



## (3.1.1) Inter-harmoniques

Zbigniew Hanzelka & Andrzej Bien,

AGH University of Science and Technology

Juillet 2004

1	<i>Introduction</i> .....	3
2	<i>Définitions</i> .....	3
2.1	Fréquence inter-harmonique .....	3
2.2	Inter-harmonique de tension (idem pour le courant).....	4
3	<i>Les sources</i> .....	4
4	<i>Charges produisant des arcs</i> .....	5
5	<i>Moteurs électriques</i> .....	5
6	<i>Convertisseurs de fréquence statiques</i> .....	7
6.1	Convertisseurs de fréquence indirects.....	7
6.2	Convertisseurs type sources de courant à charge commutée .....	7
6.3	Convertisseurs type source de tension.....	8
7	<i>Contrôle de la conduction des thyristors pendant une période complète (trains d'onde)</i> .....	9
8	<i>Utilisation du réseau de distribution pour la transmission de signaux</i> .....	11
9	<i>Conséquences de la présence d'inter-harmoniques</i> .....	12
9.1	Variation de tension et papillotement (flicker) .....	13
10	<i>Méthode de mesure</i> .....	14
11	<i>Les normes</i> .....	16
11.1	Grandeurs normalisées.....	16
11.2	Méthode normalisée de mesure.....	16
11.3	<b>Définitions liées au concept de regroupement :</b> .....	18
11.3.1	Valeur efficace d'un groupe harmonique .....	18
11.3.2	Valeur efficace d'un sous-groupe harmonique.....	18
11.3.3	Valeur efficace d'un groupe inter-harmonique .....	18
11.3.4	Valeur efficace d'un groupe inter-harmonique centré .....	18
12	<i>Limites de compatibilité</i> .....	18
12.1	Prescriptions de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI).....	19
12.2	CENELEC (norme EN 50160) .....	21
12.3	Limites d'émission de sous-harmoniques et d'inter-harmoniques [13].....	21
13	<i>Méthodes d'atténuation des inter-harmoniques et réduction de leurs effets</i> .....	21
14	<i>Conclusions</i> .....	22
15	<i>Références et bibliographies</i> .....	23
16	<i>Annexe 1</i> .....	24
17	<i>Annexe 2</i> .....	27

### *European Copper Institute*



L'European Copper Institute est une joint venture Européenne entre les principaux producteurs de cuivre mondiaux et les fabricants Européens de demi-produits. Créé en 1996, l'ECI assure la promotion du cuivre en Europe avec un réseau de 11 centres de développement basés en Allemagne, au Benelux, en Espagne, en France, en Grèce, en Hongrie, en Italie, en Pologne, au Royaume Uni, en Scandinavie et en Russie. L'ECI poursuit les efforts initialement engagés par le Copper Products Development Association, créé en 1959, et de l'INCRA (International Copper Research Association) créé en 1961.

### *Centre d'Information du Cuivre, Laiton & Alliages et Copper benelux*



Ce sont les organisations professionnelles des producteurs et des transformateurs de cuivre chargées de promouvoir les applications du cuivre et de ses alliages sur les marchés français et du Benelux. Financés par les producteurs de cuivre du monde entier et par les sociétés fabricants de demi-produits, le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux mettent en oeuvre des programmes de développement sur leurs marchés respectifs en coordination avec les structures professionnelles internationales de leurs mandants : International Copper Association au niveau mondial, European Copper Institute au niveau Européen. Ils ont pour vocation de produire et de diffuser l'information technique relative au cuivre et à ses alliages, de faire connaître les meilleures méthodes de mise en oeuvre des produits dans chacun de leur domaine d'emploi et d'en promouvoir l'utilisation dans les grands secteurs d'application. Le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux sont les coordinateurs respectivement pour la France et le Benelux du programme européen Leonardo relatif à la formation en matière de «Power Quality».



### *Remerciements*

Ce projet a été mis en oeuvre avec le soutien de la Communauté Européenne et l'International Copper Association Ltd.

### *Avertissement*

Le contenu de ce projet ne reflète pas nécessairement la position de la Communauté Européenne. De même, il n'implique aucune responsabilité de la part de la Communauté Européenne. L'European Copper Institute, le Centre d'information du Cuivre et Copper benelux déclinent toutes responsabilités pour toutes conséquences directes ou indirectes ou les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation du contenu ou de l'incapacité à utiliser les informations et les données de ce guide.

## 1 Introduction

Les harmoniques sont des tensions et des courants dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale de l'alimentation. Les inter-harmoniques sont des tensions et des courants dont les fréquences sont des multiples non entiers de la fréquence fondamentale de l'alimentation. La connaissance des perturbations électromagnétiques associées aux inter-harmoniques se développe et il commence donc à apparaître un intérêt certain pour le phénomène. Les inter-harmoniques ont toujours existé sur les réseaux électriques mais ils ont pris récemment plus d'importance du fait de l'usage de plus en plus étendu des systèmes électroniques de puissance qui conduisent à une augmentation de leurs amplitudes.

## 2 Définitions

Les harmoniques et inter-harmoniques d'une forme d'onde donnée sont définies en termes de composantes spectrales dans une gamme de fréquences définie, communément admise par tous. Le tableau 1 propose leurs définitions mathématiques.

Le terme "infra-harmonique" n'a pas de définition officielle – il s'agit, en fait, d'un cas particulier d'inter-harmonique dont la fréquence est inférieure à la fréquence fondamentale. Cependant, le terme a été employé dans de nombreuses publications ; il est fréquemment utilisé dans la profession.

Harmonique	$f = n \cdot f_1$ avec $n$ entier supérieur à zéro
Composante continue	$f = n \cdot f_1$ pour $n = 0$
Inter-harmonique	$f \neq n \cdot f_1$ avec $n$ entier supérieur à zéro
Infra-harmonique	$f > 0$ Hz et $f < f_1$
$f_1 =$ fréquence fondamentale de tension	

**Tableau 1 – Composantes spectrales de formes d'onde (de fréquences  $f$ )**

La norme IEC 61000-2-1 définit les inter-harmoniques de la façon suivante :

Entre les harmoniques en tension et en courant de la fréquence réseau, la présence d'autres fréquences, non multiples entiers de la fréquence fondamentale, peuvent être observées. Il peut s'agir de fréquences discrètes ou d'un spectre dans une bande de fréquences.

En raison de considérations exposées plus loin, les définitions détaillées suivantes seront utilisées :

### 2.1 Fréquence inter-harmonique

Toute fréquence non multiple entier de la fréquence fondamentale. Par analogie au rang d'une harmonique, le rang d'une inter-harmonique sera fourni par le rapport de sa fréquence à la fréquence fondamentale. Si cette valeur est inférieure à l'unité, elle sera

également considérée comme une fréquence infra-harmonique. En accord avec la recommandation de l'IEC, le rang d'une fréquence inter-harmonique est indiqué par la lettre "m" (IEC 61000-2-2).

## 2.2 Inter-harmonique de tension (idem pour le courant)

Onde de tension sinusoïdale de fréquence comprise entre deux harmoniques, c'est-à-dire qui n'est pas un multiple entier de la fréquence de la composante fondamentale.

## 3 Les sources

Il y a deux mécanismes principaux qui peuvent conduire à la création d'inter-harmoniques.

Le premier est la création de composantes dans les bandes latérales de la fréquence d'alimentation et de ses harmoniques, du fait de la modification de leurs amplitudes et/ou de leurs angles de phase. Elles sont dues à des variations rapides des courants appelés par les équipements et les installations, et dont peuvent également résulter des fluctuations de tension. Les perturbations sont causées par les régimes transitoires des charges, réguliers ou occasionnels, ou, dans la plupart des cas, si l'on est en présence de modulation d'amplitude des courants ou des tensions. Ces perturbations sont, en général, aléatoires, liées aux modifications de charge liées aux processus et aux équipements utilisés.

Le second mécanisme consiste en la commutation asynchrone (c'est-à-dire, non synchronisée avec la fréquence) de composants semi-conducteurs dans les convertisseurs statiques. Les exemples usuels sont les cyclo-convertisseurs et les convertisseurs modulation de largeur d'impulsion (M.L.I.). Les inter-harmoniques qu'ils génèrent sont situés n'importe où dans le spectre, mais directement en rapport avec les harmoniques de la tension d'alimentation.

Pour de nombreux équipements, les deux mécanismes sont simultanés.

Les inter-harmoniques peuvent apparaître sur tous les niveaux de tension et se transmettre d'un niveau à l'autre, ce qui signifie que des inter-harmoniques générés en HTB ou HTA se retrouveront sur la BT et réciproquement. Leurs amplitudes dépassent rarement 0,5% de la tension fondamentale, sauf dans quelques cas où, sous certaines conditions d'apparition de phénomènes résonants, des niveaux plus élevés sont à craindre.

Les principales sources de perturbations sont :

- les charges produisant des arcs
- les systèmes de contrôle électrique des charges variables
- les convertisseurs statiques, en particulier les convertisseurs de fréquence directs et indirects
- la commande par courant porteur

Les inter-harmoniques peuvent également être provoquées par des oscillations apparaissant sur des systèmes comprenant des condensateurs en série ou en parallèle ou encore si des transformateurs saturent ; enfin, lors de phases de commutation.

