

## ASPECTS CONCERNANT LA LIMITATION DES EFFETS DE LA CIRCULATION DES HARMONIQUES DANS LES RESEAUX DE DISTRIBUTION

Silvia-Maria DIGĂ, Denisa RUȘINARU, Andrei Cosmin GRIGORESCU

Université de Craiova, Faculté d'Electrotechnique,  
Boulevard Decebal no.107, 200440 Craiova, Dolj, Roumanie  
Tél./Fax: 0251435781

e-mail: sdiga@elth.ucv.ro, drusinaru@elth.ucv.ro, grigorescu\_cosmin@yahoo.com

**Abstract** – Ce travail a pour but d'effectuer une étude concernant les effets de la circulation des harmoniques supérieures dans un réseau de distribution de moyenne /basse tension et propose une solution de limitation de celles-ci par la quantification des résultats, en utilisant un instrument software d'analyse, dédié et reconnu par son efficacité au niveau de la communauté d'électroénergétique, EDSA Technical.

**Keywords:** harmoniques supérieures, réseaux de distribution, limitation, filtres d'harmoniques, software dédié.

### 1. INTRODUCTION

Après 1989, les pays de l'Europe Centrale et Orientale sont devenus intéressés par l'interconnexion de leurs systèmes électroénergétiques avec UCTE des pays occidentaux. L'intégration des systèmes électroénergétiques est devenue une nécessité économique et politique et correspond à une étape supérieure de fonctionnement des systèmes vastes, interconnectés. Dans ces conditions, les pays de l'Europe Centrale et Orientale tendent vers l'amélioration des techniques de traitement de l'énergie et de la qualité de celle-ci, en aspirant atteindre les standards occidentaux. En ce qui concerne l'interconnexion de SEE roumain avec UTCE, apparaissent certains problèmes concernant la nécessité de l'organisation sur des fondements communs des diverses sociétés d'électricité participantes à l'interconnexion, l'existence d'une dotation technique correspondante pour l'assurance d'une qualité élevée de l'énergie électrique et la limitation de l'extension des incidents d'un système à l'autre. Dans l'analyse des aspects techniques et économiques des sous-systèmes d'un système électroénergétique, on apprécie qu'il existe un danger réel de perte du contrôle des investissements alloués au développement et à la modernisation des installations électroénergétiques, pour couvrir les croissances de consommation (l'aspect quantitatif) en comparaison avec le volume des frais destinés à la qualité de l'alimentation à énergie électrique (l'aspect

qualitatif). Dans une étude EDF on apprécie qu'actuellement les harmoniques représentent 15% des perturbations enregistrées dans les réseaux électriques, le phénomène se développant dans le futur proche jusqu'à la valeur de 50%. D'autres analyses, comme suite des mesures effectuées par des programmes amples de recherche, ont établi que le pourcentage moyen de perturbations harmoniques, du total des différentes perturbations, a dépassé déjà 51% dans des certaines zones des réseaux électriques. On apprécie de plus en plus que la monitorisation et la quantification de la distorsion et de la non symétrie de courant et de tension propagées dans les réseaux électriques, seront obligatoires à l'avenir (dans le futur proche).

Aujourd'hui, avec l'apport de l'électronique intégré dans de nombreux dispositifs électriques, les charges produisent des courants déformés dont l'allure n'est plus sinusoïdale. La valeur efficace d'un signal s'avère aujourd'hui insuffisante pour apprécier la déformation de ce signal. Elle n'est, dans le cas d'un courant, que l'image des effets thermiques de celui-ci, mais ne renseigne pas sur la forme du signal, qui est un critère d'appréciation indispensable actuellement pour une analyse précise de la qualité de l'énergie électrique sur un réseau de distribution de tension.

On peut citer, dès à présent, quelques exemples d'équipements responsables de la déformation des signaux: les convertisseurs de l'électronique de puissance, les machines à souder, les fours à arc, la généralisation des alimentations à découpage, dans l'informatique des secteurs tertiaire et industriel aussi bien que dans les appareils électroménagers, etc.

La circulation des courants harmoniques va contribuer à l'augmentation des pertes par effet Joule dans les conducteurs électriques ainsi qu'à la diminution de facteur de puissance de l'installation, et affecter les équipements raccordés sur l'installation électrique en diminuant leur durée de vie.

