

Etude des perturbations harmoniques des redresseurs en divers régimes de fonctionnement

Harmoniques caractéristiques - harmoniques non caractéristiques

A. AYAD (*), B. DAVAT(**), R. LE DOEUFF (***)

Résumé

Parmi les charges non linéaires qui sont dans la majorité des cas à l'origine des perturbations du réseau, nous avons principalement étudié les redresseurs. Ils sont à la fois générateurs de perturbations, mais sont au même titre susceptibles d'être perturbés par le fonctionnement d'un autre convertisseur. Il apparaît donc pour un équipement donné, un double impératif : limiter d'une part les perturbations générées et accroître d'autre part le niveau d'immunité aux perturbations reçues.

Dans cette étude, nous avons analysé par simulation numérique le fonctionnement de deux redresseurs à thyristors à indices de pulsation différents ($p=6$ et $p=12$).

Pour chacun, les régimes équilibrés et déséquilibrés ont été étudiés. Les déséquilibres qui nous ont intéressés concernaient les f.é.m de la source, les impédances de court-circuit de celle-ci ainsi que la commande des thyristors.

Mots clés : redresseurs, hexaphasé, dodécaphasé, pollution harmonique, caractéristique, non caractéristique, simulation numérique.

Abstract

Among the non linear loads which are in the majority of cases at the mains disturbances causes, we study the rectifiers. These converters are generators of perturbations and are capable to be disturbed by the other converters.

Thus for a given equipment it appears two imperatives : first, the generated perturbations should be limited, and second the immunity level has to be acceptable.

In this study, we have analysed, by numerical simulation, the operating of two SCR rectifiers with different pulse number.

For each one, balanced and unbalanced cases are studied. The unbalanced cases which are studied concern the e.m.f of the mains, its impedances and SCR's control.

Introduction

L'énergie, quelle que soit son origine première, est de plus en plus utilisée sous forme électrique. Cette évolution est liée à la souplesse d'utilisation de cette forme d'énergie dont l'intérêt est grandement fonction de la qualité du produit fourni aux utilisateurs. Cette qualité peut être caractérisée de la façon suivante [1], [2] :

- symétrie des systèmes polyphasés;
- stabilité de la fréquence et de l'amplitude des tensions;
- formes d'ondes des tensions sinusoïdales.

Cependant cette qualité est souvent dégradée par des charges non linéaires raccordées aux réseaux de distribution d'énergie. Le phénomène le plus gênant est donc la prolifération d'appareillages non linéaires tels les arcs électriques, ou les soupapes électroniques. On est alors confronté à l'apparition potentielle de distorsions de tension.

De nombreuses études ont d'ores et déjà été consacrées à l'analyse des perturbations provoquées par les soupapes électroniques des convertisseurs statiques et plus particulièrement à leur influence quand ils fonctionnent en régime classique ou équilibré [3]. Cependant, les résultats de ces travaux ne sont pas entièrement réalistes car ils font appel à trop d'hypothèses simplificatrices. En réalité, les angles de réglage des thyristors ainsi que les sources d'alimentation sont déséquilibrés et ceci malgré toutes les précautions. Jusqu'à présent, beaucoup de publications ont portées sur les régimes classiques de fonctionnement des convertisseurs et les régimes déséquilibrés ont rarement été étudiés. Les déséquilibres que l'on trouve dans la littérature traitent des situations pratiques sur site [5], [6], [7], mais sans aucun calcul numérique généralisé et ils sont limités à quelques cas semi-déséquilibrés mentionnés principalement dans [7].

Cependant, si le mécanisme de production des courants harmoniques caractéristiques est relativement bien connu, en revanche, les mécanismes de production, de transfert et de transformation par les convertisseurs des courants harmoniques non caractéristiques sont d'une analyse plus complexe et n'ont pas encore fait l'objet d'une approche théorique ni numérique approfondie. Le but du présent travail est d'apporter quelques éléments de réponse dans le cas d'un fonctionnement réel ou déséquilibré.

1- Origines et effets des harmoniques

1.1 - Harmoniques caractéristiques

L'analyse des systèmes d'électronique de puissance montre que les redresseurs sont générateurs de courants harmoniques tant du côté alternatif que du côté continu. Dans le cas idéal, on suppose le courant du côté continu parfaitement lissé, ainsi seule l'étude des harmoniques des courants alternatifs est intéressante.

L'étude simplifiée des harmoniques suppose le convertisseur alimenté par une source de tension parfaite d'impédance nulle fournissant des tensions sinusoïdales équilibrées débitant sur un récepteur de courant parfait absorbant un courant redressé parfaitement lissé. Alors il produit des harmoniques de courants de rang $pk+1$, de valeur efficace I_h donnée par l'expression (1) [8].

$$I_h = \frac{I_1}{\sqrt{(h-5/h)}} \quad (1)$$

Ces valeurs changent d'un montage à un autre en fonction de l'indice de pulsation "p" comme l'indiquent les équations (2a et 2b) suivantes :

pour $p=6$:

$$i(t) = K.(\cos \omega t - 1/5 \cos 5 \omega t + 1/7 \cos 7 \omega t - 1/11 \cos 11 \omega t + 1/13 \cos 13 \omega t - \dots) \quad (2a)$$

pour $p=12$:

$$i(t) = K.(\cos \omega t - 1/11 \cos 11 \omega t + 1/13 \cos 13 \omega t - 1/23 \cos 23 \omega t + 1/25 \cos 25 \omega t + \dots) \quad (2b)$$

avec :

$$K = \frac{2 \sqrt{3}}{\pi} I_d$$

1.2 - Harmoniques non caractéristiques

Les irrégularités de fonctionnement d'un convertisseur consécutives aux imprécisions des angles de réglage et aux taux de déséquilibre des tensions d'alimentation, ainsi que des divers déséquilibres dus aux

dispersions sur les impédances des transformateurs de conversion, provoquent les harmoniques non caractéristiques. Ce terme désigne les harmoniques qui ne sont théoriquement pas produits par un convertisseur fonctionnant dans des conditions idéales. On peut cependant prévoir leurs valeurs en fonction de quelques unes des causes qui les génèrent; par exemple leur relation avec l'erreur commise sur l'angle de retard à la commutation, leur relation avec un système alternatif imparfait, ou avec l'association de ces derniers paramètres.

2- Analyse des paramètres

Il existe plusieurs circonstances d'exploitation perturbées des réseaux électriques où apparaissent des régimes déséquilibrés. L'importance de l'étude des déséquilibres tient à ce qu'ils apparaissent dans un certain nombre de régimes d'exploitation normale. Il est donc utile de déterminer les conditions dans lesquelles de tels systèmes peuvent fonctionner sans que la qualité du service fourni par le système en soit trop détériorée.

L'étude des convertisseurs déséquilibrés est d'actualité et les recherches dans ce domaine se sont étendues. Cependant, l'étude analytique de ces systèmes est difficile à mener essentiellement à cause de l'ordre élevé des équations régissant ces systèmes d'une part et de la non linéarité et la dissymétrie de celles-ci d'autre part.

II.1 - Description des structures étudiées

Notre étude va porter sur l'ensemble "source - convertisseur - charge - commande", dont le schéma équivalent est donné figure 1. Nous supposons que les thyristors sont assimilables à des interrupteurs parfaits; ils ne présentent alors que deux états logiques "1" ou "0", selon qu'ils sont fermés ou ouverts. Comme nous tenons compte de l'impédance interne de la source, les commutations se feront avec une période d'empiétement " γ_{Thj} ".

Le convertisseur dodécaphasé considéré dans notre étude résulte de la mise en série de deux ponts hexaphasés P1 et P2 de structure identique. Nous considérons d'abord la modélisation du montage dodécaphasé en régime de fonctionnement optimal, pour lequel les deux ponts triphasés P1 et P2 sont simultanément conducteurs; la modélisation de la structure hexaphasée en fera donc

partie. La commande du système est assurée par un générateur d'impulsions à coïncidence et par un bloc logique de commande qui détermine les groupes des thyristors autorisés à conduire. Ce bloc génère les impulsions sur les thyristors du pont examiné, en comparant des droites d'allumage synchronisées au réseau avec une fonction de commande qui est [9] :

- soit linéaire, et alors les angles de réglage du pont sont égaux;
- soit non-linéaire ou irrégulière et dans ce cas, le pont est déséquilibré et ses angles de réglage sont inégaux.

Pour cette étude nous avons considéré une charge passive "RL".

