



Dispositif externe de spectroscopie d'impédance dédié à la caractérisation et au cyclage des sources de puissance

Julian Vernier, Pierre-Alexis Gril, Marie-Cecile Pera, Daniel Hissel, Daniel Depernet

► To cite this version:

Julian Vernier, Pierre-Alexis Gril, Marie-Cecile Pera, Daniel Hissel, Daniel Depernet. Dispositif externe de spectroscopie d'impédance dédié à la caractérisation et au cyclage des sources de puissance. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. <hal-02981847>

HAL Id: hal-02981847

<https://hal.science/hal-02981847v1>

Submitted on 28 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Dispositif externe de spectroscopie d'impédance dédié à la caractérisation et au cyclage des sources de puissance

Julian VERNIER¹, Pierre-Alexis GRIL¹, Marie-Cécile PERA², Daniel HISSEL², Daniel DEPERNET¹

¹UBFC – UTBM - Institut FEMTO-ST (UMR 6174) – FR FCLAB (FR CNRS 3539), ² UBFC – UFC - Institut FEMTO-ST (UMR 6174) – FR FCLAB (FR CNRS 3539)

RESUME - Cet article présente la réalisation d'un dispositif permettant la caractérisation des sources électriques de puissance et l'évaluation de méthodes innovantes de contrôle et de diagnostic. L'objectif est de concevoir une électronique permettant de mettre en œuvre aisément les mesures de spectroscopie d'impédance, de courbes de polarisation, et les essais de cyclage. L'électronique développée offre une grande souplesse de définition des essais adaptée à l'émulation du comportement des contrôleurs industriels et de l'environnement de la source étudiée. Elle est conçue autour d'un microcontrôleur virgule flottante dont les périphériques sont intégrés pour optimiser son efficacité. Associée à une charge électronique et à un ordinateur, ce dispositif faible coût constitue un outil performant de prospection et de validation des nouvelles techniques d'exploitation des piles à combustible, batteries, super-condensateurs ou panneaux photovoltaïques.

Mots-clés —Caractérisation, diagnostic, cyclage, courbe de polarisation, spectroscopie d'impédance.

1. INTRODUCTION

L'optimisation des performances des sources électriques de puissance constitue un point clé dans le développement des générateurs électriques et dans l'amélioration de leur efficacité énergétique. La mise en œuvre de stratégies de contrôle ou de diagnostic efficaces des piles à combustible, des batteries, des super-condensateurs ou encore des générateurs photovoltaïques requiert des moyens d'essais bénéficiant à la fois de performances dynamiques élevées et de souplesse de développement pour permettre de faciliter les investigations requises [1]. C'est dans ce cadre que cet article présente le développement d'un dispositif d'évaluation des sources de puissance et de leur contrôle dont l'architecture globale est décrite Fig. 1. Ce dispositif prend en charge le pilotage du courant dans la source à étudier, la mesure de la tension et du courant dans la source et le calcul de son spectre d'impédance. Relié à un micro-ordinateur, il permet de mettre en œuvre les essais de courte ou longue durée des sources, les relevés de courbes de polarisation ainsi que les mesures de spectroscopie d'impédance de manière indépendante ou couplée. Ce nouvel équipement entièrement développé en interne permet au laboratoire de réduire considérablement les coûts de réalisation des bancs d'essais de spectroscopie et leur maintenance, tout en maîtrisant leurs performances. Le dispositif ainsi réalisé exploite un DSP virgule flottante 32 bits de la série C2000 de Texas

Instruments™ associé à une électronique de conditionnement, l'ensemble pour un coût très réduit. Les algorithmes temps réels sont développés en langage C et pourront évoluer au gré des spécificités des essais. L'interface de pilotage est développée en langage Visual Studio C++ et ses fonctionnalités pourront également évoluer selon les exigences des projets et des chercheurs.

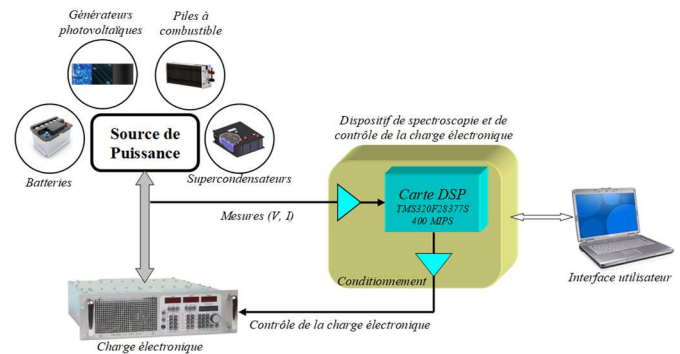


Fig. 1. Schéma synoptique du dispositif de contrôle et de spectroscopie d'impédance des sources

Après avoir présenté le contexte et l'intérêt de cette étude, cet article rappelle dans une deuxième partie les principales fonctionnalités définissant le cahier des charges de conception du dispositif électronique. Les caractéristiques matérielles et logicielles de l'électronique seront présentées dans une troisième partie tandis que les résultats de validation seront exposés dans une quatrième partie. Enfin, les performances et le potentiel d'exploitation seront discutées dans la conclusion.

