

Modélisation physique de composants et circuits électroniques non linéaires pour la production d’effets audio

Judy Najnudel

8 novembre 2022

1 Contexte de la thèse

Cette thèse CIFRE porte sur la modélisation de composants électroniques non linéaires pour la simulation de circuits analogiques audio. Elle est le fruit de la collaboration entre l’équipe S3AM du laboratoire STMS (IRCAM-CNRS-SU) d’une part, et la société UVI d’autre part.

L’équipe S3AM s’intéresse à la modélisation, la simulation, l’identification et le contrôle de systèmes physiques producteurs de son (instruments de musique acoustiques, circuits électroniques, haut-parleurs, appareil vocal, etc.). Une part importante de ses travaux récents s’appuie sur le formalisme des Systèmes Hamiltoniens à Ports (SHP), également à la base de cette thèse. En effet, ce formalisme préserve le bilan de puissance et la passivité, ce qui, associé à des méthodes numériques ad hoc, garantit la stabilité des simulations et le réalisme sonore.

La société UVI quant à elle développe des instruments virtuels et des effets numériques pour les professionnels de la musique. Elle souhaite notamment proposer à ses clients des versions virtuelles bon marché d’effets électroniques *vintage* devenus rares et chers, mais toujours très appréciés.

Ainsi, l’objectif de cette thèse est de proposer des outils mathématiques pertinents dans un contexte industriel, à savoir des modèles suffisamment sophistiqués pour qu’une simulation sonne de façon réaliste, tout en demeurant assez simples pour qu’une simulation en temps réel soit possible.

À cette fin, la thèse explore deux approches différentes, toutes deux fondées sur le formalisme des SHP.

La première approche est de type “boîte blanche”. Elle suppose la topologie du circuit connue, et se concentre sur la modélisation de composants spécifiques présents dans les circuits audio anciens, à savoir les bobines ferromagnétiques (présentes dans les amplificateurs et les pédales wah-wah) et les opto-isolateurs (présents dans les compresseurs dynamiques et les trémolos).

La deuxième approche est de type “boîte grise”. Elle vise à retrouver la topologie d’un circuit et ses lois constitutives à partir de mesures, en infor-

mant l'apprentissage par une formulation SHP sous-jacente afin de conserver des propriétés physiques essentielles.

2 État de l'art

Différentes techniques permettent d'obtenir des fac-similés virtuels de circuits analogiques (pour un tour d'horizon, voir [1, 2, 3]), notamment la méthode Modified Nodal Analysis, la méthode Nodal DK, et les Wave Digital Filters.

L'approche choisie dans cette thèse est fondée sur une représentation d'état, satisfaisant le bilan de puissance d'un système physique structuré en parties conservatives, dissipatives et sources, appelé Système Hamiltonien à Ports [4, 5]. Cette formulation peut être combinée avec des méthodes numériques préservant le bilan de puissance et la passivité en temps discret, pour des systèmes linéaires et non linéaires. Cette approche s'est par ailleurs déjà avérée pertinente pour la simulation de systèmes audio [6, 7, 8, 9].

3 Résultats

3.1 Modélisation énergétiquement bien posée de bobine ferromagnétique

Une bobine ferromagnétique (i.e., un enroulement autour d'un aimant) peut présenter de fortes non-linéarités (saturation et hystérésis), dont l'importance dépend de la température. Or, beaucoup de modèles de la littérature négligent l'aspect thermodynamique, ou lorsqu'ils en tiennent compte, deviennent trop coûteux pour des applications audio temps réel.

Dans cette thèse, nous proposons un nouveau modèle de bobine ferromagnétique multiphysique, passif et à complexité réduite. Pour ce faire, l'aimant et l'enroulement sont d'abord traités séparément. Afin de modéliser l'aimant, constitué de millions d'atomes interagissant les uns avec les autres, nous développons une nouvelle méthode générale permettant de dériver une représentation SHP macroscopique d'un système complexe décrit par la physique statistique. Après application de cette méthode à l'aimant, nous obtenons un modèle doté de ports de connexion magnétiques et thermiques. Ceci permet ensuite de traiter le couplage de l'aimant et de l'enroulement. Le modèle complet est caractérisé par un état, une fonction d'énergie (Fig. 1) et une loi de production d'entropie bien définis. La saturation et l'hystérésis sont correctement reproduits, et l'influence de la thermodynamique est explicite.

