



LABORATOIRE DE MODÉLISATION
ET SIMULATION MULTI ÉCHELLE

Sous la co-tutelle de :

CNRS

UPEC • UNIVERSITÉ PARIS-EST CRÉTEIL

UPEM • UNIVERSITÉ PARIS-EST MARNE-LA-VALLÉE

Optimisation de la vitesse des trains vis-à-vis de leur comportement dynamique sur les voies

Contact : christine.funfschilling@sncf.fr

Mots clé : mécanique probabiliste, optimisation sous incertitudes, contrainte non-linéaire, problèmes inverses, traitement du signal, dynamique ferroviaire.

Modalités pratiques :

CIFRE SNCF - encadrement : C. Funfschilling

École doctorale : Université Paris Est, MSME - directeur de thèse : C. Soize

Co-encadrement CEA : G. Perrin

Description du sujet de thèse

Problématiques industrielles

Le transport ferroviaire est en pleine mutation. L'ouverture à la concurrence et l'apparition de nouveaux véhicules, la densification des circulations et l'augmentation de leurs vitesses contraignent de plus en plus économiquement et techniquement ce système complexe. Aussi l'utilisation des méthodes numériques devient incontournable. C'est dans ce contexte que SNCF travaille à l'introduction de la simulation dans les processus de spécification, d'homologation, de maintenance de l'infrastructure et du matériel roulant.

L'impact de la vitesse de circulation des trains sur la dynamique du système véhicule-voie reste cependant peu étudié : seules des règles semi-empiriques sont appliquées pour définir une vitesse consigne à la construction de la voie et des valeurs de ralentissement en cas de défaillance de l'infrastructure ou du matériel roulant. La caractérisation de la vitesse mérite néanmoins une grande attention puisqu'elle joue un rôle primordial sur l'**exploitation** mais aussi sur la **réponse dynamique** des trains et donc sur la **sécurité** des circulations, le **confort** des voyageurs, et l'endommagement des matériels roulants et de l'infrastructure.

Ainsi, des outils d'**optimisation robuste de la vitesse du train** sous des **contraintes** liées à la **dynamique du système véhicule-voie** (pour la sécurité et le confort) permettra de **limiter l'endommagement** de l'infrastructure et du matériel roulant mais aussi de proposer de nouvelles méthodes pour définir la vitesse de circulation à respecter en cas d'avarie de l'infrastructure ou du matériel roulant.

En particulier, cette stratégie de définition de la vitesse pourra par ailleurs être utilisée dans les **trains autonomes** qui ne bénéficieront plus du **ressenti dynamique** du conducteur ou des contrôleurs pour adapter la vitesse du matériel roulant.

Enfin les outils développés pourront être utilisés pour estimer les **plages de variations acceptables vis-à-vis de la dynamique du système** des paramètres mécaniques et géométriques des matériels roulants et de l'infrastructure.

Objectifs scientifiques de la thèse

Deux objectifs principaux peuvent être définis pour ce projet de thèse.

- Le premier objectif est d'**optimiser** la loi vitesse de circulation du train, pilotée par les capacités du moteur, l'adhérence au contact roue-rail et les efforts aérodynamiques, sous **des contraintes dynamiques** (accélérations limitées pour garantir la sécurité et le confort des passagers) vis-à-vis d'un **critère multi-objectif** : minimiser le temps de circulation, l'endommagement de la voie et du matériel roulant ainsi que l'énergie consommée.
- Le deuxième objectif est de proposer des algorithmes simplifiés permettant d'adapter en **temps réel** (ou en analyse quotidienne) la vitesse de circulation d'un train à sa **réponse dynamique**.

