

Détection des défauts de coulage dans les rotors à cage d'écureuil à l'arrêt

H. Henao

Université de Picardie Jules Verne – IUP GEII
33 rue Saint Leu
F-80039 Amiens CEDEX 1, France

COMMUNICATION DANS LES JOURN2ES DU CLUB EEA

« Diagnostic en Electronique, Electrotechnique et Automatique »

17-18 mars 2005 Lyon

Détection des défauts de coulage dans les rotors à cage d'écureuil à l'arrêt

Humberto HENAO
Université de Picardie Jules Verne – IUP GEII
33, rue Saint Leu – 80039 Amiens Cedex 1
E-mail : Humberto.Henao@u-picardie.fr

Humberto HENAO est maître de conférences à l'Université de Picardie Jules Verne depuis 1997 et chercheur au Centre de Robotique, d'Electrotechnique et d'Automatique (UPRES-EA 3299 – CNRT Futurelec). Ingénieur diplômé de l'Université des Andes, Bogota, Colombie (1986), diplôme d'études approfondies (1987) et docteur (1990) de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, il a débuté sa carrière académique en 1990 en étant en poste successivement à Marseille et à Amiens. Ses activités de recherche tournent autour de la commande et du diagnostic des machines électriques. Il est également expert dans l'utilisation du logiciel EMTP pour la simulation de réseaux électriques et a organisé plusieurs sessions de formation sur le sujet. Il a publié environ 40 articles de journaux ou communications dans des conférences internationales.

Résumé

L'objectif de cette communication est la présentation d'une méthode de détection des défauts qui peuvent se présenter lors du processus de fabrication des rotors à cage d'écureuil pour machines à induction. Ces défauts, principalement associés à la porosité du cuivre ou de l'aluminium, entraînent des déséquilibres électriques et mécaniques (balourds) conduisant à une diminution du rendement et de la durée de vie de la machine. La méthodologie proposée consiste à alimenter le stator avec des signaux qui ont un contenu spectral particulier de manière à exciter la réponse associée aux défauts rotoriques de fabrication. Dans ce cas, la réponse est observée dans le flux de dispersion de la machine, étant donné l'impossibilité de mesure du courant rotorique. Ces observations sont faites dans le domaine des basses fréquences afin de se limiter aux phénomènes électromagnétiques intéressants pour les défauts étudiés.

Mots-clés : Machine à induction - Cage d'écureuil - Défauts de fabrication - Flux de dispersion.

1. Introduction

L'intérêt croissant pour l'amélioration de la fiabilité des actionneurs électriques, utilisés comme composants dans un système global, a contribué au développement des méthodes qui aident à évaluer les causes et les conséquences des défauts électriques internes de ces dispositifs. Pour les machines à induction à cage qui représentent la majorité des machines à induction fabriquées dans les dix dernières années, ces défauts sont associés aux

configurations des enroulements statoriques et du rotor à cage d'écureuil. Les défauts statoriques sont associés principalement au vieillissement du matériau isolant des conducteurs entraînant ainsi des court-circuits dans les enroulements. Les défauts rotoriques sont principalement dus à la rupture de barres ou d'anneaux ou à l'excentricité de la cage. Ces derniers peuvent se présenter pendant le processus de fabrication ou en fonctionnement normal de la machine. Dans le processus de fabrication des cages d'écureuil, ces défauts sont dus principalement à la porosité du cuivre ou de l'aluminium qui apparaît lors du coulage. En fonctionnement normal, les défauts rotoriques sont dus aux efforts électromagnétiques, thermiques, mécaniques et environnementaux auxquels la partie tournante est soumise. Une machine à induction conçue, construite, installée et maintenue correctement peut supporter tous ces efforts pendant toute sa durée de vie. Néanmoins, les défauts de fabrication, la surcharge et le manque de maintenance conduisent progressivement à la détérioration de la partie rotorique.

Les méthodes de détection permettant l'identification de problèmes mécaniques avant que le système tombe en panne, facilitent inévitablement la planification de la maintenance et minimisent les coûts d'arrêt de la production. Depuis une vingtaine d'années, les défauts associés à la cage rotorique ont fait l'objet de recherches concernant les effets induits sur le flux de dispersion [1], [2], [3], [4] et le courant statorique [5], [6], [7] de la machine en vue de l'utilisation des capteurs non invasifs du type bobine exploratrice ou capteur de courant respectivement. En général, ces méthodes utilisent l'analyse spectrale des signaux obtenus pour trouver les indices des défauts concernés. L'utilisation d'une bobine exploratrice pour l'observation du flux de dispersion est une approche particulièrement intéressante du point de vue des modifications introduites pour son installation. En effet, cette bobine peut être placée à l'extérieur de la machine sur la carcasse directement ou à une courte distance de celle-ci sans rien modifier dans la disposition de la machine à induction elle-même. Cette méthode a déjà été utilisée pour la détection et la prédiction de court-circuits dans les enroulements du stator, la rupture de barres du rotor et pour l'évaluation du déséquilibre dans l'alimentation des machines à induction triphasées [8], [9], [10].

Cet article présente une méthode de détection des anomalies dans la cage d'écureuil d'une machine à induction qui est applicable au rotor à l'arrêt afin d'effectuer des tests pour le contrôle de la qualité lors de sa fabrication. L'intérêt des tests à l'arrêt est qu'ils n'ont pas d'influence inhérente au glissement du rotor sur les mesures du courant statorique et du flux de dispersion. Ceci permet de se focaliser sur l'analyse dans un domaine de fréquence particulier. Cette méthode consiste à exciter les modes défaillants du rotor avec un signal injecté au stator qui a un contenu spectral connu. Cette excitation doit être suffisante pour induire dans la cage des courants importants sans pourtant faire démarrer la machine comme dans les tests à rotor calé. Toutefois, cette méthode peut être utilisée avec la machine fonctionnant normalement à n'importe quel niveau de charge en tenant compte de l'effet du glissement [8]. Le flux de dispersion créé par l'excitation est mesuré à l'aide d'une bobine exploratrice tout en sachant qu'il est influencé par la dissymétrie introduite par les défauts de fabrication de la cage d'écureuil. Le signal utilisé pour la détection est la tension induite aux bornes de la bobine exploratrice qui est analysé dans le domaine fréquentiel avec la transformée de Fourier rapide (TFR). La détection des défauts de coulage se fait par la différentiation entre les spectres obtenus avec un rotor en bon état qui sert de référence et celui du rotor sous test. Cette étude est complétée avec la mesure du courant statorique de manière à avoir une cohérence par rapport à la méthode qui utilise la signature spectrale du courant.