2. FONCTIONNALITES DE CONTROLE ET DE CARACTERISATION

2.1. Spectroscopie d'impédance

La spectroscopie d'impédance est une méthode de diagnostic non-intrusive permettant de réaliser des mesures d'impédance d'une source électrique sans altérer son fonctionnement nominal. Elle est réalisée en définissant tout d'abord le point de polarisation statique de la source (point de fonctionnement en courant I_0 pour lequel le spectre d'impédance doit être mesuré). En mode galvanostatique, on applique ensuite une perturbation

sinusoïdale Δi en courant de fréquence et d'amplitude définies selon les caractéristiques de la source.

L'amplitude de cette perturbation électrique doit être suffisamment faible pour ne pas modifier le comportement linéaire de la source.

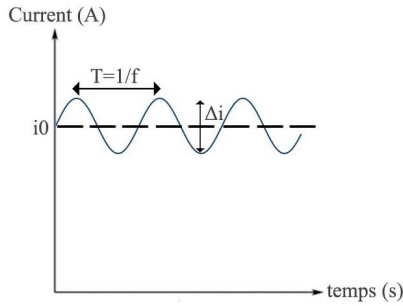


Fig. 2. Perturbation sinusoïdale

On récupère ensuite les composantes alternatives du courant et de la réponse en tension afin d'en déduire l'impédance de la source à la fréquence considérée. Ces données permettent de déterminer le diagramme de Nyquist ou de Bode de l'impédance de la source en répétant la mesure sur la gamme de fréquence désirée, de façon à obtenir suffisamment de points pour couvrir la largeur du spectre de l'impédance de la source. La Fig. 3 permet d'illustrer les phases d'une spectroscopie d'impédance :

- ① La source de puissance est en fonctionnement normal : elle débite un courant continu imposé par sa charge.
- ② Le courant imposé par la charge est fixé au point de polarisation spécifique auquel le spectre d'impédance de la source doit être mesuré.
- ③ Le courant d'excitation sinusoïdal d'amplitude Δi et de fréquence f est ensuite rajouté à la composante continue I_0 afin d'imposer à la charge une consigne en courant avec perturbation (stimuli). Une fois le signal stabilisé au niveau de la charge, des mesures sur la tension et le courant débité par la source sont réalisées par le dispositif de spectroscopie à intervalles réguliers. Ces données permettront de calculer l'impédance de la source à la fréquence imposée par la perturbation sinusoïdale, en utilisant un calcul de *Transformée de Fourier Discrète* (TFD). Après le calcul d'impédance terminé, on réalise de nouvelles mesures à une fréquence de perturbation différente de la précédente, afin

de balayer le spectre d'impédance complet de la source. Les données sont transmises à l'interface homme machine (IHM) tout au long des mesures par liaison série avec le DSP.

L'impédance d'une source électrique à une fréquence f est déterminée par la tension complexe $V_z(f)$ et le courant complexe $I_z(f)$ selon la formule :

$$Z_s(f) = \frac{V_z(f)}{I_z(f)} \quad (1)$$

Ces données sont obtenues par mesure de N échantillons de la tension alternative V_{S_ALT} et du courant alternatif I_{S_ALT} . Un calcul de TFD permet ensuite de reconstituer ces signaux sous leur forme complexe ($Re(x) + j*Im(x)$).

La partie réelle et imaginaire de la tension et du courant alternatif de la source en réponse au stimuli sont extraites par les formules de TFD suivantes :

$$\begin{cases} Re(V_{S_ALT}) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V_{S_ALT}(n) * \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \\ Im(V_{S_ALT}) = -\frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V_{S_ALT}(n) * \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Re(I_{S_ALT}) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_{S_ALT}(n) * \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \\ Im(I_{S_ALT}) = -\frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_{S_ALT}(n) * \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \end{cases} \quad (3)$$

Le rang k correspondant à la fréquence du stimulus est défini par le nombre de périodes prises en compte pour le calcul de la TFD. Un nombre élevé de périodes permet de minimiser l'influence d'éventuelles erreurs de mesure tandis qu'en contrepartie il augmente le temps de mesure.

L'impédance complexe $Z_s(f)$ est ensuite déduite par les calculs suivants :

$$\begin{cases} Re(Z_s) = \frac{Re(V_{S_ALT}) * Re(I_{S_ALT}) + Im(V_{S_ALT}) * Im(I_{S_ALT})}{Re^2(I_{S_ALT}) + Im^2(I_{S_ALT})} \\ Im(Z_s) = \frac{Re(I_{S_ALT}) * Im(V_{S_ALT}) - Re(V_{S_ALT}) * Im(I_{S_ALT})}{Re^2(I_{S_ALT}) + Im^2(I_{S_ALT})} \end{cases} \quad (4)$$

Les parties réelle et imaginaire de l'impédance sont utilisées pour tracer le diagramme de Nyquist ou de Bode qui permettront d'étudier le spectre de la source et de diagnostiquer ses éventuels défauts par rapport à un spectre de référence [2][3][4].

