



P. ESPEL

Analyse de la qualité de l'énergie électrique : mesure du Flicker

Power quality analysis: measurement of Flicker

Patrick ESPEL

Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), 29 Avenue Roger Hennequin, 78197 Trappes Cedex, France, patrick.espel@lne.fr.

Résumé

L'article présente un nouvel étalon au LNE pour la mesure des fluctuations lentes de tension (ou Flicker). Ce phénomène est reproduit en laboratoire par un signal modulé qui résulte de la modulation d'amplitude d'une porteuse sinusoïdale par un signal modulant rectangulaire ou sinusoïdal. Deux méthodes sont présentées pour analyser chacune de ces modulations. Elles permettent de mesurer le Flicker avec une incertitude type de l'ordre de 10^{-5} .

MOTS CLÉS : ÉTALON DE MESURE, ÉNERGIE ÉLECTRIQUE, FLICKER, TAUX DE MODULATION, ÉCHANTILLONNAGE, TEMPS D'INTÉGRATION.

Abstract

The paper describes a new standard for precision measurement of Flicker developed at LNE. This phenomenon manifests by a voltage fluctuation which is simulated in the laboratory by the modulation of a sine wave carrier signal by a rectangular or sine wave modulating signal. Two different methods are used for the analyses of each type of modulation. The standard uncertainty is closed to 10^{-5} .

KEY WORDS: FLICKER, MODULATION DEPTH, SAMPLING METHODS, APERTURE TIME.

1. Introduction

Depuis quelques années, les règles du jeu du secteur électrique ont évolué avec l'ouverture à la concurrence de la production d'électricité et donc la possibilité pour les consommateurs d'électricité de choisir leur fournisseur. Dans ce contexte de libéralisation du marché de l'énergie, la compétitivité des compagnies d'électricité est aussi liée à la qualité de l'énergie fournie qui est devenue un facteur différenciateur. Sa garantie peut être, pour un industriel notamment, un critère de choix d'un fournisseur

d'énergie. En effet, pour les industriels, une mauvaise qualité de l'énergie électrique peut entraîner un dysfonctionnement ou même l'arrêt des outils de production. Le coût des perturbations peut donc être très élevé car il doit tenir compte du manque à produire, de la remise en marche de l'outil de production, des retards de livraison.... Ces problèmes sont devenus d'autant plus importants que les équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux-mêmes générateurs de perturbations se sont généralisés.

Les principales perturbations susceptibles d'altérer le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont les creux de tension, les harmoniques et inter-harmoniques, les fluctuations de tension ou Flicker, les déséquilibres de tension, les surtensions, les surtensions temporaires et les surtensions transitoires. Afin de caractériser et de quantifier ces perturbations, les industriels ont développés des « mesureurs » de la qualité de l'énergie (qualimètre, flickermètre, perturbographe, analyseur de réseau, analyseur de puissance...). Les instituts nationaux de métrologie (INM) se doivent désormais de développer de nouvelles références primaires pour étalonner ces différents appareils. Dans cet article, nous nous intéresserons plus particulièrement aux mesureurs de Flicker ou Flickermètre. Cette perturbation se manifeste par une variation lente de la tension électrique provoquée par la mise en marche de charges variables (fours à arc, imprimantes laser, micro-ondes...). En plus des conséquences éventuelles sur les équipements industriels, ce phénomène se manifeste par une variation de l'intensité lumineuse des éclairages qui peut entraîner des effets négatifs sur l'homme (fatigue visuelle et nerveuse, mal de tête, irritabilité et parfois même épilepsie).

En laboratoire, le Flicker est représenté par un signal constitué d'une porteuse de fréquence $f_0 = 50$ Hz soumise à une modulation d'amplitude carrée ou sinusoïdale dont la fréquence f_m est comprise entre quelques millihertz et 25 Hz et le taux de modulation k est compris entre 0,027 2 et 0,004 02 (ces valeurs correspondent aux points de tests donnés par la norme EN 61000-4-15 [1]). Pour qualifier un flickermètre, il faut connaître précisément la valeur du taux de modulation. Jusqu'à présent, deux méthodes ont été développées dans les instituts nationaux de métrologie pour mesurer cette grandeur. La première méthode, développée par Budovsky (Australie) [2,3] est basée sur l'analyse temporelle du signal modulé alors que la deuxième méthode, développée par Wright (Royaume-Uni) [4] consiste à faire l'analyse spectrale du signal.

Ces deux méthodes ont été dupliquées au laboratoire pour traiter le cas des modulations d'amplitude carrée ou sinusoïdale. Elles sont présentées dans ce papier. Après avoir rappelé quelques définitions, le principe de la mesure est expliqué pour chacune de ces deux méthodes et les paramètres d'influence sont étudiés. Enfin, un bilan d'incertitude est établi.

