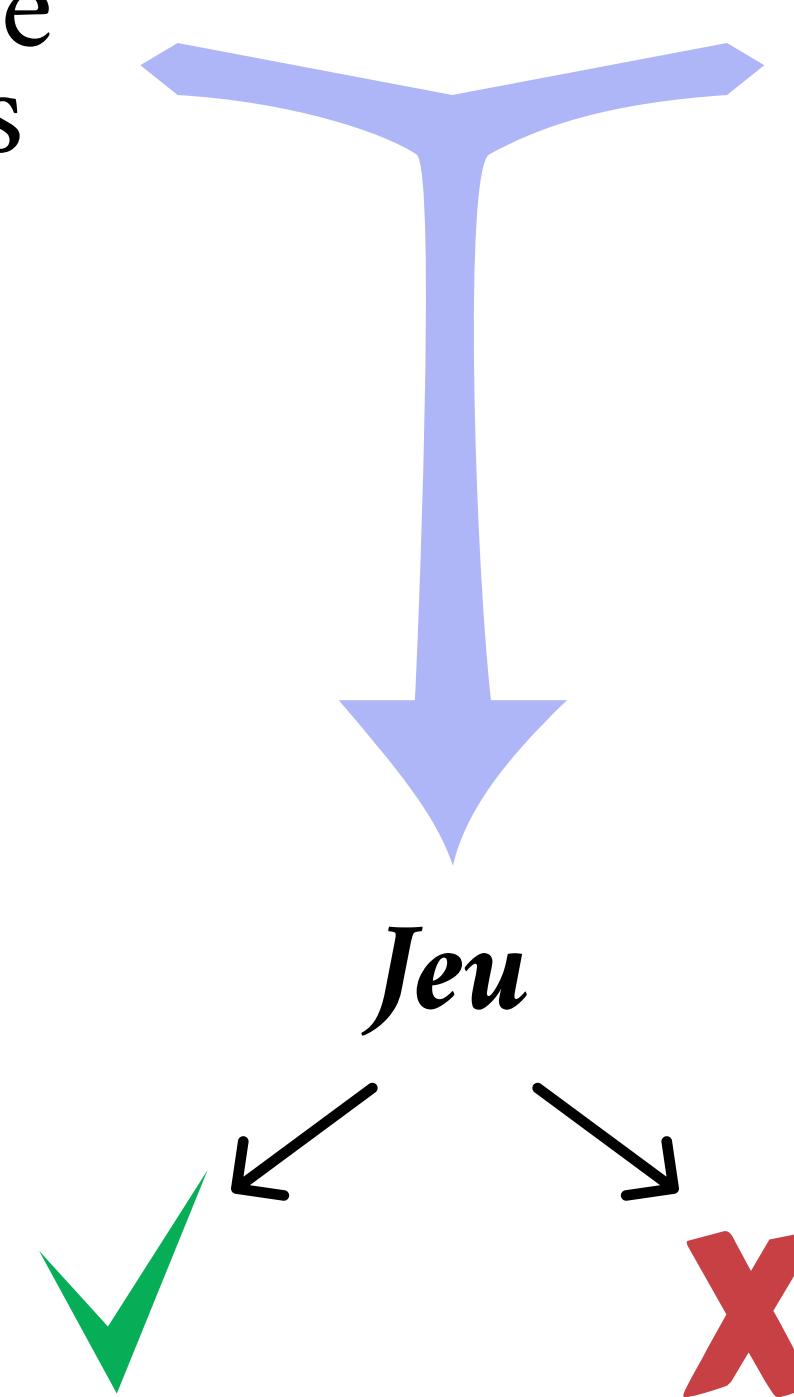
Model checking



Motivation

Model checking

Système de
transitions



*Formule
logique*

Automates

Logique

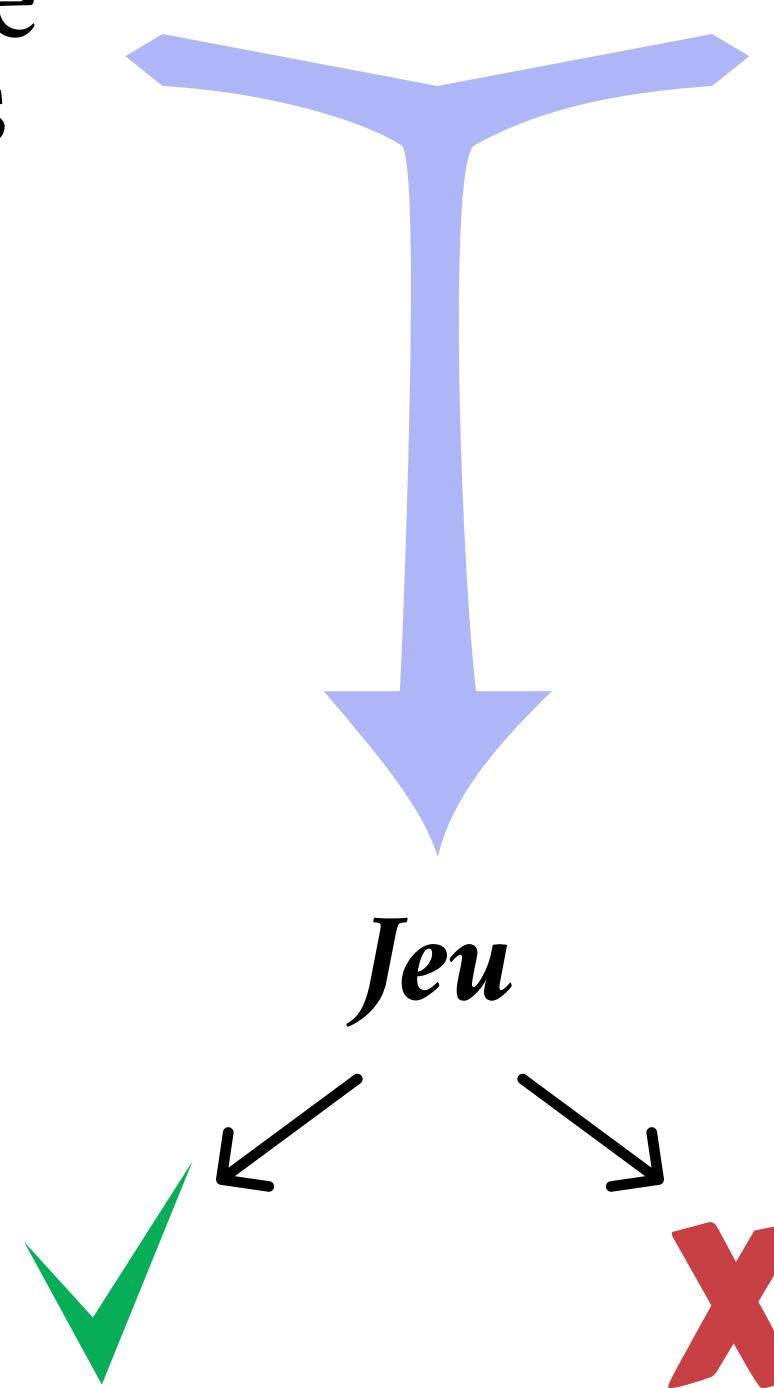
(Büchi '60, Rabin '69, Courcelle '88)

Sur : mots finis, arbres, mots infinis...

Motivation

Model checking

Système de transitions



Formule logique

Automates \longleftrightarrow **Logique**

(Büchi '60, Rabin '69, Courcelle '88)

Sur : mots finis, arbres, mots infinis...

Mots infinis \longleftrightarrow Traces d'exécution
de programmes non terminants

Travaux effectués

plus de 20 collaborateurs·rices dans 7 pays



Automates sur les mots infinis

Minimisation

CSL'22

ICALP'22

CSL'25

Transformations

ICALP'21 - TheoretCS

TACAS'22

MFCS'24

Travaux effectués

plus de 20 collaborateurs·rices dans 7 pays



Jeux sur des graphes

Complexité
des stratégies

Algorithmes

LICS'24

CONCUR'22 - IJCAI'23 - LMCS

ICALP'23 - LMCS

Preprint '25

*Chapitre dans livre
“Games on Graphs”*

SOSA'24

TACAS'25

Automates sur les mots infinis

Minimisation

CSL'22

ICALP'22

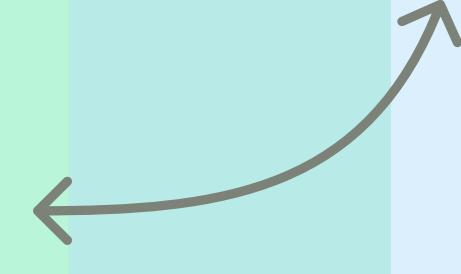
CSL'25

Transformations

ICALP'21 - TheoretCS

TACAS'22

MFCS'24



Travaux effectués

plus de 20 collaborateurs·rices dans 7 pays



Journaux

Jeux sur des graphes

Complexité
des stratégies

Algorithmes

LICS'24

CONCUR'22 - IJCAI'23 - LMCS

ICALP'23 - LMCS

Preprint '25

*Chapitre dans livre
“Games on Graphs”*

SOSA'24

TACAS'25

Automates sur les mots infinis

Minimisation

CSL'22

ICALP'22

CSL'25

Transformations

ICALP'21 - TheoretCS

TACAS'22

MFCS'24

Transducteurs

- Équivalence fonctions polyrégulières

- Complexité communication des fonctions régulières

(en cours)

Travaux effectués

plus de 20 collaborateurs·rices dans 7 pays



Journaux

Jeux sur des graphes

Complexité
des stratégies

Algorithmes

LICS'24

CONCUR'22 - IJCAI'23 - LMCS

ICALP'23 - LMCS

Preprint '25

*Chapitre dans livre
“Games on Graphs”*

SOSA'24

TACAS'25

Automates sur les mots infinis

Minimisation

CSL'22

ICALP'22

CSL'25

Transformations

ICALP'21 - TheoretCS

TACAS'22

MFCS'24

Logique et topologie

- MSO+Borel sur les arbres infinis
(conjecture de Shelah '75)

(en cours)

Transducteurs

- Équivalence
fonctions
polyrégulières

- Complexité
communication
des fonctions
régulières

(en cours)

Travaux effectués

plus de 20 collaborateurs·rices dans 7 pays



Jeux sur des graphes

Complexité
des stratégies

Algorithmes

LICS'24
*Caractérisation
de la positionnalité*

CONCUR'22 - IJCAI'23 - LMCS

ICALP'23 - LMCS

Preprint '25

Chapitre dans livre
“Games on Graphs”