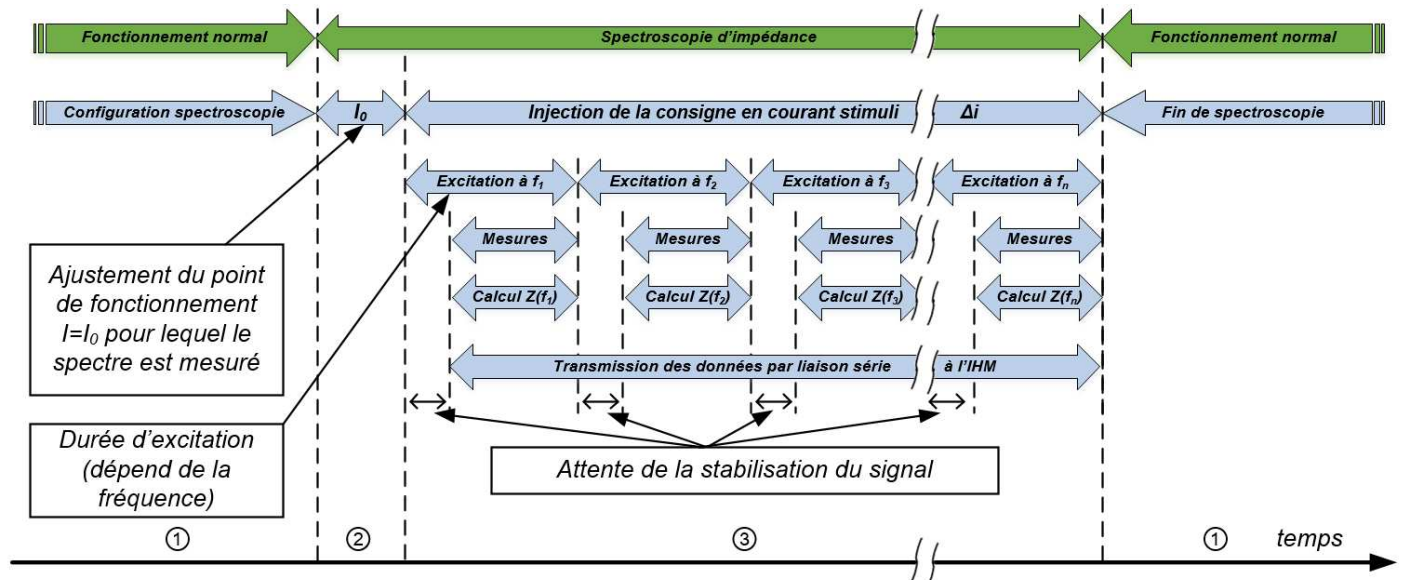


Fig. 3. Principe de spectroscopie d'impédance

2.2. Cyclage et essais longue durée

L'étude de l'évolution des caractéristiques internes des sources et des grandeurs électriques dans des conditions d'essais spécifiques ou conformes à des profils d'exploitation réalistes, permet de mieux comprendre certains phénomènes ou encore de tester ou valider des méthodes de diagnostic ou de contrôle. Le dispositif est donc conçu de manière à pouvoir reproduire des cycles périodiques ou longue durée définis par l'utilisateur ou chargeable depuis un fichier préexistant. L'insertion de mesures de spectroscopie d'impédance dans les profils temporels est également réalisable afin de permettre un suivi des propriétés de la source au cours du temps.

2.3. Relevés de caractéristiques statiques

Les relevés des courbes de polarisation permettent d'extraire certains paramètres statiques caractérisant l'état de santé des sources de puissance. Ainsi, le dispositif est conçu pour réaliser des cycles spécifiques de relevé de courbes de polarisation selon les contraintes définies par l'utilisateur pour les relevés (nombre de points, temps de stabilisation, le sens de progression du courant ou de la tension). Certains tracés annexes sont également mis à disposition comme le tracé de la courbe de puissance dans le cas de panneaux photovoltaïques, permettant ainsi de relever facilement le point de puissance maximale.

3. ARCHITECTURE DE LA CARTE DE CONTROLE

3.1. Système microcontrôleur DSP

La carte de contrôle utilise un module LaunchXL-F28377S développée par Texas Instruments™ caractérisé par sa puissance de calcul, sa facilité de mise en œuvre et son faible coût (de l'ordre de 28€ TTC). Le microcontrôleur TMS320F28377S (400 MIPS) qui constitue le cœur de la carte de contrôle possède une architecture à virgule flottante pour faciliter le codage des calculs de spectroscopie d'impédance. Il possède 4 convertisseurs analogique numérique (ADC) internes configurables en résolutions 16 bits ou 12 bits pour permettre d'atteindre des fréquences d'échantillonnage de 1.1 MHz et 3.5 MHz respectivement. Il comprend également trois convertisseurs numérique analogique (DAC) internes de résolution 12 bits permettant le pilotage sans latence des consignes analogiques de la charge électronique. La Fig. 4 présente les périphériques du μC DSP exploités par la carte de contrôle réalisée.