La tension d'alimentation contient un bruit de fond gaussien dont le spectre est continu. Les niveaux typiques de perturbations sont les suivants (IEC 61000-2-1) :

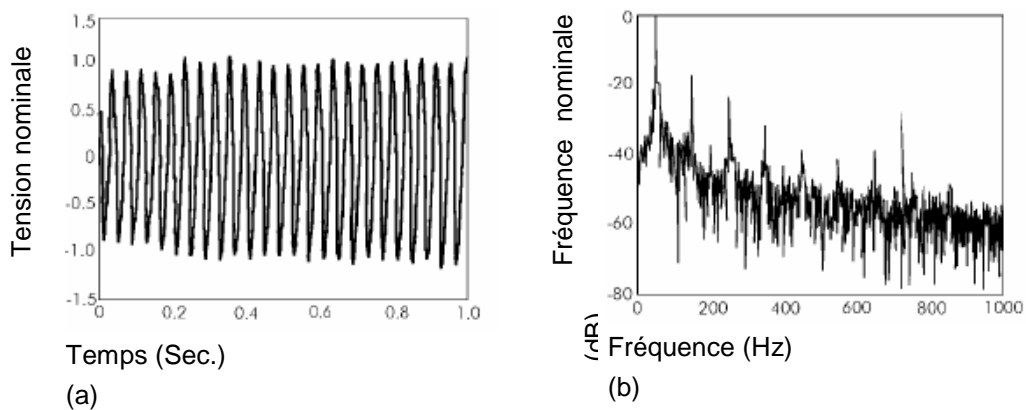
- 40-50 mV (voisin de 0,02% de  $U_n$ ) si la mesure est faite avec un filtre de largeur de bande 10 Hz
- 20-25 mV (voisin de 0,01% de  $U_n$ ) si la mesure est faite avec un filtre de largeur de bande 3 Hz

où  $U_n$  est la tension nominale (230 V).

#### 4 Charges produisant des arcs

Ce type de charges comprend les fours et les soudeuses. Les fours à arc ne produisent pas normalement d'inter-harmoniques significatives, sauf si elles sont amplifiées par phénomène de résonance. Le régime transitoire, source d'inter-harmoniques, se produit sous sa forme la plus intense lors de la phase de fusion (figure 1).

Les machines à souder génèrent un spectre continu selon un processus particulier. La durée d'une seule phase complète de soudure s'étale entre une et dix secondes, selon le type de soudeuse.



**Figure 1 – Scintillement en tension typique des arcs électriques, mesuré au secondaire du transformateur d'alimentation**

**a) fluctuation de tension**

**b) spectre représentant les harmoniques et les inter-harmoniques [1]**

#### 5 Moteurs électriques

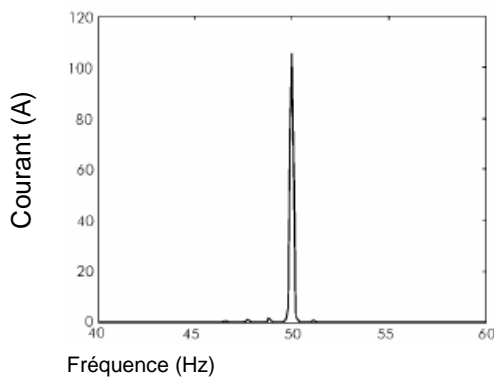
Les moteurs asynchrones peuvent être source d'inter-harmoniques du fait des dentures ménagées dans les tôles du stator et du rotor, en particulier s'il y a saturation du circuit magnétique (harmoniques dites de denture). A vitesse stabilisée du moteur, les fréquences

des composantes perturbatrices sont généralement comprises entre 500 et 2000 Hz mais, pendant la phase de démarrage, cette gamme peut être beaucoup plus étendue. L'asymétrie naturelle du moteur (mauvais alignement du rotor, etc.) peut également être source d'inter-harmoniques (voir figure 2).

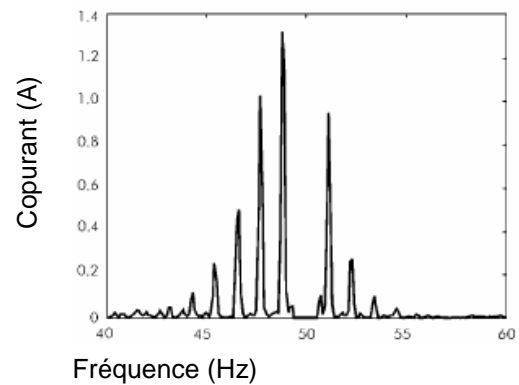
Les moteurs entraînant des charges à couple variable, à savoir entraînement de forge, marteaux-pilons, scies, compresseurs, pompes, etc., peuvent également générer des inter-harmoniques ; les effets des charges variables peuvent aussi apparaître sur les variateurs de vitesse à convertisseurs statiques.

Sur les sites de production éoliens, la variation de couple sur la turbine, liée par exemple au "phénomène d'ombre du au pylône", peut provoquer la modulation de la composante fondamentale dont la conséquence est l'apparition de composantes basse fréquence indésirables.

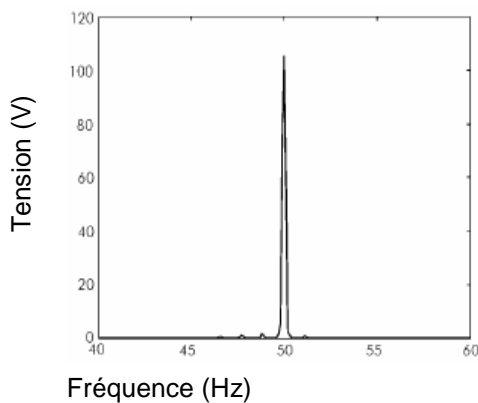
a) Spectre du courant



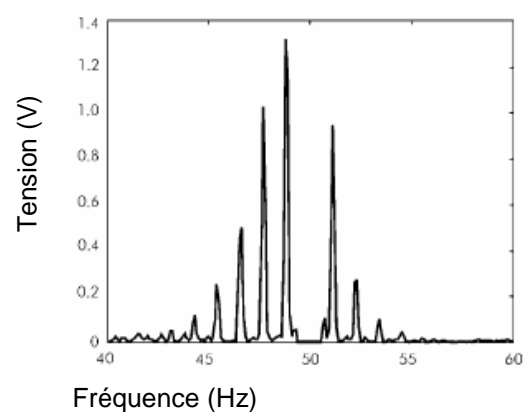
b) Spectre du courant



c) Spectre du voltage



d) Spectre du voltage



**Figure 2 - Analyse spectrale en courant et tension aux bornes du moteur**  
**a), c) spectre complet du signal**  
**b), d) spectre sans fréquence fondamentale**

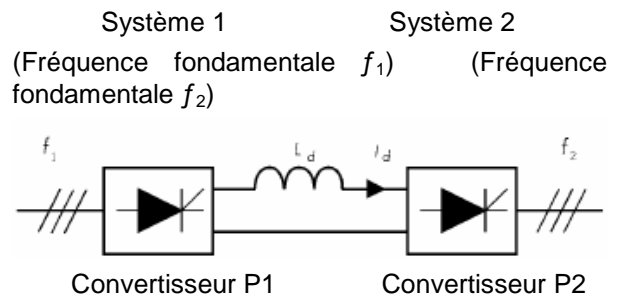
## 6 Convertisseurs de fréquence statiques

### 6.1 Convertisseurs de fréquence indirects

Les convertisseurs de fréquence indirects comprennent un bus continu reliant le convertisseur d'entrée relié au réseau et le convertisseur de sortie (fonctionnant habituellement en onduleur) alimentant la charge. Aussi bien dans un fonctionnement en source de tension qu'en source de courant, le bus continu est équipé d'un filtre qui découple courant ou tension du réseau de ceux de la charge. C'est donc grâce à lui que les deux fréquences fondamentales (réseau et charge) sont découplées. Cependant, le filtre idéal n'existant pas, il subsiste toujours un certain degré de couplage. Il en découle que les composantes de courant côté charge se retrouvent sur le bus continu puis sur le réseau. Ces composantes sont des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques de la fréquence réseau.

### 6.2 Convertisseurs type sources de courant à charge commutée

Du fait du mode de commutation des composants de puissance, on les répertorie dans la famille des convertisseurs de fréquences indirects à ligne commutée. Un convertisseur de fréquence est constitué de deux ponts triphasés P1 et P2 et d'un bus continu comprenant une self (inductance  $L_d$  – figure 3). Un de ces ponts fonctionne en redresseur, tandis que l'autre fonctionne en onduleur, ces deux fonctions peuvent être interverties.



**Figure 3 – Convertisseur de fréquences indirect à charge commutée**

La présence de deux ponts redresseurs alimentés par des systèmes de fréquences différentes conduit à la modulation du courant sur le bus continu par deux fréquences –  $f_1$  et  $f_2$ . Chacun de ces convertisseurs cherche à imposer des composantes non caractéristiques d'un bus continu, ce qui se traduit par la présence d'harmoniques non caractéristiques des signaux variables, aussi bien côté charge que côté réseau.

Composantes sur le bus continu :

dues au système 1 :  $f_{d1} = p_1 k f_1 \quad k = 0, 1, 2, \dots$

dues au système 2 :  $f_{d2} = p_2 n f_2 \quad n = 0, 1, 2, \dots$

où :

$p_1, p_2$  = nombre de pulses, respectivement des convertisseurs P1 et P2

$f_1$  = fréquence fondamentale du système 1 (alimentation réseau) [Hz]

$f_2$  = fréquence fondamentale du système 2 (alimentation charge) [Hz].

Le fonctionnement du convertisseur P1 va provoquer l'apparition d'harmoniques de courant caractéristiques sur le réseau aux fréquences suivantes :

$$f_{hh, char} = (p_1 k \pm 1) f_1 \quad k = 1, 2, \dots$$

De plus, des composantes dues à P2 sur le bus continu vont apparaître.

La formulation exhaustive de toutes les fréquences que l'on va retrouver sur le courant réseau est de la forme :

$$\text{Fréquences du courant réseau (système 1)} = (kp_1 \pm 1) f_1 \pm p_2 n f_2$$

où :

$$k = 0, 1, 2, \dots \text{ et } n = 0, 1, 2, \dots$$

Si  $n = 0$ , pour  $k = 0, 1, 2, \dots$  on obtient les rangs des harmoniques caractéristiques pour une configuration donnée du convertisseur P1. Les composantes obtenues pour  $k = \text{Constante}$  et  $n \neq 0$  sont les bandes adjacentes aux fréquences caractéristiques du convertisseur. Ainsi, chaque harmonique caractéristique, par exemple pour un pont six pulses, de rang 1, 5, 7, ... propose sa propre bande latérale, comme le montre, pour le rang 5, la figure 4.