SOSA'24

TACAS'25

Automates sur les mots infinis

Minimisation

CSL'22

ICALP'22

CSL'25

Transformations

ICALP'21 - TheoretCS

TACAS'22

Transformations
optimales

MFCS'24

Logique et topologie

- MSO+Borel sur les arbres infinis
(*conjecture de Shelah '75*)

(en cours)

Transducteurs

— Équivalence
fonctions
polyrégulières

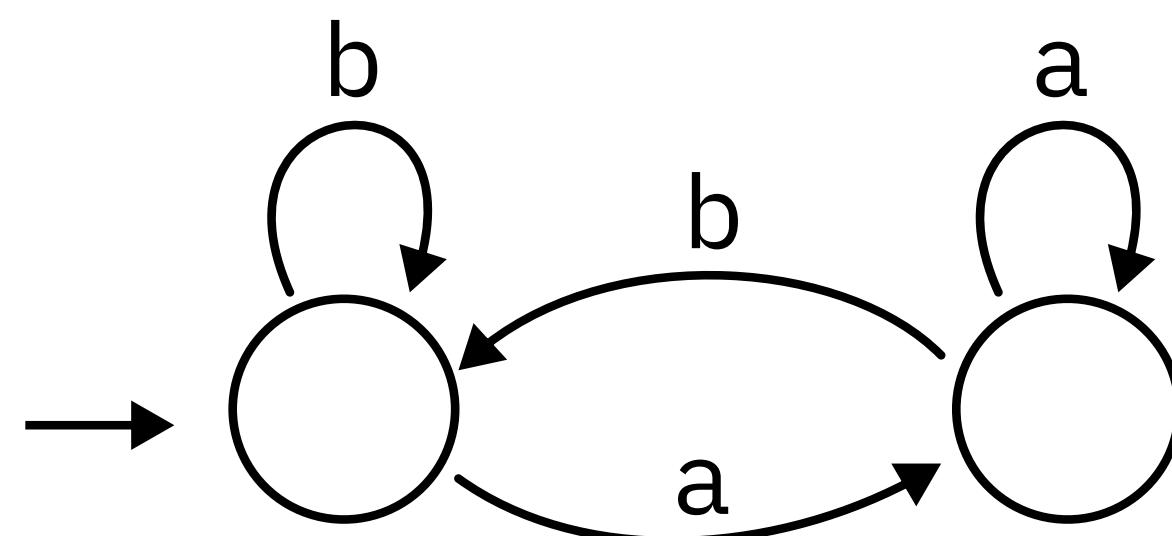
— Complexité
communication
des fonctions
régulières

(en cours)

Contribution : Décomposition d'automates sur les mots infinis

(ICALP'21 & TheoretCS, avec T. Colcombet, N. Fijalkow et K. Lehtinen)

Automates sur les mots infinis

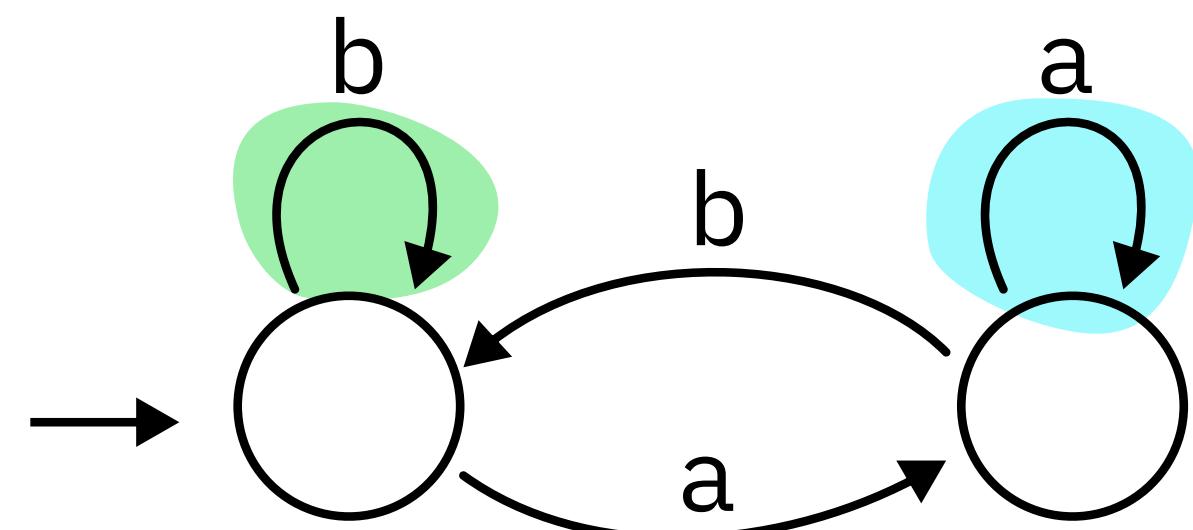


Entrée : aabbabaaaabb...

Contribution : Décomposition d'automates sur les mots infinis

(ICALP'21 & TheoretiCS, avec T. Colcombet, N. Fijalkow et K. Lehtinen)

Automates sur les mots infinis



Entrée : aabbabaaaabb...

L = Mots qui finissent par aaa... ou bbb...

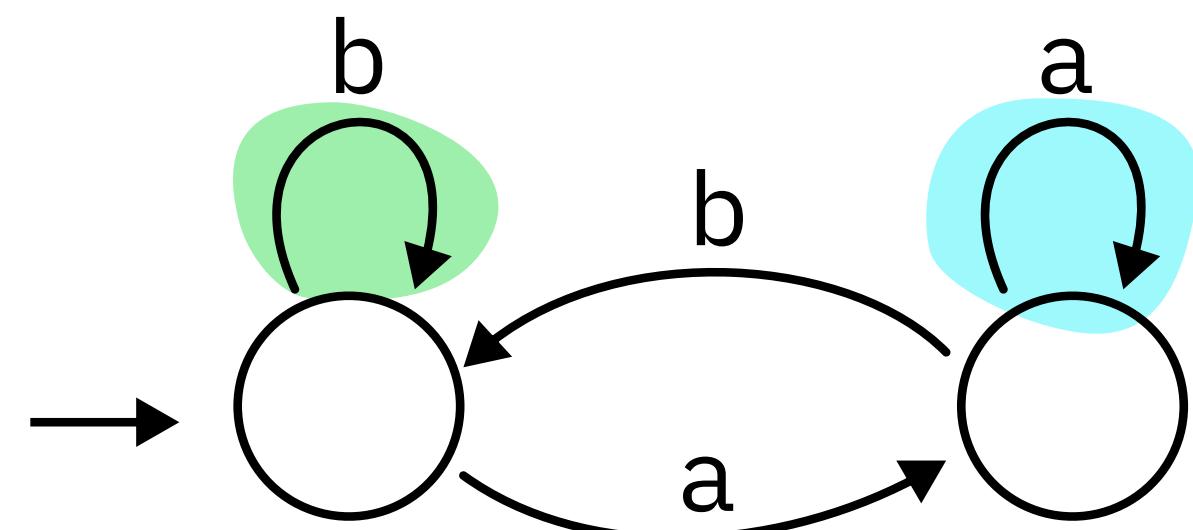
Condition d'acceptation (Muller) :

- Famille d'ensembles acceptants
 $\{ \text{ } \xrightarrow{\text{ }} \}$, $\{ \text{ } \xrightarrow{\text{ }} \}$
- Accepte si les transitions vues infiniment souvent forment un ensemble acceptant

Contribution : Décomposition d'automates sur les mots infinis

(ICALP'21 & TheoretiCS, avec T. Colcombet, N. Fijalkow et K. Lehtinen)

Automates sur les mots infinis



Entrée : aabbabaaaabb...

L = Mots qui finissent par aaa... ou bbb...

Condition d'acceptation (Muller) :

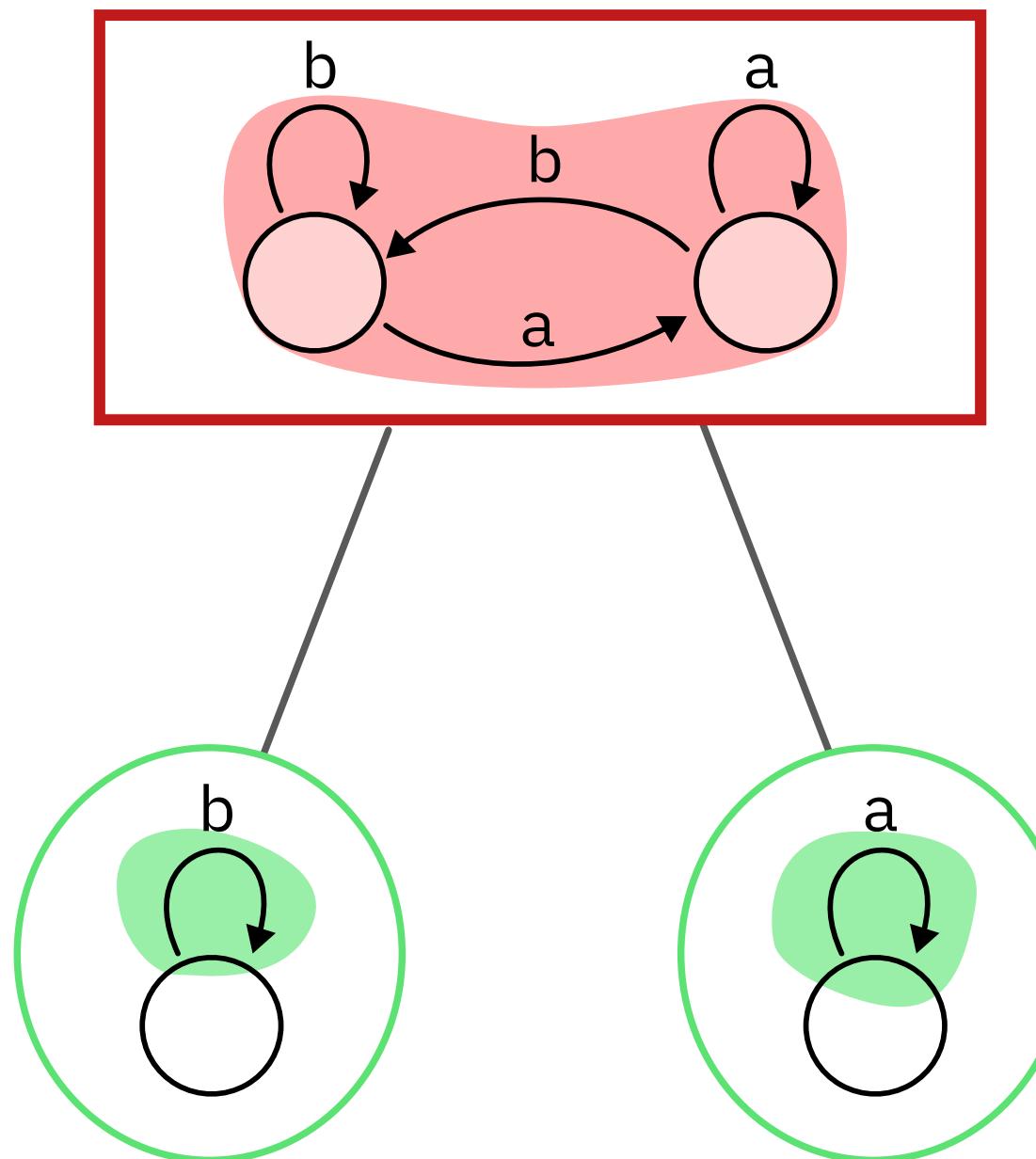
- Famille d'ensembles acceptants
 $\{ \text{ } \xrightarrow{\text{ }} \}$, $\{ \text{ } \xrightarrow{\text{ }} \}$
- Accepte si les transitions vues infiniment souvent forment un ensemble acceptant