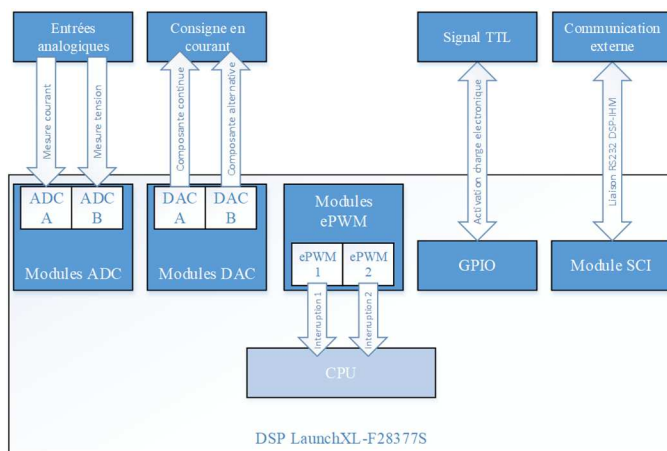


Fig. 4. Synoptique des fonctionnalités du microcontrôleur TMS320F28377S

3.2. Interface de conditionnement

L'interface de conditionnement permet la récupération des mesures de courant et de tension, le pilotage de la charge

électronique et la communication avec l'interface utilisateur. Elle autorise la mesure simultanée sur plusieurs voies analogiques, fonction utile pour la réalisation de spectroscopies d'impédance multiples dans le cas des sources constituées de plusieurs cellules en série. Les principales fonctionnalités de conditionnement, sont les filtrages passe-haut et anti-repliement des mesures analogiques, le calibrage, l'adaptation des niveaux analogiques de sortie pour le contrôle de la charge électronique. La Fig. 5 représente le principe de conditionnement des mesures de courant et de tension et de leur composante alternative extraite.

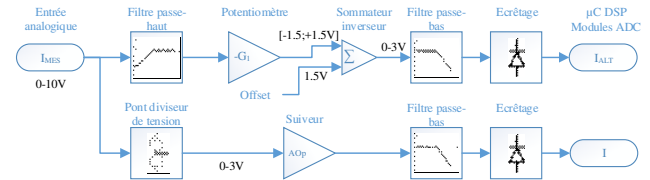


Fig. 5. Chaîne de mesure du courant

La charge électronique utilisée dans le dispositif de contrôle et de spectroscopie d'impédance est équipée d'une sonde interne de courant de bande passante adaptée à la mesure de spectroscopie. L'image en tension du courant comprise entre 0 et 10V est exploitée par la carte de DSP. Ce signal est récupéré sur l'entrée analogique I_{MES} de la carte électronique qui permet ensuite d'extraire la composante alternative I_{ALT} et la composante globale I sur les entrées du module ADC du DSP. La chaîne de mesure pour ces deux composantes est la suivante :

- I_{ALT} : Un filtre-passe haut permet d'éliminer la composante continue du signal en centrant la composante alternative sur 0V. Un montage amplificateur permet d'adapter l'amplitude du signal alternatif afin d'avoir la meilleure résolution sur la plage de tension de l'ADC ($[0; 3V]$). L'ADC ne pouvant recevoir une tension négative, il est nécessaire d'ajouter un offset de +1.5V qui centrera le signal sur $[0; 3V]$ grâce à un amplificateur sommateur inverseur. Une correction logicielle de cet offset peut également être réalisée. Enfin, le filtre passe-bas permet de réduire les bruits haute-fréquence et joue le rôle de filtre anti-repliement. L'écrêtage à diodes permet d'éliminer une éventuelle surtension au niveau de la broche du μC DSP pour ne pas l'endommager.
- I : Un pont diviseur de tension associé à un montage d'adaptation d'impédance est utilisé afin de ramener la tension entre 0 et 3V. Sont également ajoutés un filtre passe-bas et un écrêtage pour les raisons évoquées précédemment.

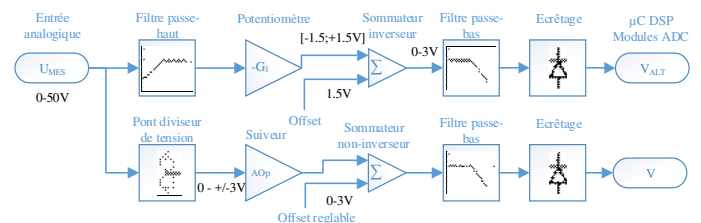


Fig. 6. Chaîne de mesure de la tension

La mesure de la tension est effectuée directement aux bornes de la source et ramenée sur l'entrée analogique U_{MES} de la carte électronique. Le principe de la chaîne de mesure est similaire au précédent, le diviseur de tension étant calibré pour une plage de tension de la source comprise entre 0 et 50V.

