# Instrumentation à bas coût pour l'électrotechnique en TBT

Yannick Le Bras
yannick.le_bras@univ-lemans.fr
ENSIM, Le Mans Université, 1 Rue Aristote, 72000 Le Mans

**RÉSUMÉ :** Avec le développement des énergies renouvelables, de nombreuses formations sont amenées à proposer des enseignements pratiques en électrotechnique pour, par exemple, étudier des panneaux photovoltaïques ou des moteurs électriques. Ainsi, dans le cadre du nouveau BUT Mesures Physiques parcours Mesures et Analyses Environnementales, des enseignants sont chargés de monter de nouveaux travaux pratiques d'électrotechnique sans pour autant utiliser de salle spécialisée en basse tension avec du matériel onéreux. On présente dans cet article l'instrumentation développée pour des travaux pratiques d'électrotechnique en très basse tension et mise en œuvre à l'ENSIM et à l'IUT du Mans (LE MANS Université). Ce matériel est notamment mis en œuvre pour étudier des moteurs électriques.

**Mots clés** : électrotechnique, sonde de tension, sonde de courant, accéléromètre, très basse tension, bas coûts.

## 1 INTRODUCTION

Les travaux pratiques d'électrotechnique se font généralement dans des salles spécialisées courant fort ou basse tension. Dans ces salles, on trouve des bancs moteurs de puissance supérieure au kilowatt, c'est ainsi que se sont longtemps faits les TP Actionneurs de l'ENSIM. L'ENSIM [1], qui propose actuellement 2 spécialités, Acoustique et Instrumentation d'une part, et Informatique d'autre part, forme avec la spécialité Acoustique et Instrumentation, des ingénieurs généralistes avec des compétences marquées en Mesure et Vibro-acoustique. A sa création, l'ENSIM ne comprenait qu'une spécialité Vibration-Acoustique-Capteur, elle se voulait être une école généraliste spécialisée dans la Mesure Industrielle. Rapidement, la spécialité devenue Acoustique et Instrumentation, est passée de la Mesure à l'Acoustique. C'est ainsi que l'enseignement électrotechnique de quatrième année, Actionneurs, est devenu Machines Tournantes électriques. Les TP Actionneurs se faisaient dans une salle spécialisée basse tension de l'IUT voisin, les objectifs étant, en plus de la connaissance des moteurs, la maîtrise des mesures appliquées aux systèmes motorisés. L'objectif de l'enseignement de 4ème année, Machines Tournantes Électriques, a évolué dans la même direction que la spécialité Acoustique et Instrumentation : il s'agit maintenant de connaître le fonctionnement des principales machines électriques (principes de fonctionnement, variateurs associés, pilotages). Ce sont surtout des connaissances qui sont développées, plus que des compétences, connaissances utiles pour développer des compétences dans d'autres champs disciplinaires, comme en vibroacoustique pour caractériser le comportement vibratoire d'un banc tournant.

Si les mesures de caractéristiques mécaniques de moteurs ou les mesures de rendement se font bien sur d'assez grosses machines (puissance supérieure au kilowatt), les études des principes de fonctionnement et des variateurs associés se font aussi bien sur des petites machines. La réalisation de variateurs « faits maison » permet de plus la maîtrise du pilotage. Ainsi, les onduleurs triphasés, réalisés à l'ENSIM peuvent fournir soit des tensions triphasées à pleine onde, soit à MLI, avec possibilité de changer la fréquence de la porteuse. On peut, ainsi modifier le pilotage d'une machine asynchrone.

On peut noter que les variateurs et certaines machines sont ou seront utilisés pour deux modules du parcours Mesures et Analyses Environnementales du BUT Mesures Physiques[2], un module de deuxième année Énergie et Environnement et un module de troisième année Énergie : de la production au stockage. En travaux pratiques, on y étudie ou étudiera des panneaux photovoltaïques, des machines synchrones ou des convertisseurs statiques.