Modèle bien établi

Structure complexe

CONTRIBUTION : DÉCOMPOSITION EN CYCLES ALTERNANTS (ACD)

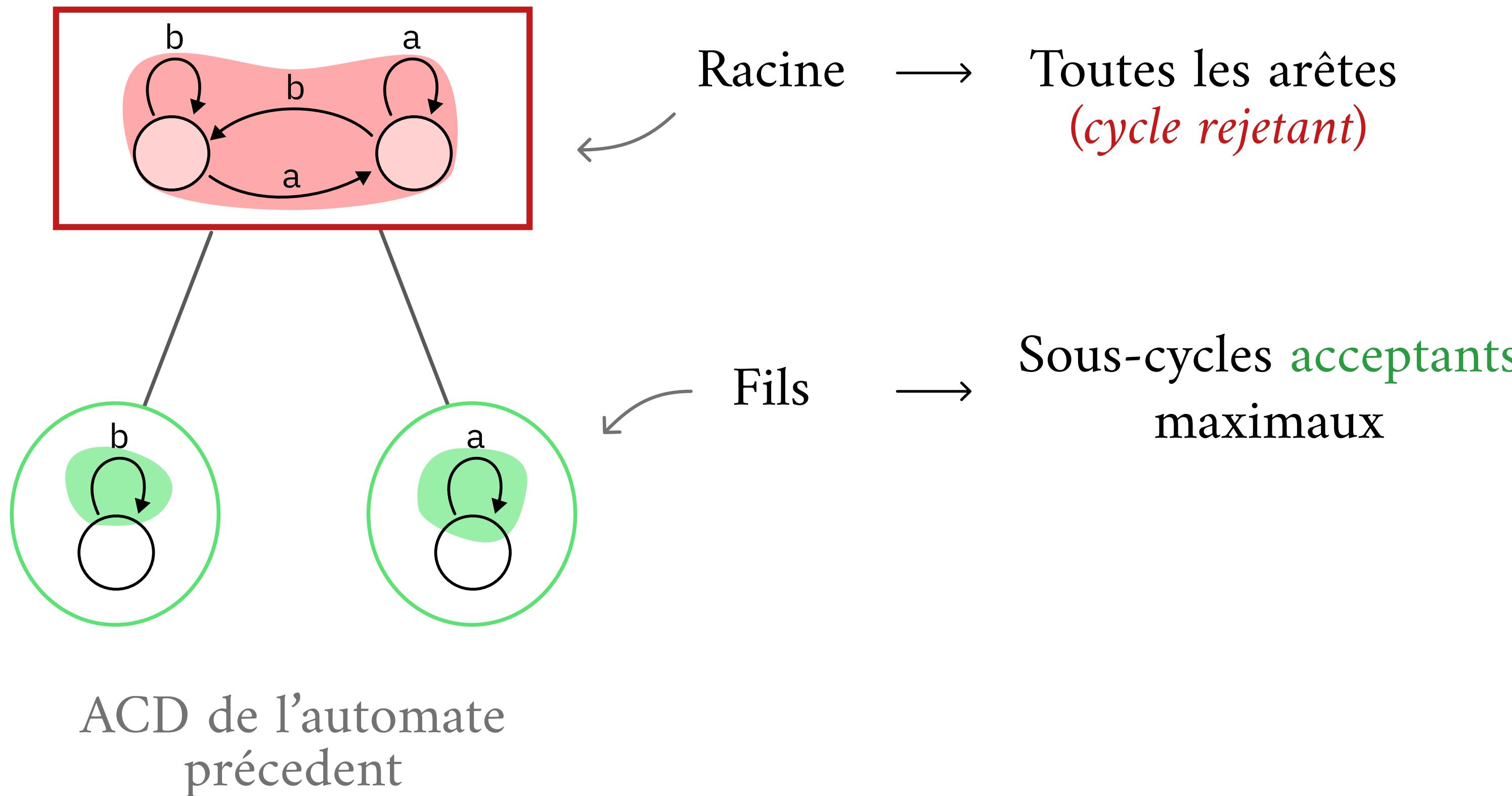
Nouvelle représentation de la structure d'un automate.



ACD de l'automate précédent

CONTRIBUTION : DÉCOMPOSITION EN CYCLES ALTERNANTS (ACD)

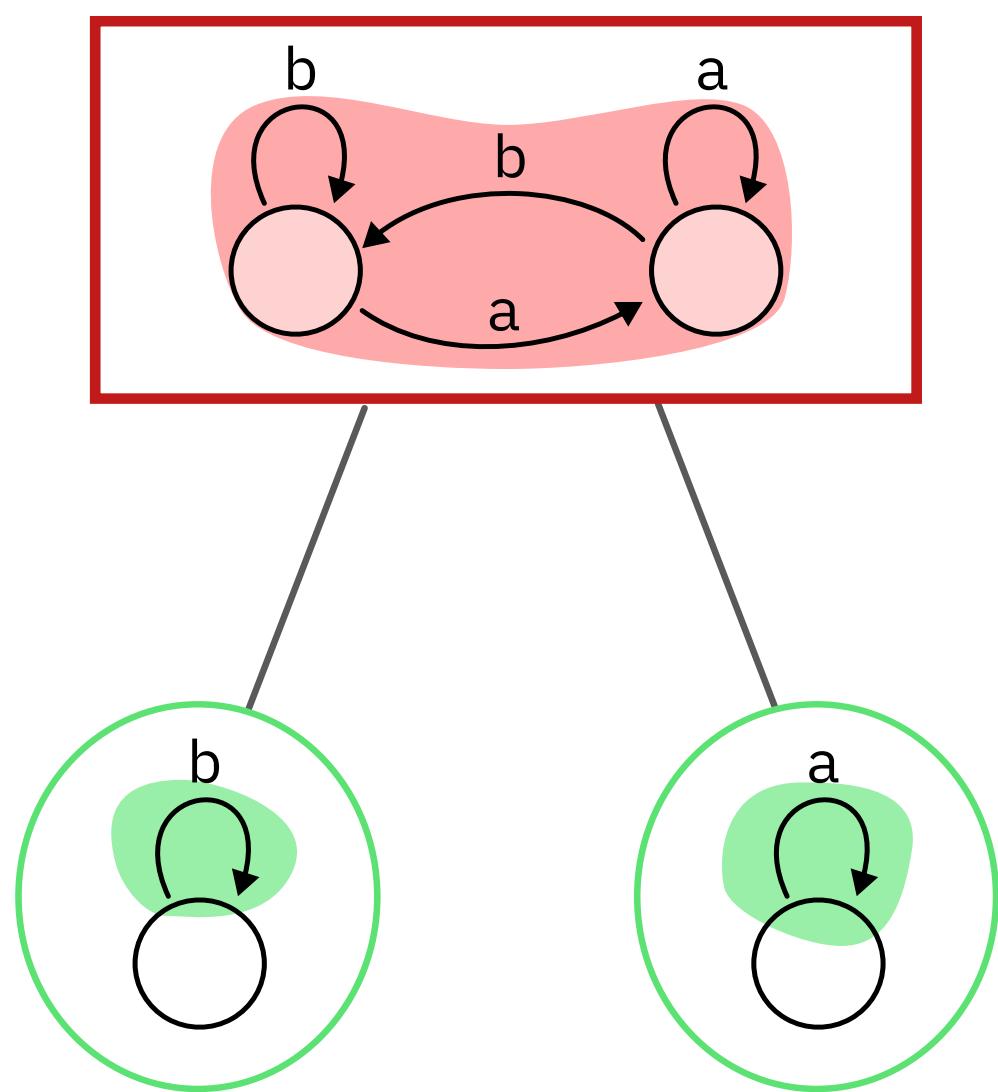
Nouvelle représentation de la structure d'un automate.



ACD : Intérêt et applications

Rend information explicite

- ★ Hauteur = Complexité topologique du langage
- ★ Simplification des cycles acceptants



