

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, une étude comparative structurelle et la technique de commande appliquées sur un onduleur de tension cascade et NPC à diodes flottantes à 5 niveaux sont simulées et leurs performances comparées en terme de qualité de forme d'onde de tension de sortie. Les techniques de commande applique de ce chapitre sont :

- La commande MLI avec porteuses en phase décalées verticalement,
- La commande MLI avec porteuses en opposition de phase deux par deux décalées verticalement.

IV.2. Comparaison entre les différentes structures des onduleurs multi niveaux

On peut trouver dans la littérature des descriptions intéressantes des trois topologies de base, avec leurs avantages et inconvénients, comme celle offerte par Lai et Peng dans ou par Shakwek et Lewis dans. Le tableau(IV.1) montre, de manière résumée, les principales caractéristiques des trois topologies multiniveaux de base pour un convertisseur de m niveaux. La sélection de la topologie multiniveaux la plus adéquate pour chaque application n'est pas évidente, jusqu'à présent c'est un défi non résolu dans la littérature.

Configuration	Les trois topologies de base des onduleurs multiniveaux		
	Diodes de bouclage	Condensateurs Flotteurs	En cascade
Dispositifs principaux de commutation	$2(m-1)$	$2(m-1)$	$2(m-1)$
Diode antiparallèle	$2(m-1)$	$2(m-1)$	$2(m-1)$
Diode de bouclage	$(m-1)(m-2)$	0	0
Condensateur de bus continu	$(m-1)$	$(m-1)$	$(m-1)/2$
Condensateur d'équilibrage	0	$(m-1)(m-2)/2$	0
Total	$m^2 + 2m - 3$	$(m^2 + 8m - 8)/2$	$(9/2)(m-1)$

Tableau IV. 1: Comparaison entre les trois topologies de base des convertisseurs multiniveaux au niveaux de composant électronique

Du point de vue du nombre de composants, l'onduleur en cascade paraît être la solution multiniveaux la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. Dans la suite de notre étude, on utilisera cette topologie.

IV.3. Application de la MLI sur un onduleur à cinq niveaux à structure Cascade

IV.3.1. Commande MLI avec des porteuses décalées verticalement (superposé)

- **Porteuses triangulaires**

Cette stratégie de commande est définie par quatre porteuses triangulaires à décalage vertical l'une par rapport à l'autre avec une référence et une commande diagonale des interrupteurs, on admet que la tension de sortie de l'onduleur est de cinq niveaux.

- **Résultats de simulation**

Dans cette étude, les résultats de simulations, sont obtenues pour les indices de modulation suivants : $m=25$, $m=50$, $m=100$.

Les formes de tension de sortie de l'onduleur, pour les différentes valeurs de m , accompagnées par leur spectres d'harmoniques sont illustrés aux figures (IV 1. IV 2. IV 3. IV 4).