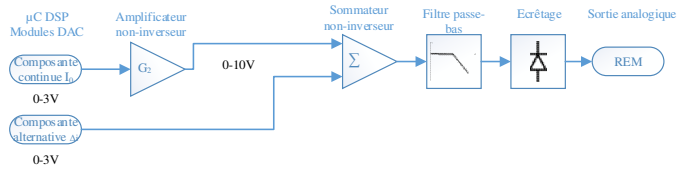


Fig. 7. Génération signal de commande de la charge électronique

La génération du signal d'injection REMote de pilotage de la charge est effectuée par deux modules DAC du DSP, gérant indépendamment la composante continue I_0 et alternative Δi du signal afin d'avoir une meilleure résolution sur cette dernière (Fig. 7). Le module DAC pouvant générer une tension maximale de 3V, la composante continue est amplifiée pour être ramenée à 10V maximum, correspondant à la valeur maximale de commande de la charge électronique. La carte électronique dispose également d'un signal ENable TTL permettant d'activer ou de désactiver le pilotage de la charge électronique. L'alimentation de la carte électronique s'effectue par la liaison USB (5V) qui alimente le μ C DSP, et la communication avec l'IHM est réalisée par liaison série RS232.

3.3. Algorithme temps réel

L'algorithme de contrôle exécuté par le microcontrôleur est développé en langage C. Il exploite les interruptions matérielles associées aux périphériques utilisés pour permettre une efficacité optimale et donc une résolution d'échantillonnage accrue des grandeurs mesurées ou pilotées. Lors d'une spectroscopie, deux interruptions sont utilisées et cadencées par des modules ePWM distincts. La première permet le calcul la génération du signal alternatif sinusoïdal (Δi) pour la commande du stimulus appliqué à la charge électronique. Cette interruption est cadencée à 200 kHz permettant ainsi une résolution minimale de 20 points par période pour une fréquence maximale de spectroscopie à 10 kHz (limitation par la bande passante de la charge électronique). La seconde interruption permet l'échantillonnage des voies analogiques U_{MES} et I_{MES} . Elle est cadencée par l'ePWM à une fréquence d'échantillonnage réglable par l'utilisateur. Le calcul des registres de l'ePWM s'effectue automatiquement par un algorithme qui ajuste les fréquences d'horloges du DSP pour se rapprocher au maximum de la fréquence d'échantillonnage désirée. Les calculs qui requièrent le plus de ressources tels que les transformées de Fourier discrètes ainsi que les communications avec l'interface utilisateur sont réalisés en temps masqués afin de ne pas affecter les performances matérielles.

L'organigramme de la Fig. 8 présente de façon simplifiée l'algorithme effectué en tâche de fond par le DSP. Il effectue principalement une série de tests logiques (0 ou 1) sur l'état de bits afin de savoir ce qui est actuellement en cours de réalisation dans le programme, puis en fonction de ces niveaux logiques l'algorithme effectuera la séquence adaptée. Si l'IHM transmet via la liaison série SCI un ou plusieurs octets, l'algorithme lira ces données et les stockera dans la mémoire du DSP si nécessaire. Il peut s'agir de données à utiliser ultérieurement (ex : fréquences à utiliser lors d'une spectroscopie), ou une demande provenant de l'IHM (ex : déclenchement d'une spectroscopie). Lorsqu'une spectroscopie est en cours, le calcul de TFD progresse en temps masqué au fur et à mesure de la disponibilité de nouveaux échantillons. Ainsi, le calcul de TFD reste en progression pour la raie en cours de mesure jusqu'à la mesure du dernier échantillon. Les données sont alors transmises à l'IHM et la spectroscopie se poursuit aux raies suivantes.

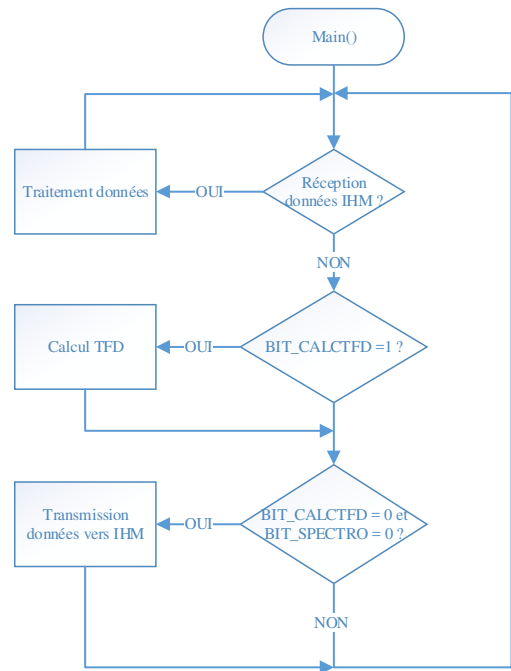


Fig. 8. Organigramme des tâches de fond

3.4. Interface utilisateur

L'interface utilisateur représentée Fig. 9 est constituée d'un PC et d'une application développée en langage C++ répartie en plusieurs onglets : spectroscopie, profils de mission, courbes de polarisation. Elle permet un paramétrage aisé des différentes mesures.

