

De la théorie à la pratique dans l'enseignement du Traitement du Signal : Initiation à la recherche

L. Chehami, N. Smagin, J. Assaad, P. Campistron, F. Jenot, et E. Moulin

Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Junia, Univ. Polytechnique Hauts-de-France,

UMR 8520 - IEMN - Institut d'Électronique de Micro électronique et de Nanotechnologie, F-59000 Lille, France

Résumé—Le débat entre la théorie et la pratique dans l'enseignement sur l'importance de chacun comme base de la formation en Master existe depuis plusieurs années. Ce lien est souvent sous-évalué et on a tendance à oublier que de la théorie naît la pratique et que la pratique est basée sur la théorie. A l'université Polytechnique des Hauts-de-France, dans le cadre de la formation Master Matériaux, Contrôle et Sécurité, nous avons proposé un module d'enseignement sur l'analyse et traitement de signaux à nos étudiants en Master 2. D'un côté, se référer à une théorie sur le traitement de signaux c'est aborder une série d'outils d'analyse et de traitement de données tels que : transformée de Fourier, produit de convolution, calcul des fonctions de transferts, filtrage, etc., reliés naturellement aux phénomènes de notre discipline. D'un autre côté, la mise en pratique de ces approches et méthodes théoriques vues au cours est une façon de concevoir notre discipline. Quelques fois nous pouvons observer que l'enseignement en traitement de signal est complètement théorique et déconnecté de la pratique. Les étudiants sont alors loin d'y apprendre comment mettre en application les concepts vus en classe et ils sont incapables de donner un sens à leur apprentissage. L'objectif de ce papier est de donner une vue globale sur la démarche mise en place pour nos étudiants en Master pour éviter cette "dichotomie" théorie-pratique, ainsi que d'esquisser des recommandations, après retour d'expérience des étudiants, afin de renforcer cette relation et attirer les étudiants dans le monde de la recherche en laboratoire et de trouver un juste milieu.

Index Terms—Théorie, Pratique, Matériaux, Traitement de Signal, Retour d'Expérience.

I. INTRODUCTION

En dehors des connaissances fondamentales et générales acquises en Licence et en première année de Master à l'UPHF (Physique, Électronique, mathématiques, et informatique), les connaissances et compétences de base requises au domaine des sciences et de contrôle de matériaux portent sur le Traitement du Signal (TS) : représentation et filtrage temporel et/ou fréquentiel des signaux continus ou discrets. L'importance de la pratique dans l'enseignement du TS souligne le besoin de non seulement acquérir du savoir et des habiletés [1], [2], mais aussi que l'étudiant puisse y développer ses aptitudes et ses attitudes afin de les transmettre dans son milieu de travail. De même, dans le cadre d'un stage, l'étudiant sera amené à mettre à l'épreuve son habileté professionnelle et technique. En effet, le monde du travail oblige aujourd'hui les futurs diplômés à démontrer leurs qualités personnelles et faire preuve d'un minimum d'autonomie.

Dans un sondage (un questionnaire envoyé par mail aux étudiants) parmi les étudiants en Master 2 SGM (M2, Science et Génie des Matériaux), parcours Matériaux Contrôle et Sécurité (MCS), la moitié des répondants (50 %) aimerait que le programme contienne plus de pratique. Pour mieux gérer ce "déséquilibre" entre la théorie et la pratique, nous avons aménagé un espace pour un banc de mesures expérimentales au laboratoire IEMN-DOAE (Institut d'Électronique, de Micro-Électronique et de Nanotechnologie). Cette initiative a un double avantages : 1) cela a permis aux étudiants de pratiquer avec des instruments de mesure et traiter les données en abordant ce qu'ils ont vu en classe, 2) les attirer aux activités de recherche qui se font au laboratoire, apprendre à travailler en équipe dans des groupes hétérogènes, et à coopérer. Cette approche d'enseignement théorie (en classe), et recherche (en laboratoire) nécessite, toutefois, des moyens matériels et humains qui se sont réunis pour mettre en place ce dispositif, en quelque sorte, d'accompagnement. De même, les auteurs interviennent aussi, dans le cadre des stages, pour mieux former les étudiants et les préparer dans l'insertion professionnelle.

Ce papier est organisé comme suit : dans la section II, on présente la partie théorique sur les outils abordés en classe en Traitement de Signal. La section III présente la partie pratique des projets réalisés au laboratoire IEMN-DOAE à Valenciennes. Enfin, une conclusion esquissant un retour d'expérience des étudiants ainsi que des recommandation, est donnée en section IV.

