

# Stage de M2

## Simulation symbolique de réseaux de transport.

**Supervision :** Loïc Hélouët, équipe SUMO , [loic.helouet@inria.fr](mailto:loic.helouet@inria.fr),

**Keywords :** Transports, verification symbolique, analyse transitoire,

**Abstract :** L'amélioration et la gestion des transports en commun est un des enjeux majeurs des prochaines décennies. En effet, fournir des transports efficaces et répondant à la demande est une manière de répondre à des enjeux climatiques, économiques, et sociétaux. Le développement de nouvelles solutions se heurte à la difficulté d'expérimenter sur site, il est donc essentiel de pouvoir modéliser et tester *in silico* si une modification d'une politique de transport améliore la consommation énergétique, la résilience d'un réseau aux incidents,...

L'équipe SUMO développe depuis plusieurs années des modèles et des outils pour vérifier les propriétés de réseaux de transport, évaluer la performance d'une politique de régulation de trafic,... à l'aide de techniques de vérification statistique. Bien que les outils développés aient permis d'analyser les performances de réseaux existants, l'extension de notre approche à des réseaux de grande taille (e.g. à l'échelle d'une ville) nécessite d'accélérer les techniques de simulation et l'analyse statistique qui s'ensuit.

Dans ce stage, nous proposons de développer des techniques de **simulation symbolique** pour des modèles de réseaux de transport urbain. Le principe est de remplacer des campagnes de simulation réalisées en échantillonnant un grand nombre de journées d'utilisation d'un réseau par l'extraction d'un ensemble plus réduit de runs symbolique, chacun d'entre eux permettant de représenter un grand nombre de journées similaires et de calculer leur probabilité d'occurrence.

### Description Détaillée :

L'amélioration et la gestion des transports en commun est un des enjeux majeurs des prochaines décennies. En effet, fournir des transports efficaces et répondant à la demande est une manière de répondre :

- à des enjeux climatiques : des transports efficaces incitent à moins utiliser son véhicule personnel, une bonne politique de gestion d'un réseau permet, à service équivalent, d'économiser de l'énergie...
- à des enjeux économiques : on attend principalement d'un réseau urbain et péri-urbain qu'il connecte les espaces résidentiels et les lieux où se concentre le travail. Fournir cette offre de transport pour les zones urbaines les plus peuplées est une manière de favoriser l'emploi et les échanges économiques.
- A des enjeux de société en connectant le plus grand nombre aux lieux de travail, de culture, de loisirs....

Dans beaucoup de ville, les réseaux existants sont saturés, et il est impossible d'augmenter le nombre ou la taille des métros, des bus, etc. Les améliorations possibles passent par des changements de politique d'offre (horaires, tarifs, nouvelles lignes...), par l'amélioration de la gestion du trafic et des flottes de véhicules, l'intégration de solutions de mobilité douce (e.g. RER + vélo) permettant de soulager les parties saturées des réseaux lors des pics d'affluence...

Le développement de nouvelles solutions se heurte cependant à la difficulté d'expérimenter une idée sur site : il est inimaginable de perturber l'ensemble des transports d'une ville pour analyser l'impact d'un choix de gestion. Il est donc essentiel de pouvoir modéliser et tester les solutions proposées *in silico*, c'est-à-dire à partir de modèles formels permettant de vérifier si le changement envisagé induit une amélioration quelconque : consommation énergétique, résilience aux incidents, délai pour un voyage d'un bout à l'autre du réseau, temps de connexion entre bus et métro,...

Les modèles que nous considérons sont des formalismes mathématiques à partir desquels il est possible de raisonner de manière automatisée, soit à l'aide de méthodes de vérification (on parlera de « model-checking »), soit par des simulations suivies d'une analyse statistique des comportements joués (on utilise alors souvent le terme de model checking statistique). Dans l'approche statistique, l'évaluation des performances et propriétés quantitatives d'un réseau se fait en simulant un grand nombre de journées d'opération (généralement plusieurs milliers d'échantillons), pour obtenir une mesure empirique des propriétés du système de transport modélisé. Un exemple de mesure obtenu est par exemple le temps nécessaire pour rattraper un retard causé par un incident de porte dans un métro. D'une manière générale, ces propriétés quantitatives se modélisent très bien avec des logiques (e.g. Maler08) et sont faciles à vérifier sur un run fini d'un système.

L'équipe SUMO développe depuis plusieurs années des modèles [Bertrand19,Kecir19, Helouet22] et des outils [Mochy20] pour vérifier les propriétés de réseaux de transport, évaluer la performance d'une politique de régulation de trafic,... à l'aide de techniques de vérification statistique. Bien que les outils développés aient permis d'analyser les performances de réseaux existants, l'extension de notre approche à des réseaux de grande taille à l'échelle d'une ville complète nécessite d'accélérer les techniques de simulation et l'analyse statistique qui s'ensuit.

Dans ce stage, nous proposons de développer des techniques de **simulation symbolique** pour des modèles de transport urbain inspirés des réseaux de Petri temporels. Le principe est de remplacer des campagnes de simulation réalisées en simulant un grand nombre de journées d'utilisation d'un réseau par l'extraction d'un ensemble plus réduit de runs symbolique, chacun d'entre eux permettant de représenter un grand nombre de journées similaires et de calculer leur probabilité d'occurrence.