ACD de l'automate précédent

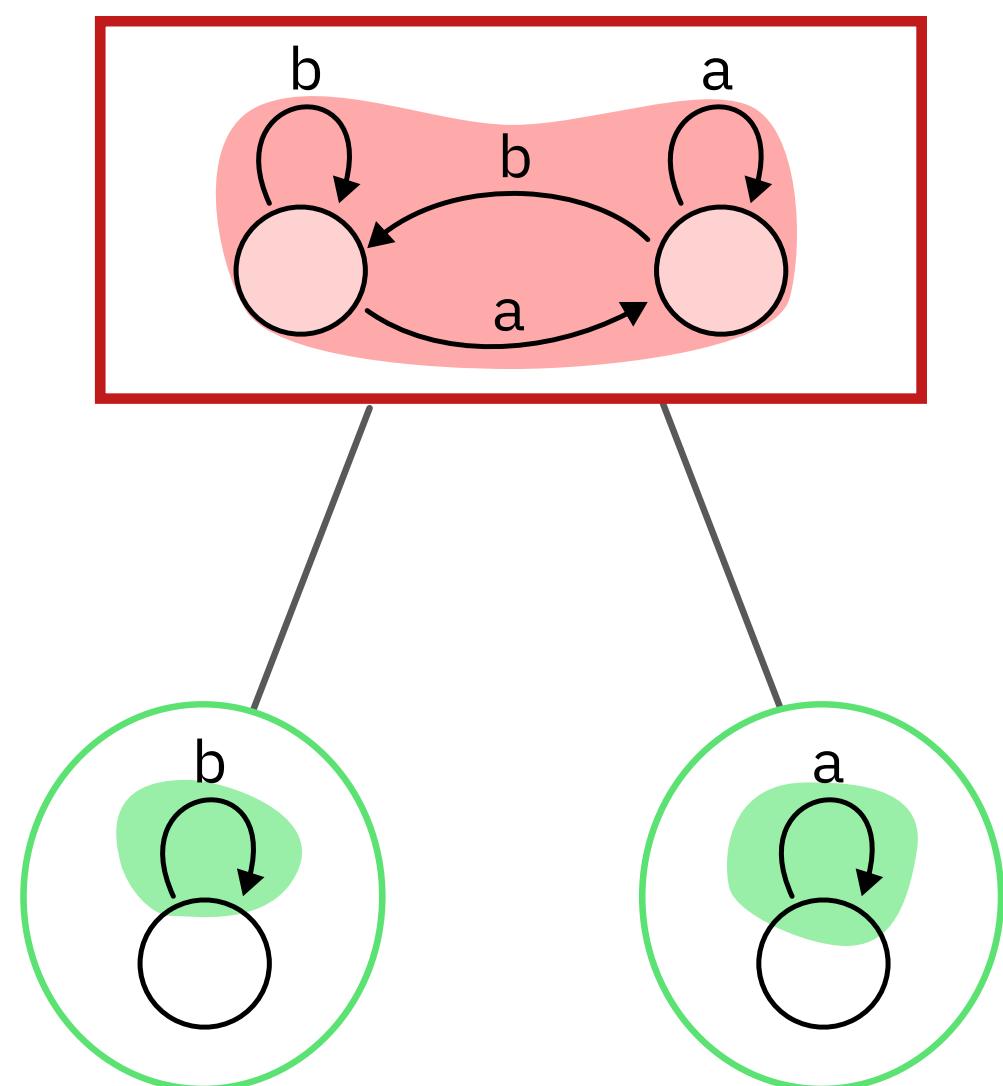
ACD : Intérêt et applications

Rend information explicite

★ Hauteur = Complexité topologique du langage

★ Simplification des cycles acceptants

★ Nouvelle transformation



ACD de l'automate précédent

Proche de
la logique

Automate
général (Muller)



Automate de
parité

Nécessaire dans
les applications

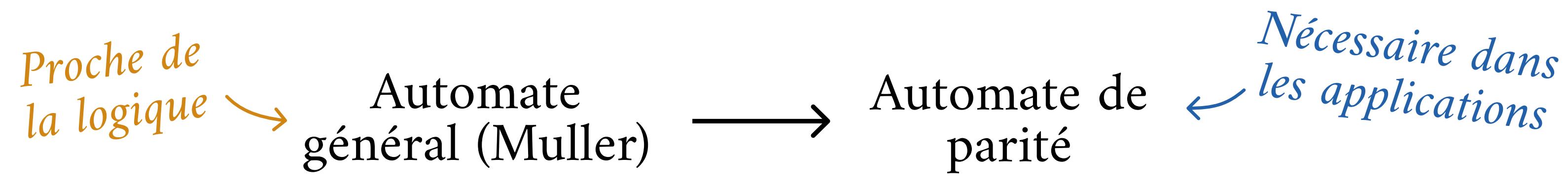
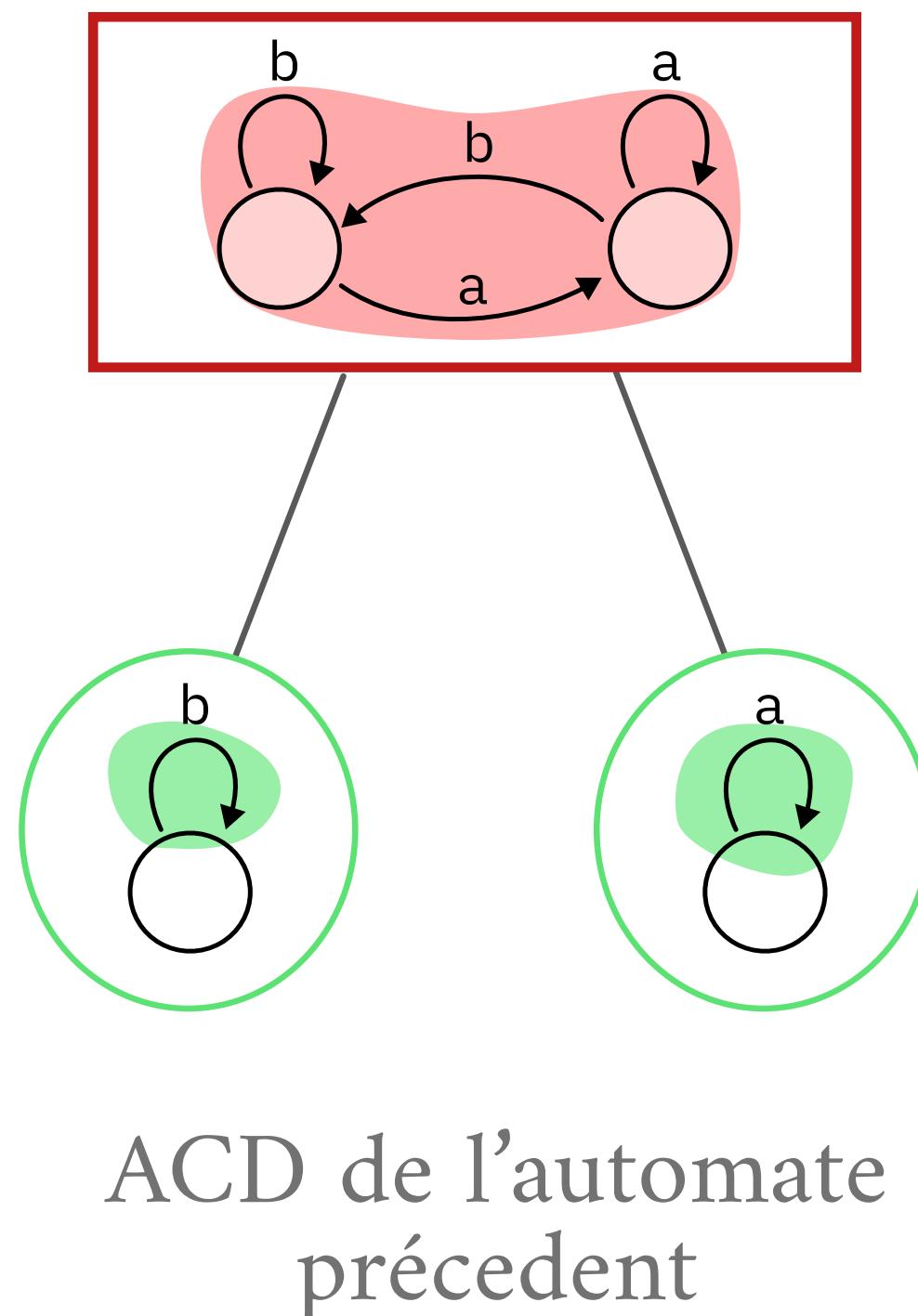
ACD : Intérêt et applications

Rend information explicite

★ Hauteur = Complexité topologique du langage

★ Simplification des cycles acceptants

★ Nouvelle transformation



THÉORÈME

L'automate construit est toujours structurellement optimal.

Applications pratiques : 2 implémentations indépendantes de l'ACD

- ★ SPOT (EPITA Paris)
- ★ Strix (TUM Munich)

*Outils de référence pour ω -automates,
synthèse et vérification*

Présentées dans : ([Casares et al. TACAS '22](#))

Applications pratiques : 2 implémentations indépendantes de l'ACD

- ★ SPOT (EPITA Paris)
- ★ Strix (TUM Munich)

*Outils de référence pour ω -automates,
synthèse et vérification*

Présentées dans : ([Casares et al. TACAS '22](#))

Applications théoriques

- ★ Minimisation ([Casares CSL '22](#))
- ★ Simplification des cycles ([Casares-Masclé MFCS '24](#))
- ★ Stratégies dans les jeux ([Bouyer-Randour-Vandenbroucke STACS '22](#))
([Casares-Colcombet-Lehtinen ICALP '22](#))

PROJET

MODÈLES CANONIQUES POUR LA THÉORIE DES AUTOMATES

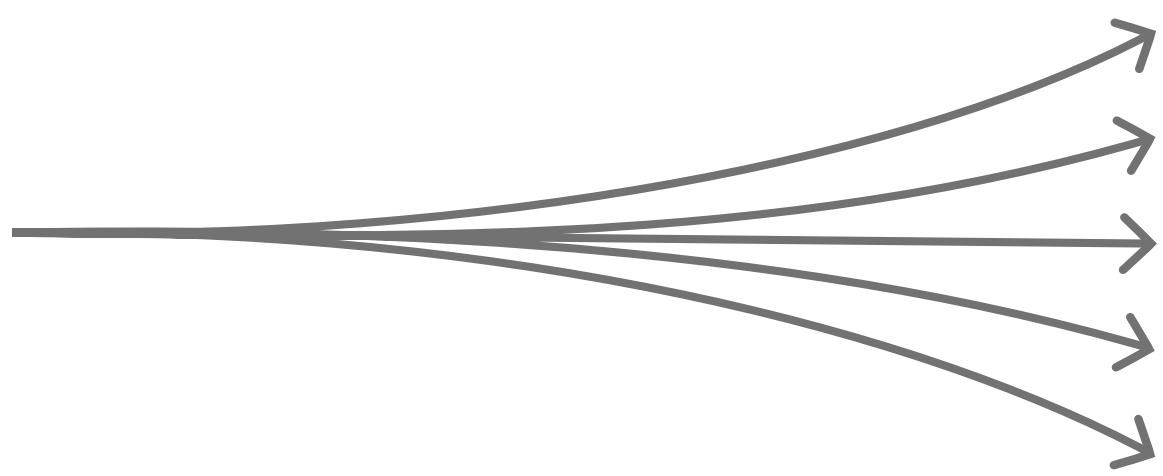
Axe 1
Mots infinis
Moyen terme
(Approche claire)