II. PARTIE THÉORIQUE

Cette partie théorique est dispensée sous forme de cours magistraux (15h CM), et de travaux dirigés (12h TD). Les enseignements étaient en grande partie en présentiel, le reste en distantiel en utilisant la plateforme Moodle de l'Université Polytechnique des Hauts-de-France (UPHF) et l'outil Big-BlueButton <https://bigbluebutton.org/> (BBB). Le contenu du module Traitement de signal est porté essentiellement sur :

- 1) les opérations de base : produit de convolution, corrélation ;
- 2) représentation fréquentielle des signaux : Transformée de Fourier ;
- 3) Filtrage des signaux analogiques et numériques ;

- 4) Calcul des fonctions de transfert des systèmes linéaires invariants dans le temps.

L'objectif du contenu de ce cours est de pouvoir utiliser ces outils et théorèmes fondamentaux pour le contrôle des matériaux, qui rentre naturellement, dans les grandes lignes du parcours MCS. En particulier, on s'intéresse ici à la caractérisation d'un système par sa fonction de Green (en physique), couramment appelée réponse impulsionnelle (en électronique). Bien entendu, par réponse impulsionnelle, les étudiants doivent maîtriser l'outil du produit de convolution en domaine temporel, ou la notion de fonction de transfert en fréquentiel. Pour cela, l'analyse dans le domaine de Fourier devient nécessaire, notamment si l'on s'intéresse au spectre d'énergie des signaux.

Cette année, avec les conditions sanitaires, certaines séances se sont déroulées en distanciel. Néanmoins, il y'a eu beaucoup d'interaction (par email ou en ligne via un lien BBB créé par les chargés de cours à cet effet). Cela a permis, un suivi continu pour évaluer le savoir-faire et les compétences acquises, des apprenants étudiants.

Dans la prochaine section, on montre la partie application où les étudiants ont mis en pratique ce qu'ils ont vu en classe.

III. PARTIE PRATIQUE

Cette partie pratique est dispensée d'abord à la salle de travaux pratiques (TP) de l'université de Valenciennes, où les étudiants ont fait une séance d'initiation au logiciel Matlab. Ensuite, les travaux pratiques sont poursuivis au laboratoire IEMN-DOAE pour un total de 9h TP. Les travaux pratiques au laboratoire de recherche étaient centrés sur le « Contrôle non-destructif (CND) des rails ferroviaires par la mesure de la Fonction de Green/Fonction de Transfert/Réponse impulsionnelle ». Pour cet objectif, un banc d'essais de contrôle de santé intégré (CSI) a été adopté aux besoins d'étudiants. Ce banc représente un rail ferroviaire avec douze capteurs piézoélectriques collés en dessus du rail, d'une façon équidistante. le dispositif expérimental est équipé de : (1) oscilloscope, (2) générateur de formes d'onde arbitraires, (3) filtre passe-bas avec un amplificateur intégré et (4) une meuleuse qui sert à créer des vibrations mécaniques hautes-fréquences ($\simeq 50$ kHz). Le défaut "artificiel" est représenté par une pince-étau attachée au rail (Fig. 1). Il est à souligner, qu'à cause du contexte du COVID-19, le groupe des étudiants a été divisé en deux parties afin que chaque étudiant puisse accomplir sa propre tâche en respectant les normes sanitaires en vigueur.

La séance pratique est précédée d'une présentation démontrant le contexte dans lequel les étudiants pourront appliquer les connaissances de traitement du signal dans le cadre de leur métier lié aux matériaux. En premier lieu on présente le concept d'infrastructure technique moderne où grâce aux possibilités offertes par l'internet des objets (IoT) les constructions du génie civil et les moyens de transport



FIGURE 1. Photographie de vue générale de banc de CSI pour les TP en traitement du signal

pourront intégrer de nombreux capteurs communicants. Cette approche nommée le Contrôle de Santé Intégré (CSI) permettra de doter ces structures d'un "système nerveux" permettant d'avertir d'une façon préventive de l'apparition des défauts dangereux (fissures de fatigue, corrosion, conditions extrêmes d'opération, etc.). Les futurs diplômés en sciences de matériaux seront très probablement confrontés à la problématique du CSI et d'intégration de ces capteurs pendant le développement de nouveaux matériaux et structures intelligentes.