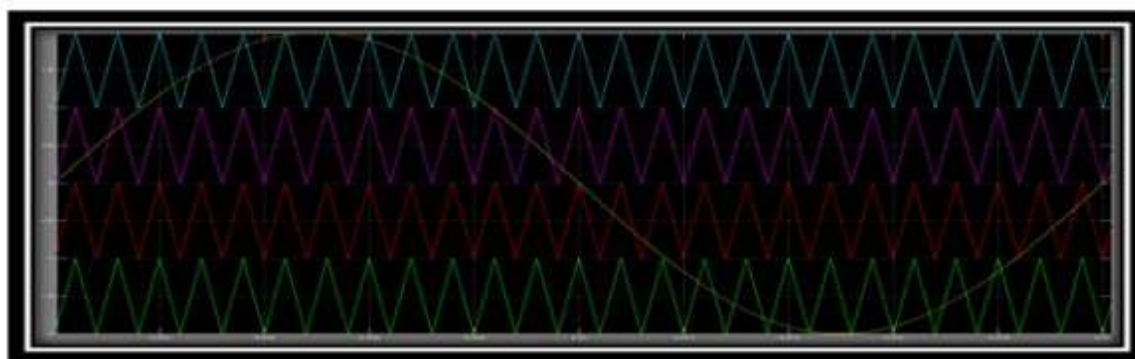


Figure IV.1. Référence et quatre porteuses triangulaires superposées

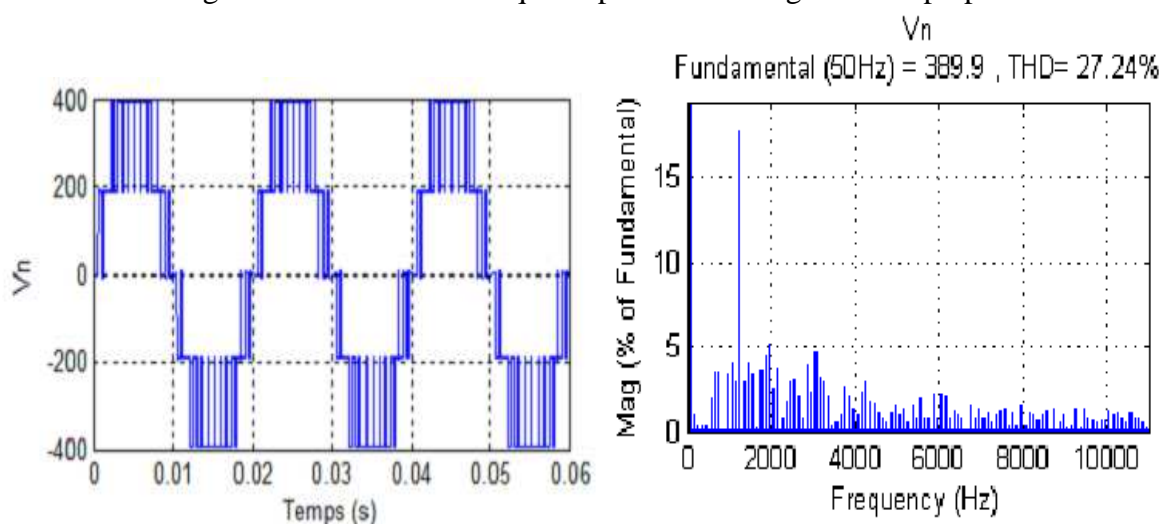
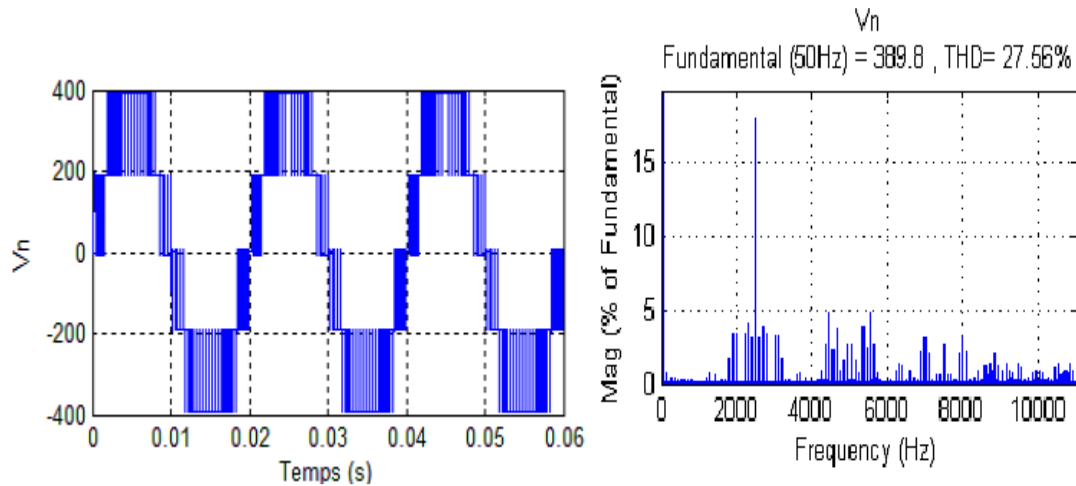
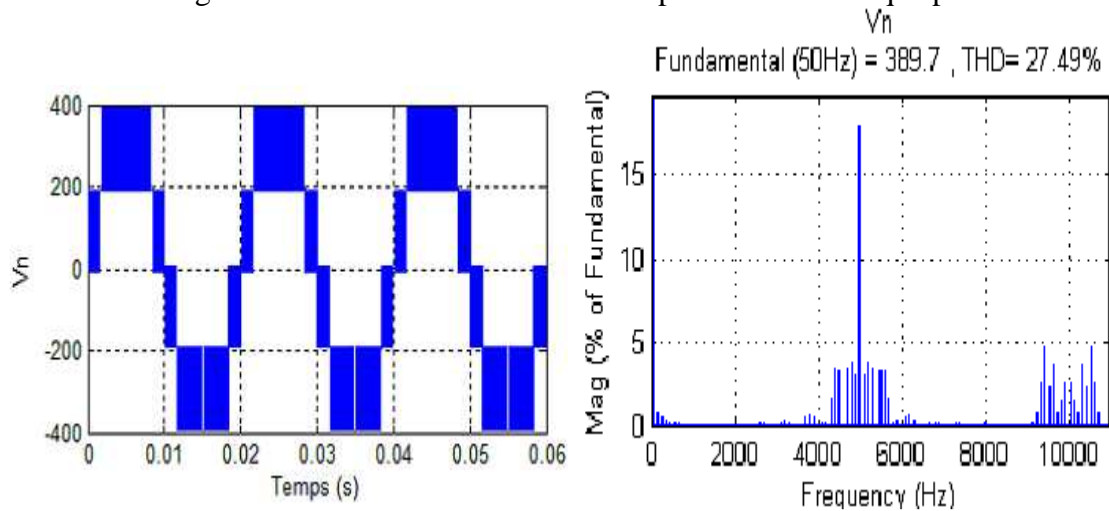