Le matériel TBT permet deux choses essentielles : le dédoublement de matériel et la réalisation de montages adaptés à l'objectif de l'enseignement. La réalisation de banc d'études TBT peut se faire à partir d'éléments basiques, peu chers et faciles d'utilisation, on réalise ainsi des bancs et variateurs en de multiples exemplaires. Ceci permet de faire tourner les TP, par binômes par des rotations qui ne sont pas de simples permutations circulaires, avec la possibilité de faire un TP sur trois séances. Le matériel TBT permet aussi de réaliser des bancs et variateurs « faits maison », spécialement conçus pour des TP. A l'ENSIM, les variateurs permettent de changer les caractéristiques des pilotages des moteurs. On peut par exemple changer la fréquence du hacheur alimentant une machine à courant continu et avec un accéléromètre mettre en évidence les corrélations entre courant et couple moteur.

Faire des travaux pratiques avec du matériel TBT permet aussi d'utiliser une salle de TP classique, limitant les contraintes de salles. Cette salle permet d'avoir accès à des moyens informatiques et de mesures, plus importants et plus performants.

Les étudiants non spécialistes de l'électricité n'apprécient que modérément le matériel courant fort de la salle basse tension de l'IUT, matériel un peu daté et trop onéreux pour être renouvelé : cela constitue une autre raison de faire le maximum de TP en TBT.

Il a été présenté précédemment des TP de l'ENSIM mettant en œuvre en TBT des moteurs pas à pas[3] et des moteurs asynchrones[4]. On se propose dans cet article de présenter l'instrumentation à bas coût développée pour les travaux pratiques d'électrotechnique de l'ENSIM et du BUT Mesures Physiques.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Article publié par EDP Sciences et disponible sur le site https://www.j3ea.org ou https://doi.org/10.1051/j3ea/20231028

## 2 LE MATERIEL TBT

L'instrumentation sert à étudier des moteurs électriques et des variateurs.

### 2.1 Les moteurs

On met en œuvre des machines à courant continu Crouzet 89800908 [5] montées sur un banc (fig 1), des machines asynchrones LVACIMTR[6] montées sur un banc (fig 2) avec un frein à hystérésis Magtrol HB-20M-2 [7].
On utilise aussi des moteurs pas à pas moteurs 23HS41-1804S [8] et synchrones BRUSHLESS 10T 2P 60A 3930KV[9].

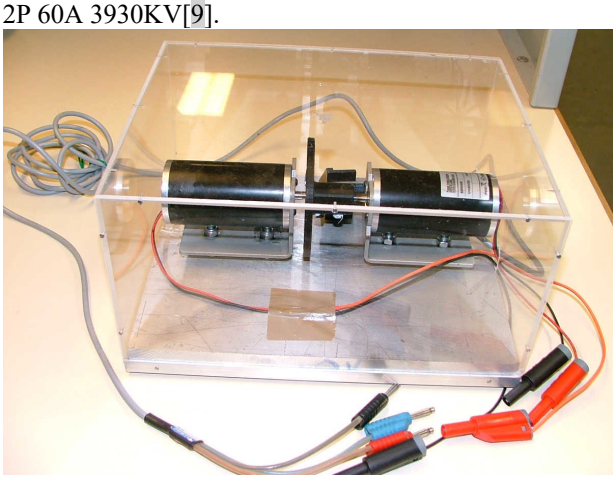


*Fig 1 : banc machine à courant continu*

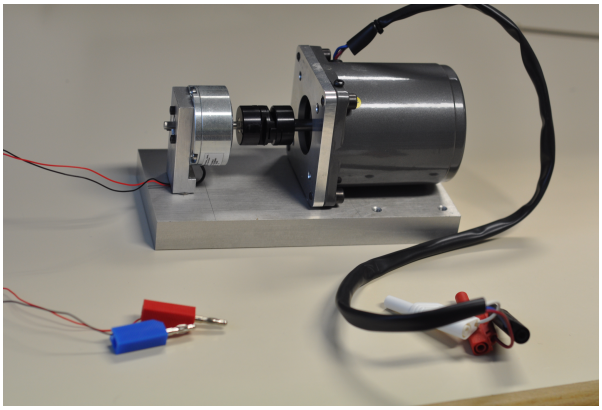


*Fig 2 : banc machine asynchrone*

### 2.2 Les variateurs

Les moteurs sont pilotés par des convertisseurs statiques, hacheurs ou onduleurs. On dispose à l'ENSIM de convertisseurs à pont en H (à double bras d'onduleur) basés sur un L298[10], ils peuvent alimenter aussi bien les machines à courant que les moteurs pas à pas. On a réalisé, pour piloter en TBT, les machines synchrones et asynchrones, un onduleur triphasé (fig 3) comprenant des IGBT FS15R12VT3 [11] et un driver en IR2130PBF [12].



