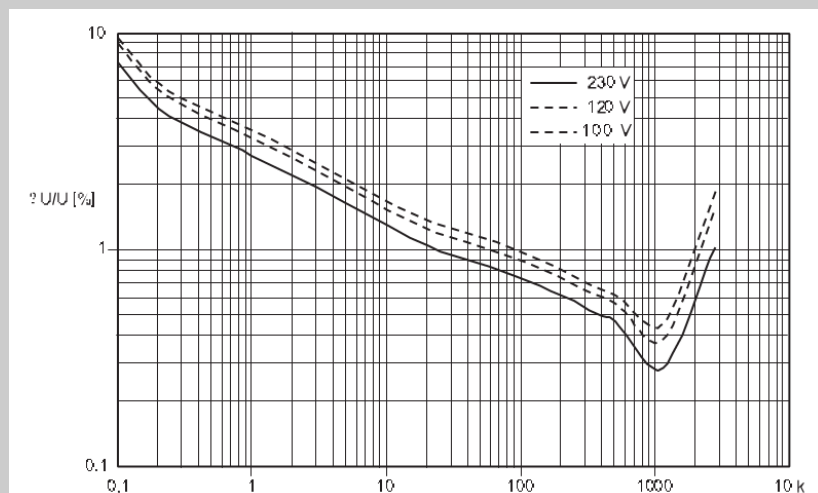
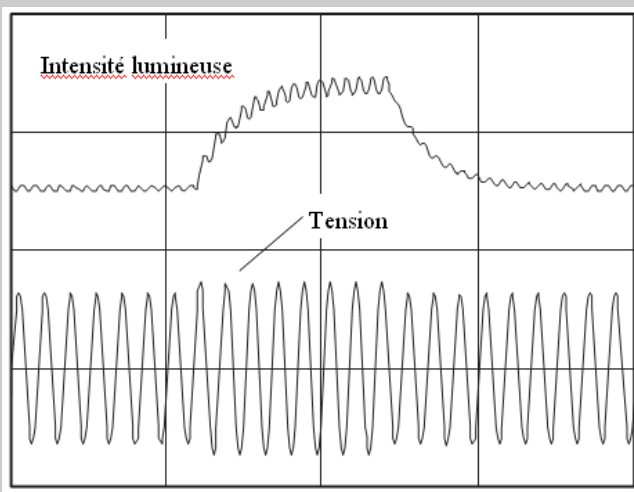


# Perturbation en tension - Section 5.2.3

**Zbigniew Hanzelka & Andrej Bien**

AGH Université de Sciences et Technologie

Septembre 2008



# Perturbation en tension

---

fr.leonardo-energy.org

## Table des matières

<b><u>1. Introduction</u></b>	<b>3</b>
<b><u>2. Evaluation des fluctuations de tension</u></b>	<b>4</b>
<b><u>3. Mesure de sévérité de courte durée <math>P_{ST}</math></u></b>	<b>6</b>
<b><u>4. Calibration et vérification d'un instrument de mesure de sévérité de flicker</u></b>	<b>10</b>
<b><u>5. Mesure et évaluation du flicker sur un réseau électrique</u></b>	<b>11</b>
<b><u>6. Conclusion</u></b>	<b>13</b>
<b><u>7. Références</u></b>	<b>14</b>

## 1. Introduction

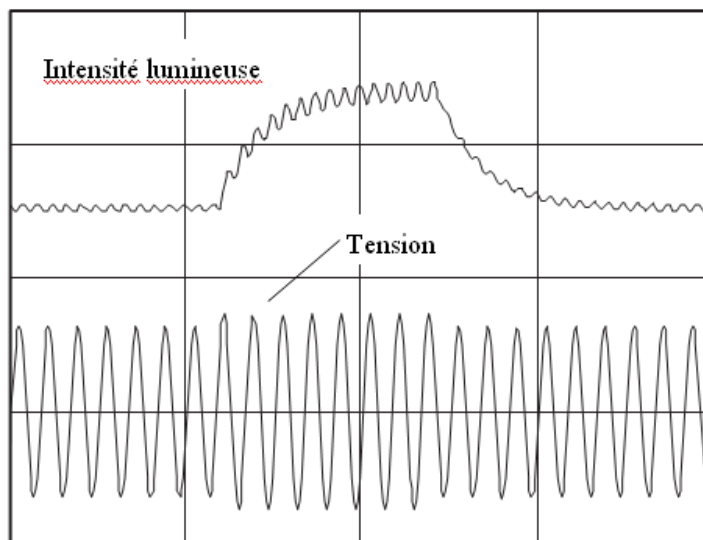
La tension d'alimentation d'un réseau électrique peut fortement varier lors de perturbations dans les process de production, le transport ou la distribution d'énergie.