On note le surcoût au niveau de la facturation d'électricité que peut entraîner la génération des harmoniques sur une installation électrique, du fait de la diminution du facteur de puissance de celle-ci.

La pollution alors présente sur le réseau de distribution est préjudiciable au bon fonctionnement de tous les récepteurs raccordés sur ce même réseau. De toute évidence, la limitation de la pollution harmonique se concrétise par un travail commun entre les deux partenaires, distributeur et utilisateur. Du côté du distributeur de l'énergie électrique, il est essentiel de fournir une qualité de l'énergie électrique présentant la distorsion la plus faible possible. Du côté de l'utilisateur de cette énergie électrique, il est impératif de s'assurer que les charges polluantes identifiées ne contribuent pas à dégrader la tension du réseau, ce qui serait préjudiciable pour le fonctionnement des autres récepteurs.

## 2. TEXTES ET NORMES DE REFERENCE

Généralement un standard ou une réglementation traite trois aspects principaux :

1. l'introduction de grandeurs de contrôle et la fixation de valeurs limites de celles-ci;
2. la précision des méthodes de mesure et d'évaluation des résultats de la mesure pour la vérification de l'encadrement dans les limites imposées au point 1);
3. la suggestion de moyens qui peuvent conduire à l'encadrement dans les limites prescrites au point 1).

En ce qui concerne les prévisions concernant les harmoniques dans les réseaux de distribution, peuvent être mentionnés: [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8].

Au niveau des divers pays ont été élaborés des standards propres de régime harmonique, qui incluent des limites individuelles d'émission, en tenant compte de conditions et demandes locales. Les conditions actuelles de développement et d'échange de marchandises entre les pays ont conduit à l'intensification des efforts d'élaboration des standards internationaux concernant les harmoniques et les interharmoniques, par exemple, la série de standards dans le domaine de la compatibilité électromagnétique IEC 61000 ou le standard IEEE 519 qui fournit des recommandations seulement sur les harmoniques, sont deux des plus importants documents dans ce domaine.

Les niveaux de compatibilité sont, en général, relatifs à une probabilité qui ne dépasse pas 95% pour un réseau complet, à la base des répartitions qui représentent la variation des perturbations en temps et en espace. Le fournisseur ne peut pas garantir le niveau dans tous les points du réseau et à tout moment. C'est pour ça qu'il est désirable que les niveaux de compatibilité soient évalués pour l'ensemble du réseau ; il n'existe pas de méthode d'évaluation dans un point spécifique. On présente le normatif roumain PE143 [8] qui indique pour les niveaux de compatibilité des tensions harmoniques pour les réseaux de BT et MT, un facteur de

distorsion harmonique totale de tension (THD) de 8%. Le normatif indique aussi les valeurs limites des harmoniques de tension et de courant, en fonction du niveau de tension et respectivement, de la puissance de court-circuit du système en PCC, conformément à CEI 1000-X-X et CEI 61000-2/3-X [2, 3, 9, 10]. Sont présentées les procédures d'évaluation des contributions des charges déformantes dans les nœuds du réseau, mais sont proposées aussi des solutions de limitation des harmoniques et des nonsymétries.

Le principal avantage de ces standards de qualité de l'énergie est le fait que généralement les valeurs indiquées ne prennent pas en considération, l'influence simultanée et réciproque entre le système d'alimentation et consommateur. IEEE 519 Std. inclut pourtant une section relativement nouvelle : *les caractéristiques de la réponse du système*.

Dans le cas des régimes nonsinusoidal ou nonsymétrique, les valeurs des indicateurs sont prescrites individuellement, sans considérer l'effet équivalent. La fixation des limites de nonsymétrie dans le cas d'un régime nonsinusoidal permettrait déterminer des certains régimes de fonctionnement plus avantageux pour les composantes du système.

## 3. LES REMEDES

Avant d'envisager de mettre en place une solution de filtrage pour combattre les harmoniques, il faut s'intéresser au mode de raccordement du récepteur pollueur vis-à-vis de l'installation concernée et vis-à-vis des autres charges présentes sur le même réseau.