Figure IV.2. Tension de sortie et son spectre d'harmonique pour $m=25$

Figure IV.3. Tension de sortie et son spectre d'harmonique pour $m=50$ Figure IV.4 Tension de sortie et son spectre d'harmonique pour $m=100$

- **Porteuses en dents de scie**

Cette stratégie de commande est définie par quatre porteuses (en dents de scie) à décalage vertical l'une par rapport à l'autre avec une référence et une commande symétrique des interrupteurs, on admet que la tension de sortie de l'onduleur est de cinq niveaux.

- **Résultats de simulation**

Dans cette étude, les résultats de simulations, sont obtenues pour les indices de modulation suivants : $m=25$, $m=50$, $m=100$.

Les formes de tension de sortie de l'onduleur, pour les différentes valeurs de m , accompagnées par leur spectres d'harmoniques sont illustrés aux figures (IV5.IV6. IV 7. IV 8).

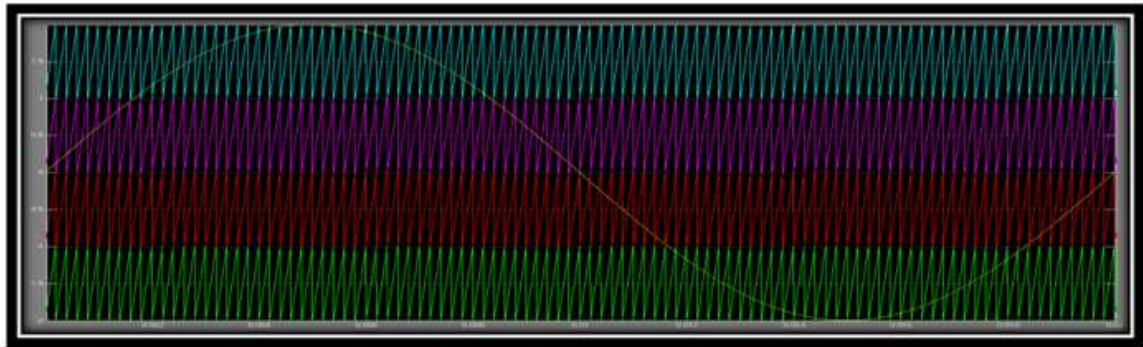
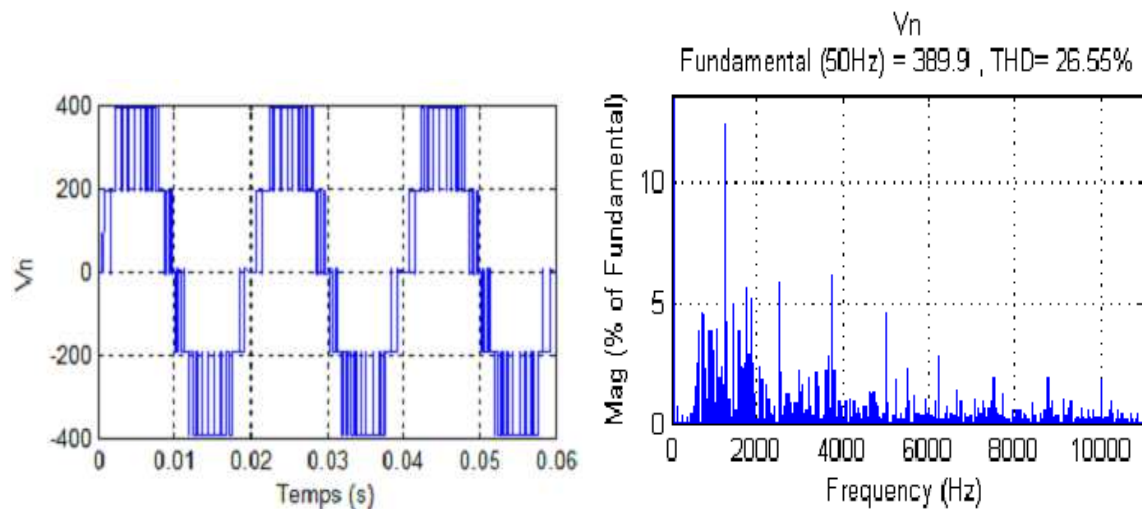
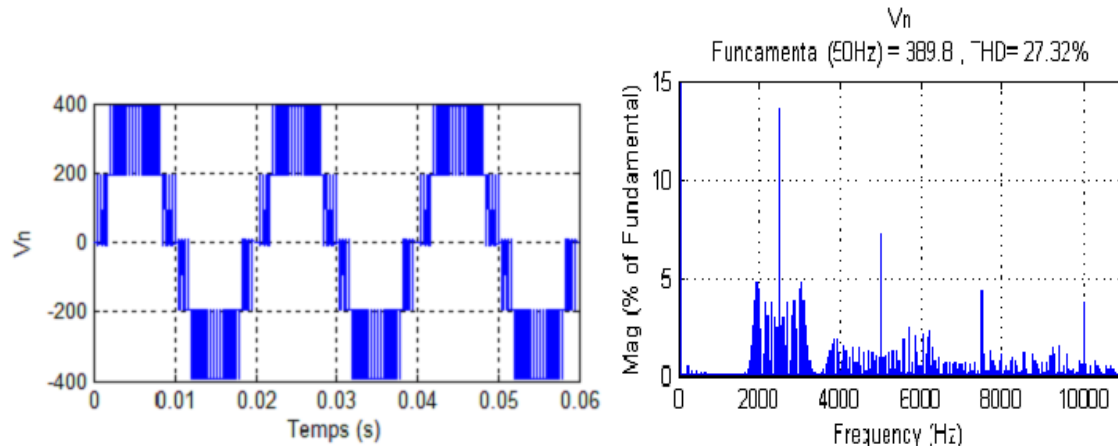
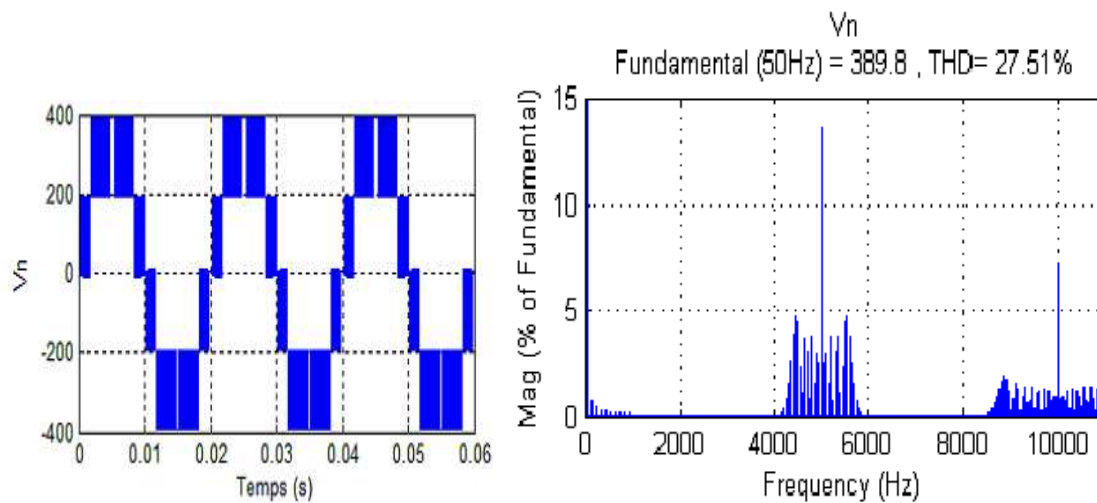


Figure IV.5 Référence et quatre porteuses en dents de scie superposées

Figure IV.6 Tension de sortie et son spectre d'harmonique pour $m=25$

Figure IV.7 Tension de sortie et son spectre d'harmonique pour $m=50$ Figure IV.8 Tension de sortie et son spectre d'harmonique pour $m=100$

IV.3.2. Commande MLI avec des porteuses décalées horizontalement

- **Porteuses triangulaires**

Cette stratégie de commande est définie par quatre porteuses triangulaires à décalage horizontal l'une par rapport à l'autre avec une référence et une commande (symétrique ou diagonale) des interrupteurs, on admet que la tension de sortie de l'onduleur est de cinq niveaux.

