

Sujet de thèse

Vérification de propriétés dynamiques pour une famille de modèles hybrides. Application au contrôle des épidémies

Directeur(s) : Benoît Delahaye et Morgan Magnin – `benoit.delahaye@ls2n.fr`,
`morgan.magnin@ls2n.fr`

Encadrant : Guillaume Cantin – `guillaume.cantin@ls2n.fr`

Équipes MéForBio & VELO – Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes UMR 6004

Contexte

Dans un contexte international marqué par l'augmentation constante d'événements épidémiques majeurs, la recherche scientifique est fortement sollicitée, afin d'apporter aux acteurs institutionnels une aide à la décision, dans l'urgence et l'incertitude [Mor20]. Anticiper et contrôler la propagation de ces épidémies émergentes sont alors deux enjeux cruciaux, qui concernent de nombreuses communautés scientifiques.

La modélisation de la dynamique de propagation de ces événements a récemment fait l'objet de très nombreuses avancées. Pour étudier l'effet des comportements humains et des décisions des acteurs institutionnels sur la dynamique biologique, on sait notamment construire des modèles hybrides, en couplant les outils de modélisation discrète probabiliste tels que les chaînes de Markov, issus de l'informatique, avec les outils de modélisation continue déterministe tels que les équations différentielles, issus des mathématiques [CSB22]. Or, des méthodes de vérification des propriétés des chaînes de Markov sont bien connues [BK08], ainsi que des méthodes d'analyse de la dynamique des équations différentielles [Per13]. Mais la vérification des propriétés de ces modèles hybrides obtenus par couplage des deux formalismes est un domaine peu exploré, qui représente aujourd'hui un axe de recherche essentiel, avec des applications également prometteuses dans d'autres domaines (étude des propriétés dynamiques de systèmes biologiques).

Objectifs de la thèse

L'objectif premier de cette thèse consiste à construire un formalisme nouveau pour définir et étudier une classe de modèles hybrides. Ces modèles hybrides seront obtenus par couplage d'un processus continu déterministe avec un processus discret probabiliste. Le cadre choisi devra être suffisamment large pour couvrir plusieurs domaines d'application, et devra dépasser les travaux existants [JCD22, SFM22, Hen00], avec notamment une réflexion approfondie sur les échelles de temps. Cette classe de modèles devra également être équipée d'une structure logique permettant la comparaison et le raffinement de modèles.

Le second objectif de cette thèse consistera à étendre ou à redéfinir les méthodes de vérification de propriétés pour ces nouveaux modèles. En plus des propriétés usuelles telles que l'accessibilité et l'invariance, on s'intéressera particulièrement aux propriétés dynamiques telles que la stabilité et la périodicité. Les méthodes de vérification pourront être de nature numérique et reposer sur un traitement statistique, ou de nature symbolique et associées à une procédure algorithmique.

Un cas d'étude privilégié portera sur l'étude des propagations épidémiques et de leur contrôle. Ces phénomènes sont en effet caractérisés par la juxtaposition d'une dynamique virale continue avec une dynamique humaine décisionnelle visant à réduire leurs impacts. La généralité du formalisme hybride ainsi conçu pourra être illustrée sur un cas d'étude biologique complémentaire portant sur la résilience

d'un modèle simplifié de l'horloge circadienne face à des événements venant la perturber (jet-lag, disruption du mécanisme jour/nuit, etc.) [AMI16].

Ces recherches seront menées dans le contexte de deux projets en cours de financement : (1) le projet CoSysM3, mené par Cristiana J. Silva (Université de Lisbonne, Portugal), financé pour une durée de 4 ans par la Fondation Portugaise pour la Science, qui porte sur le contrôle des épidémies et (2) le projet VERHYDYN, mené par Guillaume Cantin (Nantes Université), financé par l'INS2I pour l'année 2023, qui porte sur la vérification de systèmes hybrides dynamiques. Ces projets de recherche permettront de supporter des séjours de collaboration scientifique entre les Universités de Nantes et de Lisbonne pour la doctorante ou le doctorant.

Profil de la candidate ou du candidat

Pour réaliser ce travail de thèse, la candidate ou le candidat devra disposer de solides connaissances en informatique théorique, sur les méthodes formelles de vérification de modèles, et montrer un vif intérêt pour les mathématiques appliquées. Une expérience sur l'étude de modèles en épidémiologie sera fortement appréciée.

Références

- [AMI16] Alexander Andreychenko, Morgan Magnin, and Katsumi Inoue. Analyzing resilience properties in oscillatory biological systems using parametric model checking. *Biosystems*, 149 :50–58, 2016.
- [BK08] Christel Baier and Joost-Pieter Katoen. *Principles of model checking*. MIT press, 2008.
- [CSB22] Guillaume Cantin, Cristiana J Silva, and Arnaud Banos. Mathematical analysis of a hybrid model : Impacts of individual behaviors on the spreading of an epidemic. *Networks & Heterogeneous Media*, 2022.
- [Hen00] Thomas A Henzinger. The theory of hybrid automata. In *Verification of digital and hybrid systems*, pages 265–292. Springer, 2000.
- [JCD22] David Julien, Guillaume Cantin, and Benoît Delahaye. End-to-end statistical model checking for parametric ODE models. In *International Conference on Quantitative Evaluation of Systems*, pages 85–106. Springer, 2022.
- [Mor20] Serge Morand. Emerging diseases, livestock expansion and biodiversity loss are positively related at global scale. *Biological Conservation*, 248 :108707, 2020.
- [Per13] Lawrence Perko. *Differential equations and dynamical systems*, volume 7. Springer Science & Business Media, 2013.
- [SFM22] Honglu Sun, Maxime Folschette, and Morgan Magnin. Limit cycle analysis of a class of hybrid gene regulatory networks. In *Computational Methods in Systems Biology : 20th International Conference, CMSB 2022, Bucharest, Romania, September 14–16, 2022, Proceedings*, pages 217–236. Springer, 2022.