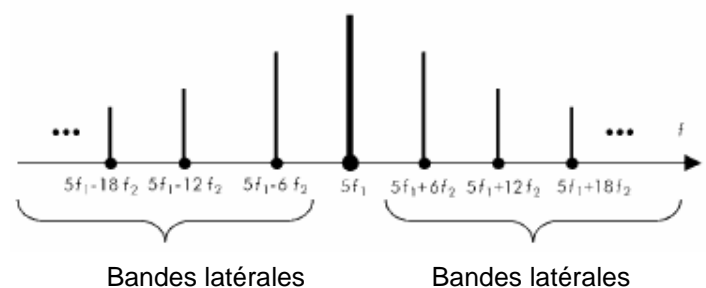
La première paire d'inter-harmoniques, qui apparaît au voisinage de la fréquence fondamentale, c'est-à-dire aux fréquences  $f_1 \pm p_2 f_2$  possède l'amplitude la plus élevée. La valeur de l'inductance de la self du bus continu a une influence significative sur le niveau des inter-harmoniques. Un exemple de configuration de variateur électrique contenant un convertisseur type source de courant est un variateur statique à compensation de glissement.

### 6.3 Convertisseurs type source de tension

Pour les convertisseurs type source de tension (figure 5), les harmoniques caractéristiques du convertisseur P1 sont également prédominantes. Les bandes latérales, dont les fréquences sont déterminées par le nombre de pulses du convertisseur P2, se situent autour des fréquences caractéristiques de P1, à savoir :

$$(kp_1 \pm 1) f_1 \pm n p_2 f_2$$

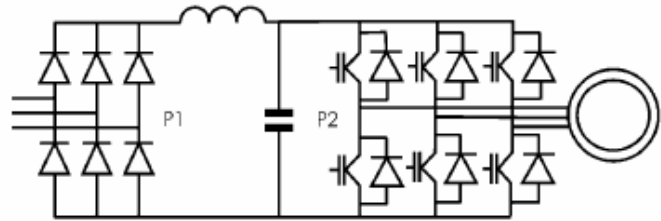
Pour  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  et  $n = 0, 1, 2, \dots$  Dans la plupart des cas, les harmoniques non caractéristiques représentent une part minime du courant d'alimentation.



**Figure 4 – Bandes latérales adjacentes de la 5ème harmonique de fréquence, caractéristiques des convertisseurs 6 pulses P1 et P2**

La détermination numérique de la valeur des harmoniques et des inter-harmoniques du courant d'alimentation nécessite une analyse précise du convertisseur de fréquence mis en œuvre, ou de disposer des informations fournies par le constructeur.

Certains convertisseurs sont constitués d'un étage redresseur actif fonctionnant sur une fréquence de découpage qui n'est pas un multiple entier de la fréquence réseau. Cette fréquence peut être constante ou variable et dépend du mode de contrôle du convertisseur.



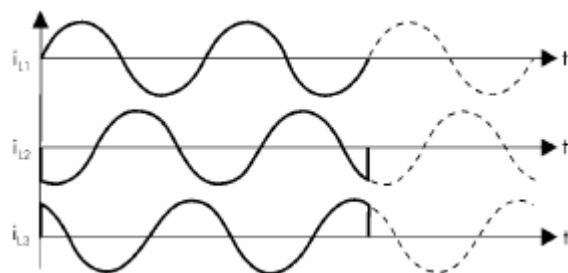
**Figure 5 - Diagramme schématique d'un convertisseur de fréquences avec bus continu**

Les convertisseurs de fréquence type source de tension à redresseur M.L.I. génèrent des composantes de courant à la fréquence de découpage et sur leurs harmoniques, et qui ne sont pas synchronisées sur la fréquence réseau. Habituellement, on les rencontre dans une gamme qui va de plusieurs centaines de hertz à plusieurs dizaines de kHz.

## 7 Contrôle de la conduction des thyristors pendant une période complète (trains d'onde)

Ce type de contrôle permet la conduction du composant de puissance pendant la totalité de la période du courant. La conséquence de ce contrôle évite la distorsion en courant – celui-ci est soit sinusoïdal (sur charge linéaire), soit nul.

La figure 6 propose un exemple de ce type de contrôle des composantes de puissance en triphasé. La commutation d'une charge triphasée au zéro de tension conduit à la circulation de courant dans le neutre dans un système tétrapolaire. Dans le cas de commutation simultanée des phases, et sur charge résistive, le courant dans le neutre est nul (figure 6) mais, dans le cas d'une charge inductive, des transitoires apparaissent pendant les phases de commutation.



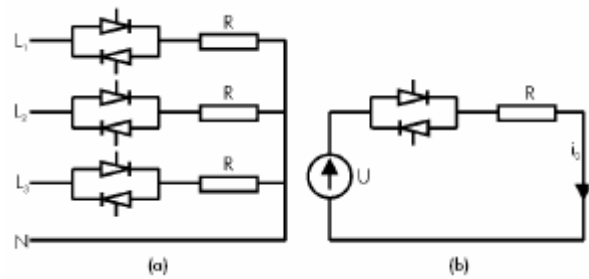
**Figure 6 - Formes d'onde des courants en triphasé avec conducteur de neutre pour contrôle intégral du cycle**

L'étude de la configuration proposée figure 7a (avec conducteur de neutre) se limite à l'étude d'un circuit monophasé (figure 7b). La charge monophasée résistive, application pratique la plus usuelle, sera considérée plus loin.

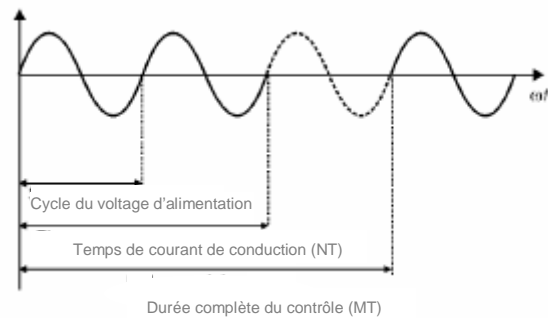
Un cycle de contrôle de conduction complète comprend  $N$  périodes de conduction inférieur ou égal à un nombre entier de périodes  $M$  (figure 8). La puissance moyenne fournie à la charge est proportionnelle au rapport  $N/M$ . Du fait des propriétés de l'analyse de Fourier, la période de répétition de l'onde de courant sera  $Mf_1$ , où  $f_1$  est la fréquence de la tension réseau et  $M$  est le nombre de périodes.

La première composante est l'inter-harmonique de fréquence  $(1/M)f_1$ , qui est la plus basse composante de fréquence en courant. Dans l'exemple de la figure 8, où  $N = 2$ ,  $M = 3$ , la valeur de cette sous-harmonique est un tiers de la fréquence de la tension réseau. Les autres composantes existent sur ses multiples.

Ce type de contrôle provoque l'apparition de sous-harmoniques et d'inter-harmoniques, mais n'engendre pas d'harmoniques de fréquence supérieure au fondamental. Si  $N = 2$  et  $M = 3$ , comme pour la figure 8, les amplitudes des harmoniques pour  $n = 6, 9, 12...$  sont nulles. Dans ce cas, le spectre du courant est celui présenté figure 9. Il y apparaît que la plupart des composantes sont des harmoniques de la tension réseau et la sous-harmonique de fréquence  $(2f)/3$ . Les amplitudes des harmoniques sont nulles.



**Figure 7 – Contrôleur de courant alternatif en configuration**  
**a) triphasée**  
**b) monophasée**



**Figure 8 – Forme d'onde du courant d'un système à trains d'ondes :  $N = 2, M = 3$**

## 8 Utilisation du réseau de distribution pour la transmission de signaux

Le réseau d'énergie public a pour vocation première de fournir l'énergie électrique à ses clients. Cependant, le fournisseur l'utilise fréquemment pour transmettre des signaux de gestion du système, c'est-à-dire pour le contrôle de certaines catégories de charges (éclairage public, changements tarifaires contrôle de commutation de charges, etc.) ou transmission de données.

Du point de vue technique, ces signaux sont la cause d'inter-harmoniques dont les apparitions durent entre 0,5 et 2 s (jusqu'à 7 s autrefois) et se répètent sur des périodes de 6 à 180 s. Dans la plupart des cas, la durée de l'impulsion est de 0,5 s et la séquence complète avoisine 30 s. La tension et la fréquence de ce type de signaux ont fait l'objet d'agrément et sont émis à des moments prédéfinis.

Quatre catégories principales sont indiquées dans la norme IEC 61000-2-1 pour ces signaux :

- *courants porteurs basse fréquence* : signaux sinusoïdaux entre 110 et 2 200 (3 000) Hz avec une préférence pour la gamme 110-500 Hz pour les nouveaux systèmes. Principalement utilisés sur les distributions professionnelles (également, parfois sur les distributions industrielles) pour la BT, la HTA et la HTB. L'amplitude du signal sinusoïdal de tension se situe entre 2 et 5% de la tension nominale (selon les pratiques locales). Dans des conditions de résonance, elle peut atteindre 9%.
- *Signaux porteurs en moyenne fréquence* : signaux sinusoïdaux dans la gamme 3-20 kHz, principalement 6-8 kHz. Essentiellement utilisés sur les distributions professionnelles. Amplitude du signal jusqu'à 2% de la tension nominale.
- *Signaux porteurs en radio-fréquence* : 20 à 150 (148,5) kHz (jusqu'à 500 kHz dans certains pays). Utilisés sur les distributions professionnelles, industrielles et communales et également pour des applications commerciales (contrôle d'équipement à distance, etc.).
- Systèmes de marquage du réseau : masques non sinusoïdaux sur la forme d'onde de tension sous la forme de :
  - impulsions longues (pulse sur la tension d'une durée de 1,5 à 2 ms, de façon préférentielle au passage par zéro) ;
  - impulsions courtes d'une durée de 20 à 50  $\mu$ s ;
  - impulsions à 50 Hz d'une durée égale une demi ou une période de la tension réseau.