En effet, le branchement de la charge non linéaire doit être réalisé, si possible, sur la source présentant l'impédance la plus faible (transformateur le plus puissant par exemple). Lorsque l'impédance de source est faible, la puissance de court-circuit est importante, ce qui réduit les problèmes dus aux harmoniques. Les charges polluantes aussi doivent être raccordées le plus en amont possible de la source afin de bénéficier du niveau le plus élevé de puissance de court-circuit. D'autre part, il faut éviter de raccorder un récepteur sensible à proximité d'une charge déformante. La position du branchement des charges déformantes au sein d'une installation revêt ainsi un double intérêt : assurer la séparation des charges et bénéficier de la puissance de court-circuit la plus élevée. La séparation des sources est aussi une solution employée, bien que coûteuse. Elle consiste à attribuer un transformateur indépendant pour l'alimentation unique de la charge non linéaire. D'autres solutions sont utilisées, notamment dans les convertisseurs d'énergie de type onduleurs ou variateurs de vitesse, mettant en œuvre une inductance en série avec le récepteur déformant (on parle dans ce cas d'inductance de ligne). L'inductance, dont l'impédance augmente avec la

fréquence, conduit à réduire les amplitudes des harmoniques de rangs élevés. Lorsque cette inductance est placée en amont du convertisseur polluant, on observe une diminution sensible des courants harmoniques générés par l'équipement sur le réseau d'alimentation électrique et, par conséquent, du taux de distorsion harmonique en tension.

Une autre solution, utilisée pour la protection des condensateurs de relèvement du facteur de puissance, consiste à placer en série avec le condensateur une inductance appelée *inductance anti-harmonique*. La valeur de la fréquence de résonance de l'ensemble du montage doit être placée en dessous des valeurs de fréquences harmoniques présentes, protégeant ainsi le ou les condensateurs de compensation d'énergie réactive contre les surcharges harmoniques. Le fabricant ABB préconise la valeur de 210 Hz.

L'emploi d'une inductance anti-harmonique présente alors un double intérêt :

- Elle supprime les risques de claquage de condensateur dus aux forts courants harmoniques (rappelons que l'impédance du condensateur diminue avec l'augmentation de la fréquence).
- Elle réduit les taux de distorsion harmonique en tension sur le réseau considéré.

La fréquence d'anti-résonance est placée elle aussi en dehors du domaine des courants harmoniques présents sur ce réseau et l'on doit veiller également à ce que cette fréquence ne corresponde pas à une fréquence de télécommande du distributeur (fréquence de 175 Hz par exemple).

La batterie de condensateurs assure ainsi, pour la fréquence fondamentale (50 Hz), la fonction de compensation d'énergie réactive, tandis que l'impédance élevée de l'inductance limite l'amplitude des courants harmoniques.

Les harmoniques de rang 3, émis principalement par des charges non linéaires alimentées en monophasé (charges informatiques, ballasts d'éclairage, etc.), sont en général bloqués au niveau du circuit aval au transformateur.

Du fait de leur couplage étoile-zigzag ou triangle-étoile, les transformateurs HTA/BT représentent une barrière contre les harmoniques de rang 3.

La mise en place d'un transformateur de séparation, dans le cas d'une installation tertiaire, par exemple, composée de nombreux ordinateurs et matériels informatiques, peut constituer une solution efficace pour éliminer les harmoniques de rang 3, aussi.

La présence de charges déformantes sur de nombreux réseaux industriels nécessite d'apporter les solutions adaptées pour remédier à ces perturbations harmoniques par la mise en œuvre de filtres passifs, actifs ou encore hybrides.

L'augmentation constante de ce type de charges sur les réseaux, associée aux exigences fixées par les distributeurs d'énergie électrique, impose de nouvelles stratégies de la part des fabricants

d'équipements d'électronique industrielle. Les techniques, déjà opérationnelles au sein de nombreux dispositifs sur le marché, mettent en œuvre la technique de modulation de largeur d'impulsion dans les convertisseurs d'énergie électrique (MLI). Ce type de convertisseur est qualifié de propre puisqu'il ne pollue pas le réseau d'alimentation. Il agit en permanence pour réguler et pallier la déformation du signal courant absorbé par la charge en question en réalisant la technique dite du prélèvement sinusoïdal et en reconstituant la sinusoïde courant. Le dispositif nécessite une régulation très rapide rendue possible aujourd'hui grâce aux nouveaux composants de l'électronique de puissance. Lorsque ces convertisseurs sont évolués, ils associent à cette démarche une compensation auto-adaptative du facteur de puissance de l'installation, améliorant ainsi les performances électriques de l'équipement dans sa globalité.