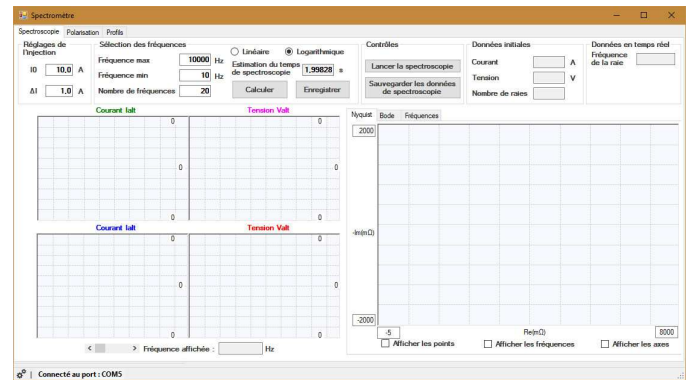


Fig. 9. Onglet « spectroscopie » de l'interface utilisateur

L'onglet « spectroscopie » présente l'onglet principal que percevra l'utilisateur lorsqu'il souhaitera faire une spectroscopie d'impédance. Il peut choisir la valeur du I_0 et du Δi selon le point de fonctionnement de la source auquel il souhaite effectuer sa spectroscopie. La répartition des fréquences des différentes raies du spectre en fonction du choix du nombre de fréquences et de l'étendue de mesure en fréquence (fréquences minimale et maximale souhaitées) peut être réalisée selon un profil linéaire ou logarithmique (Fig. 10). D'autres paramètres sont aussi réglables tels que le nombre de périodes de spectroscopie, le nombre de points par période et le nombre de périodes de stabilisation des signaux entre chaque raie. L'IHM permet également d'afficher les séries de mesure en temps réel sur des graphes, ainsi que les diagrammes de Nyquist et de Bode.

L'onglet profil de mission permettra à l'utilisateur de compléter sous forme de tableau un profil en courant temporel

mais également de planifier automatiquement des spectroscopies d'impédance à des instants souhaités dans le profil.

Quant à l'onglet courbe de polarisation, il permettra à l'utilisateur de configurer la plage de courant dans laquelle sera mesurée la courbe de polarisation, et d'afficher celle-ci en temps réel. Toutes les données acquises par l'IHM sont exportables au format .CSV en fichiers exploitables par les logiciels tableurs.

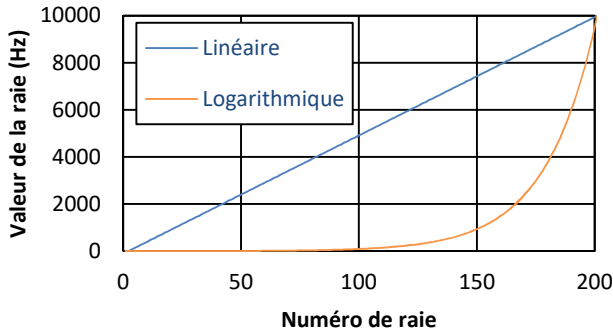


Fig. 10. Choix du profil de fréquence

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

4.1. Validation par mesure d'impédance électronique

Pour valider le fonctionnement de la carte de conditionnement, il a été mis au point différents montages présentant des caractéristiques physiques établies. Ainsi, des relevés de spectroscopie ont été réalisés par le dispositif sur ces montages, puis comparés avec les données théoriques, afin de valider le fonctionnement du dispositif de spectroscopie d'impédance.

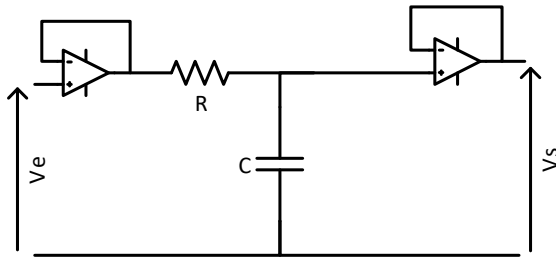


Fig. 11. Montage électronique RC

Le premier test du dispositif est effectué sur un simple montage électronique réalisé sur une platine d'essai. C'est un circuit RC qui permet de déphaser et d'atténuer le signal d'entrée selon sa pulsation ω . Il est positionné entre deux amplificateurs opérationnels montés en suiveurs jouant le rôle d'adaptations d'impédance permettant de minimiser les interactions entre l'impédance à mesurer et les électroniques de mesure et de pilotage. Les montages suiveurs n'engendrent ni atténuation du signal, ni déphasage dans la gamme de fréquence étudiée. La fonction de transfert de ce circuit permet d'émuler l'impédance suivante :

$$\frac{V_S}{V_E}(j\omega) = Z(j\omega) = \frac{1}{1+(RC\omega)^2} - j * \frac{RC\omega}{1+(RC\omega)^2} \quad (5)$$