2. Définitions

2.1. Modulation d'amplitude

Le signal $u^m(t)$ qui résulte de la modulation d'une porteuse sinusoïdale $u(t)$, de fréquence f_0 par un signal modulant $mod(t)$ sinusoïdal (fig. 1) ou rectangulaire (fig. 2), de fréquence f_m et de taux de modulation k peut s'écrire sous la forme :

$$u^m(t) = u(t) + k \times u(t) \times mod(t) \quad (1)$$

ou encore

$$u^m(t) = U \times [1 + k \cdot mod(t)] \times \sin(2\pi f_0 t) ; \quad (2)$$

- dans le cas d'une modulation sinusoïdale, le signal $u^m(t)$ s'écrit sous la forme :

$$u^m(t) = U \sin(2\pi f_0 t) + \frac{U}{2} \cdot k \cdot (\cos[2\pi t(f_0 - f_m)] - \cos[2\pi t(f_0 + f_m)]) \quad (3)$$

- dans le cas d'une modulation rectangulaire, le signal $u^m(t)$ s'écrit sous la forme:

$$u^m(t) = U \sin(2\pi f_0 t) + \frac{2}{\pi} k U \times \sum_{\alpha=0}^{\infty} \frac{1}{(2\alpha+1)} \times \cos[2\pi t(f_0 - (2\alpha+1) \cdot f_m)] - \frac{2}{\pi} k U \times \sum_{\alpha=0}^{\infty} \frac{1}{(2\alpha+1)} \times \cos[2\pi t(f_0 + (2\alpha+1) \cdot f_m)] \quad (4)$$

En réalité, on mesurera, comme spécifié dans la norme [1], la grandeur $\Delta U/U$ définie par :

$$\frac{\Delta U}{U} = 2k \quad (5)$$

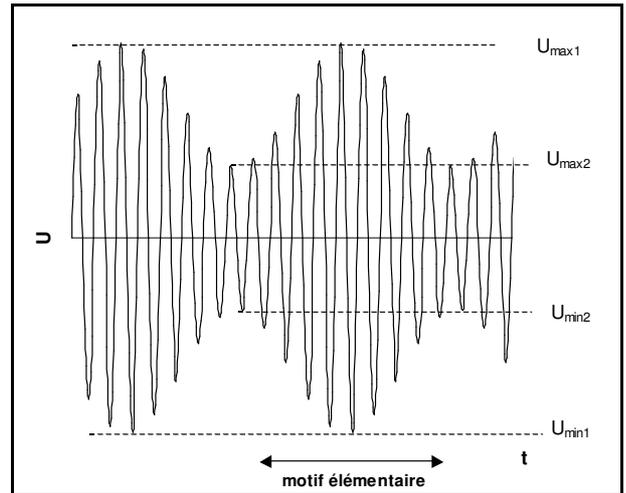


Fig. 1. – Exemple de modulation sinusoïdale.

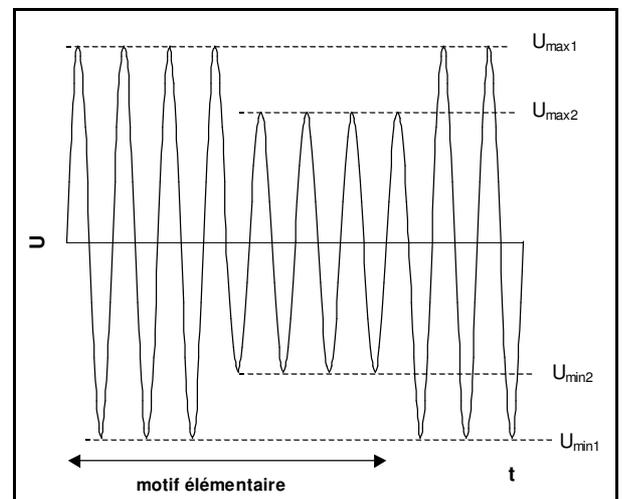


Fig. 2. – Exemple de modulation rectangulaire.

2.2. Notion de P_{st} [5 à 7]

L'une des principales conséquences du Flicker est la variation de l'intensité lumineuse des éclairages qui peut entraîner chez l'homme une gêne physiologique. Ainsi, des seuils de gêne physiologique ont été définis pour quantifier ce phénomène. Ces seuils sont assez complexes à établir, puisqu'ils dépendent non seulement de l'amplitude des creux de tension $\Delta U/U$ mais aussi de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation. Finalement, deux indicateurs normalisés ont été définis : le P_{st} (*probability short time*) et le P_{lt} (*probability long time*). Ces indicateurs sont calculés à partir d'une chaîne de traitement complexe qui fait intervenir une succession de filtres numériques permettant d'extraire les fluctuations de tension par démodulation, de prendre en compte la réponse d'une lampe à incandescence mais aussi de représenter de façon simplifiée la réponse typique du système visuel humain (œil-cerveau). Le P_{st} correspond à un indicateur statistique évalué sur 10 min alors que le P_{lt} (moins utilisé) correspond à une estimation statistique de la probabilité de gêne visuelle sur une durée de 2 h.

L'intervalle de 10 min a été jugé comme étant un bon compromis puisqu'il est assez long pour éviter d'accorder trop d'importance à des variations isolées de tensions et également assez long pour permettre à une personne non avertie de remarquer la perturbation et sa persistance. La figure 3 illustre la signification du P_{st} .