C'est l'interaction entre les charges électriques (qui appellent le courant) et le réseau d'alimentation qui est la cause de la dégradation de la qualité de l'énergie électrique.

Des charges de très forte puissance générant des courants de nature fluctuante, telles que les variateurs de vitesse pour moteurs électriques ou les fours à arc sont susceptibles de causer des variations cycliques à basses fréquences de la tension d'alimentation pouvant se traduire par :

- un papillotement des éclairages, source d'inconfort physiologique et de fatigue physique et psychologique, et parfois même d'effets pathologiques sur les personnes ;
- des problèmes de stabilité électrique des équipements et des circuits électroniques, source de dysfonctionnements variés des équipements.

La figure 1 illustre comment une petite variation de la tension d'alimentation peut avoir un impact fort sur l'intensité lumineuse d'une lampe.



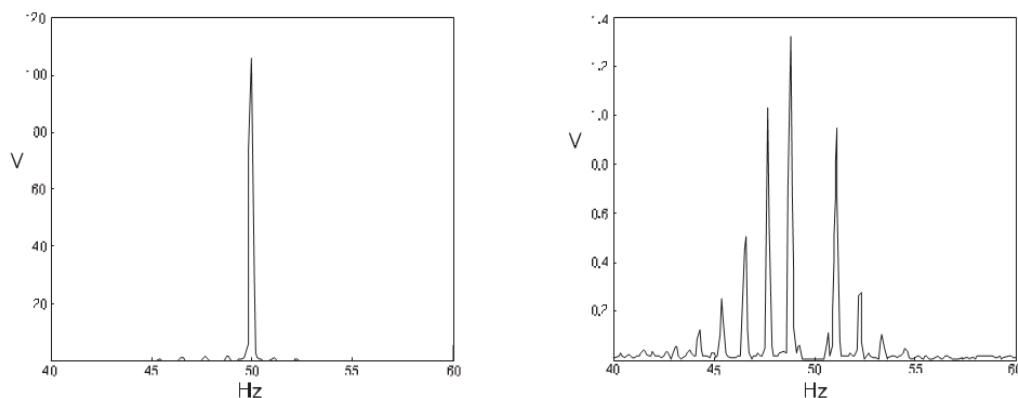
**Figure 1** – Variation de l'intensité lumineuse due à une fluctuation de tension [1]

Les fluctuations répétitives d'amplitude de la tension d'alimentation sont la principale source de papillotement des éclairages. Le papillotement, ou Flicker, est un paramètre important de mesure de la qualité de l'énergie électrique. La figure 2 représente le

# Perturbation en tension

fr.leonardo-energy.org

spectre fréquentiel de la tension d'alimentation d'un réseau électrique présentant du flicker. Cette distribution spectrale en tension est caractéristique lors l'alimentation d'un variateur de vitesse dont la charge est fortement variable. Une lampe alimentée à partir de la même source de tension subira des variations de fréquence de l'ordre de 1Hz.



**Figure 2** – Distribution spectrale de la tension – Sur la figure de droite, la composante à 50 Hz a été supprimée pour mettre en évidence les fréquences perturbatrices

Deux paramètres permettent d'évaluer la notion de flicker : la sévérité de courte durée  $P_{ST}$  et la sévérité de longue durée  $P_{LT}$ .

La méthode de calcul de ces 2 paramètres est présentée ci-dessous.

## 2. Evaluation des fluctuations de tension

La problématique imposée par le phénomène de flicker sur l'éclairage existe depuis les premières installations électriques de puissance. Cette problématique n'a fait qu'empirer avec le nombre croissant d'utilisateurs et l'augmentation des puissances électriques installées. De nombreuses recherches ont été menées dans le but de mettre en place des outils de mesure et d'atténuation du flicker. Nous présenterons ici les principes essentiels de mesure du flicker et les instruments permettant de réaliser ces mesures.