Ensuite, l'énoncé de TP commence par un court rappel des bases théoriques déjà vues en CM et TD en les adaptant au contexte du TP. Le but de cette partie introductive est de rendre les notions théoriques plus "tangibles" possibles. Elle est organisée comme suit :

- 1) Notion de Fonction de Green (FG) comme une solution particulière d'une équation différentielle à la sollicitation ponctuelle représentée par la fonction de Dirac (mesure simple de la FG dans l'ingénierie).
- 2) Notion de la réponse impulsionnelle (RI) comme une représentation de la FG dans le domaine temporel.
- 3) Notion de la fonction de transfert (FT) comme une représentation de la FG dans le domaine fréquentiel.
- 4) "Comment peut-on mesurer la RI ou la FT ?" Pour cette raison il faut imiter la fonction de Dirac car celle-ci est une abstraction mathématique. Point sur les différentes sollicitations utilisées en ingénierie : une période de signal sinusoïdal, demi-période de signal sinusoïdal, signal modulé linéairement en fréquence (chirp), bruit blanc. Notion clé : *la largeur du spectre et la distribution homogène de l'énergie spectrale*.
- 5) Exemple de caractérisation d'un amplificateur audio par sa RI et sa FT : Exemples des FTs des systèmes audio disponibles dans le commerce.

- 6) Démonstration aux étudiants que la RI et la FT sont de signatures d'un système pouvant le décrire complètement.
- 7) Démonstration d'approche du CND qui sera utilisée dans ce TP : le changement détecté dans la FT au la RI témoigne d'un changement du système et par conséquent d'une apparition de défaut.

Les tâches pratiques à accomplir par les étudiants sont regroupées en 5 sections principales :

- 1) Caractérisations de fonctions imitant la fonction de Dirac dans la gamme de fréquences de 30 kHz à 1 MHz.
 - a) Une période du signal sinusoïdal de trois fréquences différentes f_1 , f_2 et f_3 .
 - b) Une demie-période du signal sinusoïdal de mêmes fréquences f_1 , f_2 et f_3 .
 - c) Chirp large bande.
 - d) Bruit blanc.

Les notions acquises durant cette partie sont : représentation et analyse de signaux en échelle linéaire et logarithmique, largeur du spectre d'un signal, moyennage dans le domaine temporel et spectral, densité spectrale d'énergie de bruit blanc.

- 2) Caractérisation d'un filtre amplificateur. Les notions sur les signaux typiques d'excitation large bande sont appliquées pour la caractérisation de la FT d'un dispositif électronique .
 - a) acquisition du spectre de sortie d'un filtre amplificateur pour chaque excitation considérée (comme évoqué en section ci-dessus).
 - b) acquisition du spectre de sortie d'un filtre amplificateur pour l'excitation bruit blanc avec des gains différents (1, 2, 5, 10).
 - c) acquisition du spectre de sortie d'un filtre amplificateur avec des fréquences de coupure variables.

Le notions acquises durant cette partie sont : les limites d'excitation sinusoïdale courte, présentation et calcul du gain en échelle logarithmique, analyse des avantages et des inconvénients de la caractérisation des dispositifs électroniques avec un signal aléatoire ou un signal chirp.

- 3) Caractérisation de la FT du rail ferroviaire. Les notions sur les signaux d'excitation et les présentations de fonctions de transfert sont appliquées pour un cas réel de rail ferroviaire
 - a) Acquisition de la réponse du rail à toutes les excitations considérées précédemment.
 - b) Acquisition de la réponse électrique du rail à l'excitation mécanique par une meuleuse. *Le point le plus intéressant ici c'est que les étudiants ont la possibilité d'observer la correspondance des FTs obtenues par les sollicitations électriques avec celle obtenue mécaniquement. Cela rend l'apprentissage*

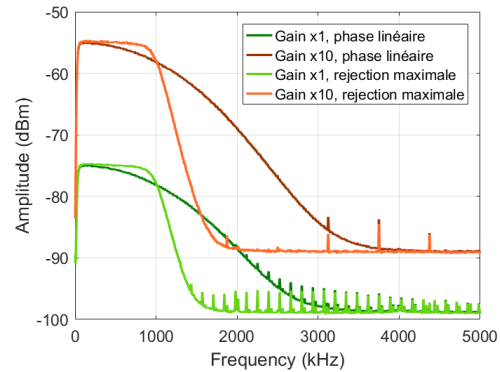


FIGURE 2. Exemples de fonctions de transfert du filtre-amplificateur, obtenues avec des réglages variables.

très visuel et donne la possibilité de bien observer la conversion électromécanique des signaux.

- c) Détection de 4 fréquences dominantes dans la réponse du rail.

Les notions acquises durant cette partie sont : signaux dans les structures réverbérantes de type "coda", fréquences dominantes dans la réponse d'une structure mécanique, comparaison de sollicitation mécanique par la meuleuse avec la sollicitation électrique par le bruit blanc.