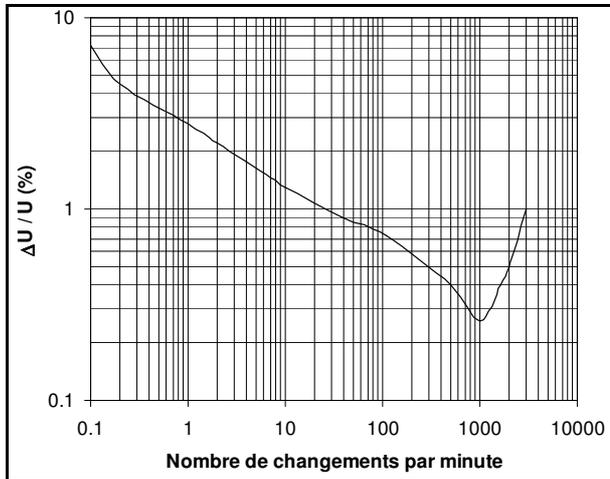


Fig. 3. – Courbe à P_{st} unitaire pour une modulation rectangulaire de la tension (exemple de la lampe à incandescence de 60 W alimentée par une tension nominale de 230 V) [4].

Les points situés au-dessous de la courbe correspondent à $P_{st} < 1$ alors que les points situés au-dessus correspondent à $P_{st} > 1$. Si le P_{st} dépasse 1, le seuil d'irritabilité est dépassé. On peut également constater qu'une même variation relative $\Delta U/U$ peut provoquer une gêne visuelle ou pas, selon sa fréquence. La fréquence la plus défavorable correspond à environ 1 000 changements par minute, c'est-à-dire environ 8 Hz.

3. Dispositif expérimental

Pour chacune des méthodes, le montage expérimental est représenté sur la figure 4. La source est un générateur de signaux modulés $u^m(t)$ qui utilise un procédé de synthèse numérique et présente l'avantage d'être entièrement programmable. Le tableau 1 présente les principales caractéristiques des signaux de modulation générés.

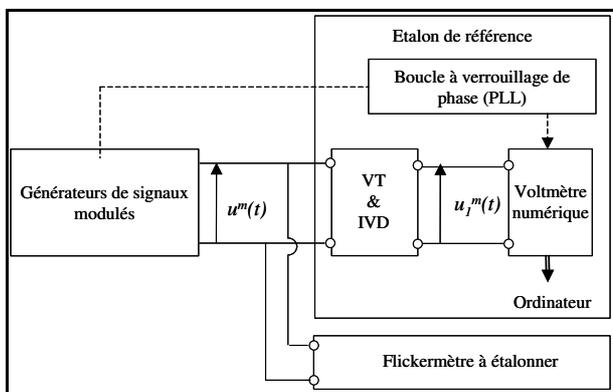


Fig. 4. – Dispositif expérimental.

Le signal $u^m(t)$ est ensuite appliqué à un voltmètre numérique de type 3458A utilisé en mode échantillonnage par lecture de tension continue (mode DCV) et sur le calibre 1 V, pour une plus grande précision des mesures. La numérisation du signal s'effectue en spécifiant un temps d'intégration T_a . Un diviseur inductif étalon (IVD) ramène la tension nominale, typiquement 230 V, à un niveau mesurable sur le calibre 1 V. Notons qu'un transformateur d'isolement (VT) est utilisé afin d'éviter le passage d'un courant continu qui pourrait entraîner la saturation des tores magnétiques du diviseur inductif. Enfin, le voltmètre est synchronisé à la source par une boucle de réaction à verrouillage de phase qui génère un signal TTL en phase et de même fréquence f_0 que la porteuse.

Tableau 1
Caractéristiques des signaux délivrés par la source.

Incertitude type sur k	0,012 5 %
Type de modulation	Carré, rectangulaire ou sinusoïdal
Résolution	0,001 %
Fréquence de modulation	De 0,000 8 Hz à 40 Hz par pas de 0,000 1 Hz

L'étalonnage d'un flickermètre consiste à mesurer l'écart absolu ε entre la valeur de P_{st} lue par l'appareil et la valeur appliquée :

$$\varepsilon = (P_{st})_{lue} - P_{st} \quad (6)$$

sachant que :

$$P_{st} = k \times \frac{(P_{st})_{th}}{k_{th}} \quad (7)$$

Les valeurs théoriques k_{th} sont les valeurs du taux de modulation qui correspondent à un P_{st} unitaire. Pour connaître la valeur de P_{st} réellement appliquée au flickermètre, il faut donc connaître précisément la valeur du taux de modulation k . C'est cette grandeur que nous allons déterminer par la suite.

Pour toutes les mesures, la porteuse est un signal sinusoïdal de fréquence $f_0 = 50$ Hz et de valeur efficace $U = 230$ V alors que le signal modulant, qu'il soit carré ou sinusoïdal, a un taux k et une fréquence de modulation f_m définis par la norme [1] (tab. 2).

Tableau 2
Spécifications d'essais pour la classification du flickermètre.

Variations par minute	f_m (Hz)	$\Delta U/U$
1	0,008 3	0,027 2
2	0,016 7	0,022 1
7	0,058 3	0,014 6
39	0,325	0,009 05
110	0,916 7	0,007 25
1 620	13,5	0,004 02

4. Étude de la modulation d'amplitude carrée (méthode 1)

4.1. Principe de la mesure

La méthode 1 consiste à mesurer directement les valeurs $U_{\max 1}$, $U_{\max 2}$, $U_{\min 1}$ et $U_{\min 2}$ du signal modulé $u_1^m(t)$ (fig. 5) et à calculer l'indice ou taux de modulation k à partir de l'équation suivante :

$$k = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} \quad (8)$$

$$\text{avec : } U_1 = \frac{1}{2}(U_{\max 1} - U_{\min 1}),$$

$$U_2 = \frac{1}{2}(U_{\max 2} - U_{\min 2}).$$

On mesurera la grandeur k_1 définie par $k_1 = 2k$.