Axe 2
Transducteurs
Moyen-long terme

Axe 3
Arbres et graphes
Long terme

Sémantique

*Spécification
(langage)*



Syntaxe

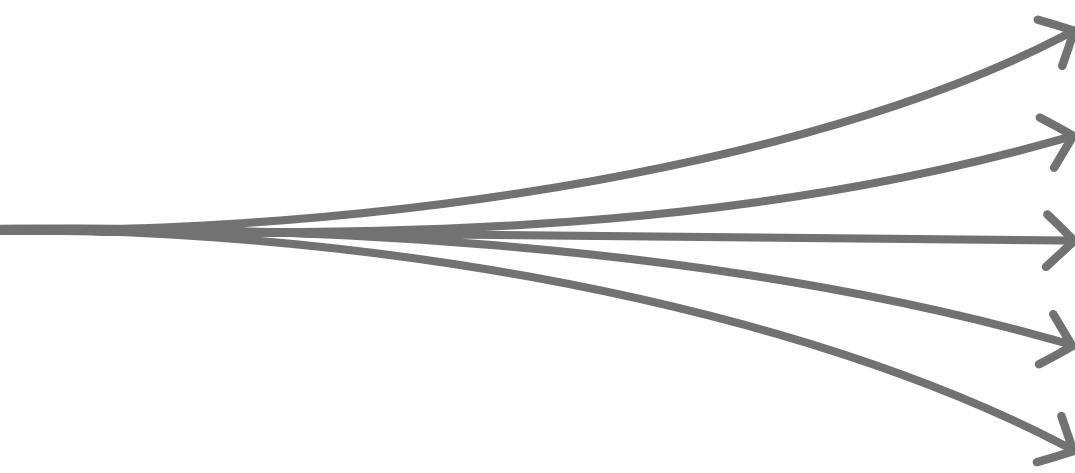
*Représentations
(automates)*

Sémantique

*Spécification
(langage)*

Syntaxe

*Représentations
(automates)*



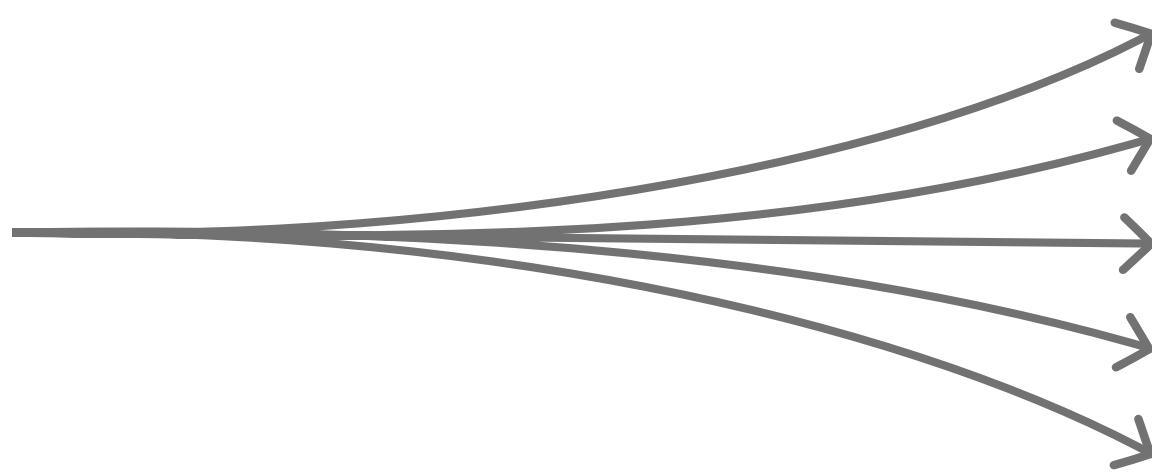
Représentation optimale ?

Sémantique

*Spécification
(langage)*

Syntaxe

*Représentations
(automates)*



Représentation optimale ?

Modèle canonique

Modèles canoniques

- ★ Description sémantique
- ★ Bonnes propriétés algorithmiques
- ★ Informations visibles

Modèles canoniques

- ★ Description sémantique
- ★ Bonnes propriétés algorithmiques
- ★ Informations visibles

Exemple prototypique

Mots finis : Automate des résiduels

- États = résiduels
- Déterministe + minimal
- Apériodicité

Modèles canoniques

- ★ Description sémantique
- ★ Bonnes propriétés algorithmiques
- ★ Informations visibles

Exemple prototypique

Mots finis : Automate des résiduels

- États = résiduels
- Déterministe + minimal
- Apériodicité

Mots infinis · Transducteurs · Arbres infinis

Modèles canoniques

- ★ Description sémantique
- ★ Bonnes propriétés algorithmiques
- ★ Informations visibles

Exemple prototypique

Mots finis : Automate des résiduels

- États = résiduels
- Déterministe + minimal
- Apériodicité

Mots infinis · Transducteurs · Arbres infinis

Question
fondamentale

OBJECTIF

Modèles canoniques d'automates sur structures plus riches.

Nouvelles
méthodes!

Axe 1 · Mots infinis

Moyen terme - Approche claire

Proposition d'un modèle canonique

Travail en cours

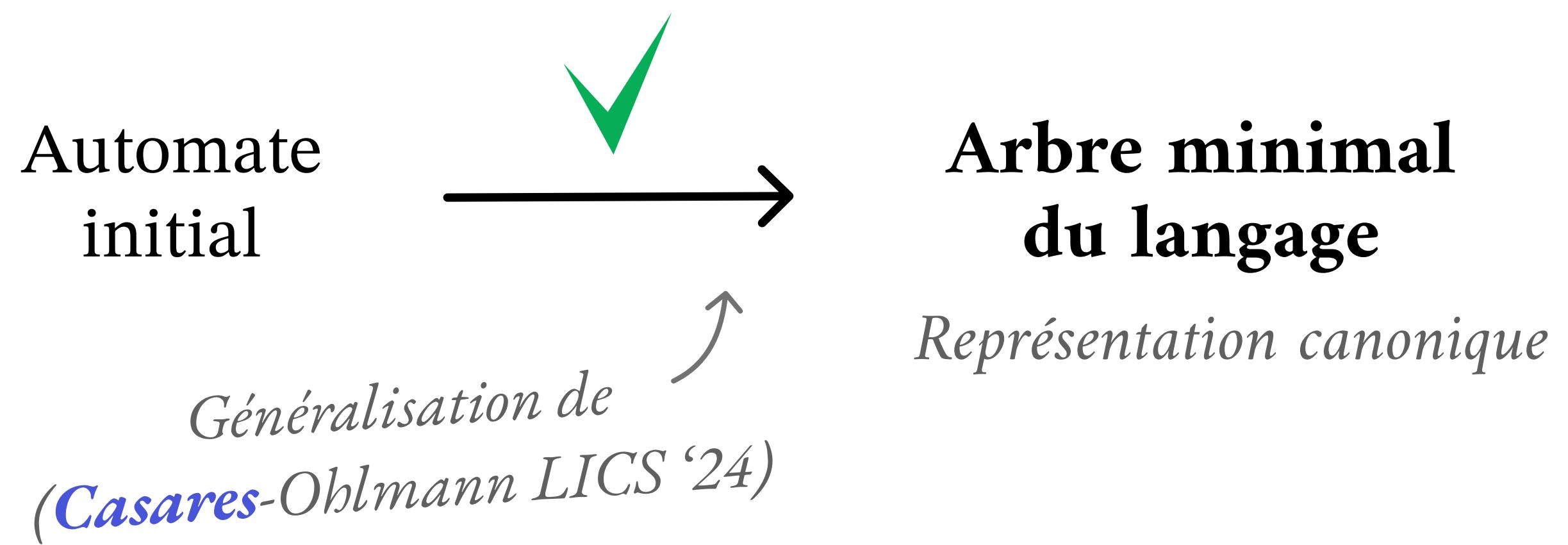
Axe 1 · Mots infinis

Moyen terme - Approche claire

Proposition d'un modèle canonique

Travail en cours

✓ *Étape accomplie*



Axe 1 · Mots infinis

Moyen terme - Approche claire

Proposition d'un modèle canonique

Travail en cours

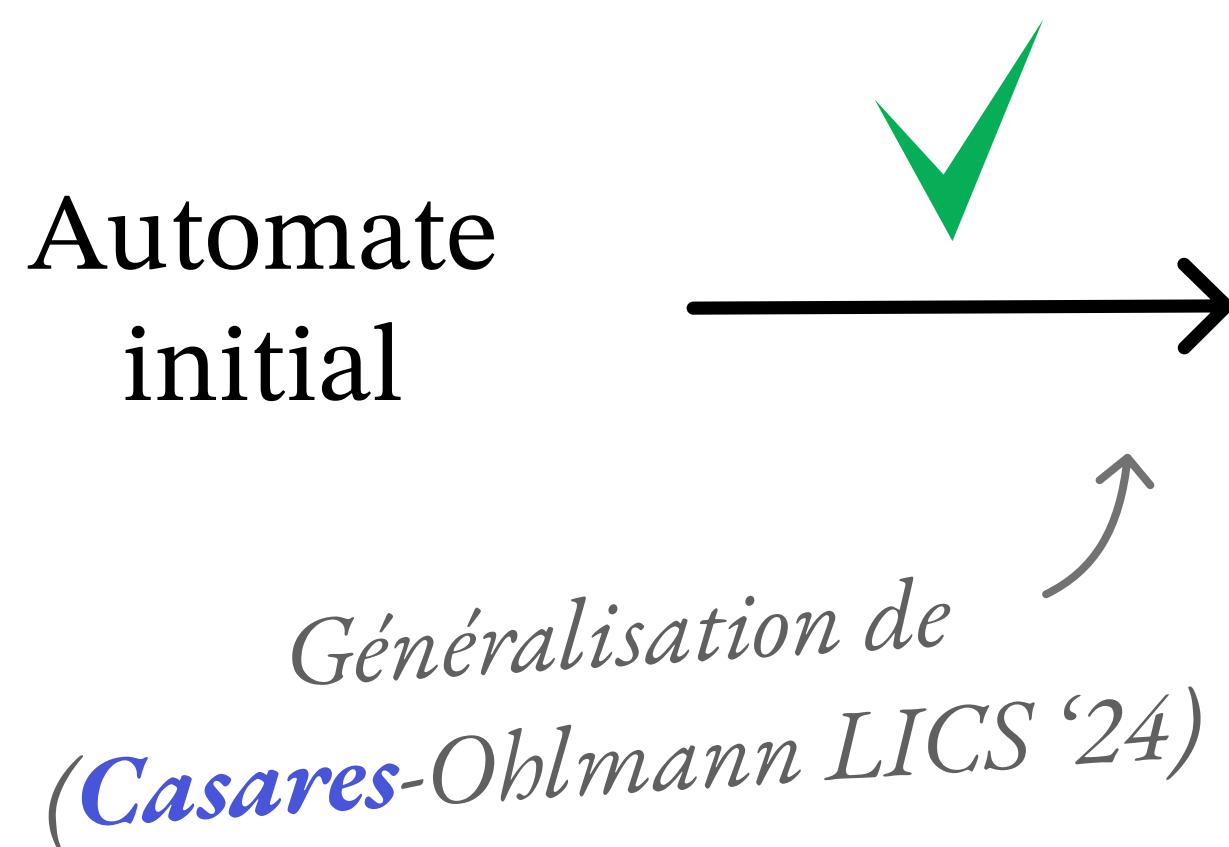


Axe 1 · Mots infinis

Moyen terme - Approche claire

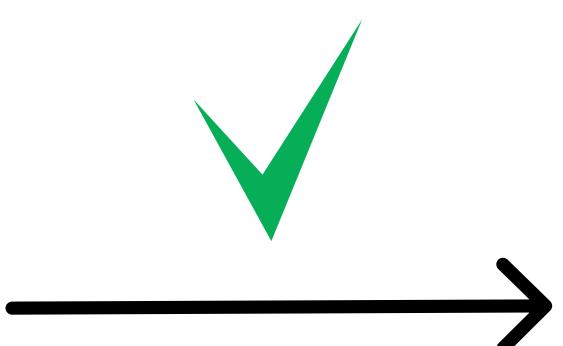
Proposition d'un modèle canonique

Travail en cours



Arbre minimal du langage

Représentation canonique



Automate déterministe en histoire

*Relaxation du déterminisme
Mêmes propriétés algorithmiques*

Conjecture

Cet automate est minimal.