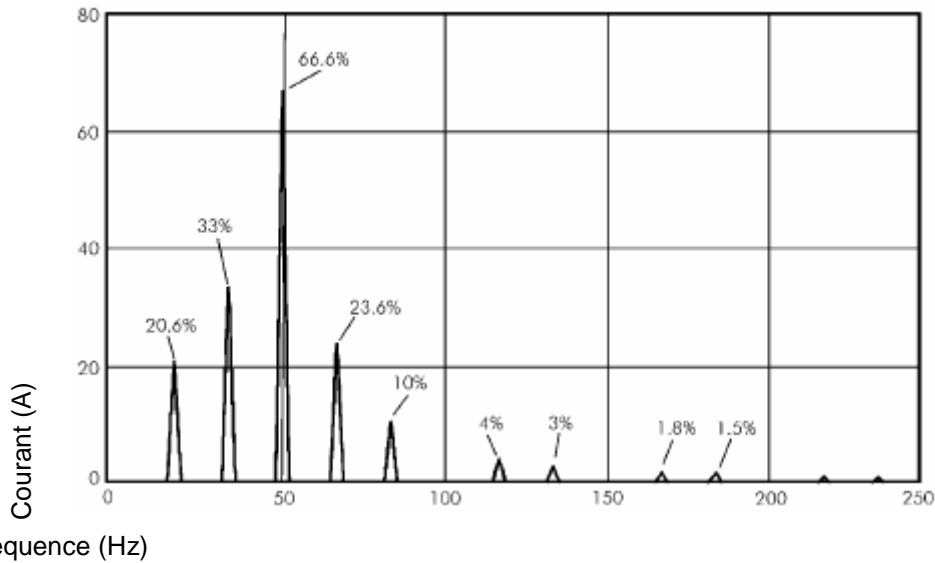


Figure 9 – Analyse spectrale du courant pour  $N = 2$ ,  $M = 3$

La figure 10 présente un exemple du spectre de la tension sur un système utilisant la transmission de données à 175 Hz ( $U_{th} = 1.35\%$ ). Dans cet exemple, d'autres inter-harmoniques apparaissent dues à l'interaction avec les fréquences harmoniques. Les composantes inférieures au second harmonique sont faibles (elles ne perturberont pas les charges), tandis que les inter-harmoniques supérieures à 200 Hz peuvent poser problème.

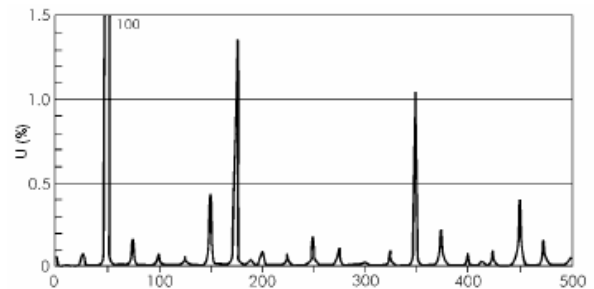


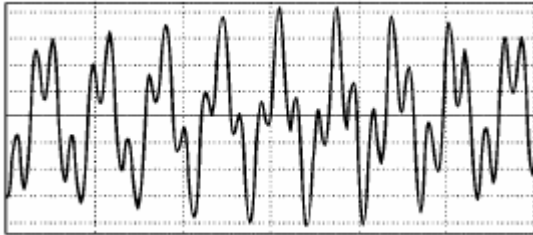
Figure 10 - Spectre de la tension sur un système utilisant la transmission de données à  $f(U_{th}) = 175$  Hz ( $U_{th} = 1,35\%$ ),

## 9 Conséquences de la présence d'inter-harmoniques

Les courants inter-harmoniques sont à l'origine de distorsion inter-harmoniques de tension déterminée par l'amplitude des composantes de courant et l'impédance de source amont du réseau aux fréquences considérées. Plus la gamme de fréquences des composantes de courant est importante, plus le risque d'apparition de phénomènes de résonances indésirables est élevé, avec un accroissement de la distorsion en tension et création de surcharges ou de perturbations sur les équipements et les installations du client. Parmi les effets les plus courants et directs des inter-harmoniques, il faut citer :

- les effets thermiques,
- les oscillations basse fréquence des systèmes mécaniques,
- les perturbations de l'éclairage fluorescent et des équipements électroniques. Dans la pratique, tous les équipements synchronisés sur un passage par zéro ou sur un maximum de la tension du réseau sont susceptibles d'être perturbés (figure 11),

- les interférences avec les signaux de contrôle et de protection sur les lignes d'alimentation de puissance. Il s'agit, aujourd'hui du principal effet pénalisant des inter-harmoniques,
- la surcharge des filtres passifs parallèles pour les harmoniques de rang élevé,
- les interférences sur les communications,
- les perturbations acoustiques,
- la saturation des transformateurs d'intensité.



**Figure 11 – Distorsion se traduisant par le passage répété de la tension à la valeur 0**

Les effets les plus courants de la présence d'inter-harmoniques consistent en des variations des tensions efficaces et l'apparition de papillotement (flicker).

### 9.1 Variation de tension et papillotement (flicker)

La tension d'alimentation s'exprime sous la forme suivante :

$$u(t) = U_1 \sin(\omega_1 t) [1 + m \sin(\omega_i t)] + \sum_h U_h \sin(\omega_h t) \quad (1)$$

$$u(t) = U_1 \sin(\omega_1 t) + \left[ \sum_h U_h \sin(\omega_h t) \right] [1 + m \sin(\omega_i t)] \quad (2)$$

où  $\omega_1 = 2\pi f_1$  et  $m$  est l'indice de modulation du signal à la fréquence  $\omega_i = 2\pi f_i$

Les équations ci-dessus représentent les possibles causes de variations de tension dues à la modulation de la composante fondamentale par des harmoniques de rang entier. Le second cas n'est guère rencontré en pratique.

En se limitant à la composante fondamentale, l'équation devient :

$$u(t) = U_1 \sin(\omega_1 t) [1 + m \sin(\omega_i t)] = U_1 \sin \omega_1 t + \frac{mU_1}{2} [\cos(\omega_1 - \omega_i)t - \cos(\omega_1 + \omega_i)t] \quad (3)$$

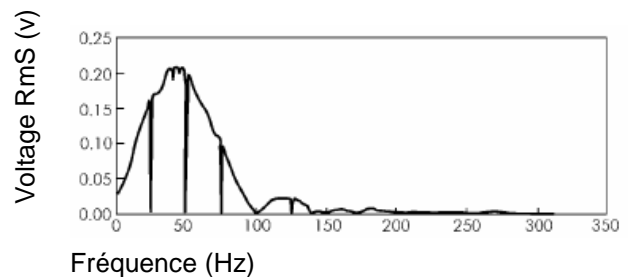
Dans cette équation, additionnés au terme fondamental, les deux autres termes sont associés à des fréquences de modulation situées symétriquement autour de la fréquence

de la composante fondamentale. Les variations périodiques de la tension peuvent être considérées comme des variations de la valeur efficace (ou crête), ou comme le résultat de la présence de bandes latérales inter-harmoniques qui modulent la tension d'alimentation.

Par exemple, pour  $u(t) = \sin(2\pi f t) + m \sin(2\pi f_i t)$  (on pose  $U_1 = 1$ ), la variation maximale de l'amplitude de tension est égale à l'amplitude de l'inter-harmonique puisque la variation de la valeur efficace dépend à la fois de l'amplitude et de la fréquence de l'inter-harmonique. La figure 12 présente le pourcentage maximum de variation pour la valeur efficace de la tension, déterminé sur plusieurs périodes de la forme d'onde fondamentale, engendré par des inter-harmoniques de différentes fréquences mais d'amplitude constante  $m = 0,2\%$  de la composante de tension fondamentale.

Comme le montre la figure 12, l'influence des inter-harmoniques de fréquence supérieure à deux fois la fréquence du réseau est faible comparée à celle des composantes de fréquence plus basse que celle du second harmonique (100 Hz). En présence d'inter-harmoniques, il apparaît un risque de fluctuation de la tension provoquant du papillotement (flicker) si le niveau dépasse, pour une fréquence, donnée une certaine valeur limite. En conséquence, si

$f_i \leq f_1$  et particulièrement pour  $f_i$  voisin de la fréquence fondamentale  $f_1 \pm 15$  Hz), la modulation de la composante fondamentale provoque des fluctuations de l'amplitude de la valeur efficace de la tension et devient source de papillotement (flicker). Ce phénomène est observé aussi bien pour l'éclairage incandescent que fluorescent, quels que soient le mécanisme et la gamme de fréquence, et les amplitudes admissibles des composantes perturbatrices sont également totalement différentes.



**Figure 12 – Pourcentage maximum de variation pour la valeur efficace de la tension, engendré par des inter-harmoniques de différentes fréquences et d'amplitude constante ( $m=0,2$  % de la composante de tension fondamentale) [10]**

Les systèmes de signaux porteurs sur les lignes d'alimentation peuvent être une cause particulière de papillotement (flicker). Malgré leur faible amplitude, ces signaux risquent parfois accroître le papillotement (flicker) sur les éclairages particulièrement sensibles comme les lampes fluorescentes basse consommation, particulièrement pour les ballasts inductifs. Ce type de perturbations est rarement observé pour les sources lumineuses à ballast électronique.

## 10 Méthode de mesure

La plupart des instruments qui réalisent des mesures dans le domaine fréquentiel ne fournissent des informations que sur les harmoniques présentes dans le signal mesuré. Ces instruments utilisent une boucle à verrouillage de phase pour synchroniser la mesure avec la composante fondamentale et échantillonnent le signal sur une ou plusieurs périodes afin de l'analyser par Transformée de Fourier Rapide (FFT). Du fait de la mise en œuvre d'une boucle à verrouillage de phase, les échantillonnages "mono-périodiques" ne

fournissent une représentation spectrale précise de la forme d'onde que si elle ne contient pas d'inter-harmoniques. Si d'autres fréquences non-harmoniques (au regard de la période de mesure) sont présentes et/ou si la forme d'onde échantillonnée n'est pas périodique dans cet intervalle temporel, des difficultés dans l'interprétation du résultat risquent d'apparaître.

L'outil fondamental d'analyse est la transformation de Fourier (FT). Dans la pratique, le signal est traité sur un intervalle de temps limité : fenêtre de mesure de durée  $T_w$  avec un nombre d'échantillons fini ( $M$ ) du signal réel. Les résultats de la Transformée de Fourier Discrète (DFT) dépendent du choix des valeurs de  $T_w$  et de  $M$ . L'inverse de  $T_w$  est la fréquence de Fourier fondamentale –  $f_f$ . La DFT est réalisée sur le signal réel à l'intérieur de la fenêtre de mesure ; le signal à l'extérieur de la fenêtre n'est pas traité mais considéré comme identique à la forme d'onde de la fenêtre. Le signal réel est ainsi remplacé par un signal virtuel, périodique de période égale à la largeur temporelle de la fenêtre.