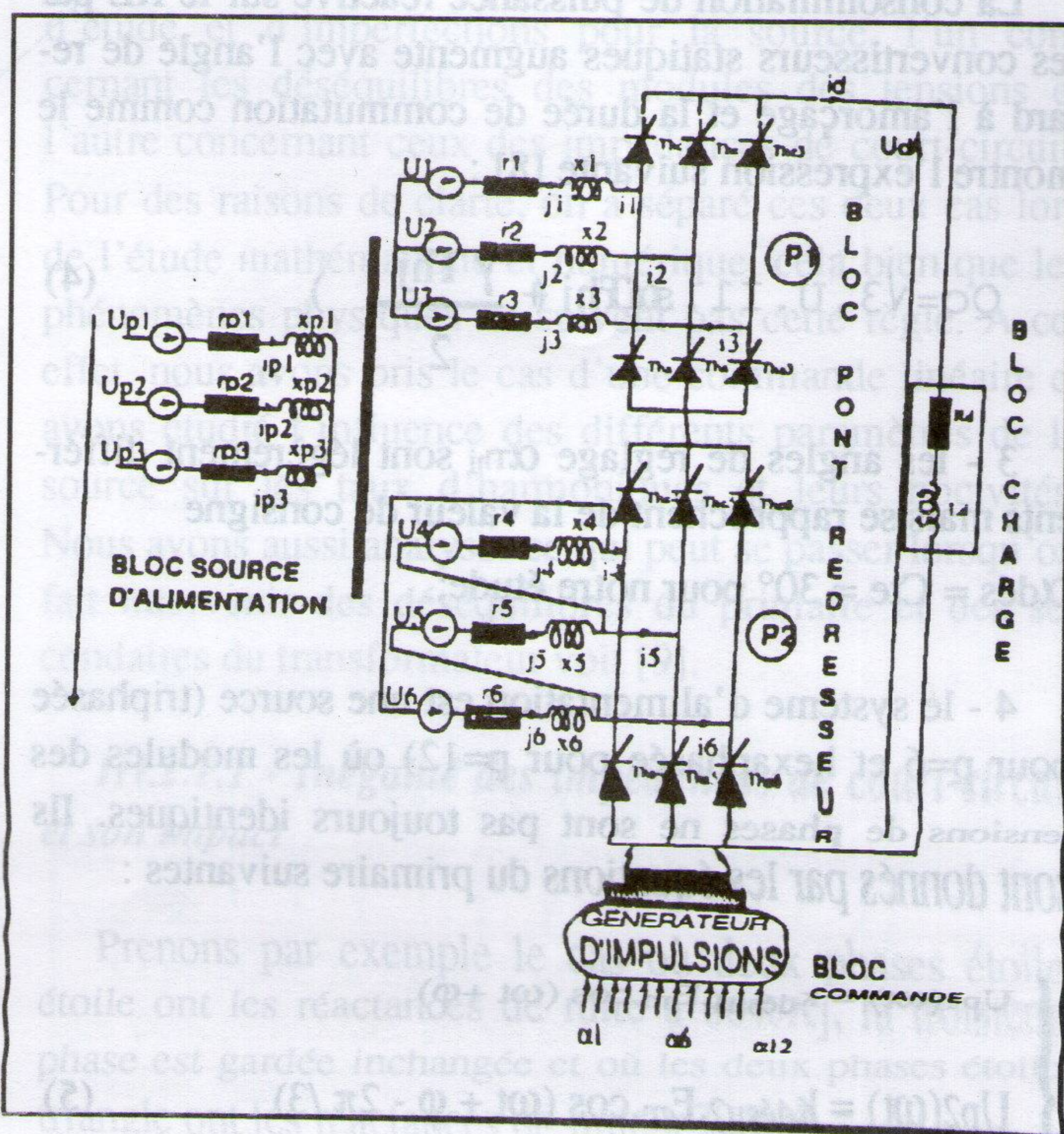


Figure 1 : Schéma de la structure étudiée et modélisée

II.2 - Principales hypothèses d'un système réel

Il est inévitable qu'en pratique un convertisseur ne fonctionne pas dans les conditions idéales et qu'il comporte certaines imperfections. De ce fait pour l'étude du fonctionnement réel d'un pont de Graëtz d'indice de pulsation "p" les réalités suivantes sont observées :

- 1 - l'inductance de charge L_d est finie;
- 2 - les réactances de fuite du transformateur de conversion sont non nulles et ne sont pas parfaitement identiques pour les différentes phases "j", d'où découle des angles de commutation γ_{Thj} inégaux tel que :

$$\gamma_{Thj} = \arccos \left(\cos \alpha_{Thj} - \frac{I_d \cdot \omega \cdot X_j}{\sqrt{3} \cdot E_m} \right) - \alpha_{Thj} \quad (3)$$

X_j : valeur de l'inductance par phase "j" du réseau

Les convertisseurs statiques perturbent le réseau qui les alimente en consommant de la puissance réactive, ce qui provoque une sensible dégradation du facteur de puissance.

La consommation de puissance réactive sur le RE par les convertisseurs statiques augmente avec l'angle de retard à l'amorçage et la durée de commutation comme le montre l'expression suivante [8] :

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_1 \cdot \sin \alpha_{Thj} + \frac{\gamma_{Thj}}{2} \quad (4)$$

- 3 - les angles de réglage α_{Thj} sont légèrement différents mais se rapprochent de la valeur de consigne $\alpha_{dés} = Cte = 30^\circ$ pour notre étude;

- 4 - le système d'alimentation est une source (triphasee pour $p=6$ et hexaphasee pour $p=12$) où les modules des tensions de phases ne sont pas toujours identiques. Ils sont donnés par les équations du primaire suivantes :

$$\begin{cases} U_{p1}(\omega t) = k_{désu1} \cdot E_m \cdot \cos(\omega t + \varphi) \\ U_{p2}(\omega t) = k_{désu2} \cdot E_m \cdot \cos(\omega t + \varphi - 2\pi/3) \\ U_{p3}(\omega t) = k_{désu3} \cdot E_m \cdot \cos(\omega t + \varphi + 2\pi/3) \end{cases} \quad (5)$$

où φ est la phase initiale fixée à $\pi/3$. On introduit la notion de déséquilibre de tension grâce aux coefficients $k_{désuj}$ qui nous permettent de modifier les tensions de source en modifiant l'amplitude de leurs sinusoïdes. Suivant la même logique, pour chacun des cas de déséquilibre étudiés, on a défini un coefficient Δ permettant de quantifier l'écart. Ces écarts que nous désignons par $\Delta\alpha_{Thj}$, $\Delta\gamma_{Thj}$ et $\Delta U_j(\omega t)$ sont non nuls pour un régime réel de fonctionnement.

3 - Divers régimes de fonctionnement et leurs impacts

III.1 - Régime classique de fonctionnement

III.1.1 - Analyse des paramètres d'entrée et de sortie.

Les tableaux 1 et 2 donnent les résultats de simulation des deux ponts pour un comportement idéalisé avec un empiètement constant. Les courants d'entrée du tableau 1 possèdent pour ce cas la même valeur efficace pour toutes les phases. Leurs formes d'onde sont améliorées et montrent qu'elles sont plus proches des ondes sinusoïdales pour le pont dodécaphasé voir figure 2.

Rangs harmoniques	1	11	13	23
Courants des trois phases du primaire	413,3 A	38,42 A	30 A	16,71 A
$\gamma_{Thj} = 1,49^\circ$ $\alpha_{Thj} = 30^\circ$ $\tau_{cp} = 12,34 \%$ $\tau_{cs} = 28,67 \%$				

Tableau 2 : Harmoniques des courants de ligne

L'inductance de la charge étant finie, la tension continue présente une ondulation peu prononcée ainsi qu'une répétition parfaitement régulière d'intervalles $\pi/6$ pour le pont dodécaphasé figure 2.

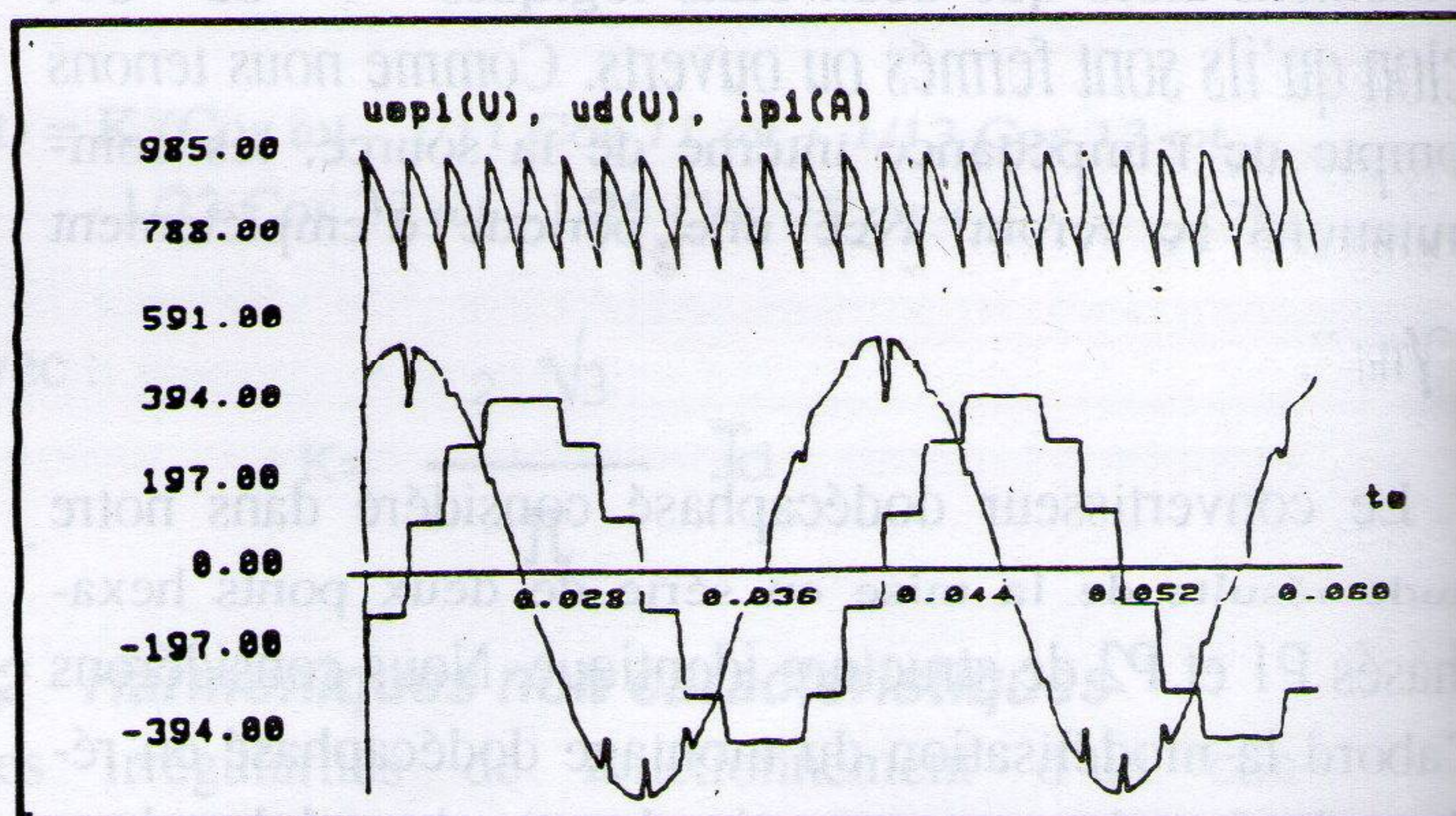


Figure 2 : Allures du courant et tensions

L'inexistence des harmoniques pairs et impairs confirme la parfaite symétrie des alternances des courants d'entrée. on peut donc dire que pour ce cas de fonctionnement, il suffit d'analyser le signal sur une demi-période et le processus se répète systématiquement après.