Axe 1 · Mots infinis

Moyen terme - Approche claire

- ★ Conjecture + Fondements du modèle

OBJECTIFS

Axe 1 · Mots infinis

Moyen terme - Approche claire

OBJECTIFS

- ★ Conjecture + Fondements du modèle
- ★ Développements algorithmiques

Axe 1 · Mots infinis

Moyen terme - Approche claire

OBJECTIFS

- ★ Conjecture + Fondements du modèle
- ★ Développements algorithmiques
- ★ Apprentissage d'automates sur les mots infinis

Applications : vérification en black-box, process mining...

Axe 2 · Transducteurs

Moyen-long terme

Automates avec sortie. Implémentent fonctions $f: \Sigma^* \rightarrow \Gamma^*$.

Axe 2 · Transducteurs

Moyen-long terme

Automates avec sortie. Implémentent fonctions $f: \Sigma^* \rightarrow \Gamma^*$.

Exemple

1er mai 2018		25-12-1996
11-11-2003		14-07-1998
12/25/96	→	11-11-2003
May 8th 2015		08-05-2015
14-07-98		01-05-2018

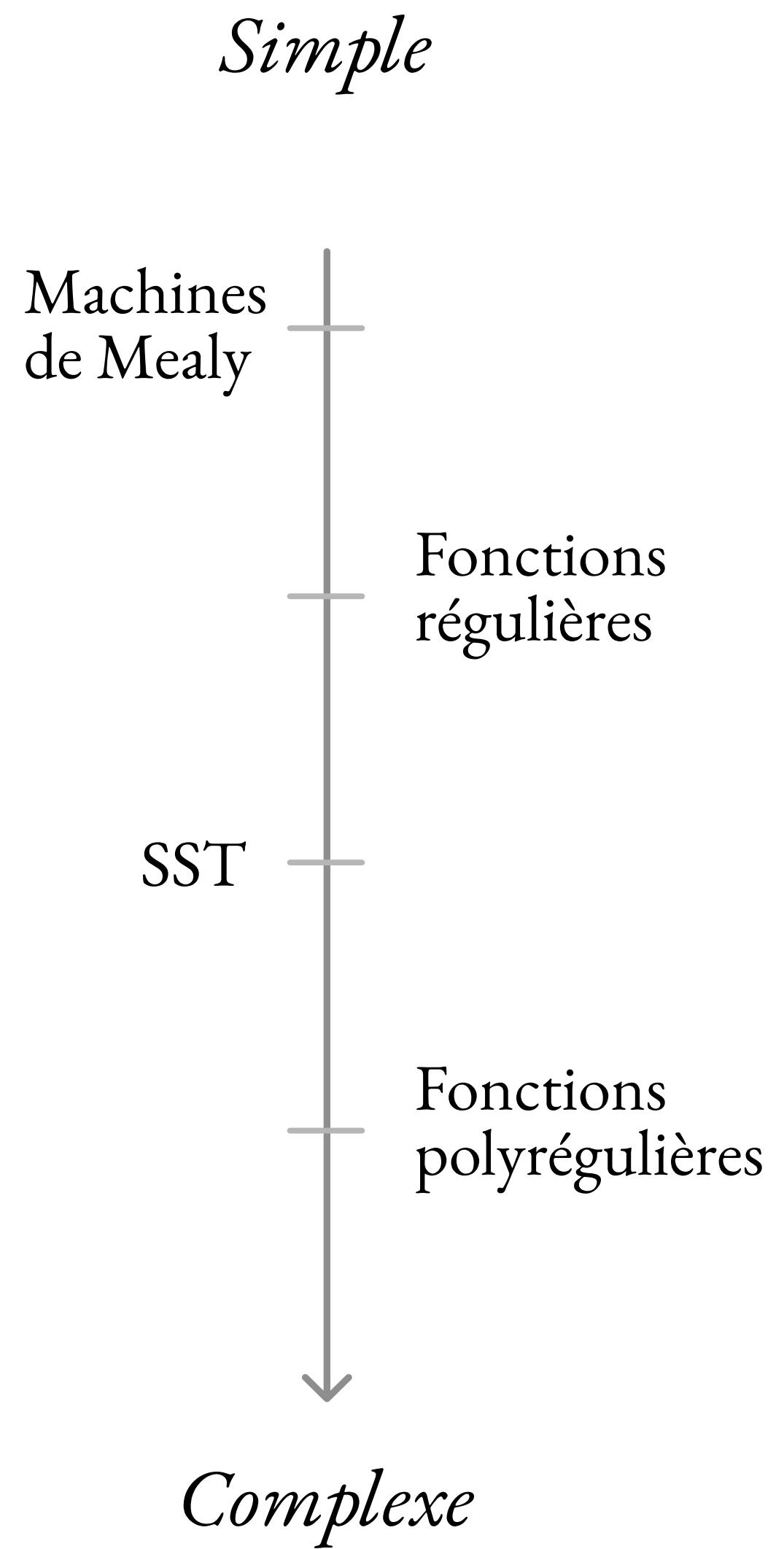
Axe 2 · Transducteurs

Moyen-long terme

Automates avec sortie. Implémentent fonctions $f: \Sigma^* \rightarrow \Gamma^*$.

Exemple

Fonction régulière	
1er mai 2018	25-12-1996
11-11-2003	14-07-1998
12/25/96	11-11-2003
May 8th 2015	08-05-2015
14-07-98	01-05-2018



Axe 2 · Transducteurs

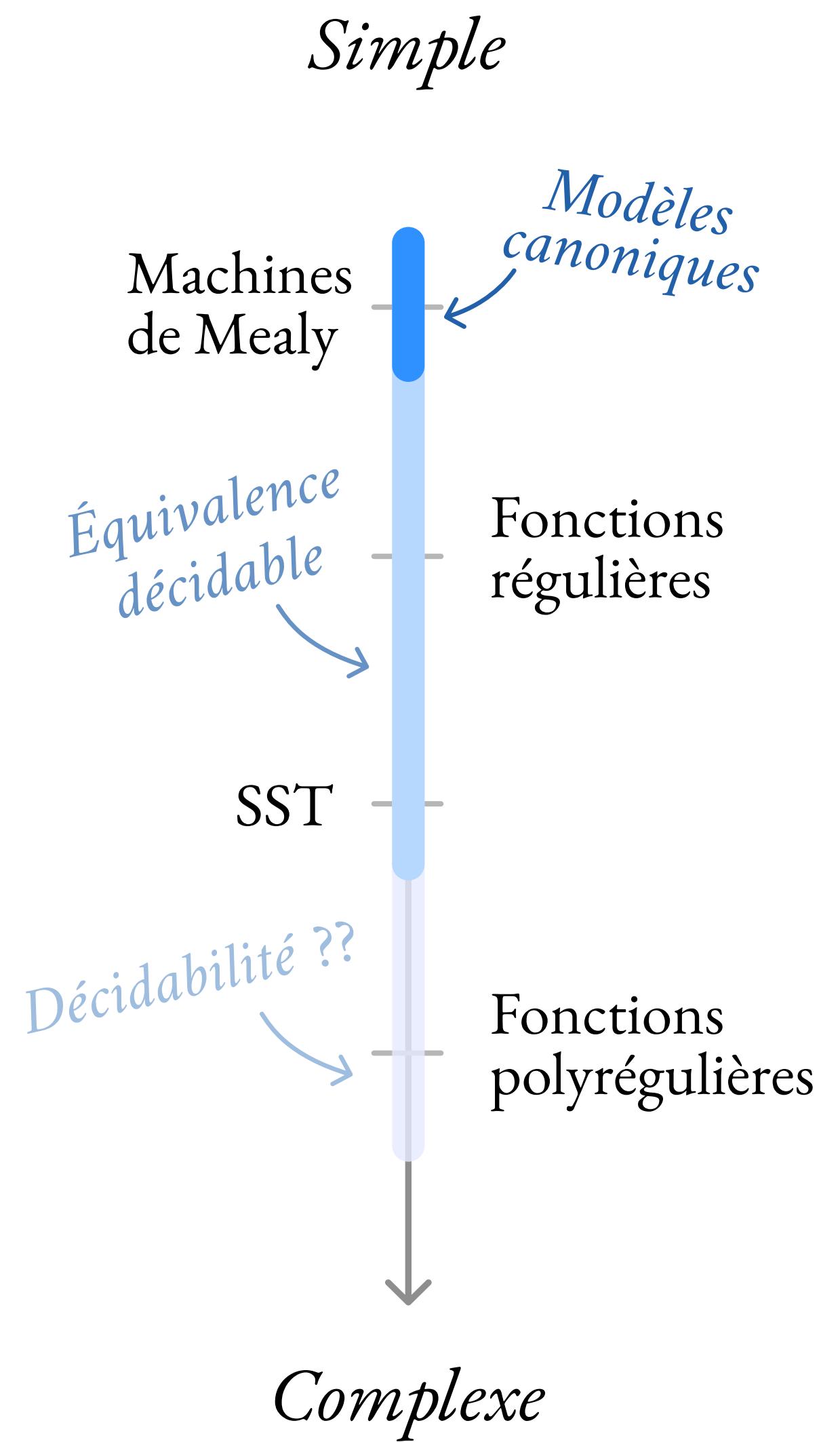
Moyen-long terme

Automates avec sortie. Implémentent fonctions $f : \Sigma^* \rightarrow \Gamma^*$.

Problème de l'équivalence

Étant données deux fonctions f_1, f_2 , décider si $f_1 = f_2$.

Applications : vérification, compilateurs...



Axe 2 · Transducteurs

Moyen-long terme

Automates avec sortie. Implémentent fonctions $f: \Sigma^* \rightarrow \Gamma^*$.