Le voltmètre est déclenché par un signal carré en phase avec le signal à mesurer et de même fréquence. Pour chaque événement de déclenchement, il est programmé pour effectuer deux mesures séparées de 10 ms (lorsque la fréquence f_0 est égale à 50 Hz). Pour centrer la mesure sur les valeurs maximales et minimales du signal, on introduit un délai d entre l'événement de déclenchement et le premier événement d'échantillonnage. Ce délai, fonction du temps d'intégration T_a et de la fréquence fondamentale f_0 de la porteuse, est définie par la relation suivante :

$$d = \frac{1}{4f_0} - \frac{T_a}{2}. \quad (9)$$

En réalité, le centre de la fenêtre d'observation (de largeur T_a) du signal ne coïncide pas exactement avec la position d'un extremum. Il existe un décalage temporel noté b (fig. 5) et le délai d est alors défini par :

$$d = \left(\frac{1}{4f_0} - \frac{T_a}{2} \right) \pm b \quad (10)$$

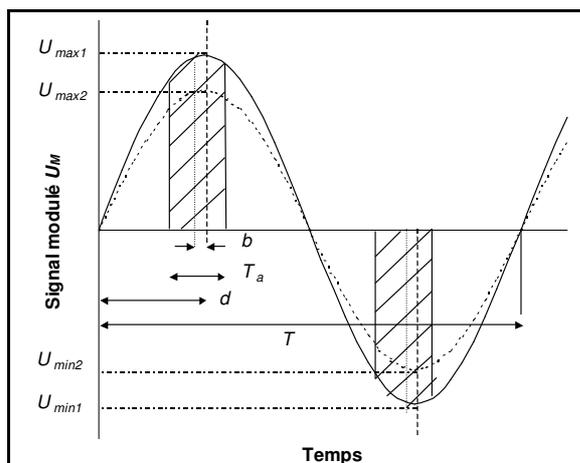


Fig. 5. – Principe de la mesure par la méthode 1.

Plutôt que de chercher à obtenir une valeur de b nulle, ce qui compliquerait considérablement le dispositif expérimental, nous allons tenir compte de l'erreur

éventuelle introduite par ce décalage temporel. La lecture M de la grandeur U_{\max} au moyen du voltmètre numérique s'écrit alors :

$$M = \frac{1}{T_a} \times \int_{\frac{T}{4} + b - \frac{T_a}{2}}^{\frac{T}{4} + b + \frac{T_a}{2}} U_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt \quad (11)$$

soit, par intégration,

$$M = U_{\max} (1 + \delta) \quad (12)$$

où l'erreur relative δ sur la mesure de la grandeur U_{\max} s'écrit :

$$\delta = \frac{T_0}{2\pi T_a} \left[\sin\left(\pi \frac{\tau_+}{T_0}\right) - \sin\left(\pi \frac{\tau_-}{T_0}\right) \right] - 1 \quad (13)$$

$$\text{avec } \tau_+ = 2b + T_a, \quad \tau_- = 2b - T_a \text{ et } T_0 = 1/f_0,$$

ou encore, en faisant un développement limité jusqu'à l'ordre 2 :

$$\delta \approx \delta_1 + \delta_2 \quad (14)$$

avec :

$$\delta_1 = -\frac{\pi^2}{6} \times \left(\frac{T_a}{T}\right)^2 \quad (15)$$

$$\delta_2 = -2\pi^2 \times \left(\frac{b}{T}\right)^2 \quad (16)$$

Comme les erreurs δ_1 et δ_2 s'appliquent identiquement sur les mesures de $U_{\max 1}$, $U_{\max 2}$, $U_{\min 1}$ et $U_{\min 2}$, leurs contributions sur la mesure du taux de modulation k_1 s'annulent.

4.2. Influence du décalage temporel b

Pour étudier l'influence du décalage temporel b , on considère un signal modulant carré, de fréquence $f_m = 12,5$ Hz et dont le taux de modulation vaut 0,008 25. Le temps d'intégration T_a est fixé à 200 μ s.

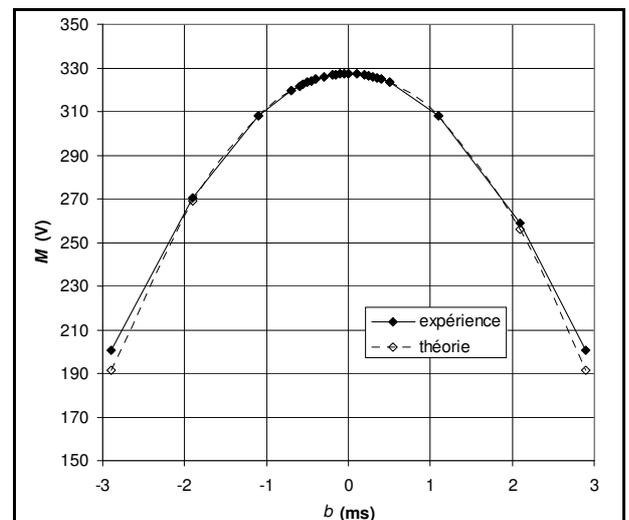


Fig. 6. – Mesures de la tension M en fonction de b .