III.1.2 - Analyse harmonique des paramètres

Désignons respectivement par τ_{cp} et τ_{tp} les taux d'harmoniques des courants et des tensions du côté primaire et par τ_{cs} et τ_{ts} les taux d'harmoniques des courants et tensions au secondaire du transformateur côté P1. Nous avons calculé les différents taux d'harmoniques, du côté amont pour un angle de retard à l'amorçage égal à 30° . Si l'on ne tient compte par exemple que des 23 premiers harmoniques les taux de distorsion harmonique des courant primaires et secondaires sont regroupés dans le Tableau 2.

La détermination des paramètres précédents montre le grand intérêt du spectre harmonique car il renseigne à la fois sur la valeur des U_h et I_h et sur l'importance relative des harmoniques de courant et de tension et par conséquent sur le degré de non sinusoïdalité d'un système. Ce degré est évalué selon le taux de distorsion harmonique global donné par l'expression suivante :

$$\tau_{d hx} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} X_h^2}}{X_1} \quad (6)$$

avec

X_h : le courant ou la tension de l'harmonique de rang h ;

X_1 : le courant ou la tension fondamental;

$\tau_{d hx}$: la grandeur reconnue comme principale caractéristique de la nocivité totale observée sur les paramètres du réseau.

Nous allons présenter dans ce qui suit l'étude de trois régimes déséquilibrés possibles, de la source et de la commande, en déduisant leurs influences sur les principales caractéristiques du système. Cependant, pour estimer les harmoniques produits, nous nous sommes placés dans les conditions du §II.2.

III.2 - Fonctionnement réel

L'objectif de l'étude étant l'obtention d'un spectre de courant réel dans un pont dodécaphasé alimenté par un

transformateur dont les secondaires sont couplés en Y- Δ , nous avons estimé judicieux d'orienter les travaux vers ces trois cas particuliers de fonctionnement. Les problèmes posés par la génération des harmoniques non caractéristiques peuvent être mentionnés grâce à ces derniers. Etant donné que l'on ne peut exprimer dans une seule formule les différents déséquilibres, on a étudié au cas par cas, afin d'observer de près les effets de chacun d'eux.

III.2.1 - Imperfections de la source et son effet

Nous avons jusqu'à présent considéré l'alimentation comme une source de tension idéal, pouvant présenter une parfaite égalité entre ces composants en lignes r_j et X_j .

Pour ce paragraphe, on fera l'hypothèse de deux cas d'étude et d'imperfections pour la source, l'un concernant les déséquilibres des modules des tensions et l'autre concernant ceux des impédances de court-circuit. Pour des raisons de clarté, on a séparé ces deux cas lors de l'étude mathématique et numérique, cela bien que les phénomènes physiques ne suivent pas cette règle. A cet effet, nous avons pris le cas d'une commande linéaire et avons étudié l'influence des différents paramètres de la source sur les taux d'harmoniques et leurs nocivités. Nous avons aussi analysé ce qui peut se passer lorsqu'on fait intervenir des déséquilibres du primaire et des secondaires du transformateur voit [9].

III.2.1.1 - Inégalité des impédances de court-circuit et son impact

Prenons par exemple le cas où deux phases étoile-étoile ont les réactances de fuite à $80\%X_j$, la troisième phase est gardée inchangée et où les deux phases étoile-triangle ont les réactances de fuite à $79\%X_j$.

Les résultats du tableau 3 correspondent à un déséquilibre de un degré sur les angles d commutation. On se fixe généralement une valeur de $\gamma_{Thj(i)}$ que l'on peut approcher par l'étude du cas idéal, puis à l'aide d'un coefficient de déséquilibre $\Delta\gamma_{Thj(i)}$, on provoque l'inégalité des angles $\gamma_{Thj(i)}$. On remarque lors de la décomposition en série de Fourier des signaux d'entrée, l'existence d'harmoniques multiples de trois relativement faibles d'une part.

D'autre part on souligne l'absence total des harmoniques pairs et par conséquent la fonction des para-

mètres d'entrée examinée remplit bien les conditions d'une fonction paire. Le courant se décompose sous la forme d'une somme d'harmoniques de rang $(6k \pm 1 + 3m)$. Qualitativement, on peut donc dire que les parties négative et positive des courants gardent une parfaite symétrie, ce qui se traduit par l'inexistence des valeurs moyennes.

En résumé, on constate donc que la présence d'un déséquilibre sur les impédances secondaires du transformateur ramène le taux d'harmonique de courant de 28,67% (cas idéal) à 28,73%.

III.2.1.2 - Inégalité des tensions de source

Dans la réalité de l'exploitation des réseaux électriques et selon les normes internationales, l'écart entre les modules des vecteurs est généralement limité à 5% de la tension nominale. Le but recherché dans ce régime est d'étudier l'influence d'un déséquilibre en tension sur les paramètres caractéristiques de la source et de la charge. En faisant varier l'un des coefficients du système (5) en provoquant par exemple un déséquilibre sur deux phases de la source tel que la première est réduite de 5% de la tension nominale et la troisième augmentée d'un même écart, les courbes suivantes peuvent alors être tracées figures 3 et 4.

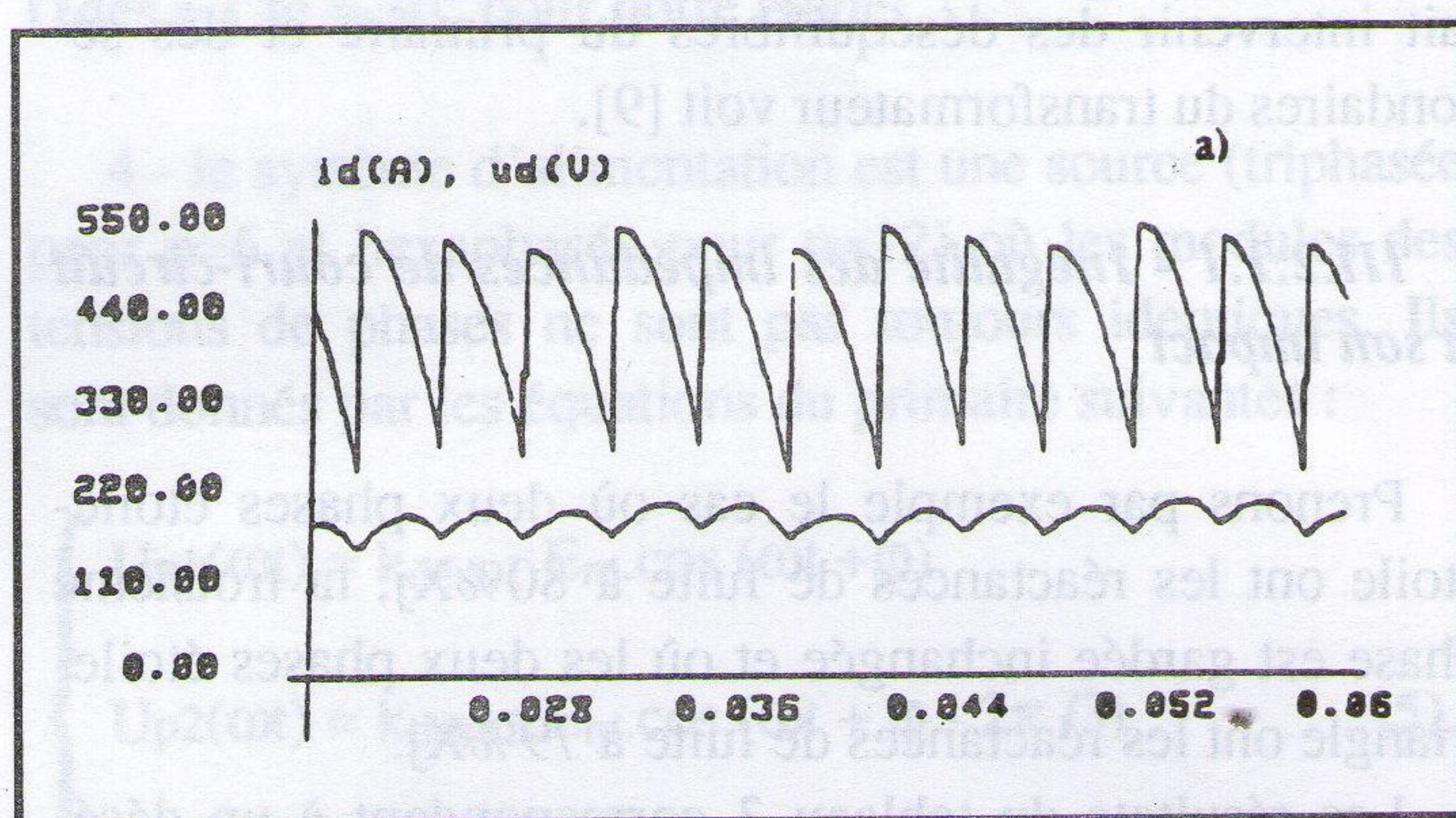


Figure 3 : Tension et courant de sortie pour un pont hexaphasé.

Dans ce cas, le convertisseur joue un rôle analogue à celui d'une source de courant harmonique avec un nombre restreint d'harmoniques non caractéristiques donnés par le spectre de la figure 5. La commande est quand même restée "linéaire". On peut constater aussi l'apparition des harmoniques d'ordre multiple de trois

alors que ce déséquilibre du système d'alimentation ne génère pas d'harmoniques pairs.