*Fig 3 : variateur à IGBT FS15R12VT3*

## 3 L'INSTRUMENTATION

Pour comprendre le fonctionnement d'une machine électrique et de son variateur associé, il est utile de visualiser les principales grandeurs électriques (tensions et courants) et mécaniques (vitesse et couple). Les bancs didactisés pour l'électrotechnique sont très chers mais ils sont généralement équipés de nombreux capteurs avec des sorties pouvant être reliées directement sur des oscilloscopes. Travaillant avec du matériel très basse tension, réalisé à partir d'éléments basiques, on doit compléter le matériel « fait maison » de capteurs. On a donc conçu une instrumentation adaptée à notre matériel TBT. On va décrire cette instrumentation composée de sondes de courant, sondes de tensions différentielles, d'accéléromètres et de tachymètres, en présentant pour chaque type de capteur, des solutions commercialisées avant de présenter le capteur maison.

### 3.1 Sondes de courant

Les études de fonctionnements de moteurs et variateurs mettent en œuvre plusieurs mesures de courants. Les bancs des salles spécialisées peuvent comporter plusieurs capteurs de courant, ce qui participe aux prix élevés du matériel ; la réduction du coût passe par la limitation du nombre de capteurs, la solution étant un seul capteur amovible, pour la mesure de courants dans différents points.

#### 3.1.1 Pinces de courant

Le moyen mobile le plus employé dans l'enseignement est la pince de courant, comme celle proposée par Chauvin-Arnoux [13].

Ces pinces présentent l'avantage d'être faciles à utiliser car sans contact. Elles ont les désavantages d'être chères, plus de 300 euros et de fonctionner avec des piles.

#### 3.1.2 Capteur de courant

La solution des pinces pour équiper tous les postes est chère, surtout pour du matériel utilisé moins de 8 semaines par an. Nous avons recherché une solution pour remplacer les pinces : un capteur de courant à faible prix de revient, ne fonctionnant pas sur pile, dont l'étendue de mesure soit d'environ -5A/5A.

On a alors choisi, pour réaliser nos sondes de courant, un capteur à effet Hall L18P003D15-OP [14]de chez TAMURA™. Le capteur de courant et une alimentation intégrée sont associés dans un boîtier (fig 4).



*Fig 4 : capteur de courant*

Notre capteur présente plusieurs avantages et un inconvénient. Le principal avantage est un prix de revient, temps de travail du technicien non compris, inférieur à 50 euros, le prix du boîtier n'étant pas négligeable. Cet avantage nous a permis d'équiper les sept postes de sondes, alors que nous ne disposions auparavant que de quatre pinces.

Le second avantage est de ne pas fonctionner sur pile, ce qui évite les problèmes de décharge. Le troisième avantage est que l'étendue de mesure -3A/3A est parfaitement adaptée à nos mesures, la sensibilité de 1,33V/A étant plus grande que celle des pinces (généralement 100mV/A) aussi les spectres obtenus sont plus fins.

Le seul inconvénient est que le capteur se câble comme un ampèremètre : un étudiant ayant le choix entre une pince et un capteur préférera la première fois utiliser une pince. Il ne choisira le capteur, qu'après avoir vu des signaux plus propres sur la paillasse des voisins, qui eux, n'auront pas eu le choix de la pince.

Avec ce capteur de courant, on dispose de sondes de courant bas coût pouvant être dupliquées facilement. Ce capteur pensé pour être utilisé en TBT peut l'être aussi en basse tension. Il servira pour les TP Énergie : de la production au stockage du BUT Mesures Physiques, notamment pour l'étude de montages triphasés.