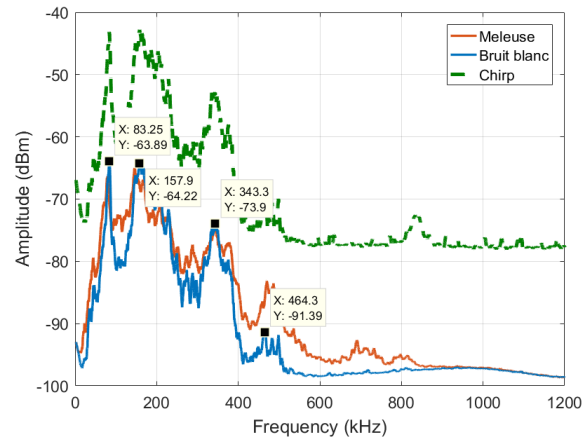


FIGURE 3. Exemples de fonctions de transfert du rail ferroviaire obtenues avec les sollicitations par chirp, bruit blanc et sollicitation mécanique par une meuleuse. Les étudiants observent également les 4 fréquences dominantes dans la réponse du rail

- 4) Caractérisation de la RI du rail par le filtre inverse
 - a) Démonstration expérimentale que la corrélation croisée d'un signal chirp avec lui-même donne une fonction proche à la fonction de Dirac.
 - b) Acquisition de signal d'excitation chirp ainsi que de réponse du rail à cette sollicitation. Application du filtrage inverse par convolution avec ces signaux.

- c) Comparaison de la RI obtenue par le filtrage inverse avec les réponses temporelles aux sollicitations courtes par impulsions sinusoïdales. *Les étudiants peuvent observer que la réponse à une sollicitation courte s'approche de la RI obtenue par le filtrage inverse. Ils sont invités à donner des explications à cet effet.*

Les notions acquises durant cette partie sont : convolution et filtrage inverse, compression du signal chirp, composantes fréquentielles de la RI.

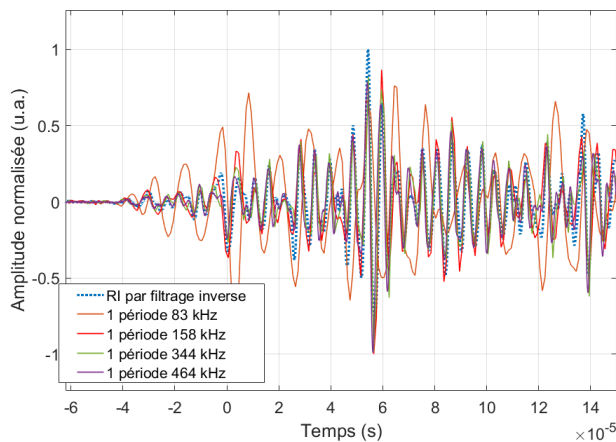


FIGURE 4. Exemples de comparaison de la RI obtenue par le filtrage inverse et les réponses temporelles aux excitations impulsives courtes.

5) Contrôle non-destructif du rail

- Acquisitions des réponses de rail avec et sans "défaut" aux excitations chirp et impulsives. L'état sans défaut est simulé par l'absence de la pince-étau accrochée au rail, le défaut "apparaît" quand la pince étau est accrochée au rail.
- Comparaison des réponses avec et sans défaut et observation de changement de signature du rail.
- Comparaison de l'efficacité du CND face aux différentes excitations, importance de connaissance des fréquences dominantes de structure et la polyvalence des signaux chirp dans toutes les circonstances.

Les notions acquises durant cette partie sont : CND par comparaison avec l'état "sain" ou initial, l'efficacité du CND face aux différentes excitations, la capacité des ondes réverbérantes de type coda de détecter un défaut se trouvant dans une position aléatoire de la structure.

A la fin de la séance de TP, un questionnaire à choix multiple (QCM) est proposé aux étudiants, les réponses au QCMs sont prises en compte dans la note finale des comptes rendus. Enfin, cette note pour la partie pratique compte pour 30 % de la note finale du module analyse et Traitement du Signal.

IV. RETOUR D'EXPÉRIENCE DES ÉTUDIANTS ET RECOMMANDATIONS

JE trouve que le fait de mixer cours et TD est efficace, contrairement à d'autres cours où il s'agissait d'attendre la fin complète de la théorie pour débiter l'application et malheureusement pour le TP nous n'avons pas eu la chance de manipuler vraiment beaucoup, mais dans l'ensemble, l'enseignement et la pédagogie a été très bonne.

J'AI une seule remarque, c'est que je n'ai su l'intérêt du cours jusqu'au TP, ça sera mieux de montrer des applications pendant le cours qui permettront de montrer l'intérêt de chaque partie étudiée pendant notre cours.