Ce modèle est utilisé pour identifier deux bobines Fasel à partir de mesures, puis simuler en temps réel deux sous-circuits audio représentatifs : un filtre passe-bande, et un transformateur. Il a également été implémenté en tant qu'effet dans le logiciel Falcon d'UVI.

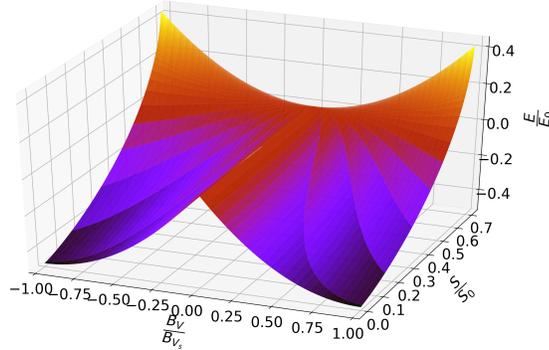


Figure 1: Énergie de l'aimant en fonction de son flux magnétique et de son entropie. Le modèle reproduit correctement la transition de phase de ferro-magnétique à paramagnétique en fonction de la température.

3.2 Modélisation énergétiquement bien posée d'opto-isolateur

Un opto-isolateur résistif est constitué d'une photorésistance et d'une LED couplées optiquement. La valeur de la photorésistance diminue non linéairement avec la lumière qu'elle reçoit, avec un temps de réponse dépendant également de la lumière reçue. En audio, les opto-isolateurs sont employés pour le contrôle automatique de gain.

Les modèles de la littérature, basés sur une représentation de type signal, reproduisent le comportement d'un circuit spécifique. Ils offrent donc moins de modularité qu'un modèle purement physique. En particulier, il est difficile de les connecter à d'autres composants modélisés en tant que SHP.

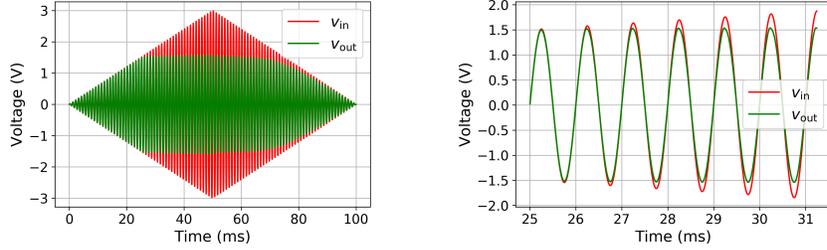
Dans cette thèse, nous proposons un nouveau modèle d'opto-isolateur résistif, entièrement issu de la physique et passif. Pour ce faire, nous étudions les principaux mécanismes de dopage dans une photorésistance (qui est un semiconducteur), et dérivons un modèle de sa dynamique interne. Ensuite, nous déduisons une loi de couplage optique entre la LED et la photorésistance, à partir de la dynamique de la photorésistance, de la résistance statique de la photorésistance, et de la loi dissipative de la LED. Enfin, nous formulons un modèle SHP complet en connectant les différents sous-composants.

Ce modèle est utilisé pour identifier un Vactrol à partir de mesures, puis simuler un compresseur optique simple (Figs 2a-2b).

3.3 Modélisation de PH-ODE à partir de données

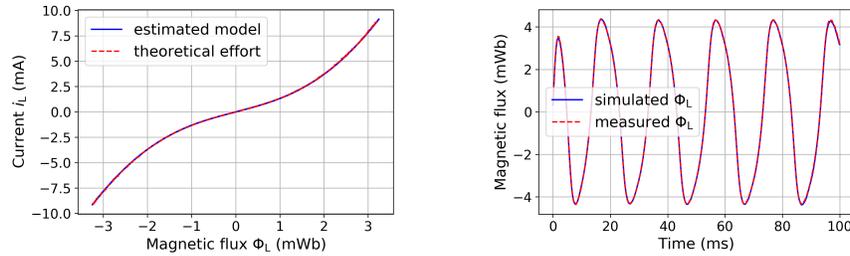
Lorsque la topologie du circuit est inconnue, la modélisation boîte blanche n'est plus une option, mais on peut retrouver le comportement du circuit à partir de mesures.

Pour ce faire, nous proposons deux méthodes de type boîte grise, combinant une formulation PH-ODE (*Port-Hamiltonian Ordinary Differential Equation*)



(a) Simulation d'un compresseur optique. (b) Simulation d'un compresseur optique (détail).