#### 4. ETUDE DE CAS

L'analyse de la propagation des harmoniques, des effets de celles-ci et des moyens de limitation, en utilisant la variante des filtres absorbants, a été effectuée sur un réseau de distribution test, donné dans la Fig.1., qui alimente les consommateurs non linéaires de type des convertisseurs de puissance 6-pulsations et ayant les caractéristiques indiquées au-dessous :

Système : S = 3500 MVA, 110 kV ;

TTU-NL-63: Transformateur de 63 MVA 110/20 kV ;

TTU-NL-2500: Transformateur de 2.5 MVA 20/0.6 kV ;

OL-AL-185: Lignes électriques aériennes de 4 km ;

SA – sources d'harmoniques (10 redresseurs à 6 impulsions), S = 2 MVA;

BC : deux batteries de condensateurs, Q = 5000 kVAR, chacune.

Le consommateur connecté sur les barres de la station, représente la principale source d'harmoniques du réseau, caractérisée par une courbe de courant dont l'allure et le spectre d'harmoniques composantes sont présentés dans la Fig.2.

L'étude a été effectuée en utilisant des modules d'analyse dédiée de l'application EDSA Technical 2000 v.4., implémentée dans le cadre du Laboratoire d'Informatisation des systèmes énergétiques de la Faculté d'Electrotechnique [11].

On a été mis en évidence:

- la répartition sur niveaux de tension du facteur total de distorsion de tension VTHD et son encadrement dans les limites de compatibilité indiquées par [8] ;
- la propagation des harmoniques de courant, de leur répartition sur les éléments de réseau et du facteur total de distorsion de courant ITHD ;
- la réponse en fréquence du système aux différents niveaux de tension ;

- les valeurs des paramètres des filtres absorbants raccordés sur la barre de basse tension ;
- les effets de l'introduction de ces filtres par la comparaison des facteurs de distorsion avec la variante sans filtres ;
- les pertes additionnelles de puissance, déterminées par la circulation des harmoniques supérieures.

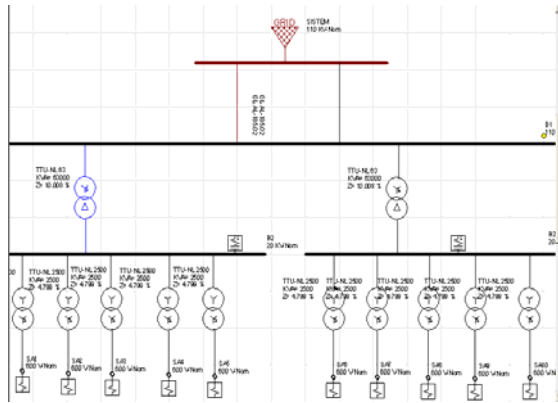
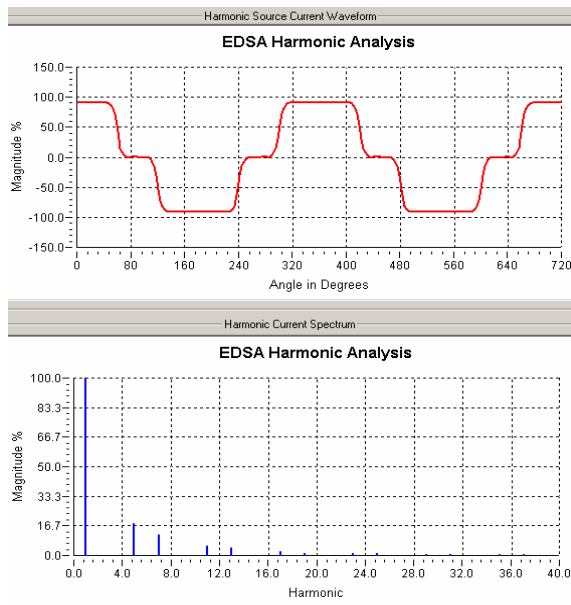
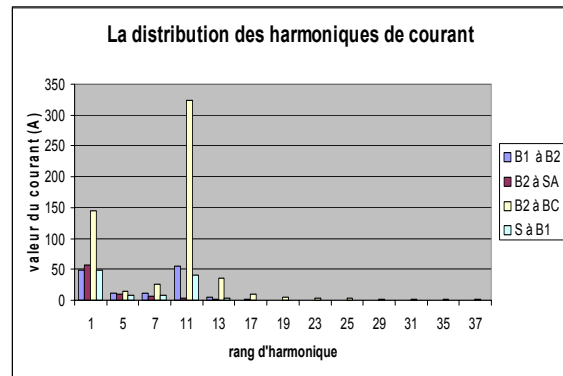