A l'origine, les premiers instruments ne permettaient que l'observation des variations de l'intensité lumineuse. Un modèle a ensuite été mis en place afin de simuler les réactions de l'œil humain – en termes d'inconfort ou de désagrément – lorsque celui-ci était soumis à un flux lumineux variable. Ce premier modèle prenait comme référence des lampes tungstène de 60 W alimentées en 230 V (éclairage le plus utilisé en Europe à cette époque).

Les courbes de la figure 3 indiquent le seuil de perception du flicker en fonction du pourcentage de fluctuation de la tension d'alimentation (axe des abscisses) et des

# Méthodologie de mesure du flicker

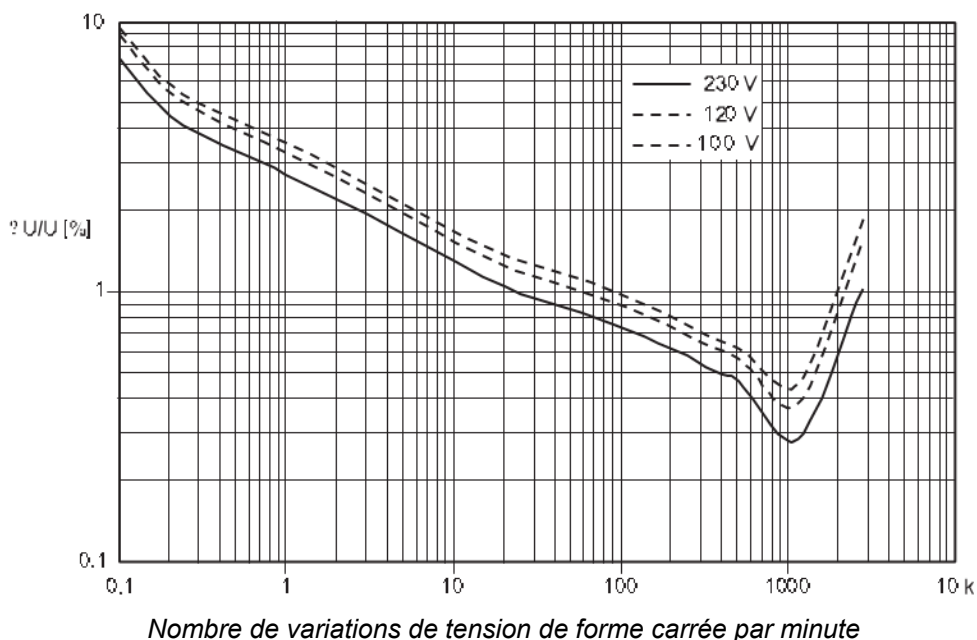
fluctuations de la fréquence (axe des ordonnées). Pour des fluctuations d'amplitude ou de fréquence situées au-delà de la courbe, les effets du flicker présentent une gêne significative pour les personnes. En deçà de la courbe, les effets du flicker sont non perceptibles.

Les différentes lignes pointillées correspondent à des lampes tungstènes pour différentes tensions d'alimentation.

Les premiers appareils de mesure étaient constitués de lampes à incandescence (60 W, 230 V), d'un capteur de flux lumineux et utilisaient un modèle analogique pour simuler les réactions de l'œil humain.

A la fin des années 80, divers travaux ont permis de compléter les méthodes de calculs de sévérité de flicker en coordination avec l'UIE.

Un modèle standardisé d'appareil de mesure de flicker, basé sur les notions de sévérité de courte durée ( $P_{ST}$ ), mesure effectuée sur une période de 10 minutes, et de sévérité de longue durée ( $P_{LT}$ ), moyenne glissante du  $P_{ST}$  sur une durée de 2 heures, a été adopté à l'issue de ces travaux. Cet appareil de mesure électronique permet de modéliser à la fois le comportement des lampes tungstène et la réponse de l'œil humain aux stimuli lumineux.



**Figure 3** – Courbe de perception de flicker pour des variations de tension carrée appliquées à des lampes de 60 W

# Perturbation en tension

## 3. Mesure de sévérité de courte durée PST

La figure 4 représente le diagramme fonctionnel simplifié mis en place par l'UIE pour mesurer le flicker.