La figure 6 représente les variations de M en fonction de b qui varie de $-2,9$ ms à $+2,9$ ms. Les valeurs expérimentales sont comparées aux valeurs théoriques calculées à partir des équations (12) à (16). Les courbes suivent la même évolution traduisant ainsi une bonne prise en compte théorique des principales erreurs affectant la mesure, à savoir le décalage temporel b et le temps d'intégration T_a .

Des mesures du taux de modulation k_1 sont effectuées pour les différentes valeurs de b précédemment définies. Les résultats sont présentés sur la figure 7, pour $T_a = 200 \mu\text{s}$. Même si la valeur de M dépend fortement de b (fig. 6), il n'y a pas de différences significatives sur la mesure du taux de modulation k_1 pour des valeurs de b inférieures à $200 \mu\text{s}$ puisque l'écart absolu entre les valeurs extrêmes mesurées n'excède pas l'incertitude type de mesure recherchée, soit $2 \cdot 10^{-5}$. Il est important de mentionner que pour $T_a = 200 \mu\text{s}$ et des valeurs de b supérieures ou égales à $200 \mu\text{s}$, les valeurs de tension mesurées sont très différentes des valeurs maximales. La formule (8) n'est donc plus respectée ce qui explique les erreurs importantes observées sur la mesure de k_1 .

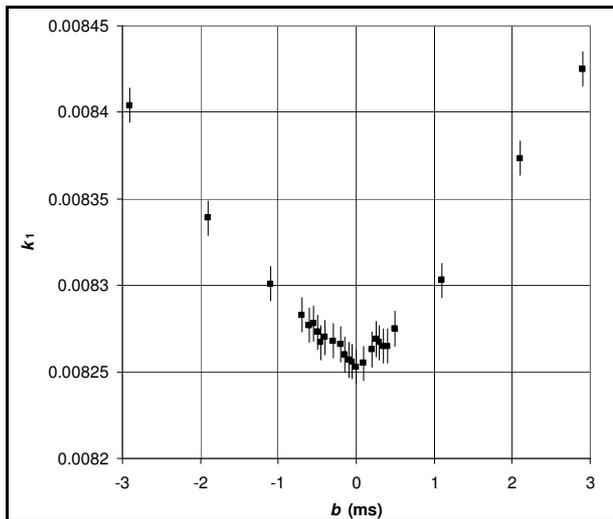


Fig. 7. – Mesures du taux de modulation k_1 en fonction de b , pour $T_a = 200 \mu\text{s}$.

4.3. Influence du temps d'intégration T_a

Jusqu'à présent, le temps d'intégration T_a était constant et égal à $200 \mu\text{s}$. On étudie maintenant son influence sur la mesure du taux de modulation k_1 en prenant différentes valeurs comprises entre $40 \mu\text{s}$ à $4\,000 \mu\text{s}$ tout en imposant un délai d entre l'événement de déclenchement et le premier événement d'échantillonnage qui vérifie au mieux la relation (9). La valeur de b est proche de zéro.

Les résultats, présentés sur la figure 8, montrent qu'il n'y a pas de différences significatives sur la mesure du taux de modulation k_1 pour la plage de temps d'intégration considérée. En effet, l'écart maximal entre les mesures n'excède pas $5 \cdot 10^{-6}$ alors que l'écart type est égal à $6 \cdot 10^{-6}$.

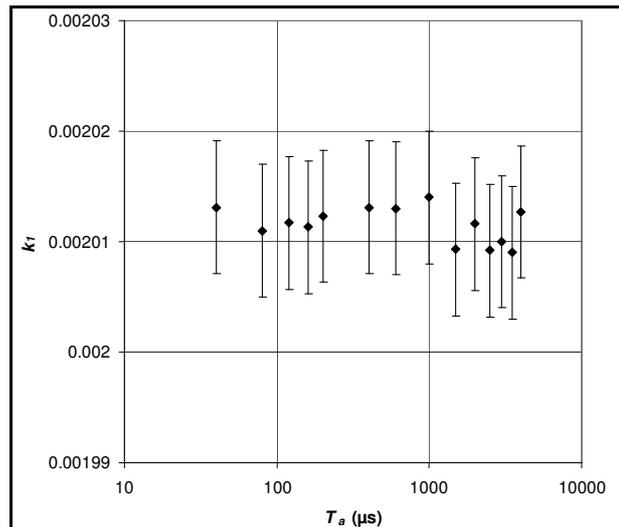


Fig. 8. – Mesures du taux de modulation k_1 en fonction du temps d'intégration T_a .

4.4. Influence de la fréquence de modulation f_m

Le signal modulant est carré de fréquence f_m variable et le taux de modulation vaut $0,008\,25$. Le temps d'intégration T_a est fixé à $200 \mu\text{s}$ et la valeur de b est proche de zéro. Les mesures du taux de modulation k_1 sont effectuées pour des valeurs de fréquence de modulation f_m comprises entre $0,005$ Hz et 24 Hz. Les résultats sont présentés sur la figure 9. L'écart absolu maximal entre les mesures n'excède pas $6 \cdot 10^{-6}$. Des mesures complémentaires ont été effectuées pour tous les taux de modulation définis dans le tableau 2. L'écart absolu maximal reste toujours inférieur à $1 \cdot 10^{-5}$.