Dans les paragraphes suivants, la théorie fondamentale du flux de dispersion basée sur le contenu spectral des courants statorique et rotorique est présentée. Ensuite, la définition du signal d'excitation convenable pour améliorer l'analyse fréquentielle du flux de dispersion en

présence de défauts dans la cage d'écureuil est donnée. Le matériel pour réaliser les tests est constitué d'une bobine exploratrice, d'une source d'alimentation triphasée programmable et d'une instrumentation informatisée qui contient un amplificateur à haut gain, un filtre anti-repliement, une carte d'acquisition et finalement un logiciel graphique programmable pour l'acquisition des données, l'estimation des indices et le diagnostic. Deux types de signaux sont conçus et leur efficacité est validée par des essais expérimentaux par rapport à une excitation purement sinusoïdale sur une machine à induction à cage d'écureuil de 18,5kW.

2. Le flux de dispersion

Pour une machine à induction à cage d'écureuil, le flux de dispersion est le résultat de l'effet des courants au stator et au rotor sur les extrémités de la machine c'est-à-dire les têtes des bobines et les anneaux de court-circuit (figure 1). A cause des dissymétries inhérentes au processus de fabrication, le flux de dispersion est toujours détecté et même avec une alimentation équilibrée. Dans son spectre, ce flux contient les fréquences des courants statorique et rotorique et il peut être utilisé pour la détection des dissymétries au stator et au rotor avec les raies les plus sensibles à ces phénomènes [11]. La méthode proposée consiste à utiliser une bobine exploratrice placée à l'extérieur de la machine pour capter le flux de dispersion par la mesure de la tension induite à ses bornes laquelle est proportionnelle à la dérivée de celui-ci.

Dans une machine sans défaut, on retrouve dans le courant statorique la fréquence fondamentale de l'alimentation et les harmoniques qui caractérisent la pollution du réseau. On retrouve également des harmoniques d'espace dus à la périodicité des barres rotoriques. A partir de l'analyse de la force magnétomotrice créée dans l'entrefer et du flux induit au stator par les courants rotoriques, les harmoniques d'espace et la fréquence fondamentale peuvent s'exprimer de la manière suivante :

$$f_{\text{stator}} = \left[\gamma \frac{N_r}{p} (1 - g) \pm 1 \right] f_{\text{source}} \quad (1)$$

avec :

- N_r : nombre de barres rotoriques
- g : glissement du rotor
- p : nombre des paires de pôles
- f_{source} : fréquence fondamentale de l'alimentation
- γ : entier positif ($\gamma=0, 1, 2, 3, \dots$)

La présence d'un défaut dans les enroulements statoriques ou dans la cage rotorique entraîne une modification de la distribution des harmoniques d'espace dans l'entrefer. En considérant seulement un défaut rotorique entraînant une dissymétrie dans la cage, l'analyse de la force magnétomotrice et du flux induit au stator permet d'identifier la signature fréquentielle du défaut dans le courant statorique avec :

$$f_{\text{stator } dr} = \left[\frac{\eta}{p} (1 - g) \pm g \right] f_{\text{source}} \quad (2)$$

avec $\eta=1, 2, 3, \dots$

Dans l'expression (2) sont contenus les harmoniques décrits par (1) et les nouveaux induits par le déséquilibre au rotor. L'effet du défaut sur la machine peut être analysé soit à partir du courant statorique, soit à partir du flux de dispersion qui contient les mêmes informations. Les informations données par ce dernier peuvent être captées avec une bobine exploratrice placée de manière axiale ou sur le côté de la carcasse. La mesure obtenue sur la bobine exploratrice est soumise au bruit induit par l'environnement, l'interférence et la numérisation. Ce bruit peut être minimisé en partie avec l'utilisation d'un amplificateur à haut gain et d'un filtre anti-repliement.

3. Les signaux d'excitation

Avec la méthode proposée, la procédure d'essai d'une machine asynchrone à cage consiste à alimenter le stator avec une tension triphasée qui a un contenu de fréquence connu. Pour la machine à l'arrêt, la tension appliquée doit être capable d'exciter les modes défectueux d'un côté et être suffisamment faible pour ne pas la faire démarrer étant donné qu'aucun dispositif mécanique de blocage n'est prévu dans le banc d'expérimentation. Cela veut dire que la puissance injectée au stator doit être maximisée sans générer un couple électromagnétique supérieur au couple de frottement à vitesse nulle. De cette manière, le glissement n'aura aucune influence sur le spectre du courant et du flux de dispersion en même temps que l'amplitude du signal capté aura l'amplitude nécessaire pour son acquisition avec un minimum d'erreur.

Le niveau du signal de tension peut être augmenté, mais il est plus intéressant de compresser le signal avec un facteur de crête minimisé. Pour un signal $s(t)$, le facteur de crête est défini par :

$$\text{facteur de crête}(FC) = \frac{\max |s(t)|}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^2 dt}} \quad (3)$$

Le facteur de crête d'un signal multifréquence peut être minimisé sans changer l'amplitude du spectre en sélectionnant convenablement l'angle de phase des différentes composantes de fréquence. Le signal d'excitation recherché est une fonction multi-fréquence couvrant un maximum de largeur dans le spectre. Parmi les signaux d'excitation qui s'adaptent le mieux à nos besoins, on trouve le signal multi-sinusoïdal et la séquence binaire pseudo-aléatoire [12], [13], [14].

3.1 Signal multi-sinusoïdal

Un signal multi-sinusoïdal est défini par la somme de N harmoniques dont les fréquences et les amplitudes sont programmables. Dans le domaine temporel, ce signal est décrit par l'expression suivante :

$$s_{ms}(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(2\pi f_k t + \theta_k) \quad (4)$$

avec:

$$f_k = \frac{k}{T}$$

- k : entier positif
 T : période du signal
 θ_k : phase de la $k^{\text{ème}}$ composante

Pour minimiser le facteur de crête d'un signal multi-sinusoïdal, il faut minimiser sa valeur maximale et injecter un maximum de puissance.

$$FC[s_{ms}(t)] = \frac{\max |s_{ms}(t)|}{\sqrt{\sum_1^N \frac{A_k^2}{2}}} \quad (5)$$

Actuellement, il n'existe pas de solution analytique pour trouver le minimum global du facteur de crête par rapport à θ_k et pour cela les algorithmes numériques de traitement du signal du type transformée de Fourier discrète (TFD) aident à synthétiser des signaux aussi complexes que ceux qui sont nécessaires pour exciter les modes défectueux des machines électriques.