### 3.2 Sondes de tension différentielle

Les études de hacheurs et onduleurs se font en visualisant plusieurs tensions, dont quelquefois deux simultanément, notamment pour observer des déphasages. Il faut donc des sondes différentielles, idéalement deux sondes par poste.

#### 3.2.1 Les sondes commercialisées

On dispose de deux sondes différentielles RS 729-6671[15] et quatre sondes de tension différentielle Langlois ISOL 600[16].

Ces sondes sont très faciles d'utilisation, elles ne présentent qu'un seul inconvénient, le prix, plus de 400 euros la sonde. Les prix élevés ne permettent pas d'acheter assez d'exemplaires pour couvrir les besoins.

#### 3.2.2 Les sondes bas coût

Idéalement, on souhaite disposer de dix sondes pour des mesures en TBT et de six pour des mesures en BT, en salle spécialisée. On se proposait donc de concevoir en interne nos sondes, en partant d'un montage différentiel à ampli linéaire intégré, mais une rapide recherche sur internet nous a permis de gagner du temps en trouvant un schéma proposé par Cyrob [17].

La sonde à réaliser a une atténuation de 100, atténuation adaptée à des mesures de tension comprises entre -600 et 600V. Pour des raisons de responsabilité face aux risques même minimes, il a été choisi de ne réaliser des sondes que pour la très basse tension avec donc une atténuation de 10. Il a aussi été choisi de réaliser des sondes doubles comprenant l'alimentation intégrée. Les composants doivent supporter 30V au maximum, la sonde pour la TBT est conséquemment plus simple à réaliser (fig 5).

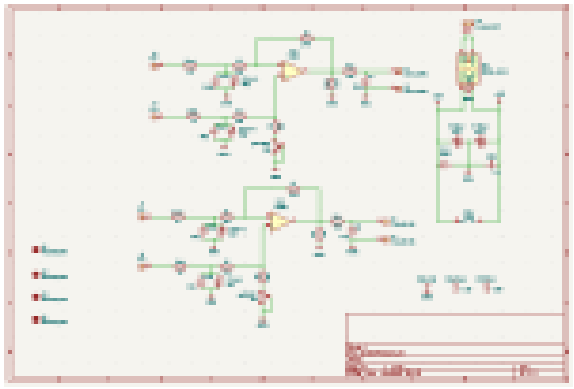


*Fig 5 : schéma électrique de sonde différentielle double*




*Fig 6 : sondes différentielles doubles*

Les sondes sont fonctionnelles, leur bande passante est supérieure à 100kHz, un signal carré n'est que peu déformé jusqu'à 10kHz.

Le principal avantage de ces sondes est, comme pour le capteur de courant, leur prix de revient qui est inférieur à 50 euros (temps de travail du technicien non compris). On pourra équiper les sept postes TBT de deux sondes. Ces sondes doubles ont aussi les avantages d'être compactes et de ne nécessiter qu'une prise secteur pour la mesure de deux tensions.

L'inconvénient pas rapport aux sondes commercialisées est qu'elles ne sont pas utilisables qu'en TBT comme la tension secteur

### 3.3 Tachymètres

Il existe différents types de tachymètres, avec ou sans contact, avec des fonctionnements mécaniques, optiques ou magnétiques. Le choix d'un tachymètre est limité par l'application, aussi la solution doit-elle être étudiée au moment de la réalisation d'un banc, car certaines solutions techniques nécessitent un élément mécanique à intégrer au banc. Pour la mesure de vitesses

de machines tournantes en petites puissances, les solutions sans contact sont à privilégier.

### 3.3.1 Tachymètres à mesure instantanée

La connaissance de la seule valeur de la fréquence de rotation est suffisante, pour des fonctionnements à vitesses stabilisées. On peut alors utiliser des tachymètres affichant simplement la valeur instantanée. A l'ENSIM, la limitation des coûts s'est faite par un recyclage de tachymètres sans contact, à photo-réflexion (tachymètre laser Voltcraft DT-10L). La limite de ces appareils est que seule la valeur instantanée de la fréquence de rotation est mesurée. Les prix assez bas de ces appareils et la facilité d'usage font qu'on gardera leur usage pour les bancs fonctionnant à vitesse constante.