Les courbes montrées sont obtenues par simulation. Elles soulignent l'influence des tensions sur les paramètres de sortie ainsi qu'une nocivité très sensible au niveau de la charge. Le courant et la tension redressés présentent une irrégularité nette de sa période de répétition.

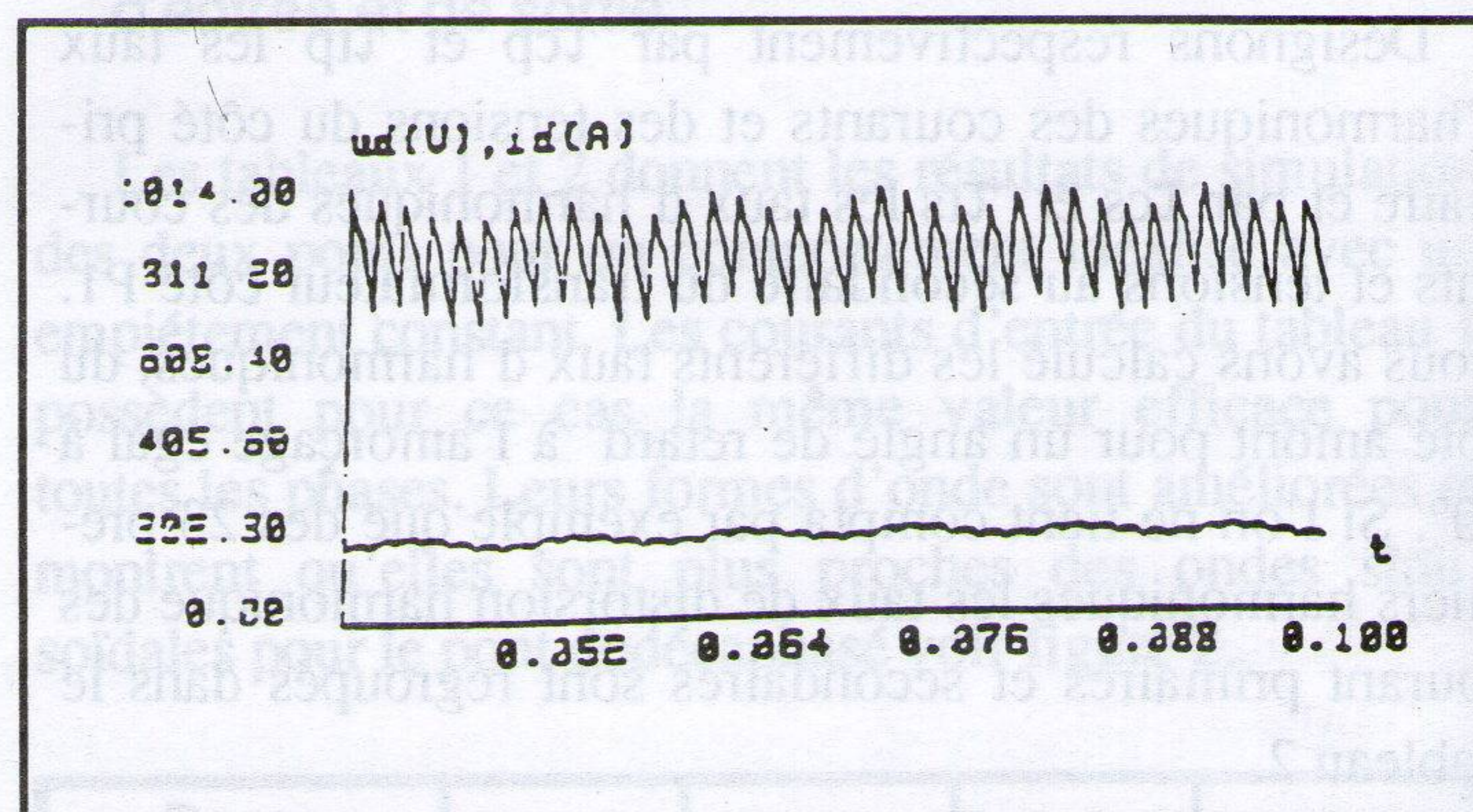


Figure 4 : Tension et courant de sortie pour un pont dodécaphasé

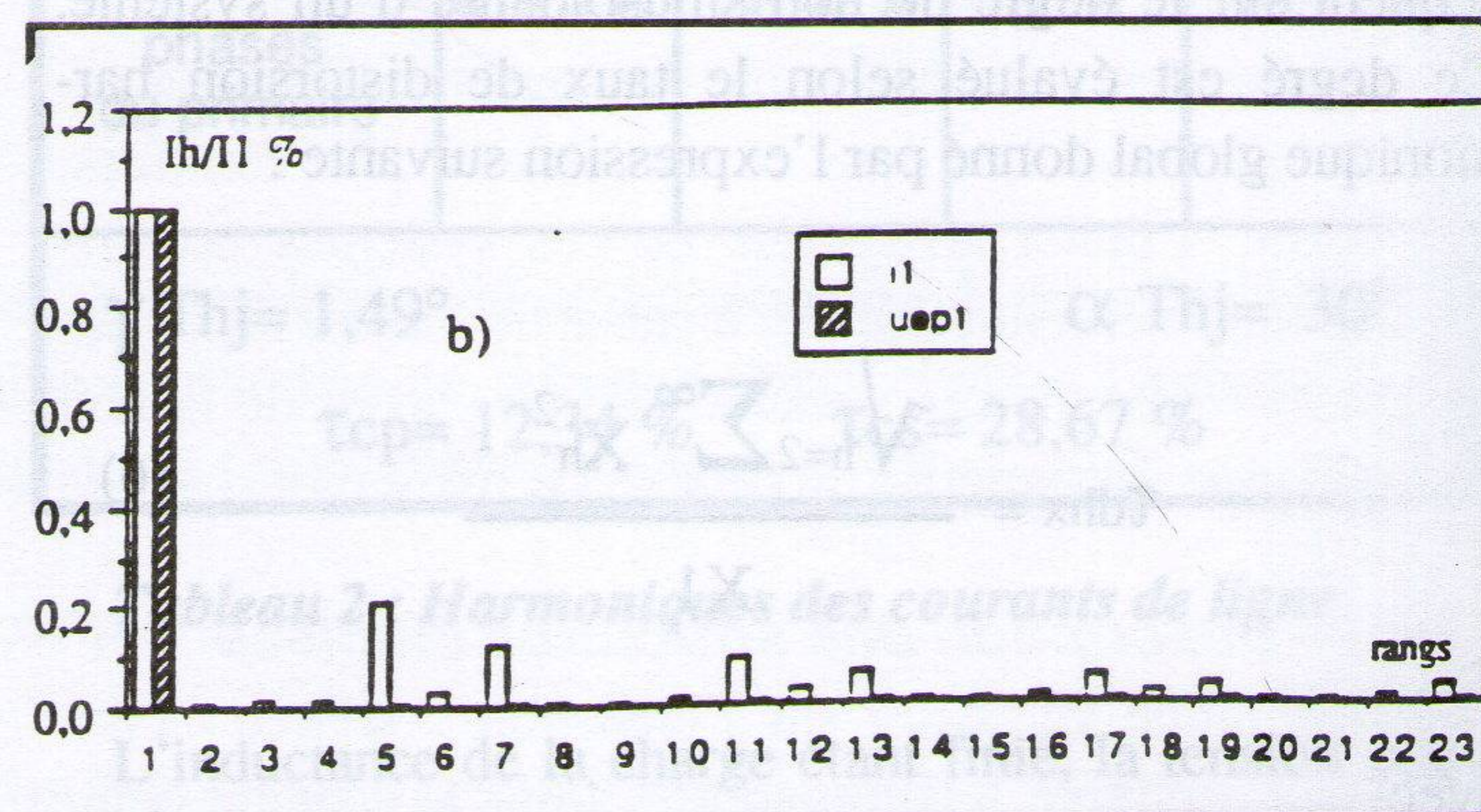


Figure 5 : Spectres du courant et de la tension de source

On constate par ailleurs une diminution des amplitudes des courants primaires ce qui entraîne un léger déséquilibre des courants harmoniques du spectre donc l'inégalité des valeurs efficaces.

L'altération de la sinusoïde de courant entraîne à son tour l'inégalité des angles de réglage fournis par le générateur d'impulsions du pont. ceci est d'ailleurs la principale cause de l'existence des harmoniques multiples de trois.

III.2.2 - Influence de la commande

Dans ce paragraphe nous examinons en détail l'influence de l'inégalité des angles de réglage sur la pollution du réseau électrique. Ce type de fonctionnement pour lequel le problème de la pollution des réseaux électriques a été étudié se pose de plus en plus et peut être traduit par les résultats de simulation donnés par les figures 6 à 9.

En effet, il est intéressant d'étudier si la sensibilité du déséquilibre est la même lorsque la valeur affectée par une variation de l'angle d'amorçage appartient au pont étoile ou au pont triangle. Pour cette étude, on a observé l'effet d'un déséquilibre des angles d'amorçage de chaque pont puis les deux à la fois [9].

Lors de cette étude, nous nous sommes placés dans les conditions d'analyse suivantes :

- Les angles d'amorçages des six valves du pont P1 sont fixés à 30 degrés $\alpha_{Thj}(P1) = 30^\circ$;
- Les angles d'amorçage des trois valves cathodiques du pont P2 sont fixés à 30,2 degrés, soit donc une incertitude de $0,2^\circ$ pour chaque thyristor.