Le processus itératif proposé pour minimiser le facteur de crête de $s_{ms}(t)$ [12] consiste à fixer les amplitudes A_k dans le domaine fréquentiel avec les phases θ_k choisies de manière aléatoire et avec une distribution uniforme dans l'intervalle $[0, 2\pi]$. Pour concevoir ce signal d'excitation, les algorithmes de TFR et de TFR inverse sont d'une grande utilité (figure 2). Initialement, les amplitudes du fondamental (50Hz à 100%) et des harmoniques ($A_k=x\%$, $k=6n\pm 1$, $n=1, 2, 3, \dots$) pour définir le spectre de référence sont fixés. En partant de ces valeurs et des valeurs aléatoires pour les phases de chaque harmonique ($\theta_k \in [0, 2\pi]$ $k=6n\pm 1$, $n=1, 2, 3, \dots$), le signal $s_{ms,i}(t)$ est calculé en appliquant la TFR inverse. Quand la valeur maximal de ce signal dépasse un seuil de 100%, celui-ci est écrêté et passé par une TFR pour déterminer les valeurs de θ_k correspondantes. Ces dernières sont utilisées avec les amplitudes de référence pour recalculer le signal $s_{ms,i}(t)$ jusqu'à ce que sa valeur maximale soit inférieure ou égale au seuil fixé $s_{ms,i}(t)$. Une fois que cette dernière condition est obtenue, le facteur de crête est calculé et comparé par rapport à celui du signal précédent $s_{ms,i-1}(t)$ afin de conserver le signal le mieux compressé. Cette procédure est répétée N_i fois. Finalement, le signal choisi est celui qui a le facteur de crête minimum avec les phases $\theta_{k,op}$. Expérimentalement, on trouve que pour les contraintes imposées, on obtient un facteur de crête acceptable avec $N_i = 1000$.

La fréquence d'échantillonnage utilisée f_e est choisie de manière à trouver un compromis entre la bonne représentation du signal et le temps de calcul. Un bon compromis est obtenu avec f_e entre 8 et 16 fois la valeur de l'harmonique le plus important du signal généré. Le signal optimal est obtenu pour une période sous forme d'une séquence de 1024 points.

3.2 Signal binaire pseudo-aléatoire

Un signal binaire pseudo-aléatoire est un signal binaire périodique. Celui-ci peut être généré à partir d'un signal multi-sinusoïdal à phase aléatoire (figure 3). L'algorithme proposé pour générer ce signal consiste à fixer les amplitudes A_k dans le domaine fréquentiel avec les phases θ_k choisies de manière aléatoire et avec une distribution uniforme dans l'intervalle $[0, 2\pi]$. Initialement, les amplitudes du fondamental (50Hz à 100%) et des harmoniques ($A_k=x\%$, $k=6n\pm 1$, $n=1, 2, 3, \dots$) pour définir le spectre de référence sont fixés. En partant de ces valeurs et des valeurs aléatoires pour les phases de chaque harmonique ($\theta_k \in [0, 2\pi]$ $k=6n\pm 1$,

$n=1, 2, 3, \dots$), le signal $s_{sbpa,i}(t)$ est calculé en appliquant la TFR inverse. Ensuite, le signal binaire $SBPA_i$ est obtenu en appliquant l'algorithme suivant :

$$\text{Si } s_{sbpa,i}(t) \geq 0 \rightarrow SBPA_i=100\%, \text{ sinon } SBPA_i=-100\% \quad (6)$$

Avec le signal ainsi obtenu, le facteur de crête est calculé et comparé par rapport à celui de la séquence précédente $SBPA_{i-1}$, afin de conserver le signal qui a le facteur de crête le plus faible. Le signal optimal est obtenu pour une période sous forme d'une séquence de 1024 points.

3.3 Signaux de test

Les deux algorithmes précédents sont appliqués pour générer les signaux d'excitation correspondants en limitant le domaine de fréquence à l'harmonique 21. Cette bande correspond aux fréquences observables pour une représentation inductive des dissymétries du rotor à cage d'écureuil. Afin de comparer l'effet de ces signaux sur la machine par rapport à la méthode classique, un signal sinusoïdal est aussi utilisé. Pour chaque type d'excitation le signal est reproduit trois fois avec un décalage de 120° à chaque fois, pour obtenir les tensions triphasées équilibrées de base. Ensuite, ces tensions triphasées sont amplifiées à l'aide d'une source programmable ou d'un onduleur de tension à MLI.

Sur la figure 4, on peut observer le signal sinusoïdal qui est utilisé comme référence. Sur la figure 5, le signal multi-sinusoïdal est obtenu avec un facteur de crête de $FC=1,4$ pour les harmoniques 5, 7, 11 et 13 avec une amplitude de 50%, ce qui équivaut à -6dB. Sur la figure 6, le signal binaire pseudo-aléatoire est obtenu avec un facteur de crête $FC=1,2$ pour des harmoniques s'étendant sur toute la bande de fréquence observée.

4. Banc d'essai

Un banc d'essai spécifique a été conçu pour le diagnostic de la cage rotorique d'une machine à induction à l'arrêt. Celui est constitué de deux machines à induction à cage d'écureuil de mêmes caractéristiques (18,5kW, 50Hz, 380V, 4 pôles, 40 barres rotoriques). L'une est en bon état et elle est définie comme machine de référence tandis que l'autre a un défaut au rotor avec trois barres percées sur toute leur profondeur. Ces deux machines sont montées sur le même arbre avec un frein à poudre au milieu qui simule la charge. Cette dernière possibilité n'est pas appliquée pour faire les essais à l'arrêt mais elle est d'utilité pour compléter les essais à différents niveaux de charge. Les machines sont alimentées par une source programmable de 4,5kVA (figure 7).

