

Développement d'une interface utilisateur interactive pour l'enseignement du traitement de signal

N. Smagin et L. Chehami

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—Dans l'apprentissage de traitement du signal, les connaissances formelles (théorèmes et lois) se fait généralement en lien avec la pédagogie dans le souci de mieux les faire appréhender et assimiler par les étudiants. Ces concepts fondamentaux sont parfois difficiles à enseigner dans le schéma classique des exposés magistraux, et des travaux dirigés. Il est parfois alors nécessaire d'illustrer ces ressources théoriques à l'aide des animations et des schémas plus interactifs. De plus, la pédagogie moderne nous impose de revoir nos pratiques d'enseignement et nous oblige de plus en plus à utiliser des outils informatiques pour enseigner. Il est donc essentiel de s'adapter à ce mode d'enseignement qui privilégie les technologies récentes pour mieux préparer nos étudiants à leur futur emploi. C'est dans cette logique que nous avons initié depuis septembre 2022 l'élaboration d'une interface graphique sur le traitement de signal destiné aux étudiants en master et aux doctorants. Ayant comme support Matlab, cette dernière offre la possibilité d'acquérir, de traiter et de consolider les concepts de base en traitement du signal.

Mots-clés : Traitement du signal, Matlab, interface utilisateur.

I. INTRODUCTION

L'apprentissage de la théorie et du traitement des signaux commence classiquement par une approche théorique basée souvent sur des concepts mathématiques et s'oriente vers les contraintes pratiques liées à l'implémentation «hardware» ou «software» [1]. Ces connaissances et concepts fondamentaux dans leur utilisation technique, sont beaucoup plus durs à manier et dépendra de la capacité de la personne analysant les signaux ; savoir quelle voie suivre ou quels outils utiliser en fonction du problème posé [2], [3]. C'est en ce sens que l'on peut évoquer cet aspect sous la forme de connaissance procédurale, c'est-à-dire qui concerne le savoir-faire. Dans ce contexte, il convient de rendre intelligible des situations d'apprentissage. Précisons que le fait d'expérimenter permet à l'étudiant de vérifier concrètement une loi ou un principe physique en même temps qu'il lui donne l'occasion de confronter ses préconceptions avec la réalité [1]. L'assimilation des concepts fondamentaux permet à l'étudiant de vérifier facilement les paramètres d'une expérience. Par conséquent, l'étudiant peut traiter et analyser les résultats obtenus et faire des parallèles avec la théorie : tels que la transformée de Fourier, le théorème de Shannon, le filtrage, etc. En effet, il y a tout un savoir-faire que les étudiants doivent développer pour parfaire leur formation scientifique. Pour une expérience au laboratoire, il faut être minutieux, il faut savoir manipuler des instruments de mesure ou maîtriser des techniques qui

devront être acquises. C'est là que l'informatique prend naturellement le relais : des logiciels qui jumelés à des supports pédagogiques écrits permettent l'analyse de phénomènes complexes. Dans cette optique, cet article est une continuité du premier papier Chehami et al., [3] présenté au CETSIS 2021 et traite d'un banc de mesure expérimental piloté par une interface utilisateur dans un laboratoire de recherche (laboratoire IEMN, site de Valenciennes) destiné à des étudiants en master mention sciences et génie des matériaux, parcours MCS (matériaux contrôle et sécurité). L'un des éléments essentiels de ces mises en œuvre a été la création d'interface graphique utilisateur permettant de répondre aux enjeux didactiques de la bibliothèque et de faciliter la prise en main des opérations dans le domaine des fréquences et de temps.

Par ailleurs, il faut faire très attention aux interfaces type presse-bouton. En effet, les étudiants oublient souvent les aspects théoriques. Par exemple, la TF d'un signal réel est en général complexe. Si l'interface ne trace que le module de la TF, les étudiants en viennent à oublier que le vecteur TF est souvent complexe. Idem pour les symétries quand les interfaces ne tracent généralement que les $N/2$ premiers points. Il y a un vrai risque de générer des TP presse-boutons trompeurs dans lesquels les étudiants ont l'illusion de comprendre. Pour ce faire, on demande souvent aux étudiants d'avoir un regard critique sur les outils et de faire une analyse graphique des résultats en comparant avec la théorie (spectre d'amplitude, phase, symétrie, échelle log, etc.).

Ce papier est organisé comme suit : dans la section II, nous présentons l'interface utilisateur ainsi que quelques applications mettant en évidence les améliorations offertes par notre approche. Enfin, une conclusion esquissant un retour d'expérience des étudiants ainsi que des recommandations, sont données en section III.