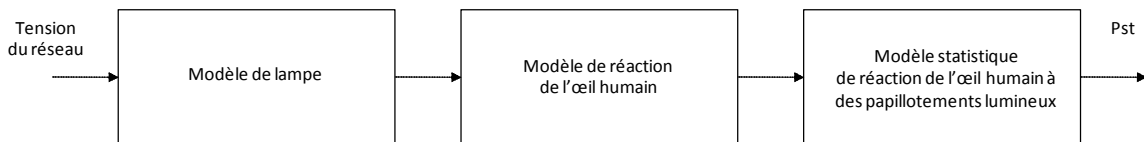


Figure 4 – Opérations successives permettant de calculer le  $P_{ST}$

Les fluctuations de tension mesurées sont compilées en utilisant un modèle permettant de simuler les variations d'intensité lumineuse à partir des caractéristiques de tension pour une lampe au tungstène. Un second modèle permet ensuite de simuler les réactions de l'œil humain soumis à ces variations du flux lumineux.

Toutefois, les réactions étant différentes pour chaque individu, les valeurs du PST sont ensuite réévaluées grâce à un modèle statistique mis en place sur la base d'expérimentations menées sur des groupes de personnes représentatives.

La figure 5 décrit le diagramme fonctionnel détaillé de calcul du flicker tel qu'implémenté dans les instruments de mesure. Ce diagramme a été défini par l'UIE à partir des documents normatifs [2]. Les instruments de mesures doivent rendre compte de la sévérité du flicker avec une erreur inférieure à 5 % des caractéristiques représentées sur la figure 3.

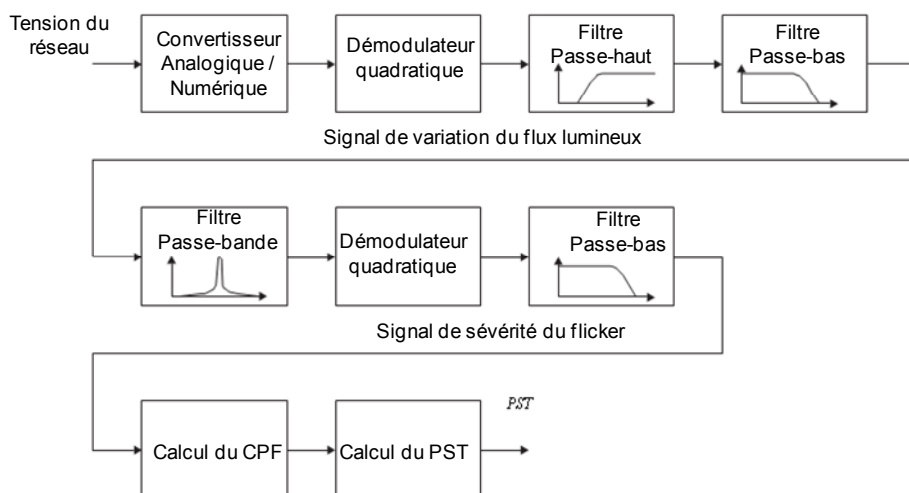


Figure 5 – Méthode de calcul de sévérité de flicker ( $P_{ST}$ ) telle qu'implémentée dans les instruments de mesure

# Méthodologie de mesure du flicker

fr.leonardo-energy.org

Le convertisseur analogique / numérique n'est utilisé que si les données d'entrée de l'instrument sont de type numérique. Le démodulateur quadratique ainsi que les filtres successifs permettent de simuler une lampe au tungstène de 60 W alimentée en 230 V.

Le filtre passe-haut à 0,05 Hz permet de se débarrasser de la composante continue et de ne conserver que les variations de flux lumineux, responsables du flicker. Le filtre passe-bas à 35 Hz permet de rendre compte des caractéristiques dynamiques de la lampe.

La seconde ligne de la figure 5 permet de modéliser les réactions de l'œil humain aux variations de flux lumineux. La réaction de l'ensemble œil/cerveau est simulée par un filtre passe bande de la forme suivante :

$$k(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)}$$

où, pour une lampe à incandescence 60 W, 230V :

$$k = 1.74802$$

$$\lambda = 2\pi \times 4.05981$$

$$\omega_1 = 2\pi \times 9.15494$$

$$\omega_2 = 2\pi \times 2.27979$$

$$\omega_3 = 2\pi \times 1.22535$$

$$\omega_4 = 2\pi \times 21.9$$

Ce filtre est le fruit de nombreuses recherches sur le comportement psycho-physiologique de l'être humain soumis à des variations du flux lumineux (variations en amplitude et en fréquence). Le démodulateur quadratique ainsi que le filtre passe bas à 0,53Hz permettent de modéliser la fatigue inhérente aux variations du flux lumineux.