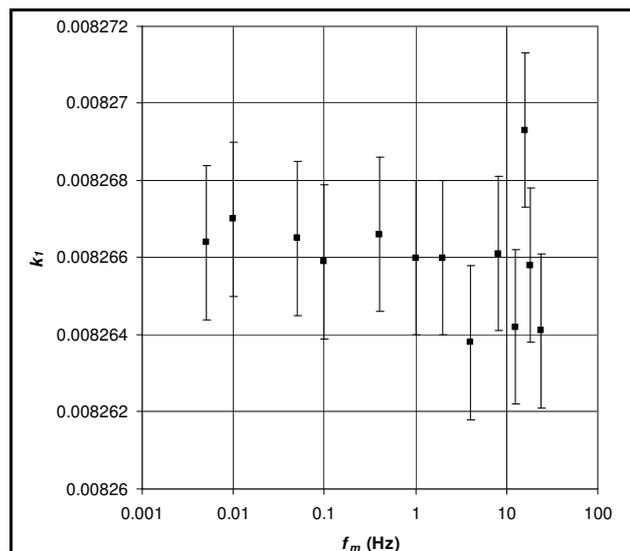


Fig. 9. – Mesures du taux de modulation k_1 en fonction de la fréquence de modulation f_m .

4.5. Calcul d'incertitudes

Le calcul d'incertitudes est effectué pour les valeurs de fréquence et de taux de modulation qui correspondent aux spécifications d'essais pour la classification du flickermètre (tab. 2). Tous les détails sont donnés dans la référence [3]. Au final, l'incertitude type sur la mesure du taux de modulation k_1 est égale à $1 \cdot 10^{-5}$.

5. Étude de la modulation d'amplitude sinusoïdale (méthode 2)

Pour étudier les modulations d'amplitude sinusoïdales, une des alternatives serait d'adapter la méthode 1, initialement développer pour traiter les modulations d'amplitude carrées. Toutefois, cette adaptation s'avère compliquée pour différentes raisons. La principale difficulté est de trouver les valeurs maximales et minimales du signal modulé car dans le cas d'une modulation d'amplitude sinusoïdale, les maxima de la porteuse et du signal modulé ne coïncident pas. Une autre alternative, plus facile à mettre en œuvre, consiste à faire l'analyse spectrale du signal modulé.

5.1. Principe de la mesure

La méthode 2 est donc basée sur l'analyse spectrale du signal. Le voltmètre est utilisé en mode échantillonnage par lecture de tensions continues. Le signal modulé $u_1^m(t)$ est échantillonné puis quantifié en spécifiant un temps d'intégration T_a . Les échantillons, notés $u_1^m(kT_e)$, sont ensuite traités par transformée de Fourier discrète (TFd) :

$$U(nf_0) = \sum_{k=0}^{N-1} u_1^m(kT_e) \times \exp(-2\pi jnk \times \frac{N}{M}), \quad (17)$$

pour $n = 1, 2, \dots, N-1$ et $N = 2^q$ (avec q entier naturel) et en prélevant N points sur M périodes.

$U(nf_0)$ notée également $U(n)$ est la transformée de Fourier de $u_1^m(t)$ et T_e est la période d'échantillonnage.

On en déduit alors le spectre d'amplitude en calculant le module $|U(n)|$. Ce spectre contient la porteuse ou composante fondamentale de fréquence f_0 et deux raies de fréquences $(f_0 - f_m)$ et $(f_0 + f_m)$ de part et d'autre de la porteuse. D'après l'équation (3), ces deux composantes ont une amplitude u définie par :

$$u = k_2 \frac{U}{2}. \quad (18)$$

La détermination expérimentale de u et U , à partir du spectre d'amplitude, permet le calcul de l'indice de modulation k_2 .

En théorie, la TFd n'introduit pas d'erreurs dans le calcul du spectre d'amplitude si le théorème de Shannon est respecté et la fonction $u_1^m(t)$ est périodique. D'autre part, l'échantillonnage doit se faire sur un nombre entier ϕ de motifs élémentaires (fig. 1 et fig. 2) ce qui revient à

écrire que le rapport défini par la relation (19) est égal à un entier naturel.

$$\phi = \frac{M}{\left(\frac{f_0}{f_m}\right)} \quad (19)$$

L'une des principales difficultés de cette méthode consiste donc à prélever un nombre entier ϕ de motifs élémentaires des signaux modulés afin d'éviter des erreurs de troncature. Pour cela, le multimètre est déclenché par un signal de cadencement généré par une boucle de réaction à verrouillage de phase (PLL) : le signal TTL délivré est en phase avec la porteuse et sa fréquence f_c est définie par :

$$f_c = \frac{N}{M} f_0 \quad (20)$$

Cette PLL présente quelques inconvénients. Notamment, elle impose la fréquence d'échantillonnage sans que l'on puisse choisir les valeurs de N et de M . Ainsi, à 50 Hz, elle génère un signal de cadencement de 51,2 kHz. La valeur maximale du temps d'intégration T_a admise par le multimètre est alors limitée à 8 μ s. Une meilleure stabilité et une meilleure précision des mesures peuvent être obtenues en augmentant ce temps d'intégration. Pour cela, nous avons inséré des diviseurs de fréquence qui permettent de diviser la fréquence d'échantillonnage et ainsi augmenter le temps d'intégration accepté par le multimètre. Par exemple, en prenant $M = 32$, la fréquence d'échantillonnage f_c vaut 1 600 Hz et la valeur maximale de T_a admise par le multimètre est alors de l'ordre de 600 μ s.