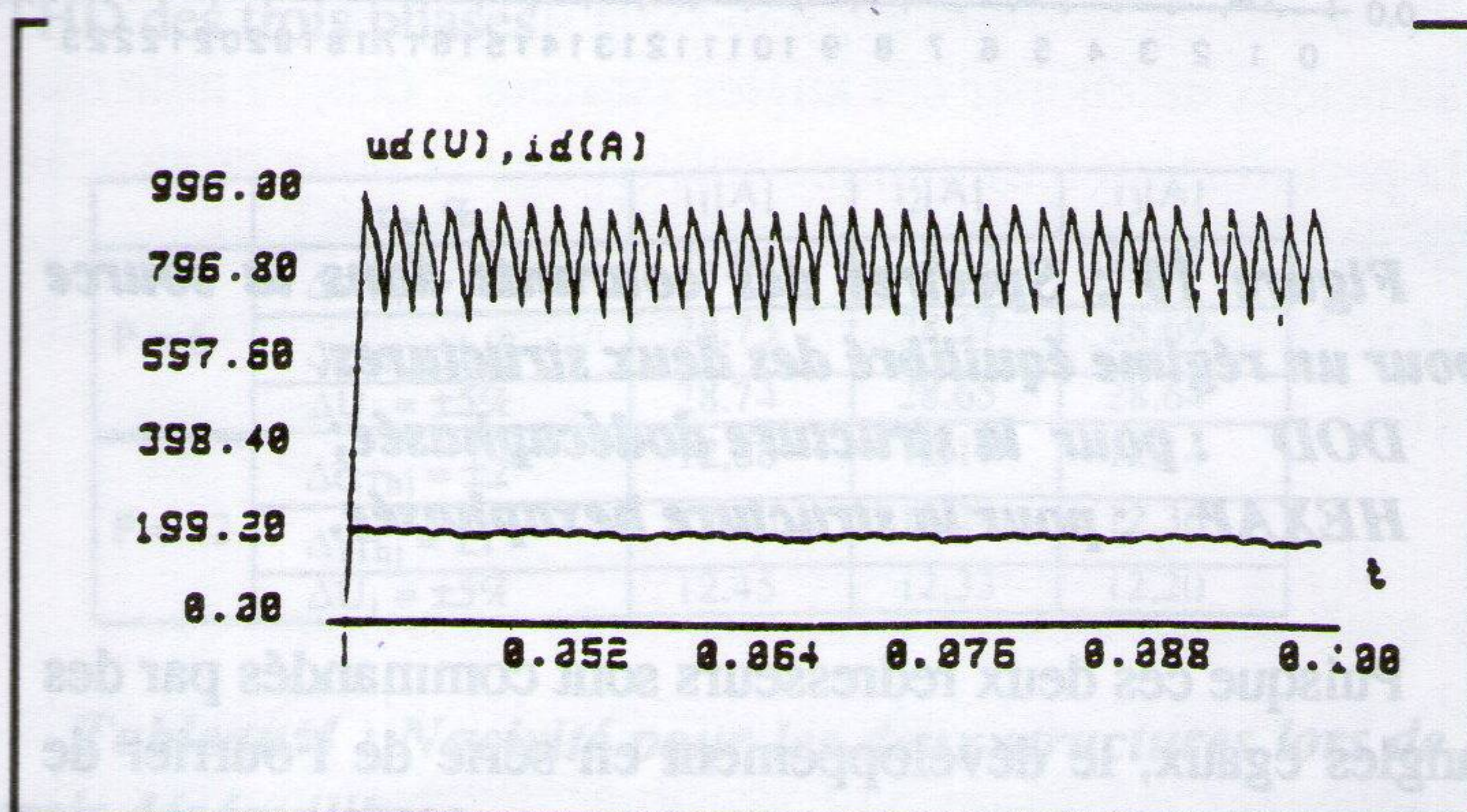


Figure 6: Allures des paramètres de sortie

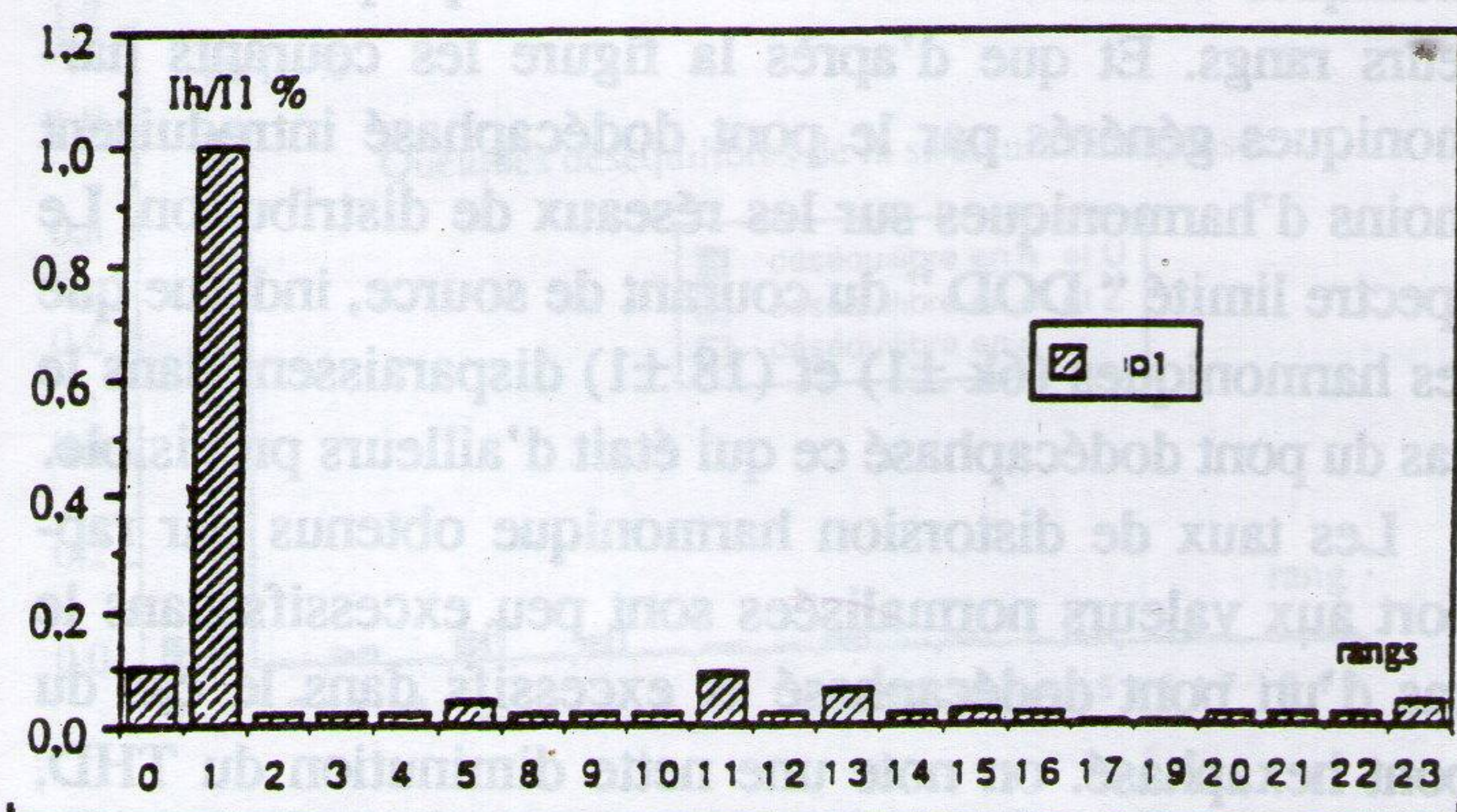


Figure 7: Évolution des harmoniques en fonction d'un déséquilibre en angle de réglage

On peut dès lors observer l'apparition des harmoniques de tout rang ainsi que l'augmentation de l'amplitude de certains harmoniques caractéristiques d'une manière non identique pour trois phases Figure 8. Afin de comparer les valeurs des amplitudes harmoniques dans les trois phases on peut examiner la Figure 9. Les spectres de courants et tensions de la première phase sont donnés par la Figure 7, pour un écart de $\pm 2^\circ$.