Figure 2: Simulation d'un compresseur optique. Le gain appliqué à l'entrée est réduit à partir d'un certain seuil, en maintenant une distorsion minimale sur la sortie.



(a) Filtre passe-bande : effort théorique et (b) Filtre passe-bande : état mesuré et estimé de l'inductance.

Figure 3: Identification d'un filtre passe-bande : résultats de l'estimation de la loi d'effort d'une inductance non linéaire et simulation de l'état à partir de l'estimation.

d'une part, et l'utilisation de noyaux reproduisants d'autre part. Les deux méthodes permettent de conserver le bilan de puissance et la passivité, tout en autorisant une large gamme de comportements non linéaires.

La première méthode se place dans l'espace d'état et vise à reconstruire l'énergie et la matrice d'interconnexion du système à partir de données. La méthode a été utilisée pour identifier un filtre passe-bande passif non linéaire (Figs. 3a-3b).

La deuxième méthode s'appuie sur l'opérateur de Koopman, un opérateur linéaire qui encode la trajectoire de fonctions de l'état. Dans cet espace de fonctions, la dynamique du système devient linéaire. Ainsi, une fois une approximation en dimension finie et passive de cet opérateur trouvée, un schéma numérique non itératif peut être employé pour les simulations. La méthode a été appliquée afin d'identifier et de simuler un circuit *diode clipper*.

4 Liste des publications

- **Journaux**

1. JAES 2021: Najnudel, et al. “Power-balanced modeling of nonlinear coils and transformers for audio circuits.”
2. Physica D 2023 (en soumission): Najnudel, et al. “From equilibrium statistical physics under experimental constraints to macroscopic port-Hamiltonian systems.”

- **Conférences**

3. DAFX 2020: Najnudel, et al. “A power-balanced dynamic model of ferromagnetic coils.”
4. DAFX 2021: Najnudel, et al. “Identification of nonlinear circuits as port-Hamiltonian systems.”
5. LHMNC 2021: Najnudel, et al. “From statistical physics to macroscopic port-Hamiltonian systems: A roadmap.”

- **Avant la thèse (stage de Master 2)**

6. AES Conv. 2018: “Analog circuits and port-Hamiltonian realizability issues: A resolution method for simulations via equivalent components.”
7. JAES 2019: Najnudel, et al. “Simulation of the ondes Martenot ribbon-controlled oscillator using energy-balanced modeling of nonlinear time-varying electronic components.”
8. IEEE TASLP 2020: Najnudel, et al. “Simulation of an ondes Martenot circuit.”

References

- [1] Jyri Pakarinen and David T Yeh. A review of digital techniques for modeling vacuum-tube guitar amplifiers. *Computer Music Journal*, 33(2):85–100, 2009.
- [2] Giovanni De Sanctis and Augusto Sarti. Virtual analog modeling in the wave-digital domain. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 18(4):715–727, 2009.
- [3] V Välimäki, S Bilbao, JO Smith, JS Abel, J Pakarinen, and D Berners. Virtual analog effects. In *DAFX: Digital Audio Effects*, pages 473–522. Wiley Online Library, 2011.
- [4] B. M. Maschke, A. J. van der Schaft, and P. Breedveld. An intrinsic Hamiltonian formulation of network dynamics: Non-standard Poisson structures and gyrators. *Journal of the Franklin institute*, pages 923–966, 1992.

- [5] A. J. van der Schaft, Dimitri Jeltsema, et al. Port-Hamiltonian systems theory: An introductory overview. *Foundations and Trends in Systems and Control*, 1(2-3):173–378, 2014.
- [6] Nicolas Lopes, Thomas Hélie, and Antoine Falaize. Explicit second-order accurate method for the passive guaranteed simulation of port-Hamiltonian systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(13):223–228, 2015.
- [7] Nicolas Lopes and Thomas Hélie. Energy balanced model of a jet interacting with a brass player’s lip. *Acta Acustica united with Acustica*, 102(1):141–154, 2016.
- [8] Antoine Falaize and Thomas Hélie. Passive guaranteed simulation of analog audio circuits: A port-Hamiltonian approach. *Applied Sciences*, 6(10):273, 2016.
- [9] Antoine Falaize and Thomas Hélie. Passive simulation of the nonlinear port-Hamiltonian modeling of a Rhodes piano. *Journal of Sound and Vibration*, 390:289–309, 2017.