Figure 1 : La configuration du réseau test étudié

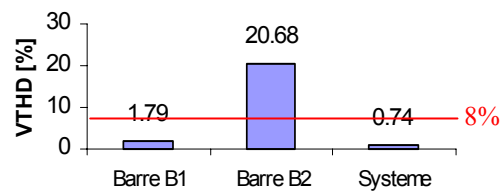
Figure 2 : La courbe de courant et le spectre d'harmoniques de la source d'harmoniques du réseau de type *convertisseur 6 pulses*

Dans la présence des consommateurs non linéaires, pour lesquels le niveau des harmoniques de courant engendrés, est caractérisé par un facteur ITHD = 22,75%, ont été enregistrées les valeurs de la Fig. 3.



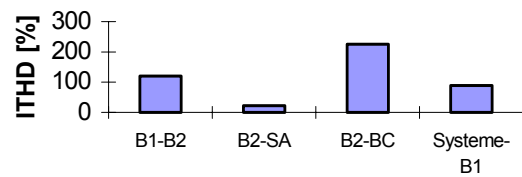
a.

## VTHD avec sources d'harmonique



b.

## ITHD avec sources d'harmonique



c.

Figure 3 : La répartition des harmoniques dans le réseau test– a. La distribution des harmoniques prédominantes de courant sur les côtés du réseau ; b. VTHD dans les nœuds du réseau; c. ITHD sur les côtés du réseau

On constate une situation dans laquelle le caractère fortement déformant des consommateurs raccordés sur les barres de basse tension du réseau test, détermine l'apparition des harmoniques de courant et successivement de tension dont les caractéristiques dépassent intensément les limites de compatibilité admises par PE 143. En plus, la présence de l'installation de compensation du facteur de puissance sollicite excessivement à cause du phénomène de résonance parallèle. La fréquence de résonance :

$$n = \sqrt{\frac{X_L}{X_L}} = \sqrt{\frac{75.74}{0.748}} = 10 \cong 11 \quad (1)$$

va se produire sur l'harmonique de rang 11 sur la barre à laquelle se raccorde la batterie de condensateurs. De la répartition des harmoniques de

courant sur les côtés du réseau on peut observer que celle d'ordre 11 est significative. Dans ces conditions, pour éviter les effets de la résonance de tension aux bornes des batteries de condensateurs, on recommande d'installer des filtres accordés sur la fréquence de l'harmonique 11.

#### 4.1. Le dimensionnement du filtre d'harmoniques

Le taux global de distorsion, comme on a vu des résultats, est supérieur à la valeur imposée par les normes, il faut donc installer un filtre compensateur d'harmoniques. Tenant compte que la résonance est produite sur l'harmonique 11, on va dimensionner le filtre pour l'absorption des harmoniques 11 et 5, qui a une valeur élevée.

La détermination des paramètres  $L$ ,  $C$  du filtre est faite en fonction de :

- la condition de résonance pour chaque harmonique:

$$X_n = \frac{1}{nC\omega} - nL\omega = 0 \quad (2)$$

- la valeur des réactances pour  $f = 50\text{Hz}$ .

$$X_{50} = \frac{1}{C\omega} - L\omega = \frac{U^2}{Qfn} \quad (3)$$

En sachant les valeurs des condensateurs utilisés dans la batterie de condensateurs, on peut calculer la valeur de l'inductance et des réactances (inductives et capacitives) qu'on va utiliser pour le filtre.