Lors de l'analyse d'une forme d'onde périodique, il n'y a pas de problème pour synchroniser le temps d'analyse avec la période de la forme d'onde fondamentale (ainsi qu'avec les harmoniques). Toutefois, lors de l'analyse des inter-harmoniques, le problème devient plus difficile. Les fréquences des composantes inter-harmoniques sont des multiples non entiers de la fréquence fondamentale et souvent elles varient au cours du temps, ce qui rend la mesure encore plus difficile.

Du fait de la présence simultanée de composantes harmoniques et inter-harmoniques, la fréquence de Fourier, qui est le plus grand diviseur commun de toutes les fréquences présentes dans le signal, est différente de la fréquence fondamentale de la tension réseau et est habituellement très petite. Deux problèmes apparaissent :

- le temps minimum d'échantillonnage risque d'être long et le nombre d'échantillons élevé.
- il est difficile de prévoir la fréquence de Fourier fondamentale car toutes les composantes pouvant être présentes dans le signal ne sont pas connues a priori.

Cette situation est illustrée dans les exemples suivants :

Le signal à analyser est la somme de la composante fondamentale d'une inter-harmonique (71,2 Hz) et d'une harmonique (2500 Hz). La fréquence fondamentale de Fourier vaut 0,2 Hz et est bien plus basse que la fréquence de la composante fondamentale. La période correspondante est de 5 s et, par conséquent, la durée minimale d'échantillonnage est également de 5 s. Si l'on suppose que la fréquence d'échantillonnage est de 10 kHz, ce qui, en pratique, est la valeur minimale applicable pour satisfaire au critère de Nyquist (appendice 2), le nombre minimal d'échantillons nécessaires est de 50 000. S'il n'y avait pas de composante inter-harmonique (71,2 Hz), le temps de mesure serait de 20 ms et le nombre d'échantillons 200.

Le signal à analyser est la somme de la composante fondamentale (50 Hz) et harmonique (2500 Hz), l'amplitude de chacune d'elles variant de façon sinusoïdale à des fréquences respectives de 0,1 Hz et 5 Hz. L'effet de ces modulations se traduit par la présence de quatre inter-harmoniques aux fréquences 49,9 Hz, 50,1 Hz, 2495 Hz et 2505 Hz. La fréquence fondamentale de Fourier vaut 0,1 Hz, la durée minimale d'échantillonnage est de 10 s et  $M = 100\ 000$ .

Dans la pratique, du fait des limites matérielles et logicielles, le nombre d'échantillons M ne peut pas dépasser un maximum et la durée de la mesure est limitée en conséquence. Utiliser une durée de mesure différente de la période de Fourier fondamentale conduit à l'apparition d'une discontinuité du signal entre le début et la fin de la fenêtre de mesure. Ceci provoque des erreurs lors de l'identification des composantes spectrales. Une solution possible consiste à utiliser une fenêtre "calibrée" appliquée au signal variable avant de réaliser l'analyse spectrale (FFT). Dans la pratique, deux types de fenêtres sont utilisées : la fenêtre rectangulaire et la fenêtre de Hanning (appendice 1).

## 11 Les normes

### 11.1 Grandeurs normalisées

Le tableau 2 ci-dessous fournit certaines grandeurs qui caractérisent les inter-harmoniques et sont utilisées dans divers documents normatifs.

FACTEURS	DEFINITIONS
Importance des inter-harmoniques par rapport à la composante fondamentale (en courant ou tension)	$\frac{Q_i}{Q_1}$
Contenu total de distorsion	$IDC = \sqrt{Q^2 - Q_1^2}$
Taux de distorsion total	$IDR = \frac{IDC}{Q_1} = \frac{\sqrt{Q^2 - Q_1^2}}{Q_1}$
Distorsion totale inter-harmonique	$TIHD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n Q_i^2}}{Q_1}$
Distorsion totale infra-harmonique	$TSHD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^S Q_i^2}}{Q_1}$
Q = Valeur efficace totale du courant ou de la tension	
Q <sub>1</sub> = Valeur efficace totale du fondamental	
Q <sub>i</sub> = Valeur efficace totale de l'inter-harmonique i	
i = indice de l'inter-harmonique	
n = nombre total des inter-harmoniques prises en compte	
S = nombre total des infra-harmoniques prises en compte	

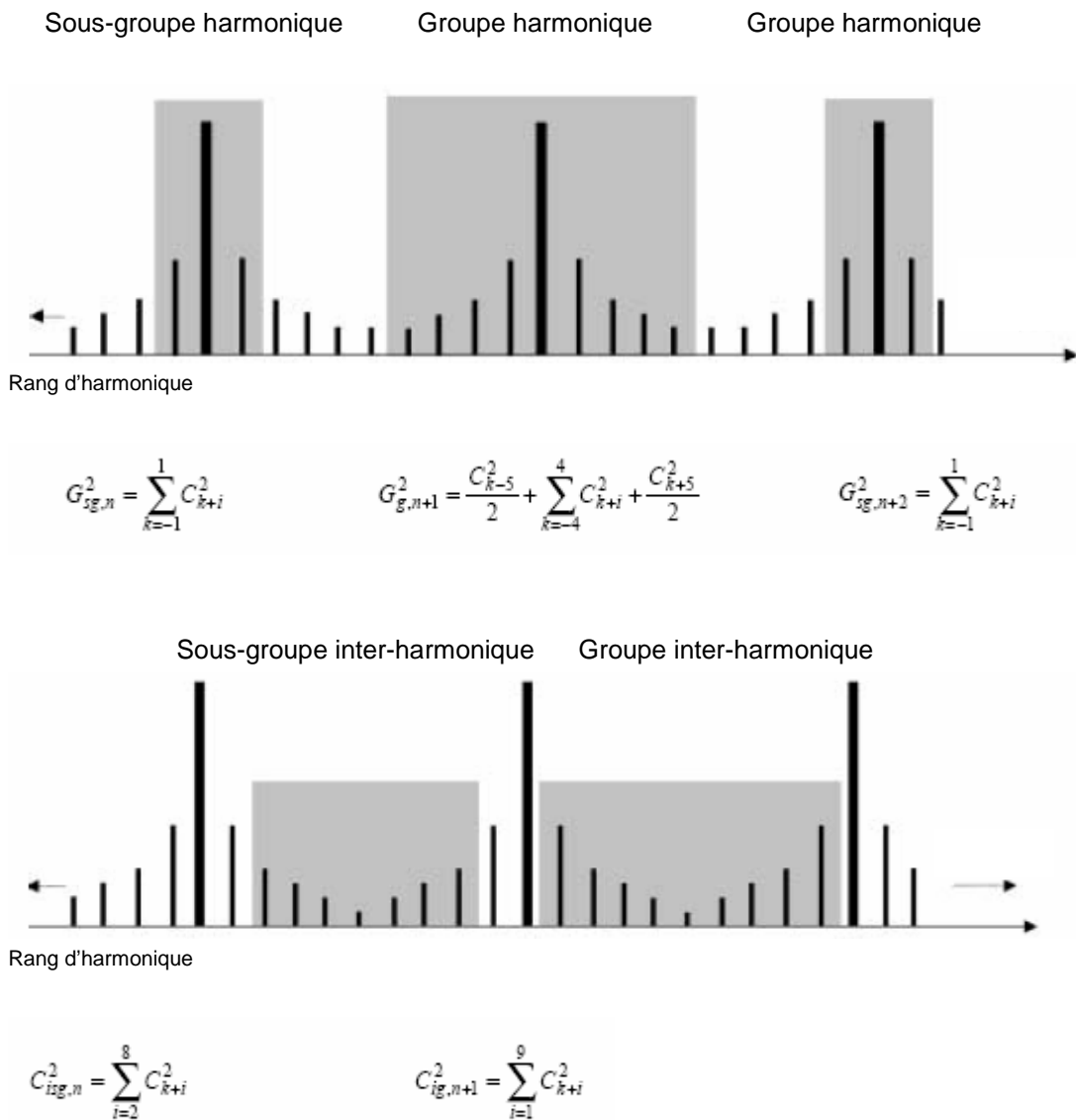
**Tableau 2 : grandeurs normatives caractérisant les inter-harmoniques**

### 11.2 Méthode normalisée de mesure

La mesure des inter-harmoniques est difficile et les résultats dépendent de nombreux facteurs, d'où le souci de développer une méthode de "mesure" pour simplifier le mode de mesure et obtenir des résultats reproductibles. La norme [6] propose une méthode de mesure des inter-harmoniques basée sur le concept dit du "regroupement". Le principe est celui d'une analyse de Fourier réalisée dans une fenêtre temporelle de longueur égale à 10

périodes de la fréquence fondamentale (50 Hz), c'est-à-dire environ 200 ms. L'échantillonnage est synchronisé à la fréquence réseau grâce à une boucle à verrouillage de phase. Il en résulte un spectre de résolution 5 Hz. La norme définit le mode de traitement de chacune des raies afin de déterminer des groupes dits harmoniques ou inter-harmoniques auxquels feront référence les recommandations des normes et les rapports techniques.

Les groupes d'harmoniques et d'inter-harmoniques sont calculés selon les équations de la figure 13.



**Figure 13 - Illustration du principe de groupes d'harmoniques et d'inter-harmoniques**

### 11.3 Définitions liées au concept de regroupement :

#### 11.3.1 VALEUR EFFICACE D'UN GROUPE HARMONIQUE

Somme quadratique des amplitudes d'un harmonique et des composantes spectrales adjacentes dans la fenêtre d'observation, correspondant au contenu énergétique de la somme d'un harmonique donné et de ses raies voisines.

#### 11.3.2 VALEUR EFFICACE D'UN SOUS-GROUPE HARMONIQUE

Somme quadratique des amplitudes d'un harmonique et des deux composantes spectrales immédiatement adjacentes, afin d'inclure l'effet des variations de tension lors de sa surveillance. Un sous-groupe des composantes fournies par la DFT correspond au contenu énergétique de la somme d'un harmonique donné et de ses raies immédiatement adjacentes.