Problème de l'équivalence

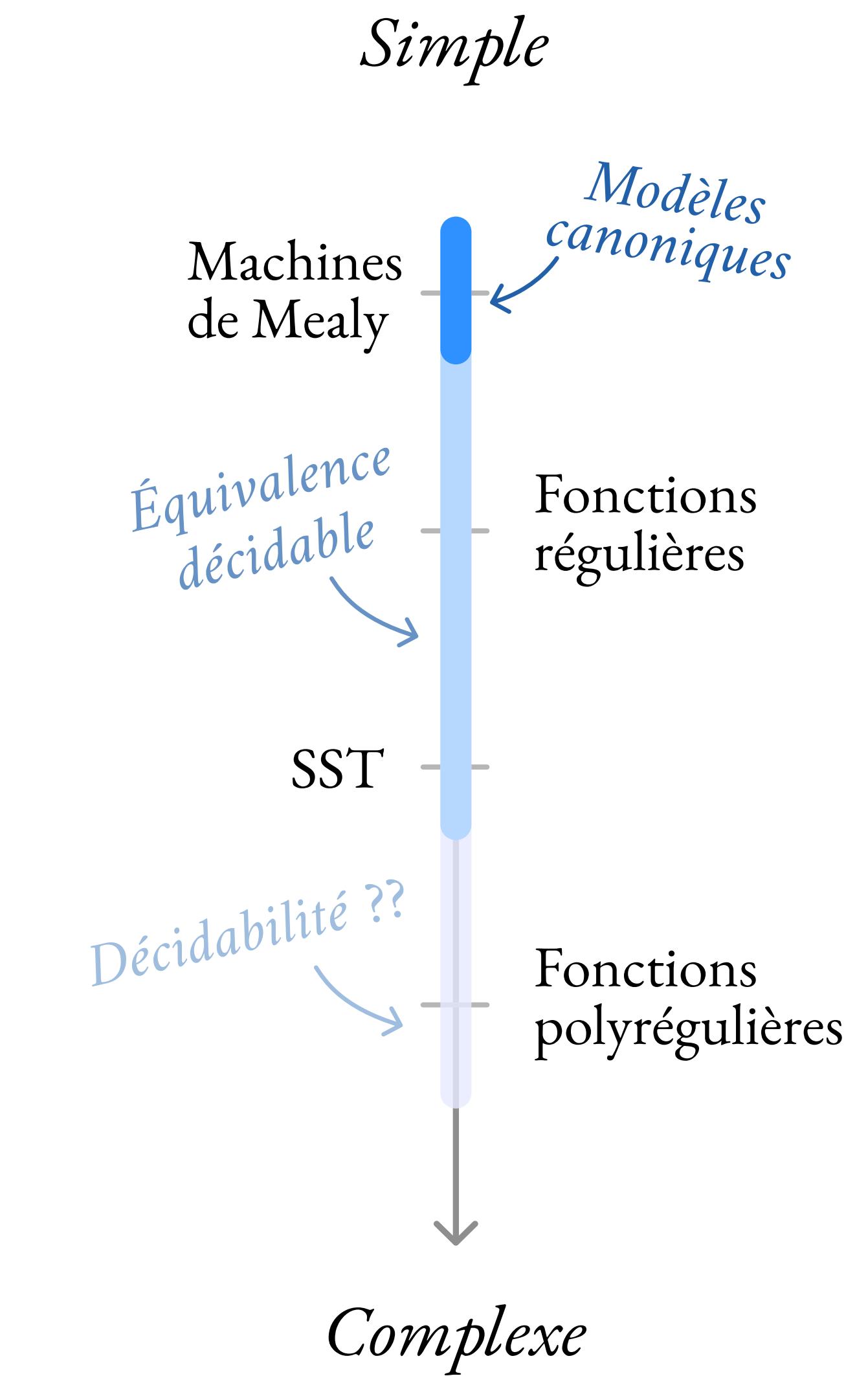
Étant données deux fonctions f_1, f_2 , décider si $f_1 = f_2$.

Applications : vérification, compilateurs...

OBJECTIF

Établir la décidabilité et la complexité de l'équivalence.

Travail en cours : Fonctions polyrégulières - cas d'entrée unaire.