La figure 6 représente la réponse en amplitude de l'ensemble des filtres de l'instrument de mesure.

# Perturbation en tension

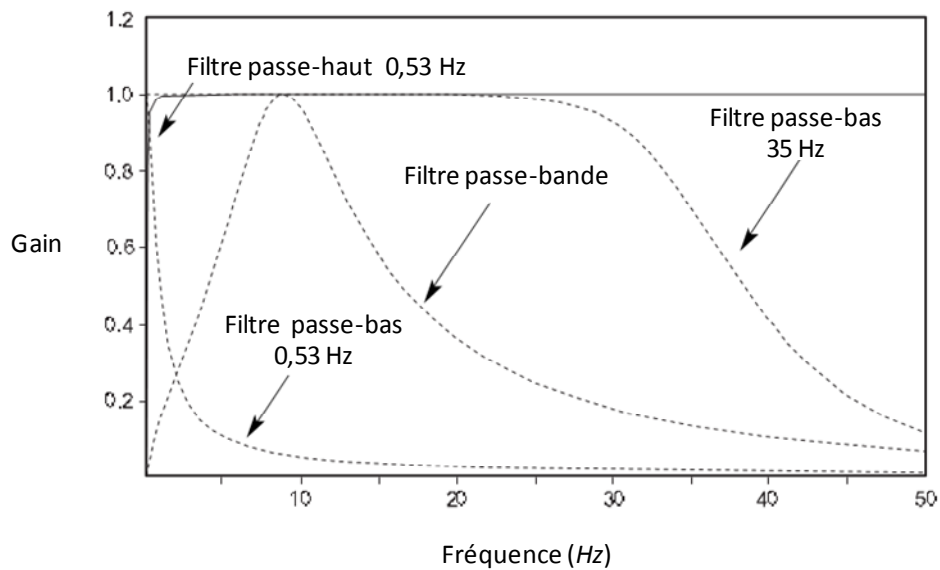


Figure 6 – Réponse en amplitude des filtres du flickermètre

La troisième ligne de la figure 5 représente la distribution statistique permettant de rendre compte de la diversité des réactions de l'œil humain. C'est en effet grâce à une Fonction de Distribution Cumulative (CPF) appliquée sur la durée d'observation que le  $P_{ST}$  est calculé.

La méthode de calcul CPF est représentée sur la figure 7 :

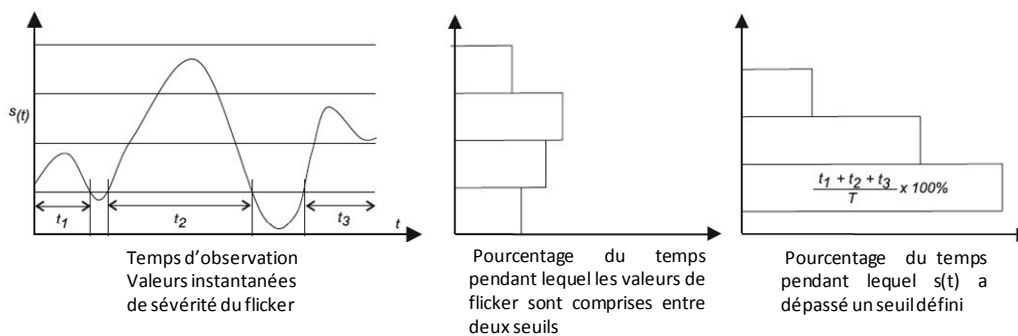


Figure 7 – Méthode de calcul de la Fonction de Distribution Cumulative (CPF)

La courbe sur la gauche représente les valeurs instantanées de sévérité de flicker (axe des ordonnées) en fonction du temps d'observation (axe des abscisses). Les lignes horizontales sont autant de seuils permettant de regrouper les mesures. Sur la figure de droite est porté en abscisse le pourcentage du temps d'observation pendant lequel les valeurs instantanées discrètes de flicker sont supérieures au seuil (voir l'exemple pour le plus petit groupe).