II. APPLICATIONS AU LABORATOIRE DE RECHERCHE-TRAVAUX PRATIQUES

Le retour d'expérience des années précédentes des étudiants en 2ème année de master sciences et génie des matériaux, sur le module analyse et traitement de signal (15 heures de cours, 6 heures de travaux dirigés et 6 heures de travaux pratiques pour un total de 4 crédits) a révélé plusieurs points susceptibles d'être améliorés dans la pratique de leur enseignement. Auparavant, des codes textes implémentés dans Matlab étaient utilisés pour obtenir des signaux à partir de l'oscilloscope et les analyser. La pratique a montré que leur maîtrise et leur

utilisation “à la volée” est difficile pour certains étudiants. Le degré d’interactivité de l’acquisition, du traitement et de la présentation des signaux s’est également avéré insuffisant. En même temps, la partie méthodologique du travail de laboratoire a été jugée conforme aux exigences du cours, en particulier grâce au feedback des étudiants [3]. Par conséquent, lors de la prochaine étape du développement du cours “Analyse et traitement des signaux”, nous nous sommes concentrés sur l’amélioration du matériel et du logiciel du laboratoire.

Afin d’améliorer et d’accélérer le processus d’apprentissage, un ensemble d’utilsitaires logiciels avec une interface utilisateur graphique (IUG) a été développé. L’environnement de développement Matlab AppDesigner a été utilisé à cette fin. La synthèse des signaux (sinus avec une période, sinus avec demie période, signal chirp linéaire modulé en fréquence, bruit blanc) a été réalisée sur un ordinateur personnel. Les signaux ont ensuite été transmis à un générateur de formes d’ondes arbitraires Keysight 81160A. Un filtre passe-bas programmable NF 3660A et un amplificateur de puissance NF HSA 4101 ont également été utilisés dans les expériences. Les signaux acquis avec un oscilloscope LeCroy WaveRunner 62Xi-A ont été transférés vers un PC pour analyse et présentation graphique dans des rapports. Une vue générale de l’installation est présentée à la figure 1.



FIGURE 1. Vue générale du banc de mesure pour les travaux pratiques.

A. Concepts de base de la transformée de Fourier discrète : améliorer le lien avec un cours théorique

L’utilisation d’une interface interactive a permis, tout en conservant le même contenu de cours présenté en [3] auparavant, d’ajouter une partie introductive directement liée aux fondements théoriques de la transformée de Fourier et de l’échantillonnage des signaux, qui avaient été présentés aux étudiants lors de cours magistraux et de travaux dirigés.

La disponibilité de canaux de réception et de transmission numériques facilement configurables a permis d’explorer les aspects pratiques de l’échantillonnage des signaux. Les étudiants ont eu l’occasion de trouver la fréquence

d’échantillonnage optimale du signal émis afin d’éviter le chevauchement spectral. L’IUG pour la transmission des signaux est présentée à la figure 2.

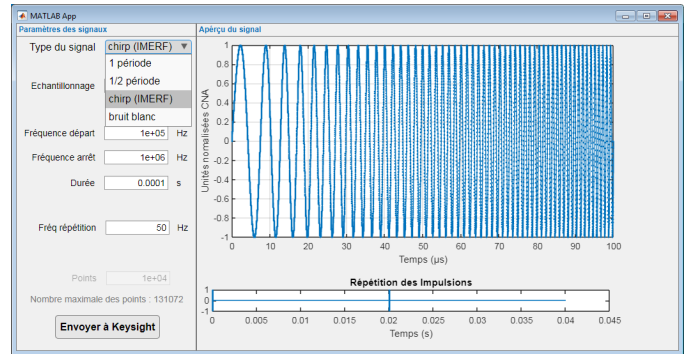


FIGURE 2. L’IUG pour la synthèse et la transmission des signaux.

En outre, les signaux synthétisés ont été envoyés directement à l’entrée de l’oscilloscope. L’IUG pour la réception des signaux est illustrée à la figure 3. Au niveau de la réception des signaux, les étudiants ont été initiés aux caractéristiques de la transformée de Fourier discrète. Ces informations et compétences sont extrêmement importantes pour travailler avec des instruments numériques, mais il est difficile d’y accorder suffisamment d’attention en théorie. Les étudiants ont donc eu l’occasion, dans la partie introductive, d’explorer les questions suivantes.