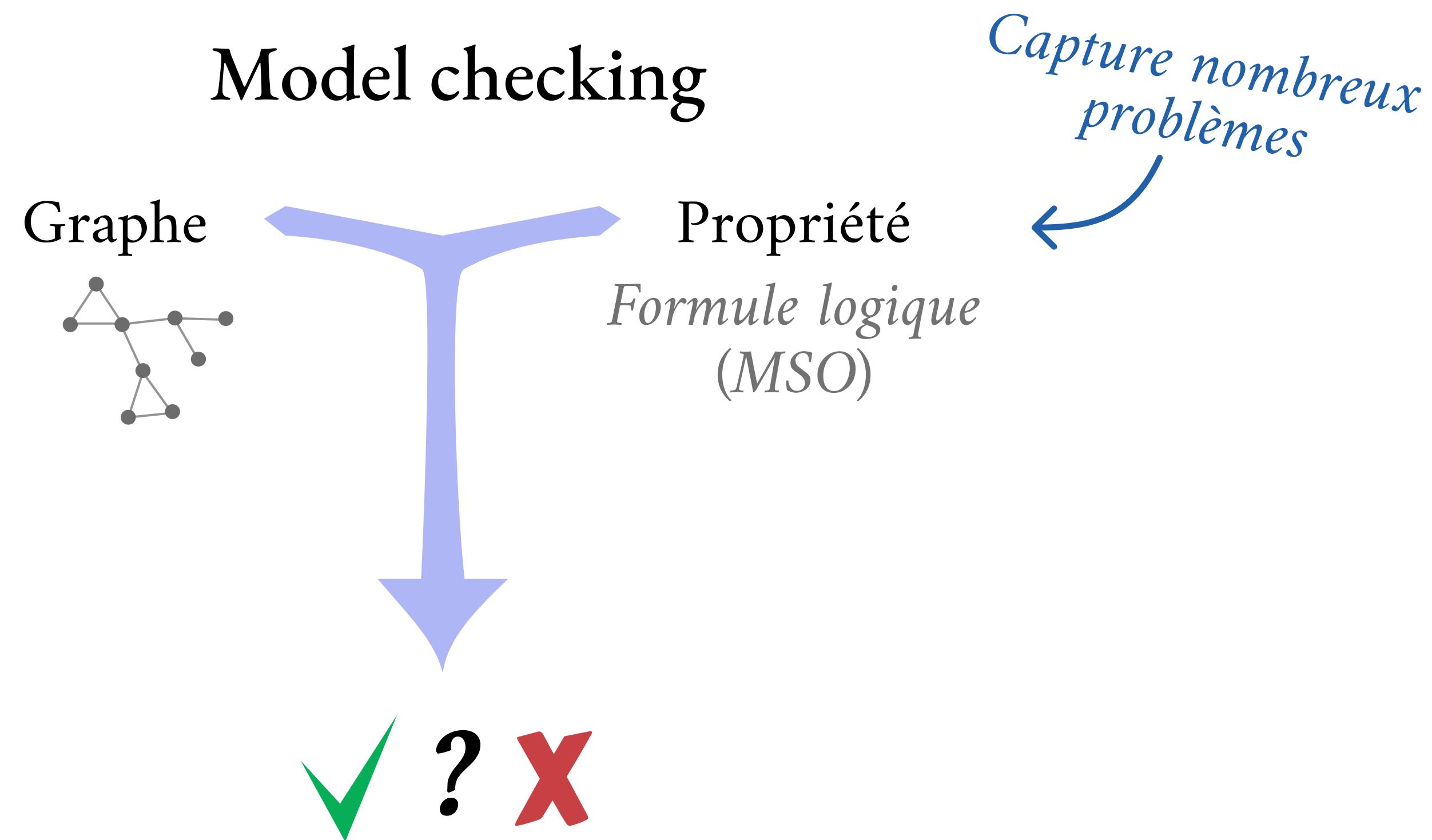


Axe 3 · Logique et graphes

Long terme

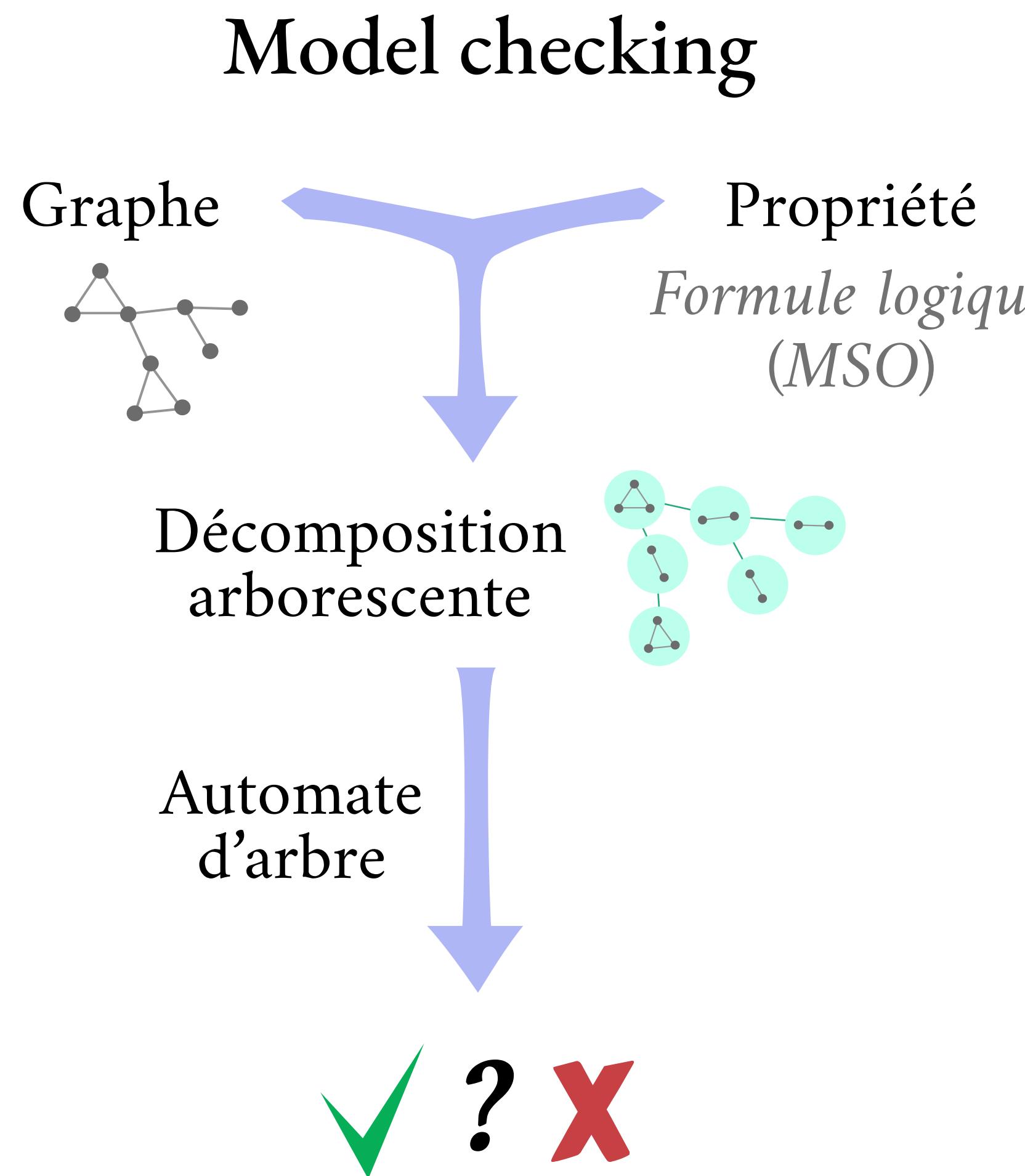
Axe 3 · Logique et graphes

Long terme



Axe 3 · Logique et graphes

Long terme

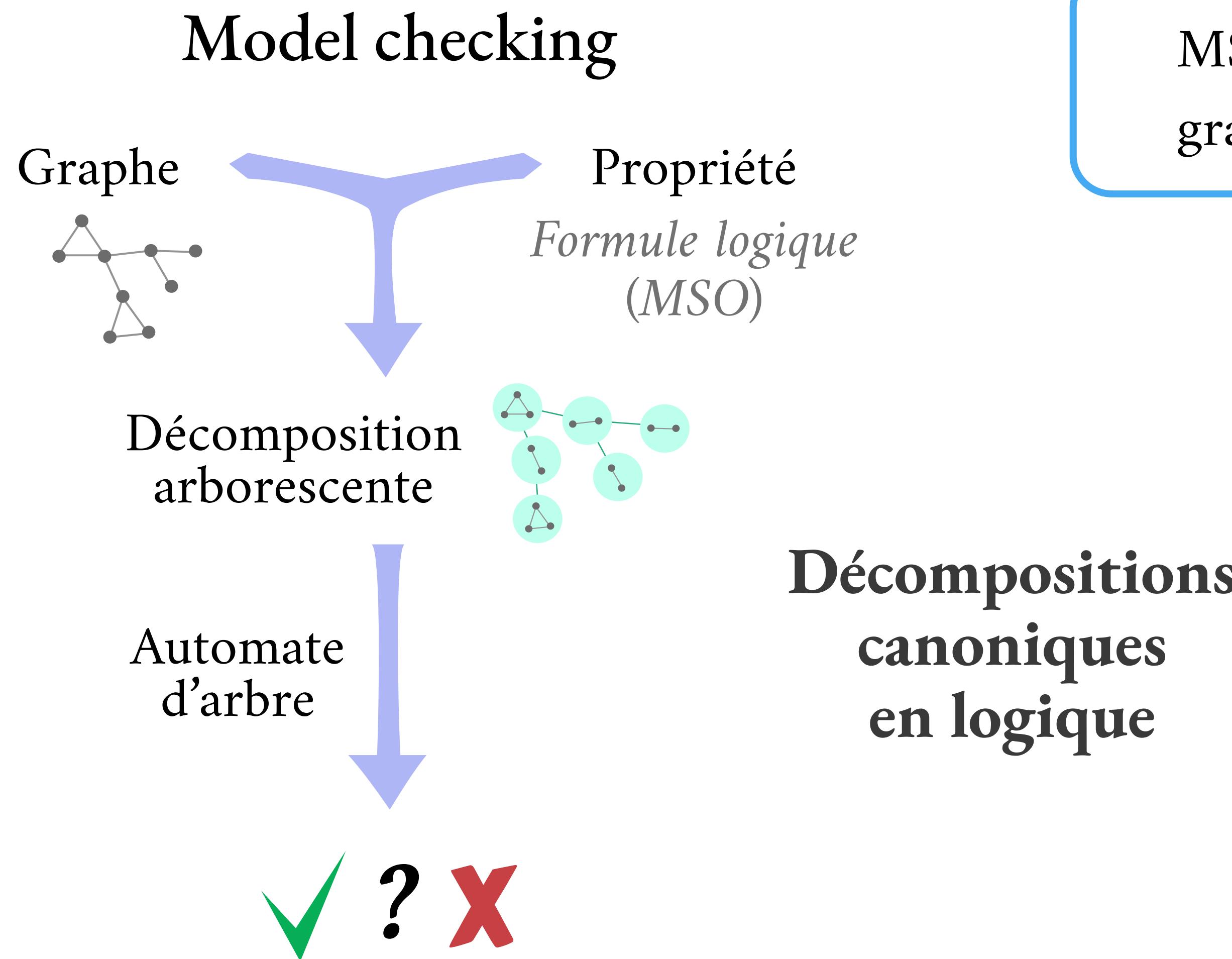


THÉORÈME (*Courcelle '88*)

MSO-Model checking en PTIME pour
graphes qui ressemblent à des arbres.

Axe 3 · Logique et graphes

Long terme



THÉORÈME (*Courcelle '88*)

MSO-Model checking en PTIME pour graphes qui ressemblent à des arbres.

Graphes éparses

(*Bojańczyk-Pilipczuk '16, Grohe '17*)

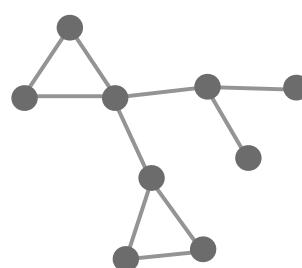
- ★ Isomorphisme en PTIME
- ★ Définissabilité = Reconnaissabilité

Axe 3 · Logique et graphes

Long terme

Model checking

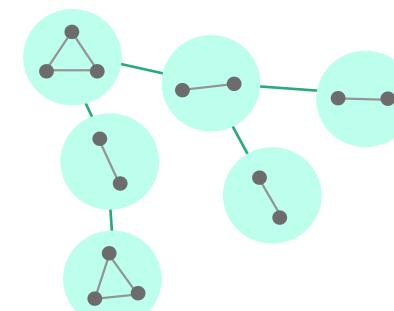
Graphe



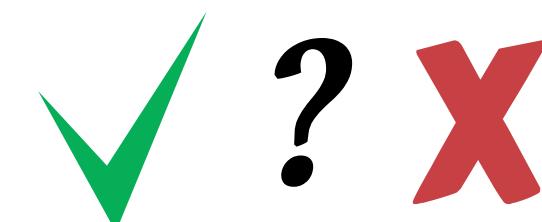
Propriété

Formule logique
(MSO)

Décomposition
arborescente



Automate
d'arbre



THÉORÈME (*Courcelle '88*)

MSO-Model checking en PTIME pour
graphes qui ressemblent à des arbres.

Théorie structurelle
Robertson - Seymour
depuis 1982

Graphes éparses

(*Bojańczyk-Pilipczuk '16, Grohe '17*)

Décompositions
canoniques
en logique

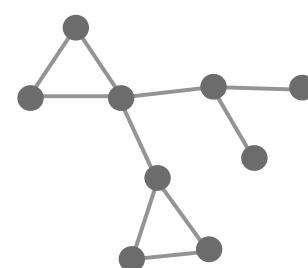
- ★ Isomorphisme en PTIME
- ★ Définissabilité = Reconnaissabilité

Axe 3 · Logique et graphes

Long terme

Model checking

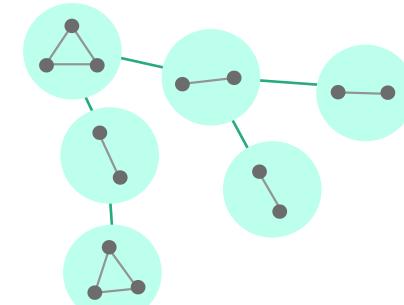
Graphe



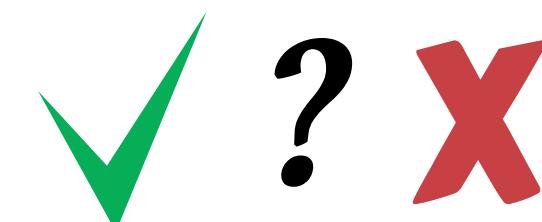
Propriété

*Formule logique
(MSO)*

Décomposition
arborescente



Automate
d'arbre



THÉORÈME (*Courcelle '88*)

MSO-Model checking en PTIME pour
graphes qui *ressemblent à des arbres*.

*Théorie structurelle
Domaine très actif*

**Décompositions
canoniques
en logique**

Graphes denses

OBJECTIF

Décompositions canoniques
pour graphes **denses**.

INTÉGRATION

LIS, Marseille, équipe MoVe



Publications communes

Déterminisme en histoire

K. Lehtinen

Transducteurs

N. Lhote, P. A. Reynier

Jeux

P. Ohlmann, B. Monmege

Ouverture :

Logique linéaire \leftrightarrow Automates

T. Nguyen

LIP, Lyon, équipes Plume et MC2

Déterminisme en histoire

D. Kuperberg

Algèbre des graphes

A. Doumane

Graphes

É. Bonnet, S. Thomassé

Ouverture :

Logique linéaire \leftrightarrow Automates

C. Riba

IRIF, Paris, équipe Automates et applications

Transducteurs

O. Carton, S. Winter

Logique et graphes

G. Stamoulis

ω -automates

T. Colcombet

Ouverture :
Catégories \leftrightarrow Automates

D. Petrişan, S. van Gool

LMF, Paris-Saclay, pôle Modèles

Apprentissage d'automates

B. Bollig

Jeux

P. Bouyer, L. Doyen

Logiques de spécification

S. Demri

Ouverture:
Topologie

J. Goubault-Larrecq

Ajouts au CV

- Soumission ICALP 2025: *The memory of ω -regular and $\text{BC}(\Sigma_2^0)$ objectives* (avec P. Ohlmann).
- Encadrement stage étudiant M1 ENS Rennes, mai - juillet 2025 (sans co-encadrant).

Résumé

★ Publications

- Chapitre dans livre “Games on Graphs”
- 3 journaux (+2 en révision)
- 11 conférences (+1 soumission) • 1 Best student paper award (article seul)
- 22 co-auteurs dans 7 pays
- >30 exposés

★ Intégration dans la communauté

- Membre comité de pilotage conférence HIGHLIGHTS (communication chair)
- 28 reviews
- Co-organisateur de 1 conférence et 2 séminaires

★ Encadrement (sans co-encadrant)

- Étudiant M2 (Université Varsovie)
- Étudiant M1 (ENS Rennes)