État de l'art

Au niveau théorique :

- Optimisation robuste [1, 2]
- Méthodes pour l'identification de paramètres statistiques par problème inverse en grande dimension, calibration bayésienne [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]
- Propagation des incertitudes et des variabilités dans les systèmes mécaniques complexes [15, 16, 17, 18]
- Modélisation et simulations des champs aléatoires gaussiens et non gaussiens [19, 20]

Au niveau ferroviaire :

- Modélisation du système voie / véhicule [21, 22, 23]
- Caractérisation et modélisation de la géométrie des voies [24, 25, 26, 27]

Originalité de l'approche

Sur le plan scientifique l'originalité de ce travail réside en la mise en place de méthodes d'**optimisation robuste** sous **incertitudes** et sous **contraintes non-linéaires**. Le fait que le problème soit **non-causal**, ce qui est encore peu traité dans la littérature, donne un caractère ambitieux à ce projet.

Sur le plan applicatif, l'intérêt repose sur la proposition d'une méthode opérationnelle permettant de définir une **vitesse optimale** des trains vis-à-vis de la dynamique du système.

Plan d'organisation du travail

Étape 1 : Construction du modèle probabiliste voie / véhicule / loi de vitesse

Le système voie / véhicule contient un grand nombre de sources de variabilité au niveau de la géométrie de la voie, des profils de roue et de rail, du coefficient de frottement, de la distribution des masses et des caractéristiques mécaniques des suspensions. Afin de pouvoir utiliser la simulation pour optimiser la maintenance, il nous faut les introduire au mieux dans le modèle.

Pour la géométrie de la voie, nous nous appuyerons sur les modèles développés par G. Perrin [24, 25] et N. Lestoille [26, 27]. Les distributions prior des éléments de suspension seront quant à elles construites à partir des données des constructeurs et des mesures établies en centre de maintenance [3].

La vitesse du train dépend quant à elle des capacités du moteur, de l'adhérence au contact roue-rail et les efforts aérodynamiques qui sont par essence aléatoires. Elle est par ailleurs limitée par la vitesse de la ligne, elle même définie en fonction du tracé de la voie.

Étape 2 : Optimisation robuste

On cherchera alors à identifier des trajectoires de vitesse **minimisant le temps de parcours et les efforts injectés à la voie, sous contrainte** des critères de sécurité, de confort des passagers et de vitesse limite de la ligne. L'optimisation devra être robuste afin de ne pas être sensible aux perturbations du système.

Le problème d'optimisation étant probabiliste, l'estimation en chaque point du plan d'expérience nécessite plusieurs évaluations du code, ce qui constitue rapidement un **défi numérique**. Les méthodes d'**apprentissage statistique** par des **modèles probabilistes**, des algorithmes de **machine learning** et la **métamodélisation** pourront être utilisées pour limiter le coût numérique.

Le travail sera effectué essentiellement sur une base de données simulées en attendant l'équipement des rames en capteurs.

Étape 3 : Algorithmes simplifiés temps réels

La dernière étape consistera à travailler sur l'**efficacité numérique** des algorithmes développés. En effet, en vue d'une utilisation sur les véhicules autonomes l'estimation de la vitesse doit se faire rapidement (en temps réel ou en analyse quotidienne).

Références

- [1] C. Soize and R. Ghanem. Data-driven probability concentration and sampling on manifold. *Journal of Computational Physics*, 321 :242–258, 2016.
- [2] R. Ghanem and C. Soize. Probabilistic nonconvex constrained optimization with fixed number of function evaluations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering, Wiley*, 113 (4) :719–741, 2018.
- [3] D. Lebel, C. Soize, C. Funfschilling, and G. Perrin. Statistical inverse method for nonlinear train dynamics coupling bayes formulation with gaussian process surrogate model. *Inverse Problems*, Submitted in mai, 2018.
- [4] G. Perrin, C. Soize, D. Duhamel, and C. Funfschilling. Identification of polynomial chaos representations in high dimension from a set of realizations. *SIAM J. Sci. Comput.*, 34(6) :2917–2945, 2012.
- [5] G. Perrin, C. Soize, D. Duhamel, and C. Funfschilling. Karhunen-loève expansion revisited for vector-valued random fields : scaling, errors and optimal basis. *Journal of Computational Physics*, 242 :607–622, 2013.
- [6] G. Perrin, C. Soize, D. Duhamel, and C. Funfschilling. A posteriori error and optimal reduced basis for stochastic processes defined by a finite set of realizations. *SIAM/ASA J. Uncertainty Quantification*, 2 :745–762, 2014.
- [7] M. Arnst, R. Ghanem, and C. Soize. Identification of bayesian posteriors for coefficients of chaos expansions. *Journal of Computational Physics*, 229 (9) :3134–3154, 2010.