# Méthodologie de mesure du flicker

fr.leonardo-energy.org

En pratique, une fois l'acquisition d'échantillons sur une durée de 10 minutes réalisée, les seuils sont fixés pour correspondre aux pourcentages – par exemple, pour un dépassement de 0.1%, 1 %, 3 %, 10 % et 50 % du temps total d'observation de 10 minutes.

Par la suite, nous noterons ces pourcentages  $P_{0.1}$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ , etc. la lettre « s » associée ( $P_{1s}$ ,  $P_{3s}$ , etc.) indique une valeur moyenne calculée d'après les formules suivantes :

$$\begin{aligned}P_{1s} &= (P_{0.7} + P_1 + P_{13})/3 \\P_{3s} &= (P_{22} + P_3 + P_4)/3 \\P_{10s} &= (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5 \\P_{50s} &= (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3\end{aligned}$$

Le  $P_{ST}$  est calculé d'après la formule suivante :

$$P_{ST} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{3s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s}}$$

Les valeurs successives du  $P_{ST}$  sont ensuite utilisées pour calculer le  $P_{LT}$  selon la formule suivante :

$$P_{LT} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{STi}^3}{N}}$$

où N est le nombre de périodes de  $P_{ST}$  pendant la durée d'observation du  $P_{LT}$  (2 heures = 12 mesures de  $P_{ST}$  sur une durée de 10 minutes chacune, soit un total de 120 minutes).

Sur la figure 8 représentant la mesure de  $P_{ST}$  au point de raccordement d'un four à arc sur un réseau électrique, l'impact du mode de fonctionnement du four est clairement identifiable.

Pour cet exemple, les valeurs de  $P_{ST}$  fluctuent d'un ratio de 15:1.

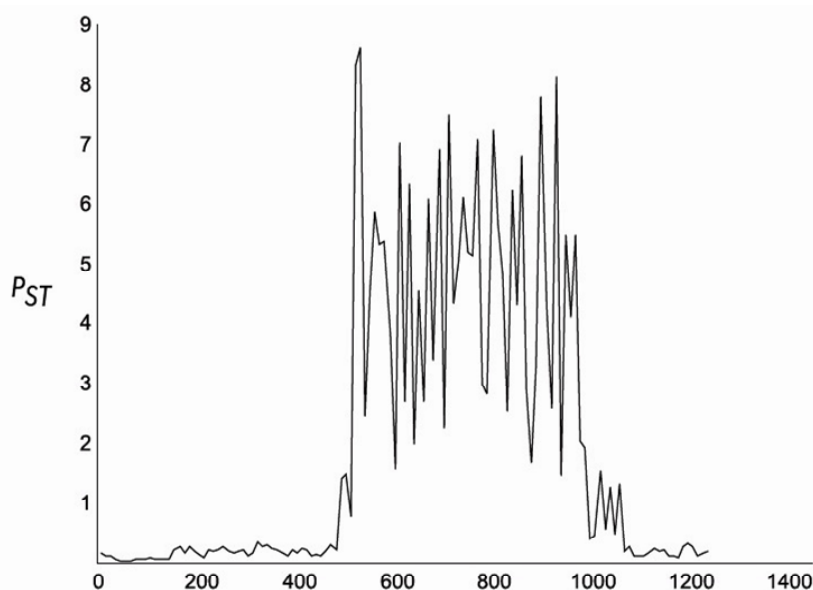


Figure 8 – Valeurs de  $P_{ST}$  mesurées lors du fonctionnement d'un four à arc

#### 4. Calibration et vérification d'un instrument de mesure de sévérité de flicker

Comme nous l'avons vu précédemment, la méthodologie de mesure du flicker est relativement complexe. Afin de garantir la cohérence des mesures effectuées par l'ensemble des flickermètres disponibles sur le marché, il convient de les confronter à des tests de conformité et à des procédures de calibration.

Les tests de conformité ont pour objectif la validation de la conception du produit, c'est-à-dire la vérification de l'exactitude des modèles implémentés et la précision de la méthode de calcul statistique. Ces tests sont effectués grâce à des signaux de référence appliqués en entrée du flickermètre et pour lesquels l'exactitude des calculs opérés par le flickermètre est vérifiée à chaque étape.