### 3.3.2 Tachymètres à mesures en continu

La sortie d'un tachymètre, pour des essais à vitesses variables, doit être exploitable ; typiquement, cette sortie est une tension dont l'une des caractéristiques varie avec la fréquence. Les tachymètres à mesure en continu des TP Machines Tournantes électriques sont constitués d'un capteur magnétique détectant un objet fixé sur un volant, l'information étant dans la fréquence de la tension de sortie.

**Tachymètre à détection de champ magnétique**

Le tachymètre d'un des bancs à machines à courant continu comprend un capteur magnétique détectant les passages de deux aimants solidaires d'un volant monté sur l'arbre entre les deux machines (fig 1). Les capteurs montés sur les bancs de l'ENSIM ont été choisis parmi ceux existant dans la salle de TP, ils sont assez onéreux. Il est possible d'utiliser un capteur à effet Hall peu cher, de type SS443A de HONEYWELL.

La tension de sortie présente des impulsions à chaque passage d'aimants, la fréquence de rotation est déterminée en divisant pas deux la fréquence de la tension du capteur. Pour relever des évolutions de la vitesse, on utilise une carte Arduino, il faut alors une carte électronique transformant les impulsions 0-24V en signaux rectangulaires 0-5V dont la durée d'impulsion est fixe.

Ce tachymètre est le moins cher, il est simple à mettre en œuvre et à utiliser pour des mesures directes de fréquence de rotation. L'inconvénient est que ce tachymètre ne peut être monté sur des bancs tournants rapidement ; en effet, la masse des aimants crée un balourd, il est adapté aux bancs à moteur à courant continu car la fréquence de rotation est limitée à 3000 tours / minute.

**Tachymètre à courant de Foucault**

Un banc en cours de réalisation (comprenant un moteur synchrone BRUSHLESS 10T 2P 60A 3930KV et une petite machine à courant continu) tournera à des vitesses de l'ordre de 6000 tours / minute. Pour éviter le balourd des aimants, on remplace le capteur magnétique précédent par un capteur à courant de Foucault détectant le passage d'un morceau de feuille d'aluminium collé sur un volant monté sur l'arbre entre les deux machines. Le capteur choisi est un capteur de proximité inductif RS PRO, M12 x 1.

Seuls des essais du capteur ont été réalisés, ils permettent de valider le choix de ce capteur.

Ce tachymètre aura des avantages et inconvénients similaires au tachymètre détection de champ magnétique. Il sera simplement un peu plus cher.

## 3.4 Accéléromètres

Les couple-mètres ne sont pas faciles à mettre en œuvre. Ils supposent souvent d'être fixés au banc moteur. Aussi, plutôt que de mesurer un couple, on utilise un accéléromètre qui mesure les vibrations induites par les variations de couple, comme se font la plupart des diagnostiques de machines tournantes.

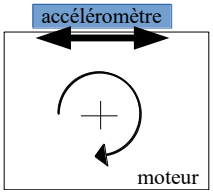



*Fig 7 : mesures de vibrations liées au couple*

Le capteur a pour objet de mesurer les vibrations de la carcasse d'un moteur, vibrations induites par les variations de couple, aussi il doit être sensible aux déplacements tangentielles (fig 7).

### 3.4.1 Accéléromètres amovibles

Les étudiants, à l'issue de leur formation, seront des spécialistes en vibro-acoustique. Pour autant, au moment de faire les travaux pratiques de Machines Tournantes Électriques, en début de semestre 7, les étudiants n'ont pas encore beaucoup utilisé d'accéléromètres. Ces TP sont l'occasion, dans une matière ne correspondant pas au cœur de leur formation, d'utiliser un accéléromètre, le capteur emblème des vibrations. Aussi, nous avons commencé et continuons à utiliser les accéléromètres présents à l'ENSIM.

Dans l'école, on peut trouver différents types d' accéléromètres, principalement ceux dédiés aux applications industrielles, on en trouve notamment des cubiques (type 333B30 de PCB), cylindriques (type M603C01 de PCB) ou des têtes d'impédance (type 5860B de DYTRAN). Les sorties de ces capteurs sont à relier à un conditionneur.