POUR ma part la formation était bien avec une bonne répartition des heures. Cependant j'aurais peut-être aimé avoir un peu plus de séance de TP pour pouvoir m'exercer sur Matlab, mais grâce à M. Smagin nous avons quand même pu voir l'ensemble du TP et voir de manière réelle comment relier Matlab à un montage. Merci pour tout ce que vous nous avez apporté, surtout avec ces conditions sanitaires.

EN ce qui me concerne, j'ai appris beaucoup de choses durant ma formation MCS. Tout ne me servira peut-être pas dans mon cadre professionnel mais j'ai beaucoup appris grâce à la qualité de vos enseignements. En effet, malgré le contexte sanitaire, l'enseignement à distance, mon état de santé un peu difficile en ce moment (et ma période COVID en Octobre) et ma reprise d'étude après 25 ans, j'ai apprécié l'enseignement réalisé par vos soins. Malgré le fait que je n'ai pas "brillé" lors de mes examens concernant le traitement de signal, j'espère quand-même avoir réussi à avoir la moyenne générale. J'ai travaillé dur et j'ai passé énormément de temps à réviser, étudier, chercher... Concernant l'enseignement, j'ai apprécié le mélange de cours et TD car nous pouvons faire le lien entre la théorie et la pratique. Les cours étaient très bien enseignés, pour moi ce n'était pas facile car je n'avais pas fait d'intégrales depuis très très longtemps, les transformées de Fourier étaient aux oubliettes ! Mon cas est un peu à part n'ayant pas fait cela depuis longtemps, mais concernant les autres étudiants je pense que pour eux cela a été un bon enseignement d'après les retours que j'ai eu, ils ont compris assez facilement (bien plus vite que moi). Le fait de solliciter les étudiants lors des exercices au tableau pendant les TD est important je pense. Pour ma part, j'aurais aimé avoir plus de temps pour tout bien comprendre, mais je sais que le nombre d'heures est compté.

JE trouve que le module est complet et nous avons abordé des points essentiels, seulement qu'à l'examen nous avons eu des choses qu'on a pas déjà fait auparavant pendant le TD.

J'AI été satisfait par la méthode d'enseignement qui vise à faire tout un chacun, ça crée de l'intérêt, ça donne envie de suivre le cours. Je pense qu'au niveau des cours aucune remarque, par contre concernant les TPs il faut allouer un peu plus de temps pour associer la théorie, donc un peu plus d'heures de TP pour les années futures. Par exemple j'ai raté

un TP et c'était le seul de l'année, pas moyen de le rattraper je pars perdant.

SUITE à votre demande d'évaluation concernant le module TS, je trouve que le cours était intéressant et le TP est complémentaire.

POUR moi les cours étaient simples malgré les difficultés que j'ai croisé au début étant donné que ma formation antérieure ne couvrait pas le cours de traitement de signal ou l'électronique. J'ai pu comprendre les bases du traitement de signal grâce à ce cours même si je pense que l'examen a été légèrement plus difficile que les TDs. Pour le TP je pense c'était une expérience agréable, grâce à cette séance j'ai pu voir l'utilité du module de traitement de signal et son application. A mon avis j'aurais aimé avoir plus de séances de TPs et de voir d'autres applications. Je tiens à vous remercier Prof L. Chehami et Prof N. Smagin pour votre engagement, pour votre enseignement, et votre soutien durant ce module.

Après ce retour d'expérience, les étudiants sont globalement satisfaits de la qualité de ces enseignements. Néanmoins, ils revendiquent plus d'heures de travaux pratiques. On se rend compte, que certains ont pris connaissance de l'intérêt du cours qu'aux séances de TP. Les étudiants ont également apprécié le mélange de cours et TD, ça crée de l'intérêt.

Enfin, à moyen terme, on peut envisager d'introduire des TPs d'instrumentation et des techniques de traitement de signal plus avancés au laboratoire, comme par exemple, la détection de défauts dans des matériaux par réseaux de capteurs sans fil.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'agence nationale de la recherche, ANR PASNI (2012-2016) : 11-BS09-0039, pour le financement matériel du banc de mesure expérimental.

RÉFÉRENCES

- [1] Ben Abderrahman Mohamed Lamine. Les conceptions des assistants du supérieur à propos de l'enseignement-apprentissage à l'université. *Carrefours de l'éducation*, (2) :139–158, 2005.
- [2] Xavier Weppe Anne Dietrich. Les frontis entre thie et pratique dans les dispositifs d'enseignement en apprentissage. *Management & Avenir*, 10(40) :35–53, 2010.