Le modèle étudié durant le stage est inspiré des réseaux de Petri temporels (TPN) [Merlin74], enrichi pour prendre en compte les trajectoires de véhicules et les contraintes de sécurité. Bien que les réseaux de Petri temporels aient la puissance d'expression des machines de Turing, de nombreuses propriétés restent décidables pour la sous-classe des TPNs bornés. Intuitivement, les techniques de vérification des TPNs bornés s'appuient sur un diagramme de classes d'états [Berthomieu91,Lime06], qui est une représentation symbolique complète et bien fondée des états du système modélisé. Les TPNs bornés sont un modèle trop faible pour représenter les contraintes sur les horaires et consignes de départ, mais une extension récente (les Waiting nets [Helouet22]) comble ces lacunes et permet de modéliser certains réseaux ferroviaires urbains. Plus intéressants, les Waiting nets continuent à bénéficier d'une représentation symbolique finie.

Au-delà de la décidabilité de problèmes de vérification, l'intérêt de cette représentation par diagrammes de classes est qu'il est possible de définir des ensembles de comportements symboliques, qui sont des successions de classes d'état (on parlera de transitions abstraites). En associant des probabilités aux transitions abstraites, il est possible de calculer la probabilité d'un ensemble de runs et de faire une analyse transitoire des comportements d'un système [Horvath12] pour calculer la probabilité de réalisation de l'ensemble des runs définis par une séquence de transitions abstraites, ou encore la probabilité de réalisation d'une propriété sur l'ensemble des runs d'une durée bornée.

Dans les TPNs et leurs extensions, les classes d'états représentent un ensemble de contraintes sur le temps restant avant un événement (comme l'arrivée ou le départ d'un train). Dans ce stage, nous souhaitons enrichir ces modèle pour tenir compte des trajectoires d'objets mobiles dans un réseau de transport. Nous conjecturons :

- 1) que l'ajout d'une notion de trajectoire simple (fonction affine ou polynomiale reliant distance et temps) au modèle de [Helouet22] autorise toujours la définition de diagrammes de classes d'états et de transitions abstraites complètes et bien fondées
- 2) Que l'ensemble des successeurs d'une classe abstraite est fini : cette conjecture, si elle se vérifie, et suffisante pour permettre la définition de simulation symbolique

- 3) Que l'ensemble des classes d'états pour un réseau à trajectoires borné est fini : cette conjecture, si elle se vérifie, rend la majorité des techniques de model-checking décidables.

Les objectifs de ce stage sont :

- De définir l'extension minimale des Waiting nets permettant d'intégrer la notion de trajectoire aux modèles de réseaux de transport urbain
- De définir pour ce nouveau modèle une notion de state class et de transition symbolique
- De prouver ou réfuter les conjectures 1) - 2) - 3).
- D'adapter, à partir des résultats précédents, les techniques d'analyse transitoire de [Horvath12] pour proposer un cadre de simulation et de vérification symbolique de propriétés.

#### **Bibliographie:**

[Berthomieu91] Bernard Berthomieu, Michel Diaz, *Modeling and Verification of time dependent systems using Time Petri nets*, IEEE transactions on Software engineering, vol 17, no 3, 1991.

[Bertrand19] Nathalie Bertrand, Benjamin Bordais, Loïc Hélouët, Thomas Mari, Julie Parreaux, Ocan Sankur, *Performance Evaluation of Metro Regulations Using Probabilistic Model-Checking*. RSSRail'19, pp 59-76, 2019.

[Helouet22] Loïc Hélouët, Pranay Agrawal. Waiting Nets. In Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. Petri Nets 2022 (Bernardinello, L., Petrucci, L. eds), Lecture Notes in Computer Science **13288**, Springer, 2022, 67-89.

[Horvath12] András Horváth, Marco Paolieri, Lorenzo Ridi, and Enrico Vicario, *Transient analysis of non-Markovian models using stochastic state classes*, Performance Evaluation 69(7-8), pp 315-335, 2012.

[Kecir19] Karim Kecir, *Performance evaluation of urban rail traffic management techniques*, Thèse Univ. Rennes 1, 2019.

[Lime06] Didier Lime, Olivier H. Roux, *Model checking of Time Petri Nets using the State Class Timed Automaton*, Journal of Discrete events and Dynamic Systems, 2006.

[Maler08] Oded Maler, Dejan Nickovic and Amir Pnueli, *Checking Temporal Properties of Discrete, Timed and Continuous Behaviors*, Pillars of Computer Science, pp 475-505, 2008.

[Merlin74] P.M. Merlin, *A study of the recoverability of computing systems*, PhD thesis, University of California, Irvine, CA, 1974.

[MOCHY20] Antoine Thébault, Loïc Hélouët, *MOCHY : Models for Concurrent Hybrid Systems*, INRIA ADT, <https://adt-mochy.gitlabpages.inria.fr/mochy/>, 2020.

#### **Compétences requises:**

Aucune compétence particulière n'est requise pour ce stage, mais le candidat devra avoir un certain goût pour les méthodes formelles. A titre d'exemple du niveau mathématique requis, on peut conseiller la lecture de [Lime06]. Il est essentiel que le candidat soit capable de lire et rédiger en anglais.