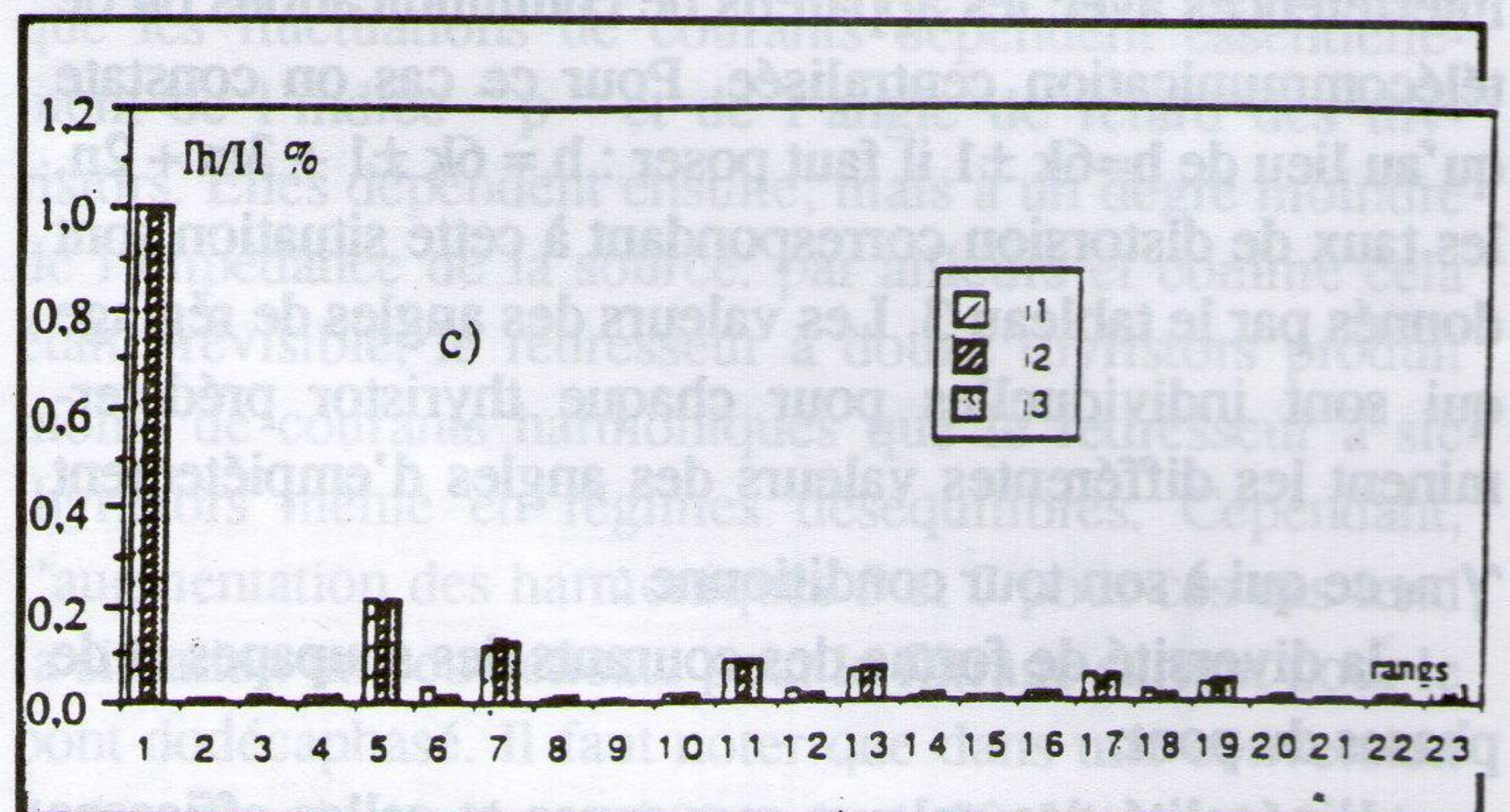


Figure 8 : Evolution des harmoniques en fonction d'un déséquilibre en angle de réglage

La figure 6 montre l'allure du courant et de la tension de charge d'un pont redresseur dodécaphasé contrôlé avec le déséquilibre examiné. Le taux de distorsion harmonique du courant d'entrée $i_{p1}(t)$ est estimé à 12,68%. On a aussi obtenu des courants différents pour les trois phases de la source Figure 8, sur cette figure, nous observons les différents harmoniques significatifs générés lors d'un déséquilibre sur les thyristors cathodiques du pont P2.

Cependant, la figure 7 montre la grande dégradation que peut provoquer un tel déséquilibre. Une composante continue apparaît dans le courant absorbé, ainsi qu'une dissymétrie respectif des alternances positives et négatives.

On a remarqué que dans certains des cas examinés (non publiés), les courants harmoniques non caractéristiques peuvent être du même ordre de grandeur que les harmoniques caractéristiques et donc influencer la conception du filtrage. Les harmoniques pairs sont toutefois les plus dangereux, car ils interfèrent sur les alternances positives et négative de l'onde de courant. De même la présence d'une composante continue, au delà d'une certaine valeur, peut contribuer à la saturation du transformateur d'alimentation. Ceci peut entraver le fonc-

tionnement correct de certains types de charges et peut même endommager certains matériels du réseau. La distorsion harmonique de tension peut donner lieu à des problèmes de différentes natures tels que la surcharge des condensateurs de compensation de la puissance réactive, la surchauffe des enroulements des transformateurs, des machines tournantes, des câbles. Elle est aussi la cause du mauvais fonctionnement des circuits à thyristors, des interférences avec les appareils de communications ou de télécommunication centralisée. Pour ce cas on constate qu'au lieu de $h=6k \pm 1$ il faut poser : $h = 6k \pm 1 + 3m + 2n$, les taux de distorsion correspondant à cette situation sont donnés par le tableau 3. Les valeurs des angles de réglage qui sont individuelles pour chaque thyristor déterminent les différentes valeurs des angles d'empiètement γ_{Thj} ce qui à son tour conditionne :

- la diversité de forme des courants des soupapes et de phases du pont;
- l'inégalité des valeurs moyennes et celles efficaces de ces courants;
- la distinction des valeurs de la tension redressée devant celle du cas classique.

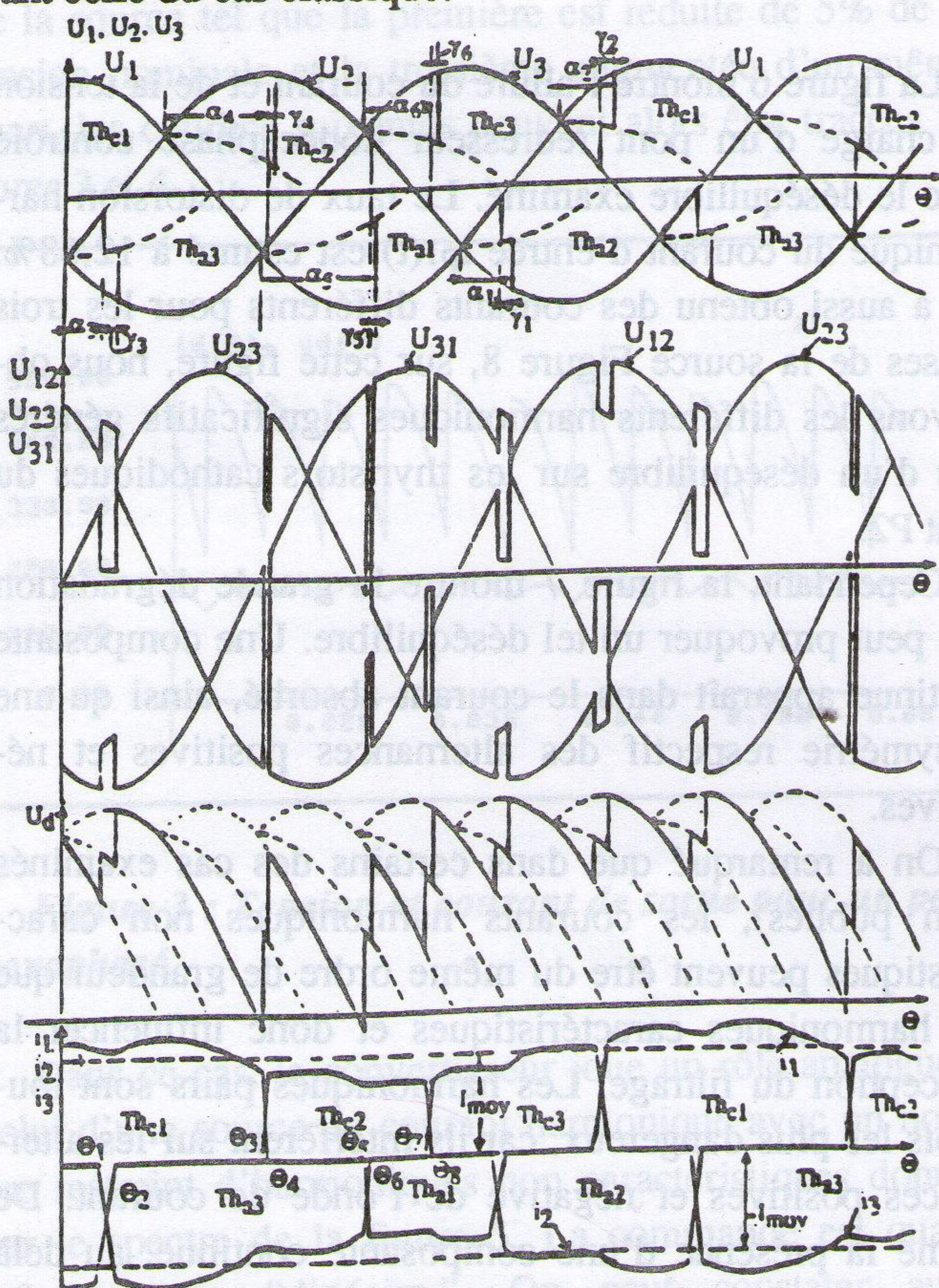


Figure 9 : Effet d'une situation réelle sur les différents paramètres

IV - Comparaison des deux montages

IV.1 - Comparaison des régimes équilibrés

Le résultat de la comparaison des deux ponts étudiés pour un régime classique de fonctionnement est présenté sur la figure 10. Le réseau alimentant ces convertisseurs contient des harmoniques de courants de fréquences $(pk+1)fr$, indésirables car ils constituent l'une des origines des fluctuations et des perturbations des tensions. Il faut cependant noter qu'indépendamment de la structure examinée le spectre de courants obtenus reste conforme à la théorie et ne contient que des harmoniques caractéristiques.