Une bobine exploratrice et un capteur de courant, chacun avec une bande passante de 20kHz, sont utilisés pour surveiller les états des deux machines séparément. Le signal aux bornes de la bobine exploratrice est adapté en amplitude avec un amplificateur analogique à large bande et passé par un filtre anti-repliement passe-bas à 2kHz. Les signaux du flux de dispersion et du courant statorique sont convertis en valeurs numériques avec une carte d'acquisition 12 bits. Pour chaque essai, on prend en régime permanent 131072 échantillons de chaque signal à une fréquence d'échantillonnage de 16384Hz. Ceci correspond à un temps d'acquisition $t_a=8s$ et à une résolution fréquentielle $\Delta f=0,125Hz$ ($\Delta f=1/t_a$). Le spectre est normalisé par rapport à la composante fondamentale (50Hz) à laquelle correspond une amplitude de 0dB. Toute la procédure de génération des signaux d'excitation, d'acquisition et d'analyse spectrale est réalisée dans un ordinateur personnel à l'aide des logiciels MATLAB[®] pour la première tâche et de LabView[®] pour les autres.

5. Résultats expérimentaux

La méthode proposée a été appliquée à la machine présentée précédemment. Avant de procéder à l'analyse des résultats, plusieurs méthodes de pondération temporelle ont été appliquées aux signaux des capteurs obtenus afin d'améliorer leur dynamique dans le spectre en fonction des raies observées. Parmi les trois fenêtres testées (Hanning, Barlett, Hamming) c'est celle d'Hamming qui répond le mieux à nos besoins.

Initialement, un signal sinusoïdal (figure 4) triphasé a été utilisé pour alimenter la machine saine et sous l'effet du défaut rotorique (trois barres percées). La machine étant à l'arrêt ($g=1$), les harmoniques d'espace que l'on peut associer à l'expression (2) ne seront pas présents et on pourra observer seulement les harmoniques provenant de l'alimentation qui correspondent aussi aux harmoniques qui excitent les modes défectueux de la cage rotorique avec $f_{stator}=f_{source}$.

Dans le courant statorique et le flux de dispersion, on peut observer les harmoniques de rang $6n\pm 1$ avec $n=1, 2, 3, \dots$ (50Hz, 250Hz, 350Hz, 550Hz, ...). Les harmoniques de rang $3n$ (150Hz, 300Hz, 450Hz, ...) sont aussi présents dans le flux de dispersion mais ceux que l'on peut observer sur le courant statorique sont évidemment dus aux non-linéarités du capteur de courant et ne sont pas pris en considération (figure 8).

On peut observer que pour la machine à l'arrêt, le courant statorique avec une alimentation sinusoïdale ne permet pas de discriminer la machine saine de la machine sous défaut contrairement au flux de dispersion qui montre plus de sensibilité au défaut rotorique (Table 1).

L'excitation de la machine avec une tension multi-sinusoïdale (figure 5), contenant quelques uns des harmoniques qui excitent les modes défectueux (250Hz, 350Hz, 550Hz, 650Hz), montre aussi l'absence de sensibilité au défaut au niveau du courant statorique (figure 9). Avec ce type d'excitation, les modes défectueux du rotor affectent de manière plus sensible le flux de dispersion (Table 2).

L'application du signal binaire pseudo-aléatoire (figure 6), qui contient une plus grande diversité d'harmoniques par rapport au signal multi-sinusoïdal, montre aussi la sensibilité du flux de dispersion et l'insensibilité du courant au défaut rotorique étudié (figure 10). Avec une excitation aussi riche, la sensibilité du flux de dispersion est plus évidente (Table 3). Ici, les harmoniques de rang $2n$ qui sont présents seulement dans le flux de dispersion sont affectés de manière observable.

6. Conclusion

La méthode présentée permet une détection précoce des anomalies telles que la rupture des barres ou la porosité, que l'on peut retrouver lors du coulage d'un rotor à cage d'écureuil. Cette méthode de détection est proposée pour le rotor à l'arrêt afin de faire un contrôle de la qualité de celui-ci tout de suite après sa fabrication contribuant ainsi à augmenter la durée de vie de la machine en sortant de l'usine. Cette méthode est particulièrement originale dans le sens qu'elle fait appel à des signaux non conventionnels dans lesquels on peut investir un maximum d'énergie dans le domaine des basses fréquences afin d'exciter les modes défectueux que l'on cherche à faire ressortir. Les modes défectueux avec le rotor à l'arrêt sont plus faciles à détecter dans le flux de dispersion que dans le courant statorique.

Dans une machine à faible puissance, la différence entre une machine saine et une machine sous défaut rotorique peut s'avérer moins évidente à cause de la faible dynamique des signaux. Néanmoins, ceci peut être compensé en adaptant mieux la puissance dans les modes défectueux et en augmentant les gains des signaux obtenus à la sortie des capteurs.

7. Bibliographie

- [1] J. Penman, M.N. Dey, A.J. Tait, W.E. Bryan, "Condition monitoring for electrical drives," *IEE Proceedings*, vol.133, n°3, 1986, pp.142-148.
- [2] G.B. Kliman, R. A. Koegl, "Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.3, n°4, December 1988, pp.873-879.
- [3] N.M. Elkasabgy, A.R. Easthem, "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.28, n°1, January-February 1992, pp.165-171.
- [4] C. Demian, A. Mpanda-Mabwe, H. Henao, G. A. Capolino, "Detection of induction machines rotor faults at standstill using signal injection," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.40, n°6, November-December 2004, pp.1550-1559.
- [5] B. Yazici, G.B. Kliman, "An adaptive statistical time-frequency method for detection of broken bars and bearing faults in motors using stator current," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.35, n°2, March-April 1999, pp.442-452.
- [6] S. Nandi, H. Toliyat, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – a review," Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference, vol.1, pp.197-204.
- [7] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, G.B. Kliman, "Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.37, n°5, September-October 2001, pp.1248-1255.
- [8] H. Henao, C. Demian, G.A. Capolino, "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.39, n°5, September-October 2003, pp.1272-1279.
- [9] O. Ondel, A. Yazidi, E. Boutleux, G. Clerc, H. Henao, G.A. Capolino, "Comparative study of two diagnosis methods for induction machine," *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT'04)*, Yasmine-Hammamet (Tunisia), December 2004, vol. CD-ROM ISBN 0-7803-8663-9, 7 pages.
- [10] H. Henao, T. Assaf, G.A. Capolino, "Detection of voltage source dissymmetry in an induction motor using the measurement of axial leakage flux," *Proceedings International Conference on Electrical Machines (ICEM'00)*, Espoo (Finland), August 2000, vol.2, pp.1110-1114.
- [11] H. Henao, G.A. Capolino, C. Martis, "On the stray flux analysis for the detection of the three-phase induction machine faults," *Conference Record of the 38th IAS Annual Meeting*, Salt Lake City, October 2003, vol.2, pp.1368-1373.
- [12] J. Schoukens, R. Pintelon, *Identification of linear systems – a practical guideline to accurate modeling*, Pergamon Press, 1991, pp.143-191.
- [13] E. Van der Ouderaa, J. Schoukens, J. Renneboog, "Peak factor minimization using time-frequency domain swapping algorithm," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 37, n° 1, 1988, pp. 144-147.
- [14] A.H. Tan, K.R. Godfrey, "The generation of binary and near-binary pseudorandom signals: an overview," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, n° 4, August 2002, pp.583-588.