- [8] C. Soize. Identification of high-dimension polynomial chaos expansions with random coefficients for non-gaussian tensor-valued random fields using partial and limited experimental data. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 199(33-36) :2150–2164, 2010.
- [9] C. Soize. A computational inverse method for identification of non-gaussian random fields using the bayesian approach in very high dimension. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200 (45-46) :3083–3099, 2011.
- [10] B. P. Carlin and T. A. Louis. *Bayesian Methods for Data Analysis, Thrid Edition*. CRC Press, Boca Raton, 2009.
- [11] A. O’Hagan, M.C. Kennedy, and J. E Oakley. Uncertainty analysis and other inference tools for complex computer codes (with discussion). *Bayesian Statistics*, 6 :503–524, 1999.
- [12] F. Bachoc, G. Bois, J. Garnier, and J.M. Martinez. Calibration and improved prediction of computer models by universal kriging. *Nuclear Science and Engineering*, 176(1) :81–97, 2014.
- [13] J.L. Beck S.H. Cheung. Bayesian model updating using hybrid monte carlo simulation with application to structural dynamic models with many uncertain parameters. *Journal of Engineering Mechanics - ASCE*, 135(4) :243–255, 2009.
- [14] J.L. Beck S.H. Cheung. Bayesian model updating using hybrid monte carlo simulation with application to structural dynamic models with many uncertain parameters. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(5) :304–321, 2009.
- [15] G. I. Schueller and H.J. Pradlwarter. Uncertain linear systems in dynamics : Retrospective and recent developments by stochastic approaches. *Engineering Structures*, 31 :2507–2517, 2009.
- [16] O.P. Le Maître and O.M. Knio. *Spectral Methods for Uncertainty Quantification with Applications to Computational Fluid Dynamics*. Springer, 2010.
- [17] R. Ghanem and P. D. Spanos. *Stochastic Finite Elements : A Spectral Approach, rev. ed.* Dover Publications, New York, 2003.
- [18] A. Nouy. Proper generalized decomposition and separated representations for the numerical solution of high dimensional stochastic problems. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(4) :403–4034, 2010.
- [19] F. Poirion and C. Soize. Numerical methods and mathematical aspects for simulation of homogeneous and non homogeneous gaussian vector fields. *Probabilistic Methods in Applied Physics*, pages 17–53, 1995.
- [20] C. Soize. Non-gaussian positive-definite matrix-valued random fields for elliptic stochastic partial differential operators. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 195 :26–64, 2006.
- [21] C. Funfschilling, G. Perrin, and S. Kraft. Propagation of variability in railway dynamic simulations : application to virtual homologation. *Vehicle System Dynamics*, 50 :245–261, 2012.
- [22] S. Kraft. *Parameter optimization for a TGV model*. Ph.d., Ecole Centrale Paris, 2012.
- [23] G. Perrin, C. Soize, D. Duhamel, and C. Funfschilling. Quantification of the influence of the track geometry variability on the train dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60-61 :945–957, 2015.
- [24] G. Perrin. *Random fields and associated statistical inverse problems for uncertainty quantification - Application to railway track geometries for high-speed trains dynamical responses and risk assessment*. Ph.d., Université Paris Est, 2013.

- [25] G. Perrin, C. Soize, D. Duhamel, and C. Funfschilling. Track irregularities stochastic modeling. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 34 :123–130, 2013.
- [26] N Lestoille, C Soize, and C Funfschilling. Stochastic modeling of train dynamics under effect of track irregularities and experimental comparisons. In *International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics*, 2014.
- [27] N Lestoille, C Soize, and C Funfschilling. Sensitivity of train stochastic dynamics to long-time evolution of track irregularities. *Vehicle System Dynamics*, 54(23) :545–567, 2016.