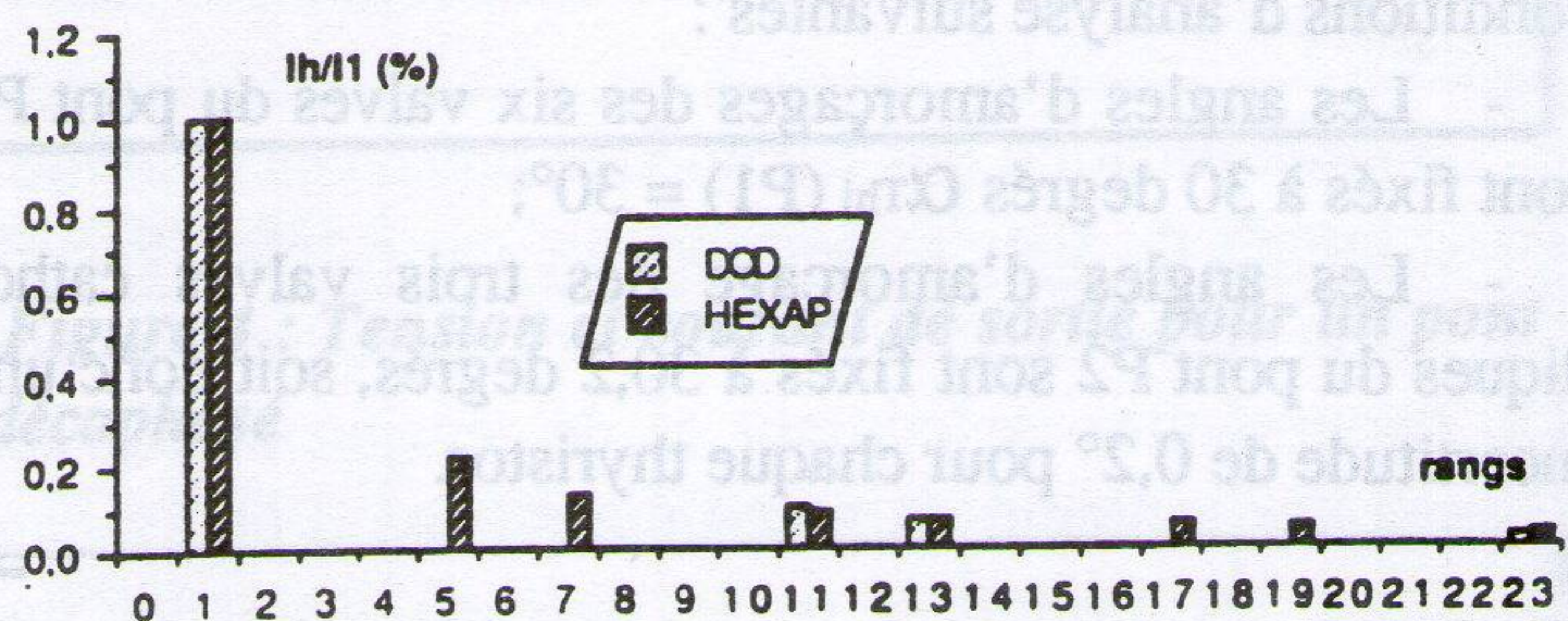


Figure 10 : Spectres des courants dans la source pour un régime équilibré des deux structures.

DOD : pour la structure dodécaphasée;
HEXAP : pour la structure hexaphasée.

Puisque ces deux redresseurs sont commandés par des angles égaux, le développement en série de Fourier de leurs courants d'entrée s'écrit comme l'indique le système d'équations (2). On a constaté que les harmoniques existant étaient inversement proportionnels à leurs rangs. Et que d'après la figure les courants harmoniques générés par le pont dodécaphasé introduisent moins d'harmoniques sur les réseaux de distribution. Le spectre limité "DOD" du courant de source, indique que les harmoniques $(6k \pm 1)$ et (18 ± 1) disparaissent dans le cas du pont dodécaphasé ce qui était d'ailleurs prévisible.

Les taux de distorsion harmonique obtenus par rapport aux valeurs normalisées sont peu excessifs dans le cas d'un pont dodécaphasé et excessifs dans le cas du pont hexaphasé. on note une nette diminution du THD, puisque celui-ci passe de 28,67% pour le pont hexaphasé à 12,34% pour celui dodécaphasé, donc un net avantage pour le choix technique de la deuxième structure.

IV.2 - Comparaison des régimes déséquilibrés

Le mécanisme de base du pont déséquilibré induit des déformations aussi bien sur les grandeurs absorbées que sur ceux débitées. L'influence de chaque structure sur les courants de source pour les deux régimes les plus perturbant s'obtient facilement en considérant le Tableau 4.

Suivant le régime de fonctionnement, les deux structures présentent plusieurs divergences aussi bien en ordre harmonique qu'en nocivité du courant, bien que les résultats soient concordants pour les mêmes hypothèses de calcul. L'analyse montre qu'il y a une similitude sur les ordres harmoniques existants pour un même type de déséquilibre. Bien que l'on ne puisse pas comparer les différents déséquilibres entre eux, on peut toutefois tirer la conclusion suivante : un déséquilibre sur les angles a des effets néfastes sur le spectre de courant et seule l'optimisation des circuits de commande des générateurs d'impulsions permet de les limiter. Le premier déséquilibre du tableau 4 provoque une nocivité importante sur le fonctionnement, comme le montre l'écart entre les THD des trois phases.

	$\tau_{hd} \%$	$i_1[A]$	$i_2[A]$	$i_3[A]$
P = 6	$\Delta\alpha_{Thj} = \pm 2^\circ$	29,01	28,52	28,47
	$\Delta\gamma_{Thj} = \pm 1^\circ$	28,73	28,57	28,69
	$\Delta U_j = \pm 5\%$	28,74	28,65	28,64
P = 12	$\Delta\alpha_{Thj} = \pm 2^\circ$	12,68	12,19	12,14
	$\Delta\gamma_{Thj} = \pm 1^\circ$	12,40	12,24	12,36
	$\Delta U_j = \pm 5\%$	12,45	12,33	12,20

Tableau 4 : Nocivité pour les deux structures lors de trois déséquilibres.

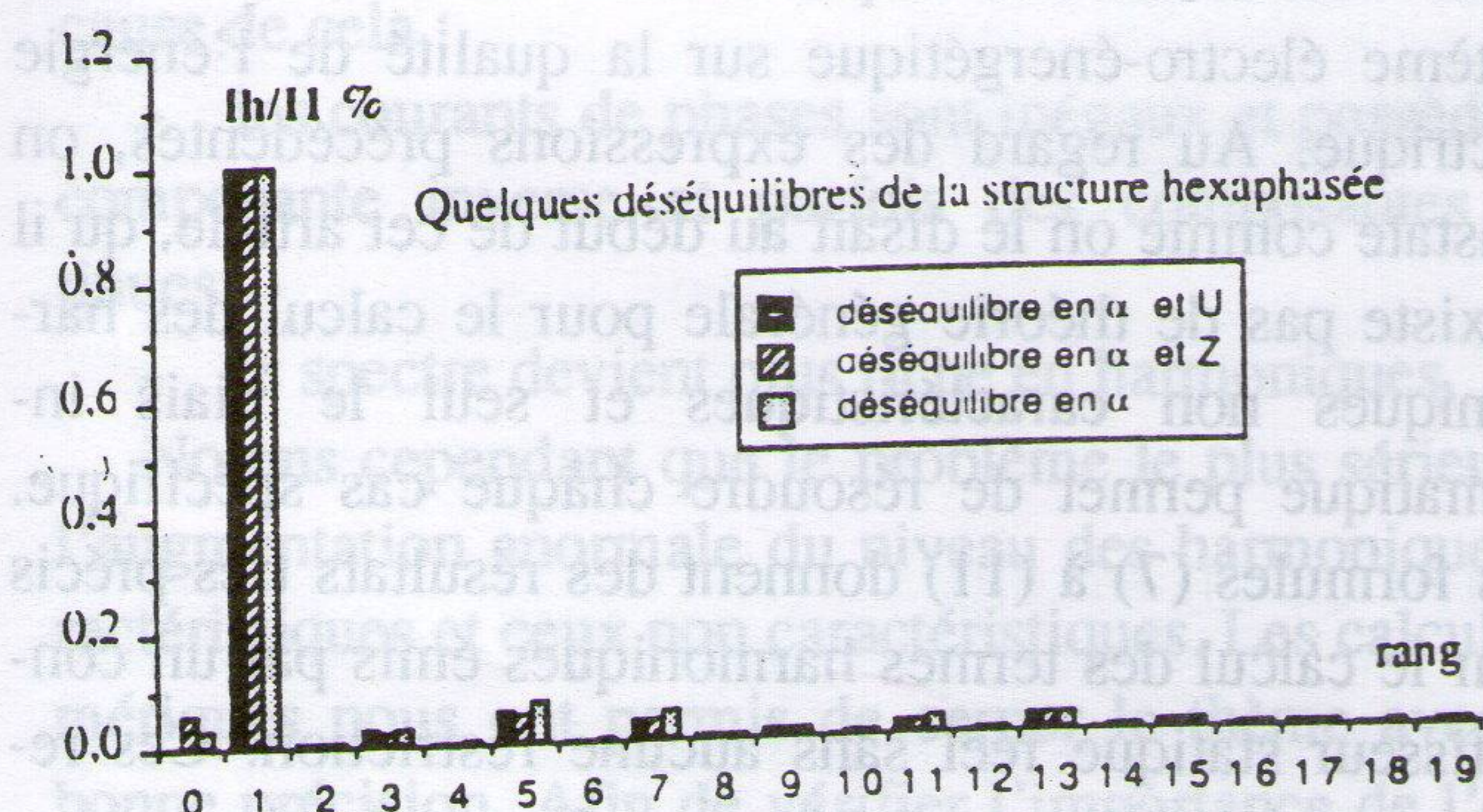


Figure 11 : Spectres comparatifs des résultats obtenus pour les deux structures lors de quelques déséquilibres.

Tous les harmoniques caractéristiques "h" de courants présents sur la Figure 11 varient en $1/h$. on note par ailleurs sur cette même figure l'apparition des composantes continues. Les amplitudes théoriques données par l'expression (1) caractérisent principalement ces deux structures et restent valables pour tous les cas de déséquilibre.

Il faut souligner aussi comme l'indique le tableau 4 que les fluctuations de courants dépendent essentiellement de l'indice "p" et de l'angle de retard des thyristors. Elles dépendent ensuite, mais à un degré moindre de l'impédance de la source. par ailleurs et comme cela était prévisible, le redresseur à douze thyristors produit moins de courants harmoniques que le redresseur à six thyristors même en régimes déséquilibrés. Cependant, l'augmentation des harmoniques 5 et 7 pour ces cas rend la situation un peu délicate pour le filtrage surtout pour le pont dodécaphasé. Il faut noter que dans une conversion dodécaphasée un écart $\Delta\alpha_{Thj}$ de $\pm 2^\circ$ fait atteindre les 5ème et 7ème harmoniques respectivement jusqu'à 1,43% et 0,72% du fondamental.

Il conviendrait donc d'éliminer ces harmoniques qui sont inexistantes lors du fonctionnement classique, mais qui en revanche, prennent une amplitude non négligeable lors d'un déséquilibre des angles des ponts P1 et P2.