5.2. Résultats expérimentaux

Le signal modulant sinusoïdal a un taux de modulation k_2 égal à 0,004 02. La norme de la référence [1] (tab. 2) impose alors une fréquence de modulation f_m de 13,5 Hz pour un P_{st} unitaire. Dans ces conditions, le rapport ϕ n'est pas un entier naturel quelle que soit la valeur de M et l'analyse spectrale introduit des erreurs sur les déterminations de U et u . On sélectionne donc les valeurs de f_m et de M qui permettent de vérifier la relation (19) tout en prenant des valeurs de f_m autour de 13,5 Hz (tab. 3).

Tableau 3
Choix des valeurs de M et de f_m .

f_m (Hz)	1,562	3,125	6,25	10	12,5	16,66	20
M	32	32	32	25	32	24	25
ϕ	1	2	4	5	8	8	10
f_c (kHz)	1,6	1,6	1,6	2,1	1,6	2,1	2,1

Pour chacune de ces conditions, on détermine expérimentalement le taux de modulation k_2 à partir du spectre d'amplitude du signal modulé $u_1^m(t)$ et en utilisant

la formule (18). Dans la pratique, les deux raies de modulation de fréquences ($f_0 - f_m$) et ($f_0 + f_m$) n'ont pas exactement la même amplitude et la valeur de u est alors la moyenne des amplitudes de chacune des raies. Les résultats, présentés sur la figure 10, montrent que la valeur de k_2 reste constante sur la plage de fréquences de modulation f_m considérées. On peut alors déduire la valeur de k pour une fréquence de modulation f_m de 13,5 Hz. Dans la pratique, un flickermètre doit être capable de mesurer correctement des taux de modulation pour une large bande de fréquence de modulation. L'étalonnage à des fréquences de modulation intermédiaires, c'est-à-dire qui ne correspondent pas exactement aux valeurs définies dans le tableau 2, est donc suffisant pour vérifier le bon fonctionnement de l'appareil.

Il est important de mentionner que, pour des fréquences de modulation très basses, cette méthode demande un nombre d'échantillons très grand.

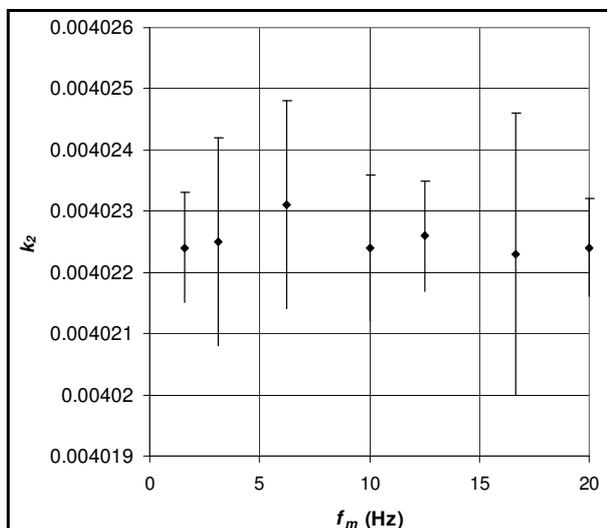


Fig. 10. – Mesures du taux de modulation k_2 en fonction de la fréquence de modulation f_m .

La figure 11 est un exemple de spectre d'amplitude obtenu. Il fait apparaître très clairement la composante fondamentale, les composantes de modulation et des harmoniques dus à une faible distorsion du signal (typiquement inférieure à 0,1 %). Le rang maximal de ces harmoniques est 9, soit une fréquence de 450 Hz. Au delà de cette valeur, les composantes harmoniques sont noyées dans le bruit de quantification du signal (entre 10^{-7} V et 10^{-6} V pour un codage sur 21 bits). On considère donc que la fréquence maximale contenue dans le signal n'excède pas 450 Hz. Par conséquent, le théorème de Shannon est vérifié pour toutes les conditions expérimentales (tab. 3).

Des essais complémentaires ont été réalisés pour étudier l'influence du temps d'intégration T_a sur la mesure du taux de modulation k_2 . Les résultats, présentés sur la figure 12, pour une fréquence d'échantillonnage $f_e = 2,1$ kHz, montrent que la programmation d'un temps d'intégration variable de 40 μ s à 400 μ s, n'a pas d'influence significative sur la mesure de k_2 puisque l'écart absolu maximal est inférieur à $3 \cdot 10^{-6}$.

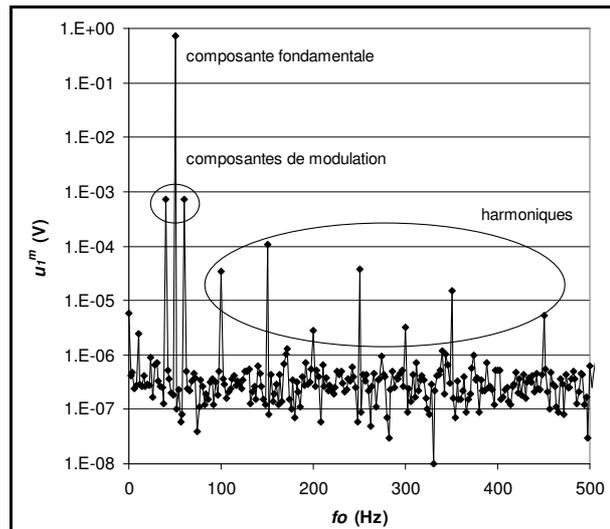


Fig. 11. – Exemple de spectre d'amplitude obtenu.