Ces capteurs disposent d'un grand intérêt : ce sont ceux que les ingénieurs vibroacoustiques utilisent pour les diagnostiques vibratoires. Ils sont faciles à installer et récupérer une fois les mesures terminées. Lors de mesures pour l'industrie, ils sont fixés temporairement avec des colles cyanoacrylates ; à l'ENSIM, on les fixe à l'aide d'une cire.

Les inconvénients de ces capteurs sont leur prix et le problème de leur fixation. On peut avoir besoin ponctuellement de sept accéléromètres. Il faut compter plus de 500 euros pour un ensemble capteur et conditionneur, aussi il n'est pas envisageable d'acheter des capteurs juste pour ces TP et on ne sera jamais sûr de disposer des accéléromètres au bon moment.

Le deuxième inconvénient majeur est le problème de fixation. Compte tenu du prix d'un capteur, il

est inenvisageable d'en dédier un par moteur. Il n'est de plus pas possible d'utiliser de la colle pour les fixer, ceci endommagerait les moteurs. On est obligé, pour chaque mesure, de faire adhérer l'accéléromètre au moyen d'une cire, aussi, seuls les accéléromètres cubiques, les moins disponibles, sont généralement correctement fixés.

### 3.5 Accéléromètre bas coût

Pour éviter les problèmes de fixations, on souhaitait pouvoir équiper nos bancs de machines à courant continu (fig 1) et de machine asynchrone (fig 2) d'un accéléromètre dédié. Il nous fallait au minimum 5 accéléromètres et donc trouver des capteurs peu chers.

Des mesures ont permis de déterminer des étendues de mesures de ±3g pour les machines à courant continu et de ±0,05g pour les machines asynchrones. Le capteur devant permettre des mesures tangentielles, on a choisi un capteur MEMS 820M1-0025 [18]. La direction de l'accélération mesurée est indiquée sans ambiguïté sur le composant (fig 8).

On a ainsi réalisé notre capteur avec le composant formant un mini PCB, relié à un condensateur CMS de découplage et une alimentation intégrée de 5V.

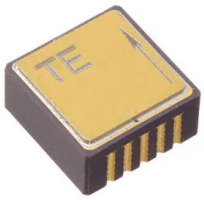


*Fig 8 : accéléromètre 820M1-0025*

Ayant pensé à la fragilité mécanique du capteur, nous avons placé le capteur directement sur les bancs à machine à courant continu, disposant d'un capot. Pour les machines asynchrones, on a placé le capteur de façon à éviter les risques de choc.

Les capteurs testés par les étudiants se sont révélés parfaitement adaptés aux besoins. Les résultats (voir paragraphe 4) montrent que les capteurs fonctionnent bien. L'avantage important du capteur, en plus de son faible coût, est un gain de temps. Les accéléromètres sont collés sur le moteur ou son support, fixés définitivement ; les mesures sont plus rapides car il n'y a pas à réaliser de montage du capteur. Le capteur ne nécessite qu'une alimentation +5V et pas de conditionneur, le câblage est ainsi simplifié : nous n'avons qu'à brancher l'alimentation au secteur et la sortie coaxiale à l'oscilloscope.

L'inconvénient majeur de ces accéléromètres est sa fragilité. Un effort, même faible, risque de décoller le capteur ou de casser les fils de connexion. Pour limiter ces risques, on utilise un capot de protection.

Le capteur présente aussi un risque de destruction par court-circuitage de sa sortie, quand le capteur est alimenté. Des étudiants ont ainsi détruit un capteur en branchant entre-elles les deux fiches bananes 4mm. Pour éviter ce problème, la sortie de la version actuelle du capteur, non testée avec les étudiants, est coaxiale.

On verra plus loin (paragraphe 4 et figure 11) que les spectres d'accélération relevés peuvent comporter une ou deux raies parasites. Cet inconvénient n'est pas majeur, les étudiants étant amenés à se poser la question des différents harmoniques relevés, on fait ainsi appel à leur esprit critique.