#### 11.3.3 VALEUR EFFICACE D'UN GROUPE INTER-HARMONIQUE

Valeur efficace de toutes les composantes inter-harmoniques comprises entre deux fréquences harmoniques consécutives (voir figure 13).

#### 11.3.4 VALEUR EFFICACE D'UN GROUPE INTER-HARMONIQUE CENTRE

Valeur efficace de toutes les composantes inter-harmoniques comprises entre deux fréquences harmoniques consécutives et excluant les composantes immédiatement adjacentes à ces fréquences harmoniques (voir figure 13).

Des informations plus détaillées concernant ce concept de mesure sont fournies dans la norme [6]. A partir de ces définitions, des mesures peuvent être réalisées pour chaque groupe inter-harmonique, aussi bien que pour la distorsion inter-harmonique totale et doivent être comparées à la composante fondamentale, à la valeur efficace totale ou à toute autre grandeur de référence.

Cette méthode présente un bon intérêt lors d'une surveillance en cas de réclamations ou de tests de compatibilité, car les niveaux limites peuvent être définis sur la base de la distorsion totale et ne font pas référence à la mesure sur des fréquences spécifiques. Elle n'est pas adaptée en situation de diagnostic.

## 12 Limites de compatibilité

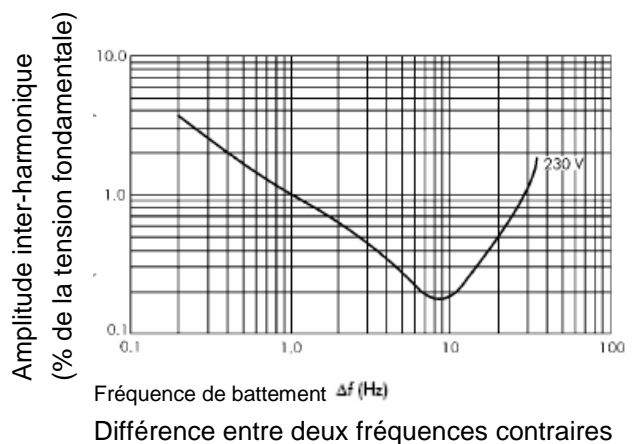
Le processus de normalisation des inter-harmoniques en est encore à ses balbutiements et la connaissance et les bases de données sont en train de se constituer.

Le niveau limite de 0,2% pour les inter-harmoniques de tension est communément utilisé, principalement du fait de l'absence de meilleures suggestions. Cette valeur a été choisie car elle est adaptée à la sensibilité des charges aux signaux de gestion du système supportés par le réseau, mais son application à d'autres cas, sans prise en compte des effets physiques possibles, peut conduire à des solutions très coûteuses, à savoir la mise en œuvre de filtres très chers. Les prescriptions de plusieurs documents fournissant des exemples sont citées plus loin, mais un certain nombre manque de consistance et des différences significatives sont évidentes.

### 12.1 Prescriptions de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Selon les recommandations de la CEI, les inter-harmoniques de tension sont limitées à 0,2% pour les fréquences comprises entre le continu et 2 kHz.

La norme [7] fournit les niveaux d'immunité à satisfaire lors des essais pour les inter-harmoniques dans diverses gammes de fréquences. Selon la classe de l'équipement, les niveaux de tension doivent rester limités jusqu'à 1,5% de  $U_1$  (1000-2000 Hz). Les niveaux lors des essais pour les inter-harmoniques au-dessous de 100 Hz sont compris entre 2 et 9%. Dans le document [5], les niveaux de compatibilité ne sont indiqués que dans le cas des inter-harmoniques de tension dont les fréquences sont voisines du fondamental et dont découlent la modulation de la tension d'alimentation et le papillotement (flicker). La figure 14 présente le niveau de compatibilité pour une seule inter-harmonique de tension, exprimée sous la forme d'un pourcentage de l'amplitude de la tension fondamentale, en fonction de

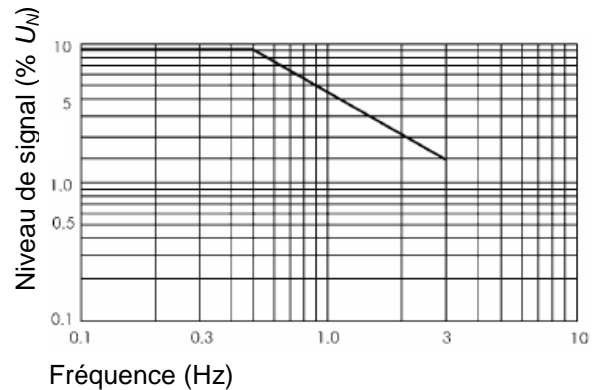


**Figure 14 - Niveau de compatibilité d'une inter-harmonique de tension en fonction de la fréquence de battement [5]**

la fréquence de battement entre deux composantes dont l'interaction est à l'origine de l'inter-harmonique. La caractéristique a pour référence la sévérité ( $P_{st} = 1$ ) du papillotement (flicker) pour des lampes à incandescence 230 V.

Des recommandations plus détaillées se rapportant à des valeurs limites pour les signaux de gestion du système supportés par le réseau sont fournies ci-après :

- *Signaux par courants porteurs* : le niveau de ces signaux ne doit pas dépasser les valeurs des harmoniques impaires non multiples de 3, dans la même bande de fréquence [5], (tableau 3). En pratique, cette valeur se situe entre 2 et 5% de  $U_N$ .
- *Signaux porteurs en moyenne fréquence* : valeur du signal jusqu'à 2% de  $U_N$ .
- *Signaux porteurs en radio-fréquence* : les niveaux de compatibilité sont à l'étude ; ils ne devraient pas dépasser 0,3%.
- *Systèmes de marquage du réseau* : les équipementiers doivent garantir la compatibilité avec l'environnement de travail.



**Figure 15 - Courbe de Meister pour les signaux de gestion du système supportés par le réseau public (de 100 à 3 000 Hz) [5]**

Dans certains pays, la courbe dite de Meister, et présentée figure 15, est officiellement reconnue.

Rang des harmoniques	5	7	11	13	$17 \leq h \leq 49$
Valeur efficace des harmoniques (en % de la composante fondamentale)	6	5	3,5	3	$2,27 \times (17/h) - 0,27$

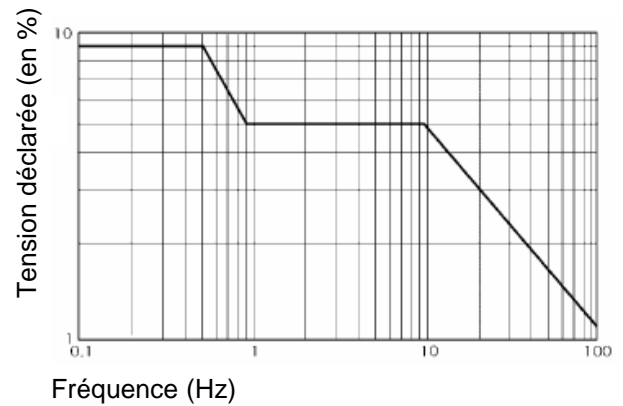
**Tableau 3 – Calcul des niveaux de compatibilité inter-harmoniques en fonction des valeurs efficaces d'harmoniques (en % de la composante fondamentale) [5]**

## 12.2 CENELEC (norme EN 50160)

Sur plus de 99% d'une journée, la moyenne sur trois secondes des tensions de signalisation doit être inférieure ou égale aux valeurs de la Figure 16.

### 12.3 Limites d'émission de sous-harmoniques et d'inter-harmoniques [13]

Au Royaume Uni, par exemple, où les signaux par courants porteurs ne sont pas utilisés et, par conséquent, une charge peut être raccordée sans avoir été testée si les émissions inter-harmoniques individuelles sont inférieures aux valeurs limites du tableau 4. Les limites pour les fréquences inter-harmoniques particulières comprises entre 80 et 90 Hz peuvent être interpolées linéairement à partir des limites du tableau 4.



**Figure 16 – Niveaux de tensions des signaux utilisés pour les systèmes de distribution publique [11]**

Fréquence des infra ou inter-harmoniques en Hz	< 80	80	90	> 90 et < 500
Distorsion en tension (% de la composante fondamentale)	0,2	0,2	0,5	0,5

**Tableau 4 – Valeurs limites des émissions infra et inter-harmoniques**

## 13 Méthodes d'atténuation des inter-harmoniques et réduction de leurs effets

Les méthodes permettant d'éliminer les effets des inter-harmoniques sont :

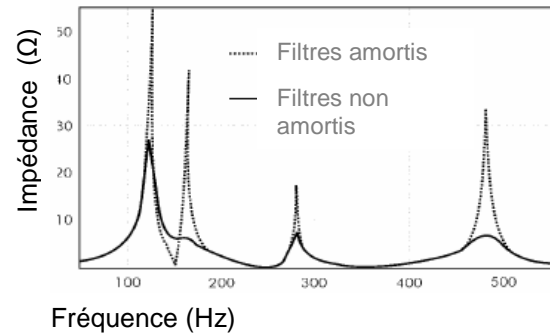
- réduction du niveau d'émission
- réduction de la sensibilité des charges et
- réduction du couplage entre les sources et les charges.

Les méthodes utilisées sont les mêmes que pour les harmoniques.

Des données supplémentaires doivent être prise en compte lors du dimensionnement des filtres passifs. Par exemple, les phénomènes de résonance entre les filtres et le réseau d'alimentation peuvent être amplifiés et provoquer de la distorsion significative en tension, ainsi que des perturbations. Les filtres doivent être dimensionnés avec un facteur d'amortissement élevé.

La figure 17 montre un exemple des caractéristiques de l'impédance d'un filtre passif (harmoniques 3, 5, 7 et 12) vue depuis les bornes d'entrée d'un convertisseur alimentant en tension continue un four à arc de forte puissance. La courbe en pointillés correspond à des filtres non amortis. Un risque réel de résonance était présent pour les inter-harmoniques voisines de 120 et 170 Hz. Les filtres amortis pour le 3ème et le 7ème harmoniques ont permis de réduire le danger d'apparition de phénomènes résonants.