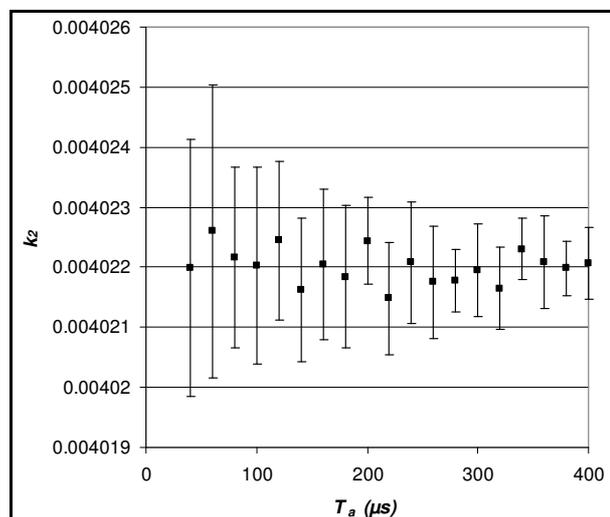


Fig. 12. – Mesures du taux de modulation k_2 en fonction du temps d'intégration T_a .

Dans le cas d'une modulation d'amplitude carrée, la méthode 2 présente quelques inconvénients. Notamment, le spectre contient une infinité de raies de modulation. Le théorème de Shannon n'est donc pas vérifié et des problèmes de repliement de spectre ou *aliasing* apparaissent. Si les fréquences de repliement se superposent aux raies de modulation utilisées pour le calcul du taux de modulation, les mesures sont faussées. Une solution consisterait à utiliser un filtre anti-repliement.

5.3. Calcul d'incertitudes

La plus grande composante d'incertitude sur la mesure du taux de modulation k_2 est due à l'écart type sur la moyenne des mesures qui n'excède pas $8 \cdot 10^{-6}$ pour toutes les configurations expérimentales.

Les autres sources d'erreurs sont les erreurs du voltmètre numérique en mode DC, ses erreurs en AC dues à la limitation de bande passante et à l'utilisation d'un temps d'intégration non-nul et enfin, les erreurs éventuellement introduites par le système de synchronisation. Toutes ces erreurs ont été déterminées expérimentalement et/ou calculées [8]. En prenant en compte toutes les contributions, l'incertitude type associée à la mesure des tensions U_0 et u est inférieure à $3 \cdot 10^{-6}$.

L'incertitude type associée à la mesure du taux de modulation k_2 a été calculée pour différentes valeurs de k_2 et une plage de fréquences variant de 0,005 Hz à 24 Hz. Dans toutes ces conditions, elle n'excède pas $1,1 \cdot 10^{-5}$.

6. Conclusion

Un nouvel étalon primaire a été développé au LNE pour la mesure du Flicker. Ce phénomène est représenté en laboratoire par un signal modulé qui résulte de la modulation d'amplitude d'une porteuse sinusoïdale par un signal modulant carré ou sinusoïdal. Pour traiter ces deux types de modulation, nous avons utilisé deux méthodes, l'une basée sur l'étude temporelle du signal modulé, l'autre basée sur son analyse spectrale. Il aurait été possible de n'utiliser qu'une seule de ces deux méthodes pour traiter l'ensemble des modulations. Toutefois, la première méthode est plus facile à mettre en œuvre pour traiter la modulation carrée alors que la deuxième méthode s'avère plus adaptée pour le traitement de la modulation sinusoïdale. Nous avons donc utilisé les deux méthodes. Pour chacune d'entre-elles, l'incertitude type sur la mesure du taux de modulation est inférieure à $1,1 \cdot 10^{-5}$.

Dans la réalité, les fluctuations de tension qui se produisent sur le réseau électrique sont beaucoup plus complexes que les modulations étudiées. Des travaux devraient être menés par la suite pour étudier la réponse des flickermètres à des signaux qui reflètent davantage les cas réels.

Références

- [1] IEC-61000-4-15, "Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques – Section 15: Flickermeter – Functional and design specifications".
- [2] BUDOVSKY I. et HAMMOND G., "Precision Measurement of Power Harmonics and Flicker", *IEEE Trans. Instr. And Meas.*, **54**, 2005, 483-487.
- [3] BUDOVSKY I. et HAMMOND G., "Uncertainties in the measurement of power harmonics and flicker", *Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, 88-89, 2004.
- [4] WRIGHT P. et CLARKSON P., "Methods for the calibration of Flickermeters", rapport Centre for Electromagnetic Metrology, NPL.
- [5] FERRACCI P., « La qualité de l'énergie électrique », *Cahier technique Schneider-Electric*, **199**, 2001.
- [6] BASTARD P., « Le Flicker sur les réseaux d'énergie électrique », *La Revue 3EI*, **31**, 13, 2002.
- [7] WIERDA R., « Flicker ou scintillement des sources lumineuses », *Cahier technique Schneider-Electric*, **176**, 1995.
- [8] ESPEL P., « Développement d'un wattmètre numérique à échantillonnage », *Revue française de métrologie*, **12**, 2007, 3-12.

Article reçu le 29 avril 2009 ; version révisée reçue le 23 septembre 2009.