Les signaux de référence sont définis en termes de modulation de forme d'onde (sinusoïdale ou rectangulaire), d'amplitude et de fréquence, et ce afin d'être facilement reproductibles et prévisibles.

La calibration requiert la vérification de l'exactitude de toutes les informations fournies par le flickermètre. La calibration se fait à partir de signaux de référence.

Les fabricants doivent obligatoirement indiquer la fréquence des calibrations et fournir les services appropriés pour effectuer cette calibration.

## 5. Mesures et évaluation du flicker sur un réseau électrique

Comme mentionné en introduction, les équipements responsables des fluctuations de tension (et du flicker qui en résulte pour l'éclairage) sont le plus souvent des charges électriques de forte puissance.

L'explication de l'origine des fluctuations de tension est fournie sur la figure 9.

La tension au point de raccordement de la charge est inférieure à la tension aux bornes de la source de tension et ce, du fait de la chute de tension due à l'impédance de source :

$$U_{Zn} = I_{Load} \times Z_{Zn}$$

Où :

$U_{Zn}$  = Chute de tension

$I_{Load}$  = Courant de charge

$Z_{Zn}$  = Impédance du réseau électrique vue depuis les points de raccordement de la charge (a,b)

La tension aux points de raccordement de la charge (a,b) étant égale à :

$$U_{ab} = U_n - U_{Zn}$$

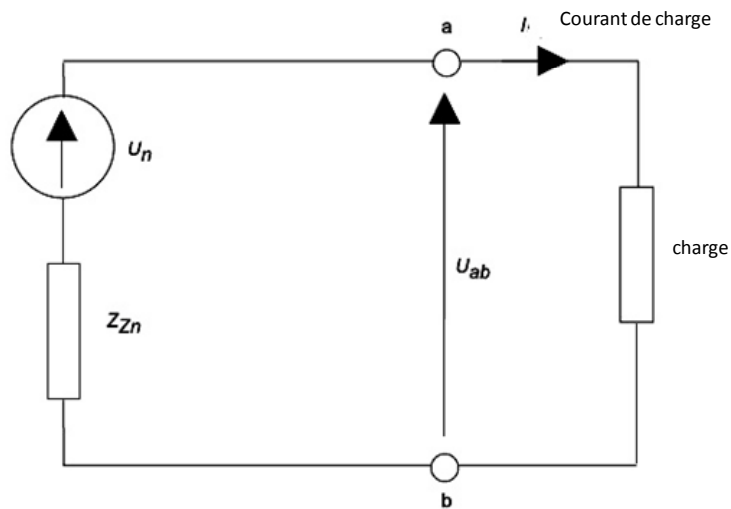
Il apparaît que toute variation du courant de charge  $I_{Load}$  aura un impact sur la tension d'alimentation  $U_{ab}$ .

Sur un réseau électrique réel, le phénomène est beaucoup plus complexe, même si le principe reste valide.

Une question qui se pose souvent est de savoir si le raccordement d'une charge (de caractéristiques connues) aura pour effet la génération de flicker ou l'augmentation du flicker au-delà des limites acceptables.

La réponse à cette question dépend des paramètres du réseau électrique et de l'ensemble des charges qui y sont raccordées et qui peuvent avoir un impact sur le flicker.