Table 1. Sensibilité aux défauts rotoriques avec une excitation sinusoïdale.

Fréquence [Hz]	Courant statorique [dB]	Flux de dispersion [dB]
150	-	-6
250	0	-11
300	-	-31
350	-1	-2
450	-	-12
550	-4	-6

Table 2. Sensibilité aux défauts rotoriques avec une excitation multi-sinusoïdale.

Fréquence [Hz]	Courant statorique [dB]	Flux de dispersion [dB]
150	-	-10
250	-1	-12
300	-	-16
350	0	-2
450	-	9
550	0	-15

Table 3. Sensibilité aux défauts rotoriques avec une excitation binaire pseudo-aléatoire.

Fréquence [Hz]	Courant statorique [dB]	Flux de dispersion [dB]
100	-	-8
150	-	-14
200	-	-5
250	0	-13
300	-	-24
350	0	-2
400	-	-13
450	-	-12
550	1	-10

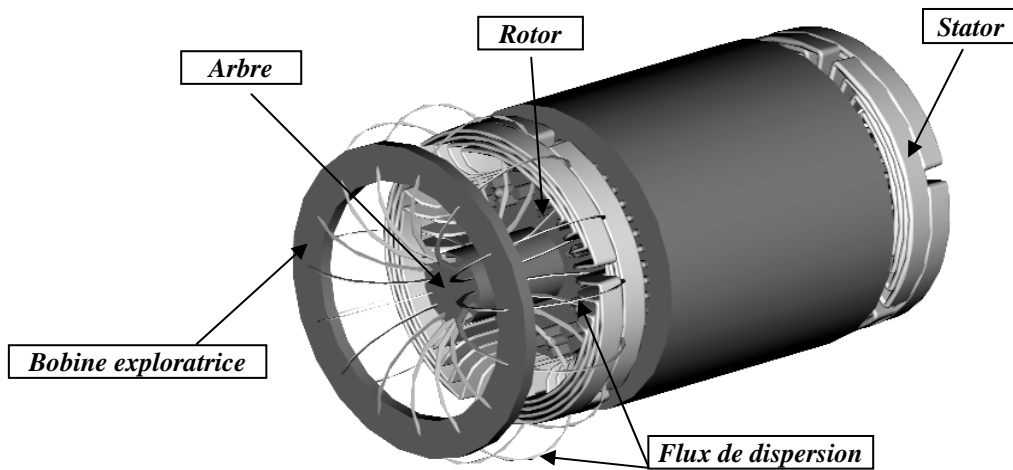


Figure 1. Bobine exploratrice pour la mesure du flux de dispersion.

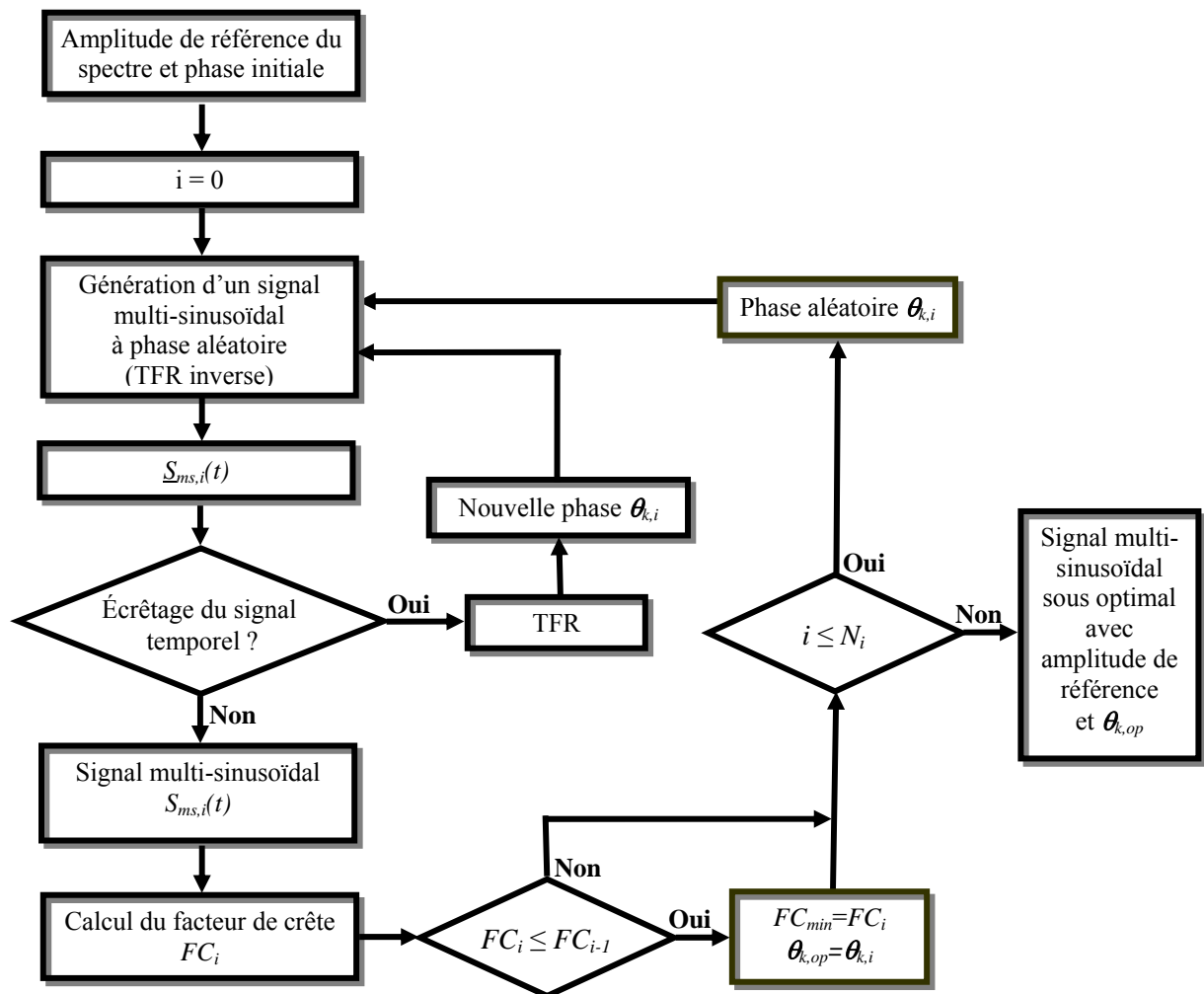


Figure 2. Algorithme pour l'obtention d'un signal multi-sinusoidal à facteur de crête minimum.