## 4 UN EXEMPLE D'APPLICATION DES CAPTEURS

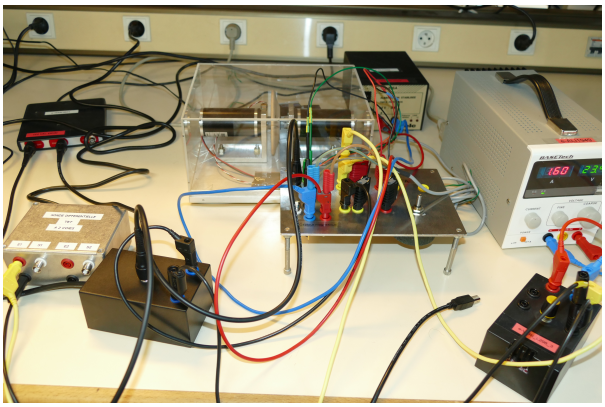


*Fig 9 : montage à MCC*

La figure 9 montre le montage utilisé pour étudier le comportement vibratoire d'une machine à courant continu, il met en œuvre quatre des capteurs présentés. Il comprend un banc de machine à courant continu équipé d'un accéléromètre et d'un tachymètre, un hacheur à L298, un capteur de courant et une sonde de tension.

Les sondes de courant et de tension permettent de visualiser le courant et la tension, donc de comprendre le fonctionnement du hacheur et de voir l'influence de la fréquence de hachage sur la forme du courant.

L'accéléromètre et le capteur de courant permettent d'étudier les effets du pilotage sur le comportement vibratoire d'un moteur en visualisant le courant moteur et l'accélération de la carcasse de ce moteur, les effets du pilotage se voyant par les corrélations des spectres du courant et des vibrations.

On reporte en figures 10 et 11 les courbes temporelles et les spectres du courant moteur et une accélération de la carcasse de ce moteur, tracés pour une vitesse faible.

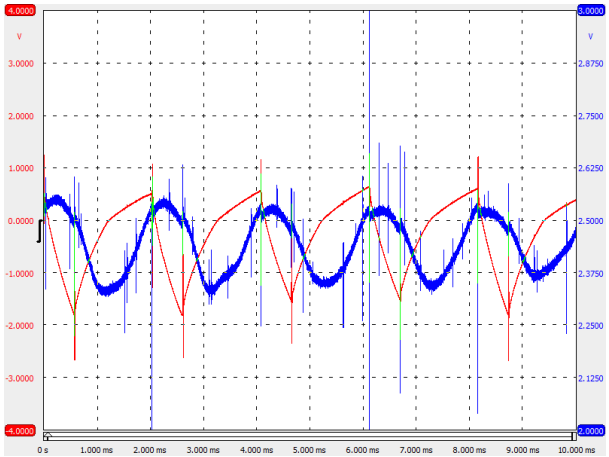


*Fig 10 : courant et accélération*

Le courant est presque triangulaire, le fonctionnement est donc générateur de vibrations. On observe bien une accélération de même fréquence que le courant.

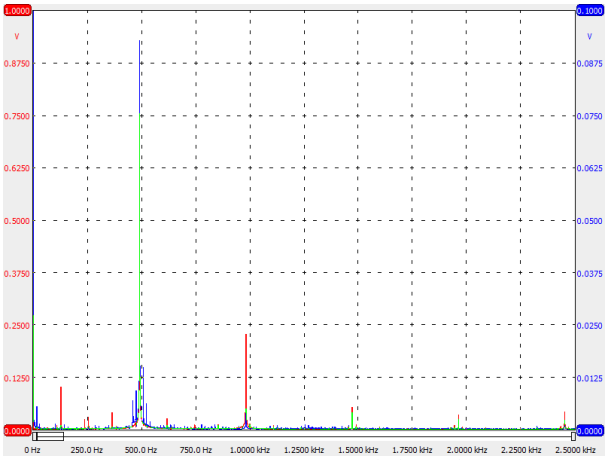


*Fig 11 : spectre du courant et de l'accélération*

Sur la figure 11, on peut voir que les spectres sont nets, on retrouve bien les harmoniques du courant attendus (fondamental, rang 3 et 5). L'accélération présente bien un fondamental et des harmoniques de même fréquence que le courant.