Ainsi, en choisissant une valeur de résistance $R = 15 \text{ k}\Omega$ et un condensateur $C = 16.5 \text{ nF}$ (deux condensateurs de 33 nF placés en série), on peut établir le graphe de Nyquist théorique en faisant varier la pulsation ω dans la gamme de fréquence souhaitée. Le montage électronique sur la platine d'essai est

réalisé avec les mêmes valeurs de composants. On applique à son entrée V_e le signal généré par le DAC du DSP, image du courant virtuel demandé à la charge électronique, tandis que la tension V_s représente la tension virtuelle aux bornes d'une source de puissance. On mesure alors les signaux V_e et V_s en les appliquant sur les entrées respectives de mesure de courant et de tension. Le dispositif de spectroscopie nous permet ainsi d'obtenir les mesures d'impédance à chaque pulsation, grâce à l'algorithme de spectroscopie implanté dans le microcontrôleur. On obtient ainsi les relevés suivants :

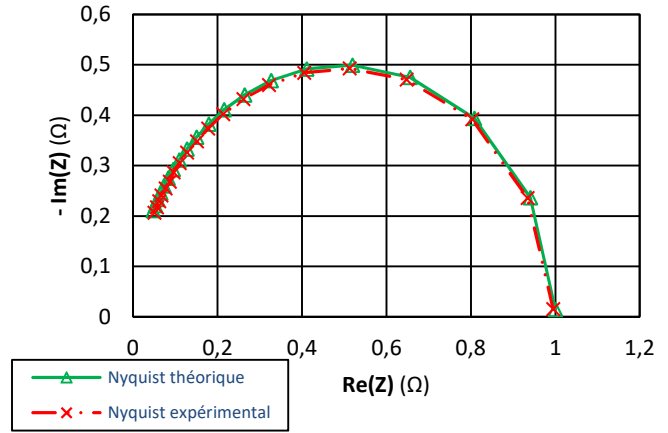


Fig. 12. Graphe de Nyquist montage électronique

Ce graphique a été réalisé pour une plage de fréquence variant linéairement de 10 Hz à 3 kHz. Le tracé vert représente le graphe de Nyquist théorique établi avec la fonction de transfert (5), et le tracé rouge est obtenu expérimentalement. On constate que les deux graphes se superposent parfaitement, validant ainsi la précision du dispositif de spectroscopie d'impédance dans le cas d'un montage électronique connu.

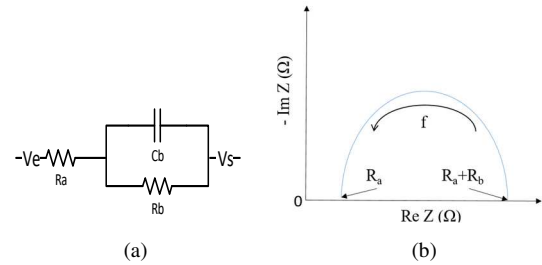


Fig. 13. (a) Montage électronique de puissance, (b) Graphe de Nyquist associé

4.2. Mesure d'impédance de puissance

Le second essai est effectué sur une électronique de puissance. On utilise un montage d'impédance associant une résistance et un condensateur en parallèle, placés en série avec une autre résistance afin d'approcher le modèle équivalent de Randle [5] de l'impédance d'une source électrochimique (Fig. 13a).

$$Z(j\omega) = R_a + \frac{R_b}{1+(R_b C_b \omega)^2} - j * \frac{R_b^2 C_b \omega}{1+(R_b C_b \omega)^2} \quad (6)$$

La fonction de transfert (6) de ce montage devrait nous donner un graphe de Nyquist dont l'allure est représentée Fig. 13b.

Contrairement à l'essai précédent, la caractérisation de cette impédance requiert d'utiliser des composants supportant un courant plus important.

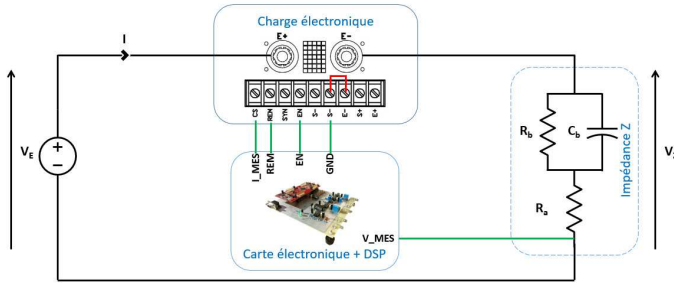


Fig. 14. Schéma de câblage du banc d'essai

La Fig. 14 représente le montage effectué pour réaliser cet essai. Il est nécessaire d'utiliser une alimentation externe qui alimentera la charge électronique, dont sa consigne en courant sera pilotée en temps réel par le DSP selon le principe de spectroscopie. L'impédance à caractériser Z se situe en sortie de la charge électronique. La borne de référence de celle-ci est reliée à la masse de la carte électronique et la mesure de la tension peut ainsi s'effectuer aux bornes de l'impédance Z sans prendre en compte l'impédance de l'alimentation. Le dispositif de spectroscopie permet ensuite d'obtenir l'impédance du circuit pour différentes fréquences en faisant varier alternativement la fréquence de la consigne en courant de la charge électronique, pour une plage variant logarithmiquement de 10Hz à 3kHz.