Le dimensionnement de l'ensemble du filtrage nécessite parfois de trouver le meilleur compromis entre un accord précis et des pertes énergétiques, lors du choix du facteur de qualité des filtres.



**Figure 17 – Exemple d'impédance vue depuis les bornes d'entrée d'un convertisseur [10]**

Le choix d'un filtre de bande étroite pose divers problèmes. Les variations de fréquence du système d'alimentation peuvent être importantes, particulièrement si des variations de la fréquence d'accord apparaissent du fait des tolérances sur les composants ou encore à cause du vieillissement, des changements de température ou de l'impédance de source.

Les variations de fréquence de résonance du filtre qui en découlent, du fait de l'utilisation d'un filtre étroit, peuvent réduire de façon significative l'efficacité du filtre, même si elles sont faibles. Cela demande donc parfois de choisir un filtre de facteur de qualité moindre, ce qui élargit la bande passante et est donc finalement mieux adapté au filtrage des inter-harmoniques.

Les perturbations dues aux signaux porteurs sur les lignes d'alimentation peuvent être éliminés à l'aide d'association de filtres, accordés sur les fréquences souhaitées et correctement positionnés sur la distribution. D'autres solutions consistent à augmenter le niveau d'immunité des charges ou d'utiliser des filtres actifs.

## 14 Conclusions

L'étude des inter-harmoniques ici présentée, leur présence, leurs causes principales et leurs caractéristiques essentielles en termes de spectre continu ou discret permettent de tirer un ensemble de conclusions de nature très générale.

Premièrement, dans la plupart des cas, les amplitudes et les fréquences des courants et des tensions inter-harmoniques sont des grandeurs aléatoires qui dépendent de nombreux paramètres complexes liés aux régimes transitoires.

Deuxièmement, l'évaluation de l'amplitude et de la fréquence d'une inter-harmonique est possible pour des cas donnés particuliers.

Troisièmement, il n'existe pas de normes proposant une cohérence globale pour les inter-harmoniques et il reste nécessaire de les établir.

## 15 Références et bibliographies

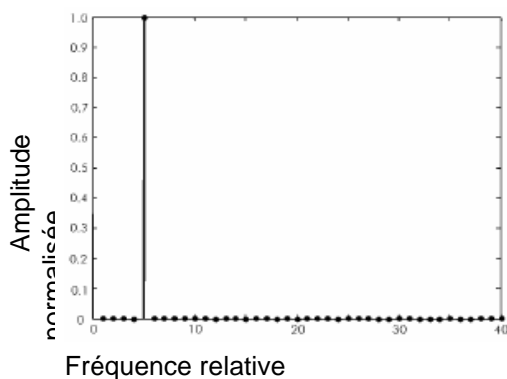
- [1] Arrillaga J, Watson N R, Chen S: Power system quality assessment, Wiley, 2000
- [2] Gunther E W: Interharmonics in power systems, UIEPQ-9727
- [3] Interharmonic Task Force Working Document – IH0101 20001, IEEE
- [4] IEC 61000-2-1: 1990 - Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment – Section 1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems
- [5] IEC 61000-2-2: 2002 - Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment – Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. (also materials used in preparation of the standard, obtained from the authors) [6] IEC 61000-4-7: 2002 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4: Testing and measurement techniques Section 7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto
- [7] IEC 61000-4-13: 2002 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4: Testing and measurement techniques Section 13: Harmonics and interharmonics including mains signalling at ac power port, low frequency immunity tests (also materials used in preparation of the standard, obtained from the authors)
- [8] Kloss A: Oberschwingungen, vde Verlag, ISBN 3-8007-1541-4
- [9] Materials used in preparation of standard IEC 61000-2-4 (obtained from the authors)
- [10] Mattaveli P, Fellin L, Bordignon P, Perna M: Analysis of interharmonics in dc arc furnace installations, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, October 14-16, 1998
- [11] EN 50160: 1999 - Voltage characteristics of electricity supplied in public distribution systems
- [12] Staudt V: Effects of window functions explained by signals typical to power electronics, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, October 14-16, 1998
- [13] Engineering Recommendation G5/4, Electricity Association, Feb. 2001.

## 16 Annexe 1

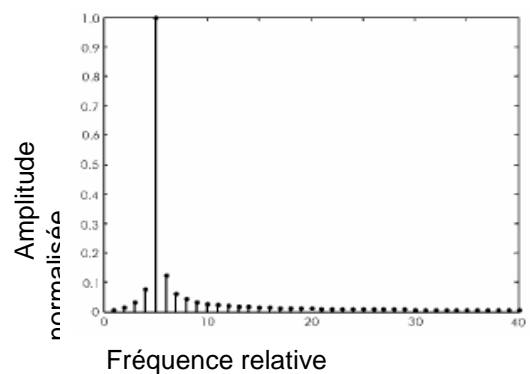
La transformée de Fourier est la méthode la plus commune pour réaliser l'analyse spectrale d'un signal. La théorie fondamentale d'analyse spectrale prévoit de l'effectuer sur un intervalle de temps allant de  $-\infty$  à  $+\infty$ . La transformée de Fourier discrète (TFD), ou sa variante, la transformée de Fourier rapide (TFR) peut faire apparaître des composantes spectrales indésirables. Ceci se produit car les TFD et TFR sont réalisées sur un nombre fini d'échantillons, c'est-à-dire sur une partie seulement du signal réel. Le spectre obtenu et le spectre réel ne seront les mêmes que si le signal est périodique et que si le temps sur lequel est faite l'analyse contient un nombre entier de périodes. Cette condition est très difficile à réaliser en pratique.

Les résultats présentés sur les figures A.1.1 et A.1.2 montrent à quoi peut ressembler le spectre réel. Différents spectres ont été obtenus à partir du même signal sachant que le temps d'observation pour la figure A.1.2 est 2,5% plus long. Dans la littérature, cet effet est appelé étalement de spectre. On peut considérer qu'une partie de l'énergie de la raie principale a été transféré vers les raies latérales. L'interprétation de ce phénomène est le suivant : l'échantillonnage réalisé lors de la TFD peut être comparé à la multiplication du signal réel, de durée infinie, par une fenêtre rectangulaire correspondant au temps d'observation, figure A.1.3.

Pour limiter cet étalement du spectre, il est nécessaire que les valeurs du signal analysé ne varient pas rapidement au début et à la fin de l'intervalle d'échantillonnage.



**Figure A.1.1 –Module du spectre du signal, 4 cycles ont été pris en compte pour l'analyse**



**Figure A.1.2 –Module du spectre du signal, 4,1 cycles ont été pris en compte pour l'analyse**

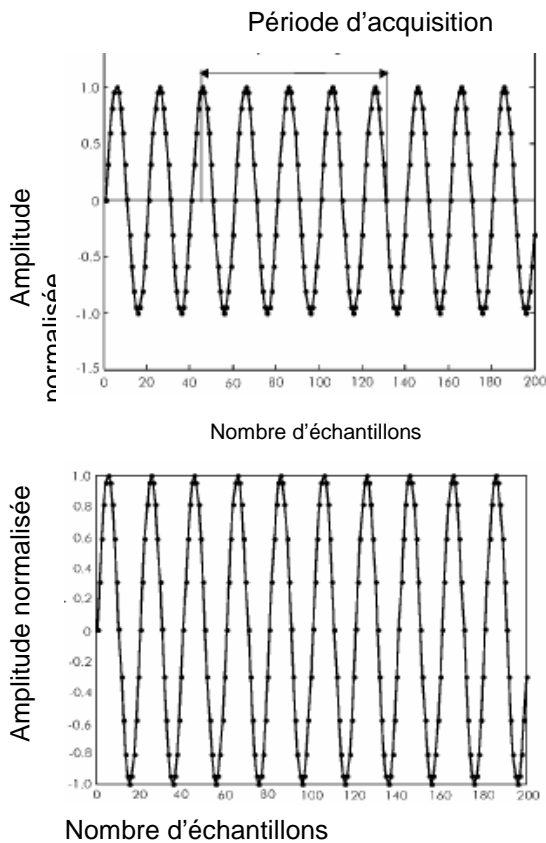


Figure A.1.4a – Acquisition d'échantillons par analyse

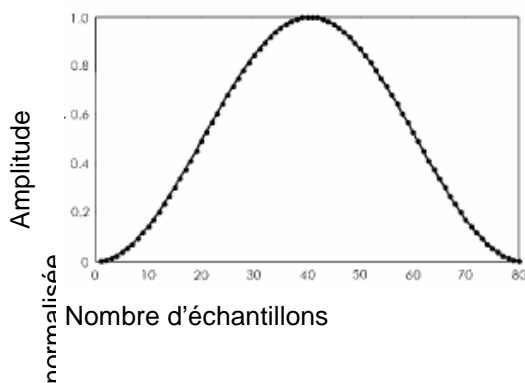


Figure A.1.4c – Analyse de spectre Transformée de Fourier Discrète

Figure A.1.3 – Acquisition d'échantillons pour analyse DFT

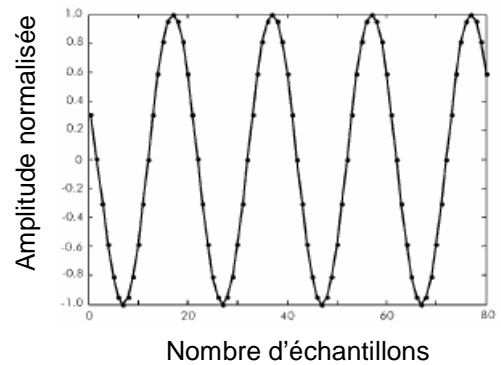


Figure A.1. 4b – Application d'une fenêtre temporelle imposant  $y_i = w_i x_i$   
 Où :  $y_i$  = signal avec fenêtre imposée  
 $x_i$  = échantillons mesurés  
 $w_i$  =fenêtre fonction de la variation de  $i$  de 1 à N (nombre d'échantillons)