Les figures 10 et 11 mettent en évidence un défaut de l'accéléromètre : sa sortie est de 2,5V pour 0g. Il est ainsi plus difficile de régler le signal à l'oscilloscope et le spectre comprend une raie à fréquence nulle. Le spectre peut aussi comprendre une raie parasite à 50Hz.

On a donc la possibilité de réaliser des accéléromètres peu chers avec des composants 820M1-0025. Le faible coût permet de dédier un capteur par application. Ces capteurs peuvent être utiles pour des TP avec des machines vibrantes, on peut aussi réaliser des capteurs amovibles.

## 5 CONCLUSION

L'instrumentation développée à l'ENSIM pour des TP d'électrotechnique comprend notamment des sondes de tension et de courant, et des accéléromètres. Ces capteurs peu chers permettent d'équiper chaque poste de l'instrumentation permettant de visualiser tension, courant et accélération. Ce matériel est une solution pour monter de nouveaux TP « énergies renouvelables », on peut ainsi réaliser de petits bancs moteur ou photovoltaïques et les instrumenter. La série de travaux pratiques de l'ENSIM Machines Tournantes Électriques comprend 18 heures réparties en six séances de trois heures, une séance étant consacrée à la machine à courant continu (montage présenté en figure 9), deux séances aux moteurs pas à pas et trois aux machines synchrone et asynchrone. Le prix de revient du montage présenté, hors équipement de laboratoire, est ainsi d'environ 700 euros, le banc de moteurs coûtant à lui seul plus de 500 euros. L'équipement complet de ces travaux pratiques peut être estimé à moins de 4000 euros.

## Bibliographie


[1]: site web, https://ensim.univ-lemans.fr/fr/index.html

[2]: site web , https://www.onisep.fr/Ressources/univers-formation/Formations/Post-bac/but-mesures-physiques-parcours-mesures-et-analyses-environnementales

[3]: Yannick Le Bras, Matthieu Milharo, "Moteurs électriques à l'ENSIM : exemple du moteur pas à pas", *Actes du 12ème Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CESTIS-2017), Le Mans (France), Mai 2017,pp 69-74.*

[4]: Yannick Le Bras, "Pilotage d'une machine asynchrone basse tension à l'aide d'Arduino, influence de la porteuse sur le comportement vibratoire", *Actes du 13ème Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CESTIS- 2018), Fes (Maroc), Octobre 2018.*

[5]: site web, www.mouser.fr/datasheet/2/92/Crouzet_brochure_Dcmind_brush_english-1108910.pdf

[6]: site web, www.ti.com/lit/ug/spruhz8/spruhz8.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-wwe&ts=1678896326467&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.fr%252F

[7]: site web, www.magtrol.com/wp-content/uploads/hb-mhb_fr.pdf

[8]: site web, www.gotronic.fr/art-moteur-23hs41-1804s-23050.htm

[9]: site web, www.fxmodelrc.com/electrique-/combos-motorisation/combo-leopard-110-brushless-13t-2p-60a-3300kv-p-50461.html

[10]: site web, www.st.com/en/motor-drivers/l298.html

[11]: www.mouser.fr/datasheet/2/196/Infineon-FS15R12VT3-DS-v02_00-en_cn-464788.pdf

[12]: site web, www.mouser.fr/datasheet/2/196/Infineon_IR2130_DataSheet_v01_00_EN-1228091.pdf

[13]: site web, https://fr.rs-online.com/web/p/pinces-amperemetriques/0212039

[14]: site web, www.mouser.fr/datasheet/2/397/TCOA_S_A0008208752_1-2563822.pdf

[15]: site web, https://docs.rs-online.com/9c26/0900766b81585323.pdf

[16]: site web, https://langlois-france.com/fr/sondes-et-sondes-differentielles/239-2389-sondes-differentielles.html

[17]: site web http://philippe.demerliac.free.fr/Articles/CP0096/CP0096.htm

[18]: site web https://www.mouser.fr/datasheet/2/418/8/ENG_DS_820M1_Accelerometer_A3-2006878.pdf