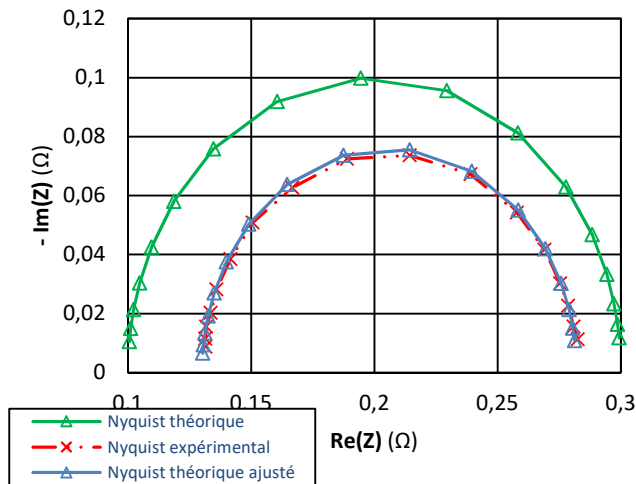


Fig. 15. Graphe de Nyquist montage électronique de puissance

Les composants qui constituent l'impédance à mesurer ont les valeurs théoriques suivantes $R_a = 0.1\Omega$, $R_b = 0.2\Omega$ et $C_b = 4700\mu F$. On remarque sur le graphe de Nyquist Fig. 15 que nous ne retrouvons ni la valeur de $R_a + R_b$ en basse fréquence, ni la valeur de R_a en haute fréquence contrairement à ce que nous annonçait la théorie (cf Fig. 15b). La connectique du montage réalisé étant imparfaite, la modification des valeurs de résistance et du condensateur pour avoir un tracé théorique se superposant avec le Nyquist expérimental permet d'évaluer les paramètres réels du montage. Cette différence s'explique par les simplifications du modèle, ne prenant pas en compte

l'impédance de la connectique, et qui considère un condensateur parfait. Il faudrait en effet tenir compte d'une résistance de fuite en parallèle de celui-ci, et d'une résistance + inductance linéique en série. Ainsi, l'identification des composants à partir de la mesure du spectre d'impédance donne les valeurs expérimentales suivantes : $R_a = 0.13\Omega$, $R_b = 0.152\Omega$ et $C_b = 7200\mu F$.

5. CONCLUSIONS

L'outil décrit dans cet article permet de réaliser l'étude expérimentale statique ou dynamique des sources électriques de puissance. Les fonctionnalités présentent toutes les propriétés nécessaires à la caractérisation des sources, l'évaluation de techniques de diagnostic ou de stratégies de contrôle ou de rajeunissement. Le faible coût et la souplesse de développement logiciel du dispositif le rendent facilement évolutif et réactif aux progrès réalisés dans le domaine des sources de puissance. Les essais de validation ont permis de mettre en évidence la grande précision de mesure de spectres d'impédance en appliquant les algorithmes à une impédance fictive précise et bien connue. Ils ont également permis de montrer qu'une attention particulière à la réalisation des connectiques est nécessaire lors de la mise en œuvre des sources de puissance afin de minimiser les impédances parasites externes à la source à caractériser. Les perspectives de ces travaux consistent à mettre en place les interfaces de communication et de synchronisation du dispositif avec les bancs expérimentaux déjà en place afin d'assurer en particulier une bonne intégration des essais dans la plateforme d'essais des piles à combustible.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le projet européen HEALTH-CODE (Real operation pem fuel cells HEALTH-state monitoring and diagnosis based on DC/DC Converter embeddeD Eis) pour le financement d'un stage de 6 mois dédiés à cette étude ainsi que du matériel nécessaire à la réalisation de ce dispositif.

7. REFERENCES

- [1] S. Wasterlain, D. Candusso, F. Harel, D. Hissel, X. François, "Development of new test instruments and protocols for the diagnostic of fuel cell stacks", Journal of Power Sources, Volume 196, Issue 12, 15 June 2011, Pages 5325-5333
- [2] Hong P, Xu L, Jiang H, Li J, Ouyang M. "A new approach to online AC impedance measurement at high frequency of PEM fuel cell stack", Int J Hydrogen Energy 2017;42:19156-69.
- [3] D. Depernet, O. Ba, A. Berthon, "Online impedance spectroscopy of lead acid batteries for storage management of a standalone power plant", Journal of Power Sources 219, 2012, pp. 65-74. doi:10.1016/j.jpowsour.2012.07.053
- [4] D. Depernet, A. Narjiss, F. Gustin, D. Hissel, M.-C. Péra, "Integration of electrochemical impedance spectroscopy functionality in proton exchange membrane fuel cell power converter". Int J Hydrogen Energy 2016;41:5378-88.
- [5] N. Fouquet, C. Doulet, C. Nouillant, G. Dauphin-Tanguy, B. Ould-Bouamama, "Model based PEM fuel cell state-of-health monitoring via ac impedance measurements", Journal of Power Sources 159 (2006) 905-913