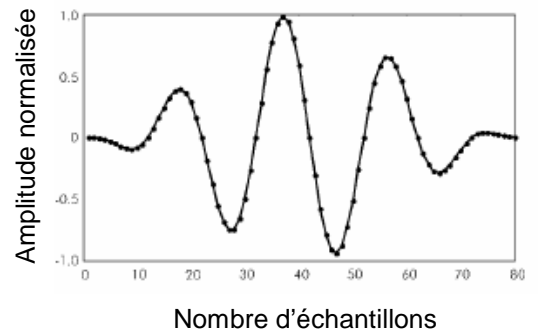
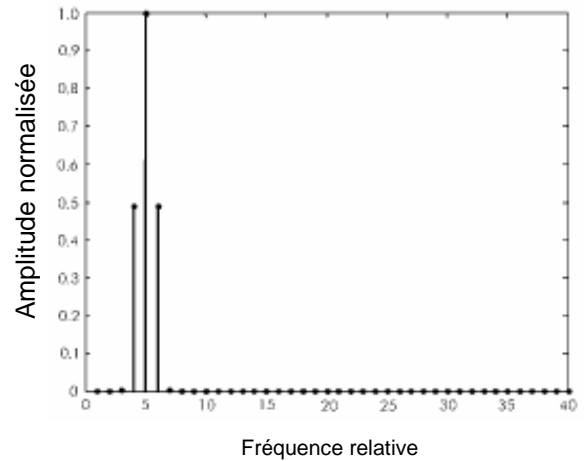


Figure A.1.4d – Analyse de spectre Transformée de Fourier Rapide

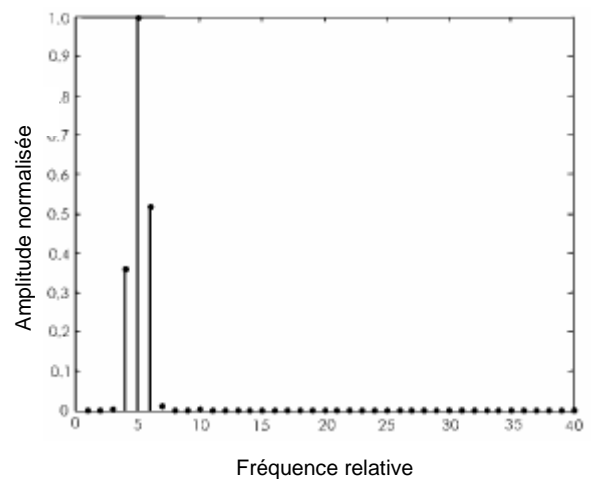
**Figure A.1.4e – Fenêtres de temps utilisées pour l'analyse du signal spectral**



La figure A.1.5 montre comment les différentes méthodes utilisées influencent les résultats sur le spectre de la figure A.1.2. Une fenêtre de Hanning a été utilisée dans cet exemple. Cela permet de minimiser le nombre de raies non nulles et de se rapprocher du spectre exact de la figure A.1.1.

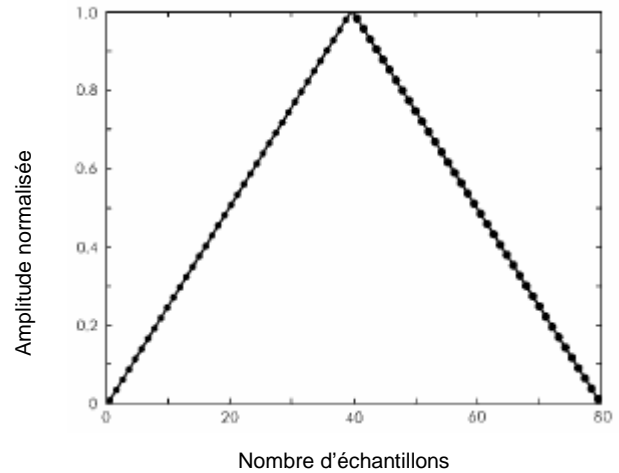
De nombreuses fenêtres pour la TFD sont proposées dans la littérature. Les plus utilisées sont (figure A.1.6) :

- Fenêtre triangulaire dite fenêtre Barlett
- Fenêtre de Hanning
- Fenêtre de Hann, ou fenêtre de Hamming

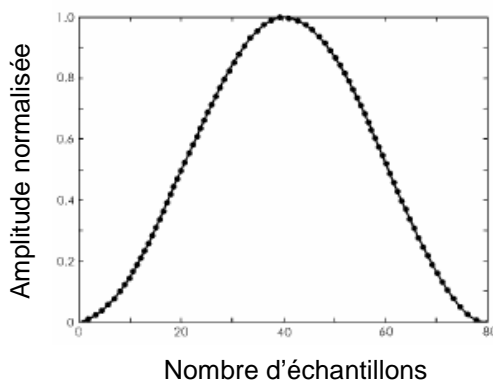


**Figure A.1.5 – Exemple d'application d'une fenêtre de Hamming pour analyse de Transformée de Fourier Discrète**

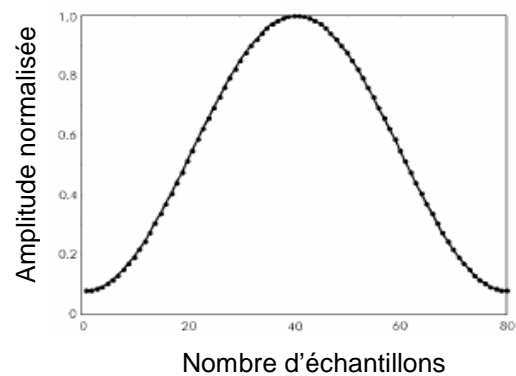
Ces fenêtres sont les plus utilisées dans les appareils de mesure. Le fait de les utiliser n'élimine pas le phénomène d'étalement de spectre mais limite sérieusement les conséquences de l'observation sur un temps fini. Ceci est particulièrement évident en terme d'amélioration de la résolution spectrale.



**Figure A.1.6.a – Fenêtre triangulaire ou de Barlett**



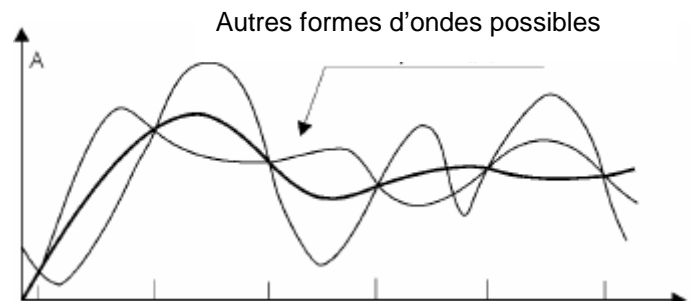
**Figure A.1.6b**



**et A.1.6c – Fenêtres de Hamming**

## 17 Annexe 2

La principale difficulté associée à l'échantillonnage est l'ambiguïté qui en résulte. La nature du problème est illustrée à la figure A.2.1. Il y apparaît clairement que le même jeu de données échantillonnées peut décrire plusieurs formes d'onde, qui ne seront pas différenciées par l'instrument de mesure.



**Figure A.2.1 – Exemples d'ambiguïtés**

Le principe de l'analyse en fréquence consiste en la représentation d'une forme d'onde arbitraire en une somme de séries de fonctions sinusoïdales. Cette façon de présenter les choses permet d'analyser le problème de l'ambiguïté liée quantitativement à l'échantillonnage. A ces fins, considérons la forme d'onde de la figure A.2.2.

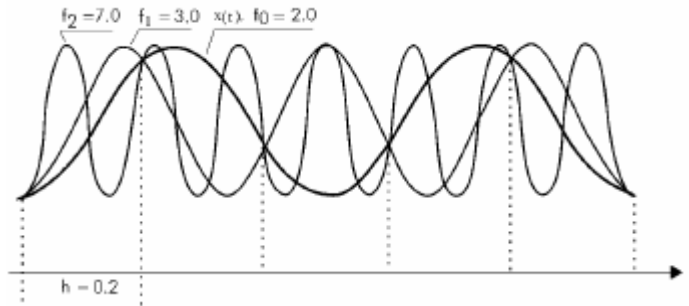


Figure A.2.2 – Analyse de l'ambiguïté

Un signal  $x(t)$  est échantillonné à intervalles de temps régulier  $h$ , qui définit les instants d'échantillonnage, pour lesquels les valeurs du signal mesuré sont représentés sur la figure. Supposons que le signal  $x(t)$  est sinusoïdal de fréquence  $f_0$ . Les mêmes points peuvent représenter des sinusoïdes de fréquences  $f_1$  ou  $f_2$ , qui sont des multiples (pas nécessairement entiers) de  $f_0$ . Ces différentes fréquences sont bien évidemment associées à la période d'échantillonnage. La fréquence  $f_0$  doit être considérée comme la fréquence fondamentale.

Il peut être mathématiquement démontré que la plage de fréquences pour laquelle l'effet d'ambiguïté n'apparaît pas s'étend de  $f_0 = 0$  à  $f_0 = f_N$  où  $f_N$ , le maximum de fréquence, est la fréquence Nyquist. Cela détermine la limite de fréquence de l'échantillonnage de valeur, dite limite de Shannon, derrière laquelle la reconstruction unique d'un signal à temps continu n'est plus possible.

On en déduit que si le signal analysé ne contient aucune composante de fréquence supérieure à  $f_N$ , alors la fréquence d'échantillonnage minimale nécessaire pour permettre au signal échantillonné de représenter le signal réel est donné par :

$$f_s \geq 2f_N, \text{ ou si l'on tient compte du fait que } f_s \geq 1/h, \text{ alors } f_N \geq 1/2h$$

C'est le théorème dit d'échantillonnage. On en déduit que, pour un spectre donné de fréquences, les composantes de fréquences comprises entre  $f_0 = 0$  et  $f_0 = f_N$  peuvent être prises en compte séparément. Si le signal est composé de fréquences  $f > f_N$ , alors ces composantes ne peuvent pas être distinguées. Il est en conséquence nécessaire de limiter la bande passante du signal mesuré afin de limiter une conséquence directe de l'ambiguïté liée à l'échantillonnage. Cela implique de filtrer le signal à mesurer à l'aide d'un filtre passe-bas, avant échantillonnage, afin d'éliminer les fréquences supérieures à  $f_N$ .