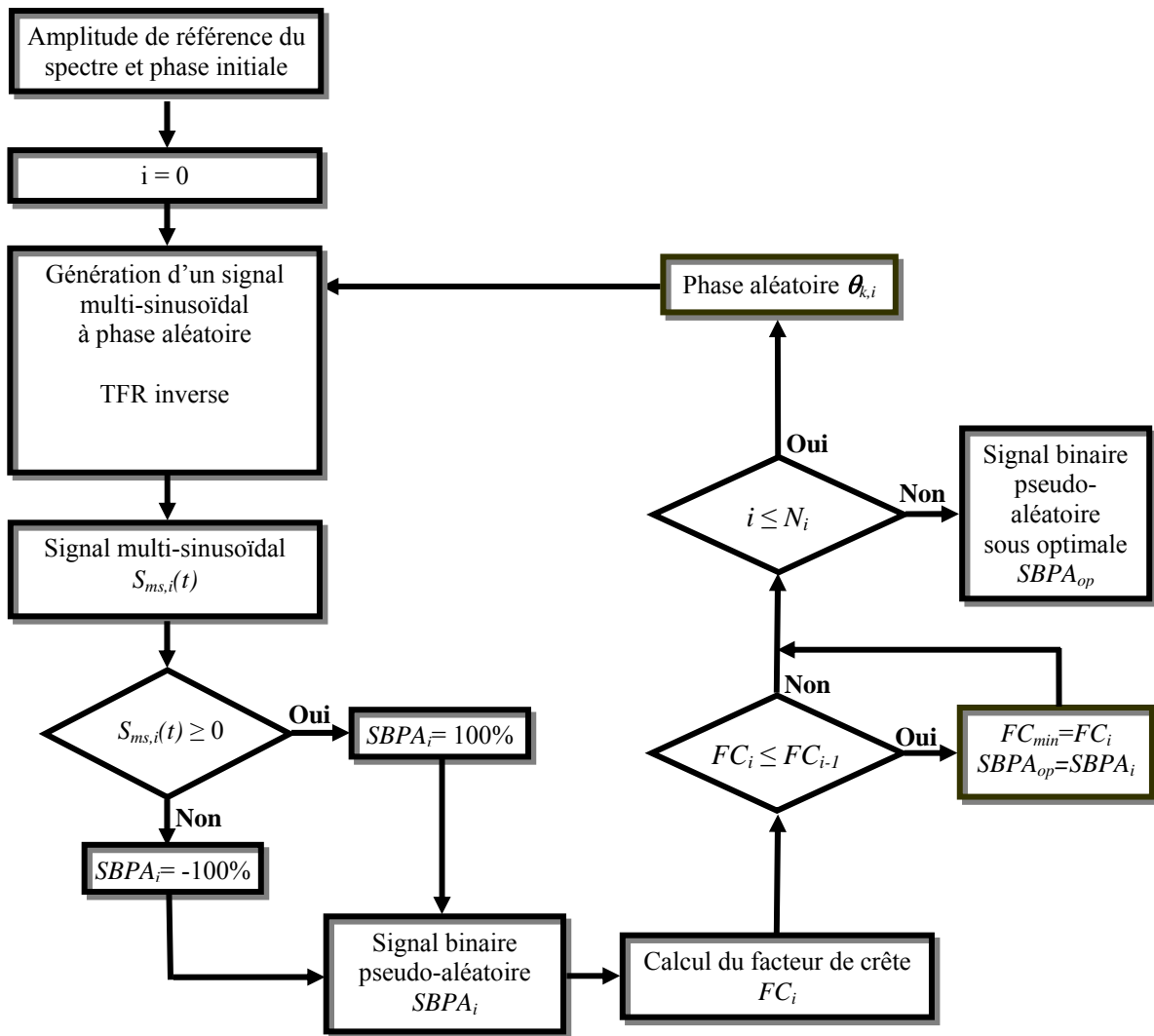
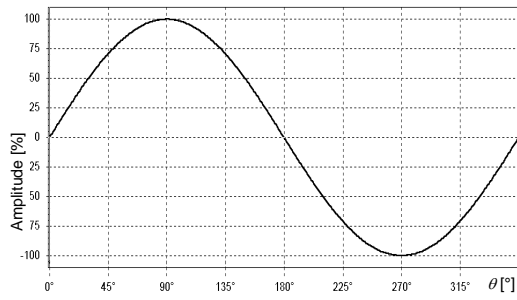
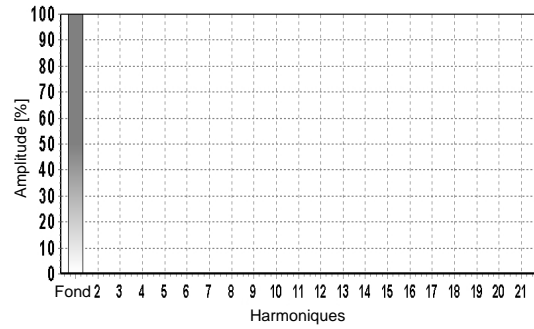


Figure 3. Algorithme pour l'obtention d'un signal binaire pseudo-aléatoire à facteur de crête minimum.



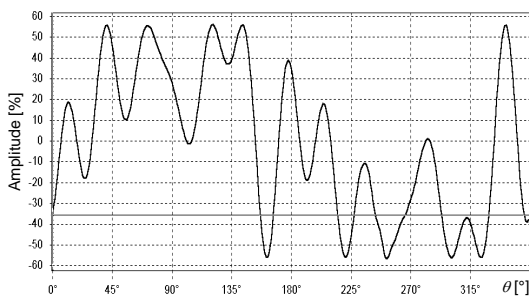
a.