Pour résumer la comparaison des résultats obtenus pour les différents modes de fonctionnement, on peut souligner l'existence des harmoniques non caractéristiques. Ces harmoniques sont plus importants pour le mode de commande non linéaire et pour le régime totalement déséquilibré [9]. Dans le cas du fonctionnement avec une commande non linéaire, les harmoniques de fréquences $(pk \pm 1)fr$ sont prédominants, tandis que dans le cas de cette même commande mais avec une source légèrement déséquilibrée en impédance, pour certaine phase, ils pourraient être moins importants.

V - Décomposition en série de Fourier

Les problèmes posés par les harmoniques retiennent de plus en plus l'attention des industriels et des universitaires. L'analyse des résultats se fait en fonction du but recherché en utilisant la transformée de Fourier ou "FFT". L'analyse des courants d'un système Réelle ou idéalisé "S.R.I" constitue une partie importante de

l'étude des perturbations harmoniques des ponts déséquilibrés.

V.1 - Ordres et amplitudes des harmoniques

Nous avons suffisamment insisté sur la difficulté qu'il y a à calculer les harmoniques non caractéristiques; cette difficulté est due au fait qu'en régime déséquilibré les courants deviennent dissymétriques. Néanmoins, ils restent périodiques et peuvent donc se mettre sous la forme exponentielle (1). D'après les résultats numériques, le courant de source $i_j(t)$ contient en plus des harmoniques caractéristiques, des harmoniques non caractéristiques "pairs et impairs" de rang "h" que l'on peut exprimer par l'équation suivante :

$$h = \begin{cases} pk \pm 1 \\ 3m \\ 2n \end{cases} \quad (7)$$

On peut donc présenter différemment les expressions réelles de la décomposition en séries de ces courants et écrire pour un cas général la dépendance des coefficients de Fourier par phase "j" du réseau triphasé, des angles de réglage " α_{Thj} " et de commutation " γ_{Thj} " comme suit :

$$\left\{ \begin{aligned} A_{hj} &= K \left(\frac{\sin(h\gamma_{Thj}/2) \sin(h+1)}{h+1} \cdot (\alpha_{Thj} + \gamma_{Thj}/2) \right) \\ &\quad - K \left(\frac{\sin(h-1)\gamma_{Thj}/2 \sin(h-1)}{h-1} \cdot (\alpha_{Thj} + \gamma_{Thj}/2) \right) \\ B_{hj} &= K \left(\frac{\sin(h+1)\gamma_{Thj}/2 \cos(h+1)}{h+1} \cdot (\alpha_{Thj} + \gamma_{Thj}/2) \right) \\ &\quad - K \left(\frac{\sin(h-1)\gamma_{Thj}/2 \cos(h-1)}{h-1} \cdot (\alpha_{Thj} + \gamma_{Thj}/2) \right) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

avec $K = \frac{2}{\pi \cdot h} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot E_m}{X_j} \sin \frac{\pi}{3}$

De même pour un S.R.I, le courant de source $i_j(t)$ peut s'écrire aussi :

$$i_j(t) = A_{0j} + A_{1j} + \sum_{h=2}^{\infty} [A_{hj} \cos(h\omega t) + B_{hj} \sin(h\omega t)]$$

h n'est plus égal seulement à " $pk \pm 1$ " mais sera donné par l'expression (7). La valeur efficace de chaque harmonique sera alors donnée par :

$$I_{hj} = \sqrt{B_{hj}^2 + A_{hj}^2} \quad (10)$$

Evidemment cette forme d'écriture est plus avantageuse et nous permet une meilleure interprétation des résultats présentés. L'intérêt porté sur l'harmonique industriel A_{1j} permet la détermination de la relation énergétique optimale de l'état du réseau grâce à l'expression suivante :

$$P_{1j} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} (1 - \frac{\gamma_{Thj}^2}{24}) \cdot I_d \quad (11)$$

L'équation (9) donne chaque harmonique en fonction des angles de commutation et ceux de réglage. Il est donc astucieux de choisir ces angles (surtout " α_{Thj} ") telle que la perturbation harmonique soit réduite et nous rapproche le plus du régime nominal. La composante continue A_{0j} et le terme fondamental A_{1j} sont alors fonction de ce régime.

II.2.2 - Analyse spectrale des courants

Une analyse harmonique rigoureuse permet, non seulement de déterminer l'origine des harmoniques caractéristiques et non caractéristiques, mais aussi d'expliquer l'influence des imperfections des éléments d'un système électro-énergétique sur la qualité de l'énergie électrique. Au regard des expressions précédentes, on constate comme on le disait au début de cet article, qu'il n'existe pas de théorie générale pour le calcul des harmoniques non caractéristiques et seul le biais informatique permet de résoudre chaque cas spécifique. Les formules (7) à (11) donnent des résultats très précis pour le calcul des termes harmoniques émis par un convertisseur statique réel sans aucune restriction. Ces relations sont d'ailleurs valables pour le cas classique moyennant les hypothèses définies au §II.2. Elles montrent alors que le cas classique n'est qu'un cas particulier d'une situation réelle où les écarts sont bien limités.

Cas	Amplitudes harmoniques des courants [A] et des tensions [V]																			τ %		
	rangs	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		18	19
$\Delta\alpha(i)=0$	i1	-	211.1	-	-	-	44.6	-	27.4	-	-	-	19.1	-	15	-	-	-	12.1	-	10.3	28.67
	i2	-	211.1	-	-	-	44.6	-	27.4	-	-	-	19.1	-	15	-	-	-	12.1	-	10.3	28.67
$\Delta\chi(i)=0$	i3	-	211.1	-	-	-	44.6	-	27.4	-	-	-	19.1	-	15	-	-	-	12.1	-	10.3	28.67
	uep1	-	533.8	-	-	-	7.3	-	6.25	-	-	-	6.85	-	6.38	-	-	-	6.72	-	6.41	3.30
$\Delta U(i)=0$	uep2	-	533.8	-	-	-	7.3	-	6.25	-	-	-	6.85	-	6.38	-	-	-	6.72	-	6.41	3.30
	uep3	-	533.8	-	-	-	7.3	-	6.25	-	-	-	6.85	-	6.38	-	-	-	6.72	-	6.41	3.30

$\alpha_{des}(i) = 30^\circ$ $\chi(i) = 1,53102^\circ$ $i_{dm} = 195,38A$

Tableau 1: Amplitudes et taux de distorsion harmonique des trois phases du pont hexaphasé P1

Cas	Amplitudes harmoniques des courants [A] et des tensions [V] .																			$\tau\%$		
	rangs	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		18	19
$\Delta\alpha(i)=0$	i1	-	211	-	0.3	-	45	-	27.2	-	0.25	-	19.22	-	14.9	-	0.25	-	12.24	-	10.23	28.73
	i2	-	211.41	-	0.45	-	44.41	-	27.6	-	0.46	-	18.84	-	15.3	-	0.46	-	12	-	10.55	28.57
$\Delta\chi(i)=1^\circ$	i3	-	210.8	-	0.23	-	44.72	-	27.1	-	0.21	-	19.16	-	14.9	-	0.21	-	12.19	-	10.2	28.69
	uep1	-	534.85	-	0.03	-	5.12	-	4.41	-	0.09	-	4.78	-	4.51	-	0.14	-	4.67	-	4.55	2.31
$\Delta U(i)=0$	uep2	-	534.83	-	0.01	-	5.1	-	4.4	-	0.08	-	4.76	-	4.5	-	0.13	-	4.65	-	4.53	2.30
	uep3	-	534.86	-	0.06	-	5.15	-	4.35	-	0.01	-	4.86	-	4.40	-	0.01	-	4.79	-	4.39	2.315

$L1 = 4.2\ c-5H$ $L2 = 6.\ c-5H$ $L3 = 7.98\ c-5H$

$70\%Ls$ $100\%Ls$ $133\%Ls$

$\chi(1) = \chi(4) = 1.08000^\circ$ $\chi(2) = \chi(5) = 1,53263^\circ$ $\chi(3) = \chi(6) = 2.02389^\circ$

$i_{dm}=195,59A$

Tableau 3: Harmoniques générés et leurs amplitudes

VI - Conclusion

Les recherches ainsi que les calculs réalisés dans ce travail révèlent des particularités qui apparaissent lors des régimes déséquilibrés de ces deux structures. On remarque que la période naturelle du système s’allonge jusqu’à 2p, au lieu de p/6 pour le régime classique, et à cause de cela :

- les courants de phases sont inégaux et possèdent la composante inverse et parfois des composantes continues;
- le spectre devient plus riche en harmoniques.

Notons cependant que le problème le plus sérieux est l’augmentation anormale du niveau des harmoniques caractéristiques et ceux non caractéristiques. Les calculs numériques nous ont permis de cerner le thème avec une bonne précision. Afin de vérifier l’importance de l’étude des convertisseurs déséquilibrés et leurs répercussions sur le fonctionnement du système, un certain nombre d’essais et mesures ont été effectués pour confirmer l’exactitude des résultats de la simulation [10].

Dans notre approche, on a noté aussi que quel que soit le type de commande les particularités suivantes ont été observées :

- une diversité du thd et donc du degré de la pollution;
- un bon comportement général lors des faibles déséquilibres;

L’analyse des courants harmoniques non caractéristiques générés par des déséquilibres montre la nécessité d’une réorganisation des systèmes de limitation des perturbations pour l’avenir.

Références bibliographiques

[1] G. Segulier “ Les perturbations induites dans le réseau par les convertisseurs statiques: Origine, propagation, procédés de réduction ” IRESTE Nantes Juillet 1992.

[2] M. Lemoine “ Résonances en présence des harmoniques créés par les convertisseurs de puissances et les fours à arcs associés à des dispositifs de compensation ” R.G.E Tome 87 N°12 Décembre 1978.