# Perturbation en tension

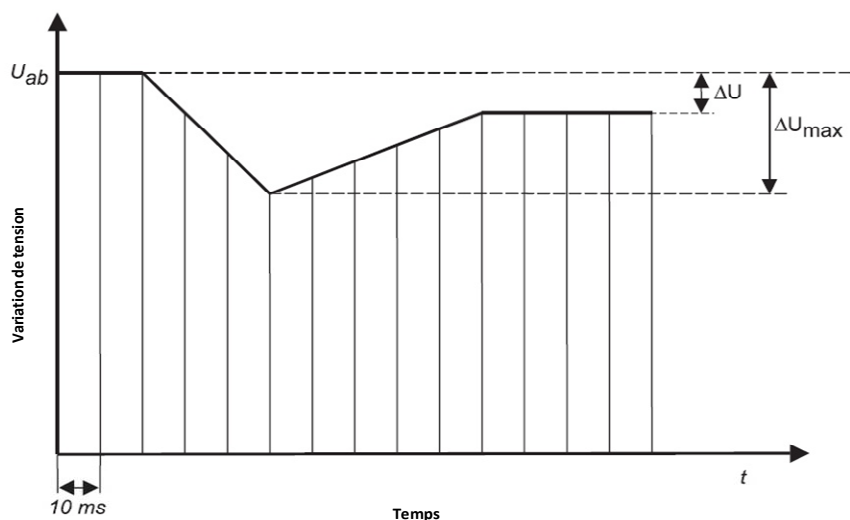


**Figure 9** – Influence d'une charge sur le réseau

Les effets ne pouvant être mesurés avant la connexion de la charge, il convient d'en faire une estimation.

La norme IEC 61000-3-3 [5] traite des problèmes de compatibilité en prenant comme référence une source d'impédance interne  $Z_{Zn}$  telle que :  $\text{Re}(Z_{Zn}) = 0.4\Omega$  , et  $\text{Im}(Z_{Zn}) = 0.25\Omega$  , à 50 Hz.

De plus, la norme met à disposition une méthode permettant d'améliorer l'évaluation en prenant en compte le profil de modulation de la tension d'alimentation – le calcul se base sur la modulation carrée la plus pénalisante, ce qui entraîne alors la modification des autres formes.



**Figure 10** – Exemple de profil de charge [5]

La figure 10 représente le profil de charge typique d'un variateur de vitesse ([5]) et la méthode d'évaluation des variations de tension  $\Delta U$  afin de déterminer le pourcentage de variation de tension :  $d = \Delta U/U_{ab}$ .

Les valeurs des paramètres pour chaque échantillon dépendent de  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ , etc. comme cela est décrit dans la norme.

Le calcul de la valeur « réelle » de la tension est réalisé à chaque demi période.

D'après la norme [5], il est impératif que :

- les valeurs de sévérité de courte durée du flicker soient  $P_{ST} \leq 1$
- les valeurs de sévérité de longue durée du flicker soient  $P_{LT} \leq 0.65$
- les variations relatives de tension soient  $d \leq 3\%$
- les variations maximales de tension soient  $d_{max} \leq 4\%$
- les valeurs de  $d$  lors des variations de tension ne doivent pas dépasser 3 % pendant une durée supérieure à 200 ms.

Si la charge est responsable de variations de tension sur  $U_{ab}$ , à une fréquence inférieure à 1 fois par heure, ou si les variations de tension sont dues à des commutations normales sur le process, alors les valeurs admissibles sont augmentées de 33 %.

Bien entendu, cela sous-entend qu'en l'absence de charge, la tension du réseau est constante et qu'aucune fluctuation de tension ne soit mesurée sur le réseau.

Le phénomène de sévérité de flicker n'est pas additif : la somme des valeurs de  $P_{ST}$  ou de  $P_{LT}$  n'a pas de sens.

## 6. Conclusion

La problématique du flicker se pose depuis l'existence des installations électriques de puissance. Depuis les années 80, la compréhension de ce phénomène s'est affinée et l'ensemble des travaux réalisés sur le sujet ont permis la mise en place de normes adaptées et le développement d'appareils de mesures fiables.

Les instruments de mesure actuels, basés sur des technologies d'acquisition numériques et rapides de signaux, permettent de mesurer et de trouver des solutions efficaces au flicker.

## 7. Références

- [1] Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations, Part 5, Flicker and Voltage Fluctuations, Power Quality - Working Group WG2, 2000.
- [2] IEC 60868, Flickermeter, Functional and Design Specifications, 1986.
- [3] IEC 60868-0, Amendment 1, Flickermeter, Functional and Design Specifications, 1990.
- [4] IEC 61000-4-15:1997, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Testing and Measurement Techniques – Section 15: Flickermeter – Functional and Design Specifications.
- [5] IEC 61000-3-3:1995, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 3: Limitation of Voltage Fluctuations and Flicker in Low-voltage Supply Systems for Equipment with Rated Current  $\leq 16A$ .
- [6] Mombauer W: EMV Messung von Spannungs-schwankungen und Flickern mit dem IEC-Flickermeter, VDE VERLAG, Berlin und Offenbach 2000.