

# Stage de M2

## Jeux d'énergie dans les systèmes ferroviaires urbains

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

**Keywords :** Transports, Energie, Jeux quantitatifs

**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. La consommation d'énergie est le premier des défis que les concepteurs et opérateurs des réseaux doivent résoudre. En effet, un système tel que le métro parisien a une consommation électrique annuelle de plusieurs TWh.

Des avancées récentes en matière de récupération d'énergie permettent de récupérer l'énergie de freinage d'un véhicule, de la convertir en énergie électrique pour la réutiliser dans le réseau électrique. Cette énergie est alors disponible pour le démarrage d'un autre véhicule. On peut voir cette pratique comme un transfert d'énergie, et chercher à optimiser ce transfert en synchronisant freinages et arrivées des véhicules.

L'objectif de ce stage consistera à étudier un nouveau modèle de jeux à transfert d'énergie permettant d'élaborer des stratégies optimales en termes de consommation énergétique.

### 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. Mais on souhaite également que ce service soit rendu avec des coûts maîtrisés
- A des enjeux de société en connectant le plus grand nombre aux lieux de travail, de culture, de loisirs....

La consommation d'énergie est un des éléments cruciaux pour les transports en commun. Un réseau comme le métro parisien consomme chaque année 2,4 TWh. A titre de comparaison, c'est la production mensuelle de trois centrales nucléaires, ou encore la consommation annuelle d'une ville de 350 000 habitants. Tout gain d'efficacité dans ces systèmes énergivores, même le plus minime, permet d'économiser des quantités d'énergie considérables.

Des avancées récentes en matière de récupération d'énergie permettent de transformer l'énergie cinétique d'un véhicule en mouvement en électricité lors du freinage et de la réinjecter dans le réseau électrique au lieu de la dissiper en chaleur. Cette énergie est alors disponible pour le démarrage d'un autre véhicule. On peut voir cette pratique comme un transfert d'énergie, et chercher à optimiser ce transfert en synchronisant freinages et arrivées des véhicules. Selon les modèles théoriques, les gains peuvent aller jusqu'à 18 %.

Cependant, il ne suffit pas de savoir transformer de l'énergie cinétique en énergie électrique pour assurer un transfert optimal entre véhicules. En effet, le transfert d'énergie ne peut se faire que si les deux véhicules sont dans la même partie du réseau électrique, si l'un freine et l'autre avance, etc.

Ceci a plusieurs conséquences :

- on peut jouer sur la vitesse et donc le temps de trajet d'un véhicule pour favoriser la « synchronisation » de son freinage avec le départ d'un autre véhicule.
- Le positionnement physique d'un véhicule affecte le gain possible d'énergie, puisque le transfert ne peut avoir lieu qu'au sein d'un même sous-réseau électrique
- Favoriser un gain d'énergie immédiat (transfert d'énergie d'un train  $n$  à un train  $n-1$ ) n'est pas nécessairement la meilleure stratégie, car elle peut impacter les gains futurs.

On notera également que la stratégie la plus triviale pour économiser de l'énergie est d'immobiliser tous les véhicules. Bien évidemment, cette « solution » n'est pas acceptable, et la gestion d'un réseau de transport doit aussi garantir une certaine qualité de service. Cette qualité peut être un critère de performance comme la régularité de service (e.g. un train passe toutes les 3 minutes dans chaque station) et mesurée comme une distance à un comportement idéal.

Les systèmes à récupération d'énergie peuvent être vus comme des **jeux coopératifs multi-agents, quantitatifs, et temporisés** et dans lesquels certaines quantités comme l'énergie peuvent être transférées d'un agent à un autre. L'objectif, dans ce type de jeu est de minimiser l'énergie consommée, tout en garantissant une certaine régularité dans le service.

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, ... Nous avons récemment proposé [Hel22] un modèle de jeux à énergie, qui permet de modéliser des systèmes capables de stocker puis utiliser l'énergie nécessaire pour atteindre un objectif. Cependant, ce modèle est composé seulement de deux agents antagonistes, et l'énergie est une variable globale de tout le système. [Bouyer08] et [Chatterjee12] ont proposé des modèles de jeux à énergie, et [Chatterjee14, Fahrenberg11, Velner15] des jeux quantitatifs multicritères. Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas de modèle de jeu multi-agent « à transfert d'énergie ».

Le travail de stage se décomposera en trois parties :

- La première partie sera consacrée à une étude bibliographique sur la théorie des jeux, les modèles temporisés, les jeux à énergie.
- La deuxième partie du stage consistera à proposer un modèle simple de jeu permettant de représenter la consommation et les transferts d'énergie dans un réseau ferroviaire urbain, la coopération entre véhicules, et de fixer les objectifs quantitatifs optimisant l'énergie et le service rendu.
- La troisième partie du stage consistera à proposer, si elle existe, des techniques pour construire des stratégies optimales dans ces jeux, et à démontrer la complexité de la recherche de stratégie dans ces jeux.

**Compétences requises :**

Aucune connaissance préalable des jeux quantitatifs 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 [Bouyer08]. Il est essentiel que le candidat soit capable de lire et rédiger en anglais.

## Bibliographie :

- [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.
- [Bouyer04] Patricia Bouyer, Franck Cassez, Emmanuel Fleury, Kim Guldstrand Larsen, Optimal Strategies in Priced Timed Game Automata. FSTTCS 2004, 148-160, 2004
- [Bouyer08] Patricia Bouyer, Uli Fahrenberg, Kim Guldstrand Larsen, Nicolas Markey, Jiří Srba, Infinite runs in weighted timed automata with energy constraints, FORMATS'08, LNCS 5215, September 2008, pp. 33-47.
- [Chatterjee12] Krishnendu Chatterjee, Laurent Doyen, Energy Parity games, Theoretical Computer Science 458, pp 49-60, 2012.
- [Chatterjee14] Krishnendu Chatterjee, Mickael Randour, Jean-François Raskin, Strategy synthesis for multi-dimensional quantitative objectives, Acta Inform., 51 (3-4) (June 2014), pp. 129-163.
- [Ejsing13] Daniel Ejsing-Dunn, Lisa Fontani, Infinite runs in recharge automata, Master's thesis, Computer Science Department, Aalborg University, Denmark (June 2013)
- [Fahrenberg11] Uli Fahrenberg, Line Juhl, Kim Guldstrand Larsen, Jiří Srba, Energy games in multiweighted automata, ICTAC'11, LNCS 6916, pp. 95-115, 2011.
- [Helouet22] Loïc Hélouët, Nicolas Markey, Ritam Raha, *Reachability games with relaxed energy constraints*. Inf. Comput. 285(Part): 104806 (2022)
- [Kecir19] Karim Kecir, *Performance evaluation of urban rail traffic management techniques*, Thèse Univ. Rennes 1, 2019.
- [MOCHY20] Antoine Thébault, Loïc Hélouët, *MOCHY : Models for Concurrent Hybrid Systems*, INRIA ADT, <https://adt-mochy.gitlabpages.inria.fr/mochy/>, 2020.
- [Velner15] Yaron Velner, Krishnendu Chatterjee, Laurent Doyen, Thomas A. Henzinger, Alexander Rabinovich, Jean-François Raskin, The complexity of multi-mean-payoff and multi-energy games, Inf. Comput. 241, pp. 177-196, 2015.