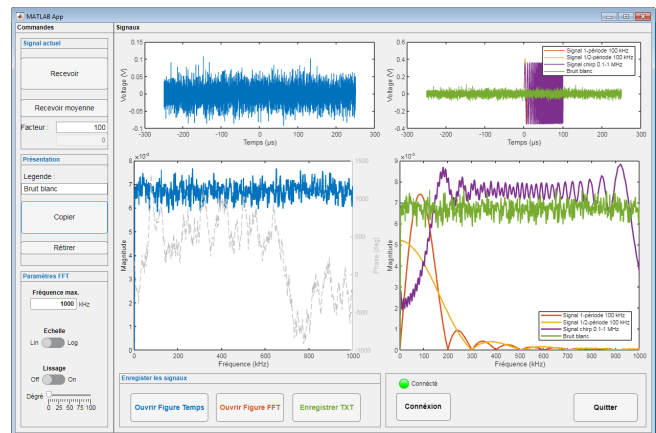


FIGURE 3. L’IUG pour la réception des signaux.

• L’efficacité pratique du critère de Shannon :

A ce stade, l’oscillateur est réglé pour transmettre une tonalité harmonique de 500 kHz. Sa réception à l’aide d’un oscilloscope se fait à des fréquences d’échantillonnage de 250 ké/s, 500 ké/s, 1 Mé/s, 2,5 Mé/s, 5 Mé/s et 100 Mé/s. Les étudiants peuvent observer des distorsions du signal à des fréquences d’échantillonnage insuffisantes, mais aussi le fait que, dans la pratique, le respect du critère de Shannon est considéré comme insuffisant. En effet, la disponibilité de la moitié seulement du pic spectral et la probabilité que les moments de numérisation du signal coïncident avec ses

zéros, entraînent un risque considérable de ne pas détecter correctement le signal. Dans la pratique, il est courant de numériser un signal à une fréquence supérieure d'un ordre de grandeur à la fréquence maximale présente dans le signal à détecter. Les étudiants peuvent constater l'utilité de ce choix dans la pratique. Le spectre du signal obtenu en respectant ce critère (à une fréquence de quantification de 5 Mé/s) contient toute l'information pertinente sur le signal et présente un rapport signal-à-bruit (SNR) acceptable. Une augmentation supplémentaire de la fréquence d'échantillonnage (20 fois, c'est-à-dire 100 Mé/s) améliorera le SNR, mais ralentira l'oscilloscope (figure 4(a)).

• **Influence de la durée de numérisation du signal :**

Les étudiants ont eu l'occasion d'observer en pratique l'effet de ce critère (nombre de points numérisés) sur la résolution fréquentielle du spectre. Ils doivent calculer ce paramètre en appliquant les formules théoriques appropriées (figure 4(b)).

• **Spectres de signaux impulsifs :** A ce stade, un signal sinusoïdal continu est converti pas à pas en une impulsion d'une durée d'une période d'oscillation. La séquence de transition utilisée est la suivante : 1) un signal continu ; 2) un signal contenant 20 périodes ; 3) un signal contenant 3 périodes ; et 4) un signal contenant 1 période. Les étudiants doivent représenter l'évolution du spectre sur un seul graphique et utiliser des formules théoriques pour montrer le changement d'amplitude et de largeur de bande du signal (figure 4(c)).

B. Utiliser des opérations de base de traitement du signal à la volée

Le remplacement du code texte par une interface utilisateur graphique a permis une démonstration beaucoup plus interactive des opérations de base de traitement du signal telles que la convolution et la corrélation croisée. La figure 5 montre l'interface utilisateur graphique correspondante. Les étudiants peuvent enregistrer le premier opérande d'une opération en cliquant sur le bouton **Recevoir (1)**. Le deuxième opérande de l'opération peut être obtenu en appuyant sur le bouton **Recevoir (2)**. Le résultat de l'opération est affiché dans la troisième rangée de graphiques de l'interface. La colonne de gauche contient les spectres de signaux correspondants. Il est également possible de sauvegarder les données des signaux numériques (points de mesure) pour un traitement et une analyse ultérieurs plus complexes.

Pour préparer un rapport de travail pratique, l'étudiant doit simplement appuyer sur le bouton approprié de l'interface (**Rapport**), en ayant préalablement saisi une description pour la courbe affichée (légende). La figure 6 montre un exemple d'un tel rapport où les résultats des opérations de convolution et de corrélation croisée sur des signaux chirp et de bruit blanc sont présentés sur le même graphique. Les étudiants ont alors testés et observé les résultats des opérations de convolution et de corrélation croisée avec les signaux de type "chirp" et "bruit blanc". Les étudiants ont pu ainsi