**Pour l'harmonique 11 :**

$$L = \frac{1}{121 \cdot \omega^2 \cdot C_e} = 6.978 \text{ mH}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C_e} = 265.266 \Omega \quad (4)$$

$$X_L = \omega \cdot L = 2.192 \Omega$$

$$r = \frac{X_L}{Q} = \frac{2.192}{50} = 0.044 \Omega$$

**Pour l'harmonique 5 :**

$$L = \frac{1}{25 \cdot \omega^2 \cdot C_e} = 34 \text{ mH}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C_e} = 265.266 \Omega \quad (5)$$

$$X_L = \omega \cdot L = 10.611 \Omega$$

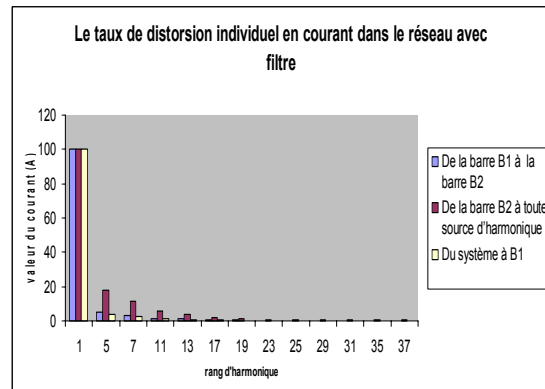
$$r = \frac{X_L}{Q} = \frac{10.611}{50} = 0.212 \Omega$$

où :

$L$  – l'inductance de la bobine du filtre absorbant ;  
 $\omega$  – la pulsation du réseau à la fréquence fondamentale (50 Hz) ;  
 $C_e = 12 \mu\text{F}$  – la capacité équivalente des condensateurs utilisés dans la batterie ;

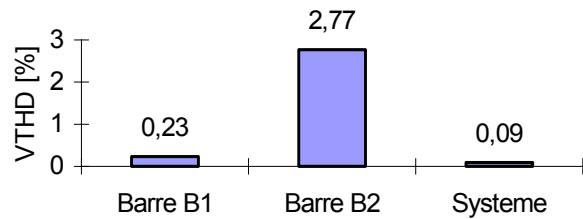
$X_L$ ,  $X_C$  – la réactance inductive, respectivement capacitive du filtre à la fréquence fondamentale ;  
 $Q = 50$  – facteur de qualité.

L'installation du filtre a comme effet la décroissance, sur l'ensemble du réseau, de l'amplitude des harmoniques prépondérantes de courant, mais aussi des taux de distorsion harmonique, sous les limites maximales recommandées par le normatif PE 143 (par exemple 8% pour VTHD), comment on peut l'observer de la Fig. 4.



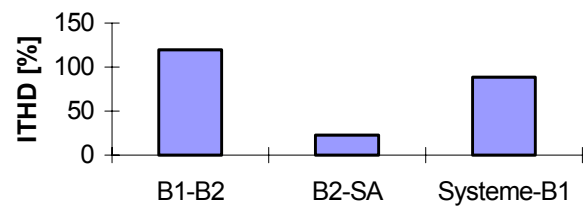
a.

#### VTHD dans le réseaux avec filtre



b.

#### ITHD dans le réseaux avec filtre



c.

Figure 4 : La répartition des harmoniques dans le réseau test dans la présence des filtres d'harmoniques – a. La distribution des harmoniques prédominantes de courant sur les côtés du réseau; b. VTHD dans les nœuds du réseau; c. ITHD sur les côtés du réseau

La simulation du comportement du réseau test pour des différentes variantes de consommateurs – linéaires et nonlinéaires – met en évidence dans le cas des consommateurs qui incluent des convertisseurs 6-pulses (des sources d'harmoniques, SA) des valeurs supplémentaires des pertes de puissance active et réactive, déterminées par les harmoniques supérieures de courant qui transitent le réseau, conformément à la Fig.5.

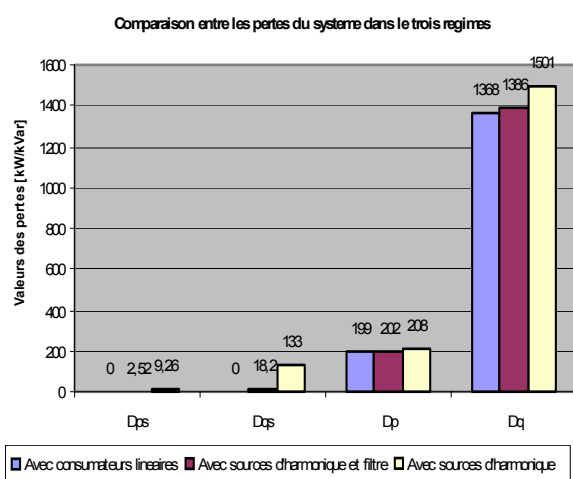


Figure 5 : Les pertes de puissance active, respectivement réactive sur les côtés du réseau dans la variante avec ou sans filtre, par comparaison avec la variante avec consommateurs linéaires