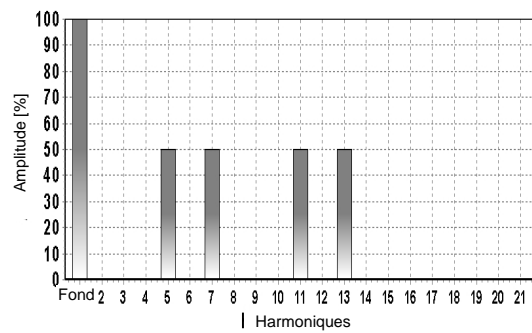
b.

Figure 4. Signal sinusoidal.

a. Représentation temporelle ($\theta = \omega t$). b. Représentation harmonique.



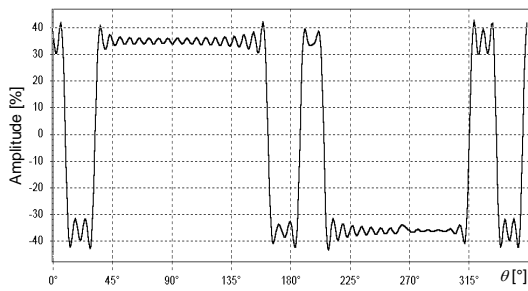
a.



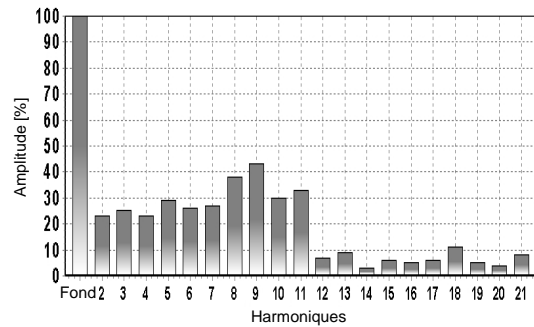
b.

Figure 5. Signal multi-sinusoidal ($FC=1,4$).

a. Représentation temporelle ($\theta = \omega t$). b. Représentation harmonique.



a.



b.

Figure 6. Signal binaire pseudo-aléatoire ($FC=1,2$).

a. Représentation temporelle ($\theta = \omega t$). b. Représentation harmonique.

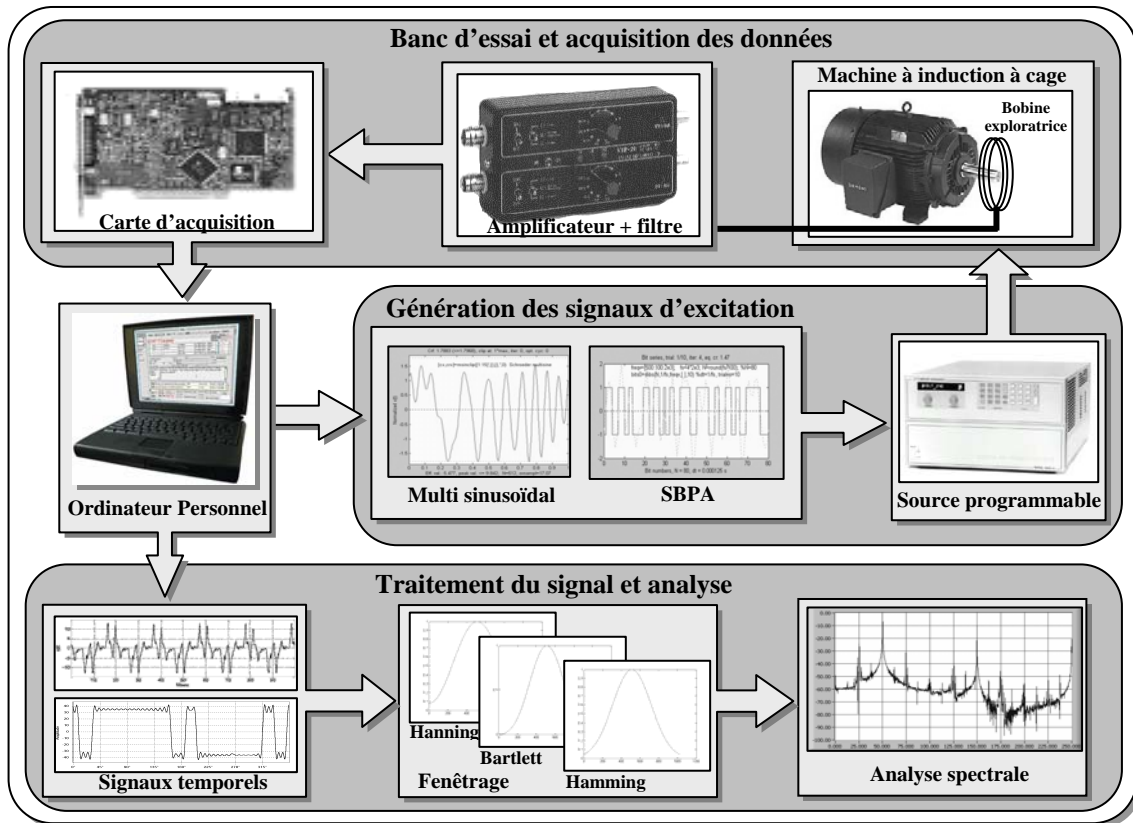


Figure 7. Synoptique du banc d'essai.