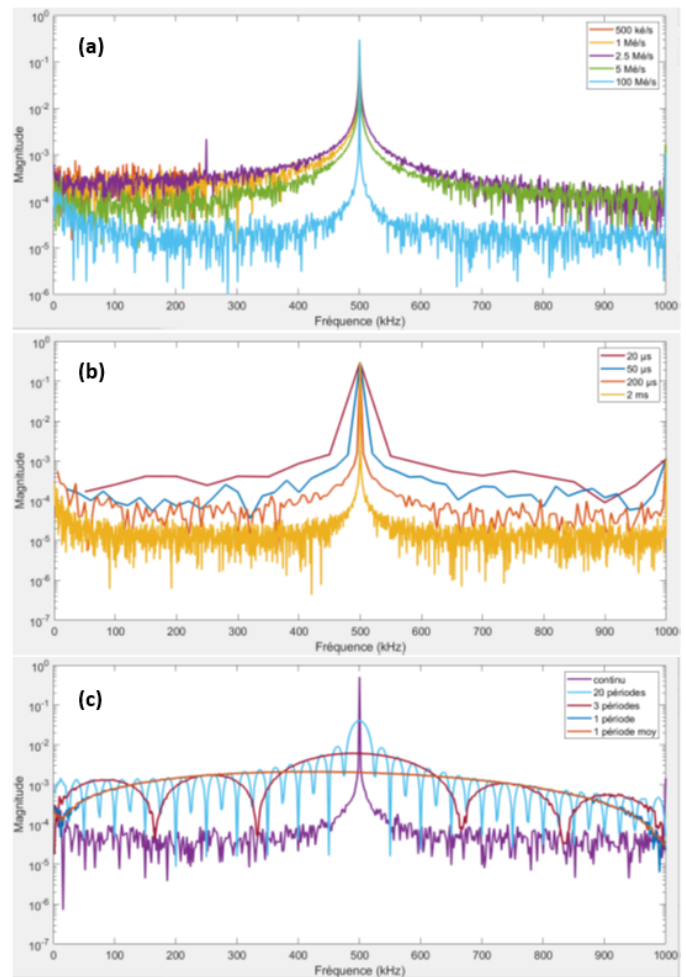


FIGURE 4. Influence de différents paramètres de la transformée de Fourier discrète : (a) fréquence d'échantillonnage ; (b) durée du signal (nombre de points) ; (c) nombre de périodes.

constater que pour le deux signaux, la corrélation croisée donne un résultat qui tend vers une fonction Delta de Dirac. Par la suite, un lien entre cette propriété et la capacité de ces fonctions à restaurer la fonction de transfert d'un système sera fait naturellement.

L'utilisation d'une IUG a donc considérablement accéléré le traitement du signal et illustre mieux le fait que, pour une bonne mesure de la fonction de transfert, la corrélation croisée du signal d'entrée doit tendre vers la fonction Delta.

L'intérêt de cette dernière partie est de faire un lien avec les activités de recherche au laboratoire IEMN, centrées sur les techniques de localisation et d'imagerie passive. En effet, il a été montré [4], que l'intercorrélation de bruits enregistrés en deux capteurs est équivalente à la réponse impulsionnelle du milieu. Théoriquement, cette approche fonctionne très bien quand l'autocorrélation du bruit tend vers une impulsion de Dirac.

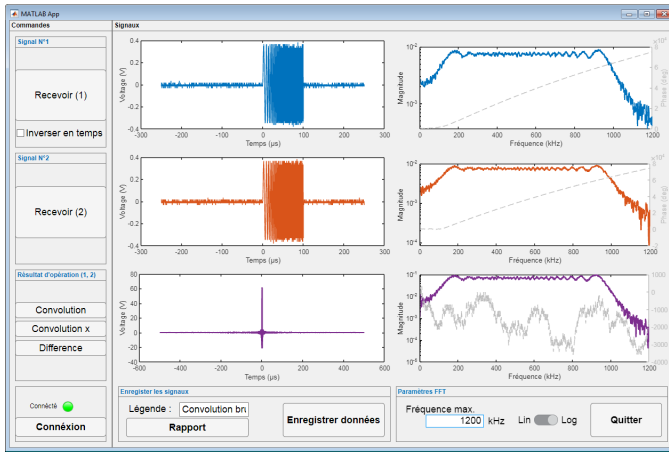


FIGURE 5. L'IUG pour étudier les opérations de traitement du signal. La colonne de gauche affiche les signaux dans le domaine temporel, tandis que la colonne de droite les affiche dans le domaine fréquentiel. Les étudiants peuvent observer la perte d'information sur la phase du signal chirp après sa compression temporelle par l'opération de corrélation croisée (courbe grise sur le graphique en troisième ligne, deuxième colonne).