Ces pertes sont diminuées dans la variante de l'utilisation de certains filtres absorbants, correctement dimensionnés, qui conduisent à la réduction du contenu d'harmoniques sur les côtés du réseau. La solution ne représente pas toujours aussi un optimum économique, les installations de filtrage étant plusieurs fois caractérisées par des coûts grands. Il est absolument nécessaire dans ces situations, un calcul technico-économique correct, qui offre une solution efficiente et même avec des effets multiples sur l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique (des compensateurs de puissance réactive, des installations de symétrisation de la charge, etc.).

## 5. CONCLUSIONS

La limitation des perturbations produites par les charges non linéaires connectées dans les réseaux de distribution, est inscrite dans la série des mesures adoptées pour l'optimisation du fonctionnement de ceux-ci.

La solution pour les problèmes liés à l'apparition des harmoniques peut être l'une de nature organisationnelle, consistant dans la reconfiguration des schémas des réseaux d'alimentation, mais plus d'une fois actionne directement sur la cause de ces perturbations: les consommateurs déformants. Dans cette variante, on suit l'adaptation des certains schémas de filtres, ayant pour but la diminution des harmoniques et la limitation de la propagation de celles-ci dans le réseau. Le dimensionnement de ces installations doit avoir en vue aussi d'autres aspects concernant la qualité et l'efficacité de la transmission de l'énergie électrique au consommateur, en suivant la corrélation avec les mesures supplémentaires qui visent ces objectifs ou l'évitement de l'amplification des certains types de perturbations de la qualité de l'énergie électrique. Les configurations usuelles de ces équipements de filtrage ont le rôle d'assurer une injection de

puissance réactive différente, contrôlée, sur chaque phase, en fonction du nécessaire déterminé par mesure (on-line). Un correct dimensionnement des dispositifs de limitation des harmoniques peut assurer en même temps aussi une compensation efficiente de la puissance réactive, mais non conduisant à des résultats spectaculaires en ce qui concerne la réduction des pertes de puissance. Il existe des cas, dans lesquels à cause d'une mauvaise administration du réseau et d'un dimensionnement incorrect des installations de compensation, les effets économiques qu'annulent les avantages techniques offerts par ces dispositifs.

## Bibliographie

- [1] \*\*\* IEC 50(161):1990 [International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - chapitre. 161: Electromagnetic compatibility].
- [2] \*\*\* IEC 1000-3-2:1994, Compatibilité électromagnétique [Partie 3: Limites Section 2: Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils  $\leq 16A$  par phase)].
- [3] \*\*\* IEC 1000-3-6:1996 [Compatibilité électromagnétique Partie 3: Limites Section 6: Evaluation des limites d'émission pour les charges déformantes raccordées aux réseaux MT et HT].
- [4] \*\*\* IEC 1000-4-7:1991 (SR CEI 61000-4-7:2000), Compatibilité électromagnétique Partie 4: Techniques d'essai et de mesure Section 7: Guide général relatif aux mesures d'harmoniques et d'interharmoniques, ainsi qu'à l'appareillage de mesure, applicable aux réseaux d'alimentation et aux appareils qui y sont raccordés.
- [5] \*\*\* SR EN 50160:1998, Les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution.
- [6] \*\*\* IEEE Std 519/1995, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
- [7] \*\*\* UNIPEDA Report on EMC co-ordination in electrical supply systems Norcomp 85, 3rd draft, December 1993.
- [8] \*\*\* PE 143/2001 – Normatif roumain de limitation du régime nonsinusoidal et nonsymétrique.
- [9] \*\*\* IEC 61000-2-2, Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 2: Environment, Section 2: Compatibility Levels for Low-Frequency Conducted Disturbances and Signalling in Public Power Supply Systems.
- [10] \*\*\* IEC 61000-3-2/4: 1994, Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 2/4: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current  $\leq 16 A/\geq 16 A$  per Phase).
- [11] \*\*\* User Guide EDSA Technical 2000, v.3.2, EDSA Microcorporation 2000.