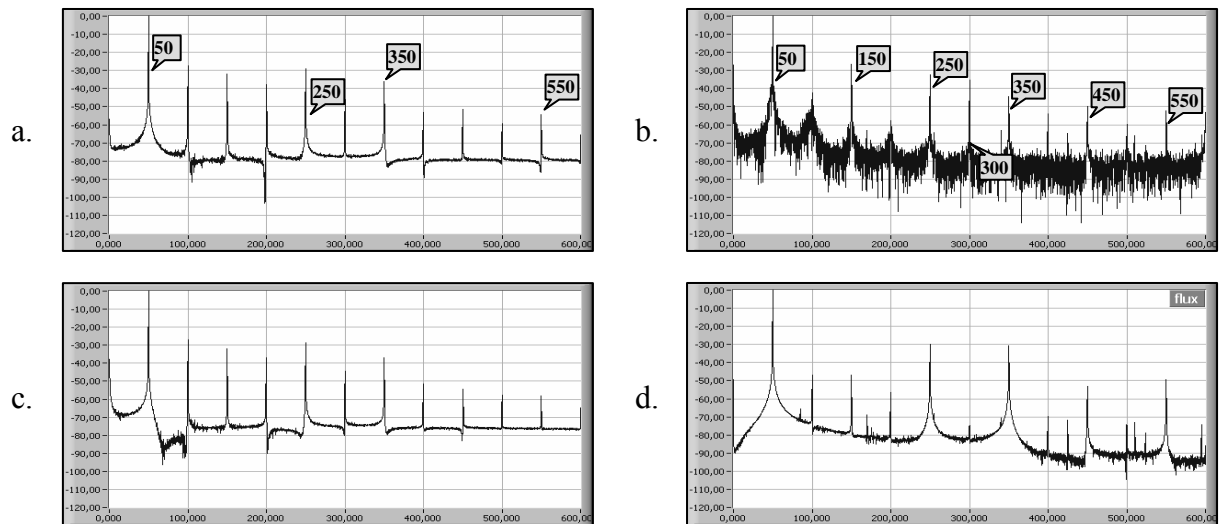


Figure 8. Résultats expérimentaux pour le signal d'excitation sinusoïdal ([dB], [Hz]).
a. Spectre du courant pour la machine saine. b. Spectre du flux de dispersion pour la machine saine. c. Spectre du courant pour la machine avec défaut. d. Spectre du flux de dispersion pour la machine avec défaut.

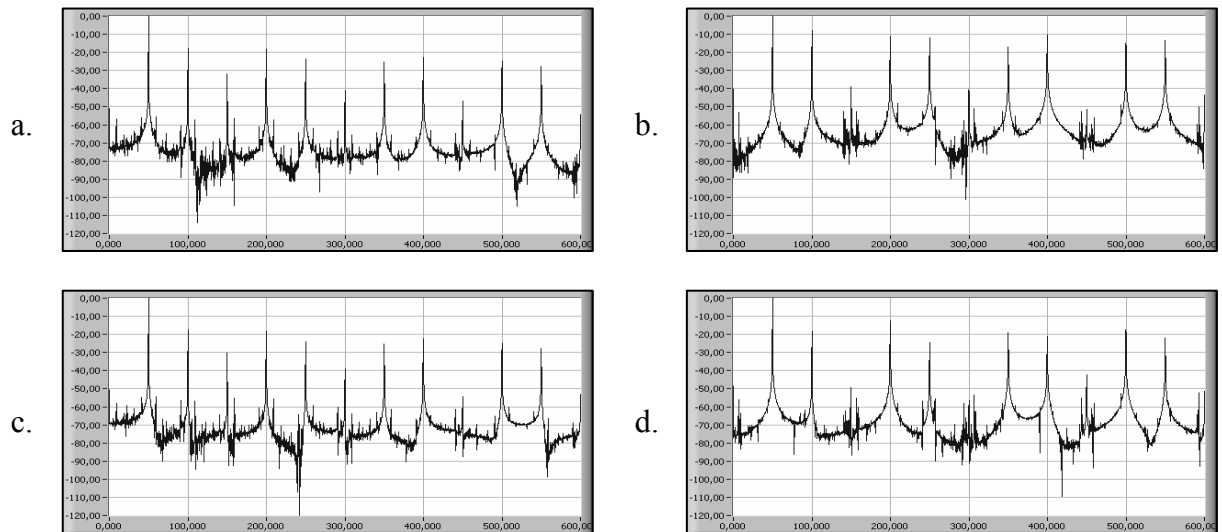


Figure 9. Résultats expérimentaux pour le signal d'excitation multi-sinusoïdal ([dB], [Hz]).
a. Spectre du courant pour la machine saine. b. Spectre du flux de dispersion pour la machine saine. c. Spectre du courant pour la machine avec défaut. d. Spectre du flux de dispersion pour la machine avec défaut.

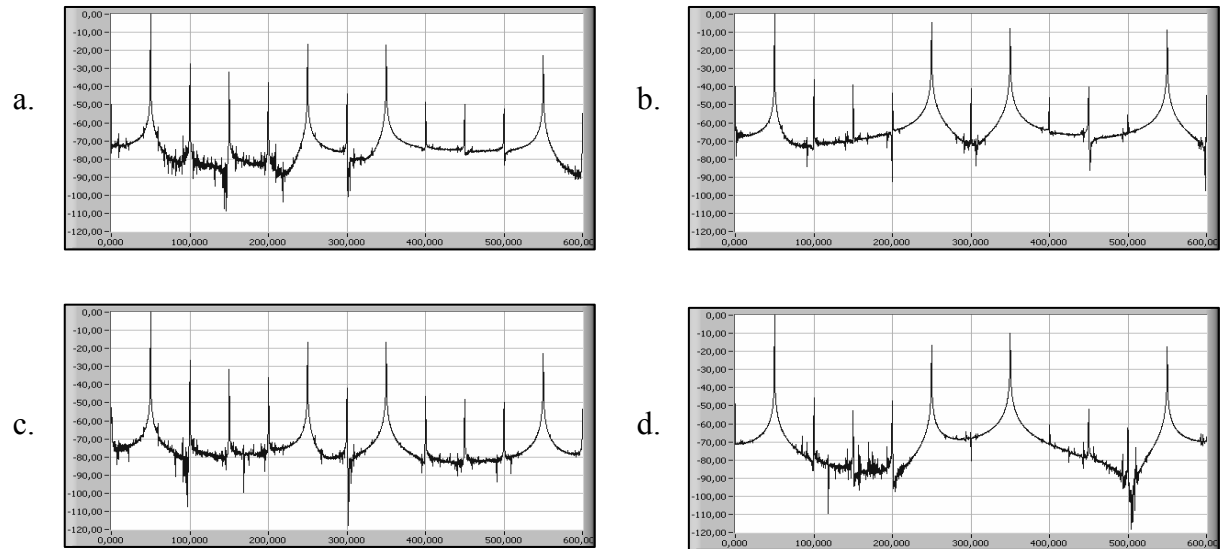


Figure 10. Résultats expérimentaux pour le signal d'excitation binaire pseudo-aléatoire ([dB], [Hz]).

- a. Spectre du courant pour la machine saine. b. Spectre du flux de dispersion pour la machine saine. c. Spectre du courant pour la machine avec défaut. d. Spectre du flux de dispersion pour la machine avec défaut.