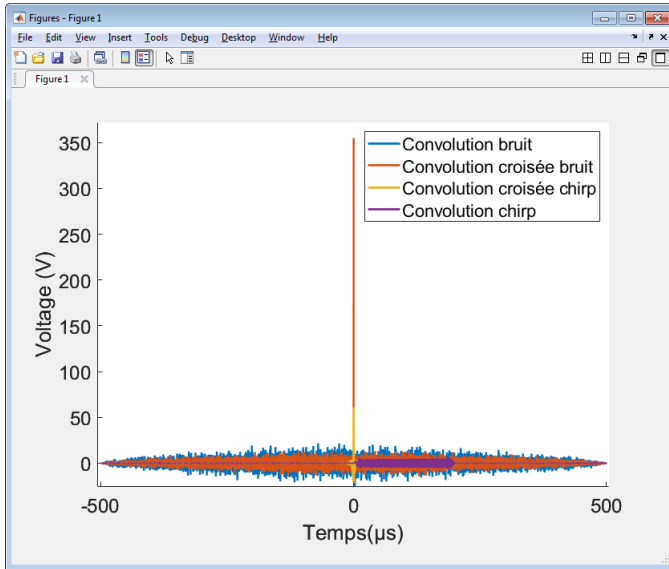


FIGURE 6. Exemple des résultats de traitement de signal dans un compte rendu d'un étudiant.

III. CONCLUSION

En conclusion, il est pertinent de noter qu'une automatisation maximale du travail avec des appareils de mesure a permis de libérer du temps supplémentaire pour une démonstration pratique des concepts de base de la transformée de Fourier discrète. L'élimination de nécessité de modification de code texte de programme et du réglage manuel des appareils de mesure a permis de mieux concentrer le déroulement du cours sur les points clés du sujet enseigné. Le retour d'expérience des étudiants nous a servi comme une affirmation d'utilité de l'approche présentée. Des recommandations nous ont été remontées également pour rendre le cours moins théorique comme, par exemple, consacrer certaines heures d'enneigement

en traitement du signal à des plateaux projets.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'agence nationale de la recherche, ANR PASNI 11-BS09-0039 et ANR DACLOS : ANR-21-CE42-0002-01, pour le financement matériel du banc de mesure expérimental.

IV. RETOUR D'EXPÉRIENCE

- Très utile pour les TP et le stage.
- Clairement avec des TP c'est beaucoup mieux et ça permet d'assimiler plus vite les notions.
- Le contenu du cours était bien cohérent avec les TP, cependant je ne peux pas vous dire si les notions du cours sont utiles puisque je n'ai pas encore trouvé de stage.
- Je trouve que les cours et les TP avaient une certaine cohérence. Les TP m'ont permis de mieux comprendre l'aspect pratique du traitement de signal en nous faisant étudier des signaux obtenus suite à l'application d'un couple de serrage sur le rail. De plus, le projet biblio m'a permis de mieux comprendre les notions vues en cours et leur utilité en traitement du signal. Pour ma part, je n'ai pas encore eu l'occasion de faire du traitement de signal lors de mon stage, mais les cours, les TP et le projet biblio me permettront déjà d'avoir de bonnes bases. Je suis également contente d'avoir pu recevoir une correction des TP et les notes car en général on n'a ni l'un ni l'autre ce qui est, je trouve, dommage car sans correction il est difficile de comprendre nos erreurs et donc de s'améliorer par la suite.
- Les TP nous ont bcp apportés, le format était très agréable à suivre. Pas vraiment de relation entre cours et TP. Le cours était trop rapide au vue de nos capacités sur le sujet. En espérant que cela servent pour les prochains étudiants.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Quinquis, E. Radoi, C. Ioana, and F. Totir. Outil didactique pour l'apprentissage du traitement du signal et de l'image. *J3eA*, 4 :008, 2005.
- [2] A. Giremus, R. Mégret, E. Grivel, O. Lavielle, and Y. Berthoumieu. Découvrir le traitement du signal et de l'image grâce à des projets personnalisés : du traitement de la parole à la télécommande virtuelle. *J3eA*, 7 :1024, 2008.
- [3] L. Chehami, N. Smagin, J. Assaad, P. Campistron, F. Jenot, and E. Moulin. De la théorie à la pratique dans l'enseignement du traitement du signal : Initiation à la recherche. *J3eA*, 21 :2042, 2022.
- [4] Lynda Chehami. *Surveillance passive des milieux réverbérants par corrélation de bruit ambiant : application à la localisation de défauts*. PhD thesis, Université Polytechnique des Hauts de France, 2015.