- **Résultats de simulation**

Dans cette étude, les résultats de simulations, sont obtenues pour les indices de modulation suivants : $m=25$, $m=50$, $m=100$.

Les formes de tension de sortie de l'onduleur, pour les différentes valeurs de m , accompagnées par leur spectres d'harmoniques sont illustrés aux figures (IV.10, IV.11, IV.12).

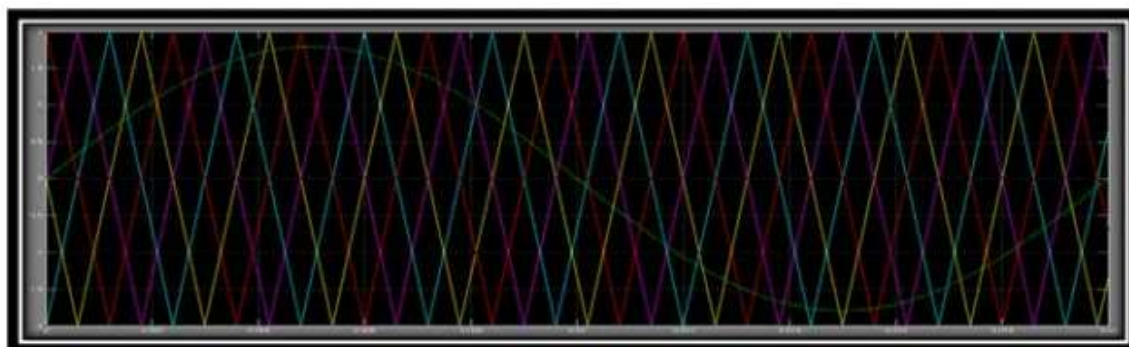
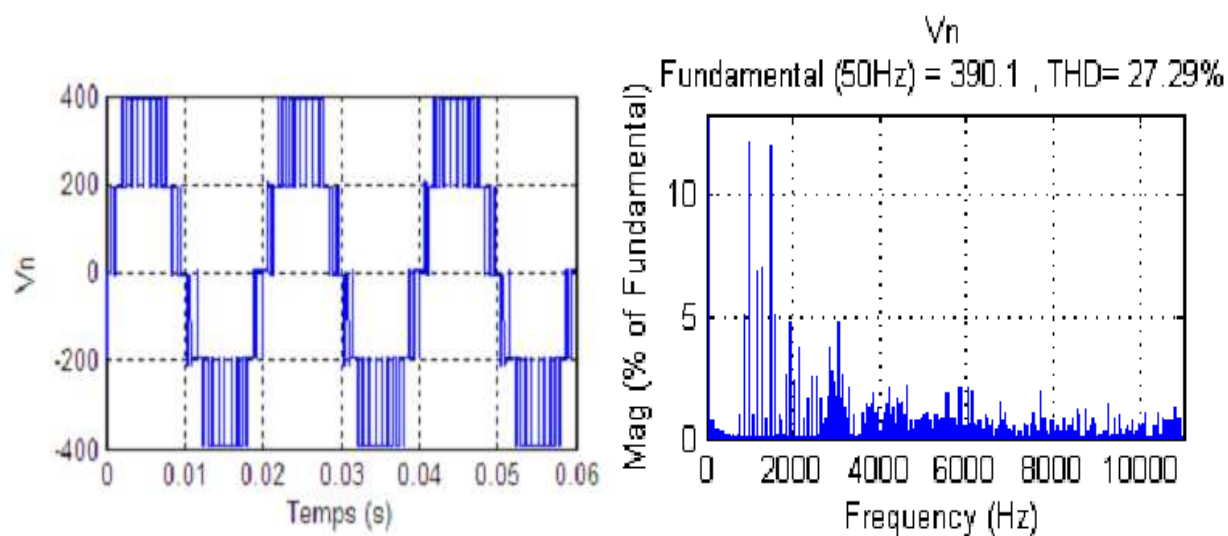
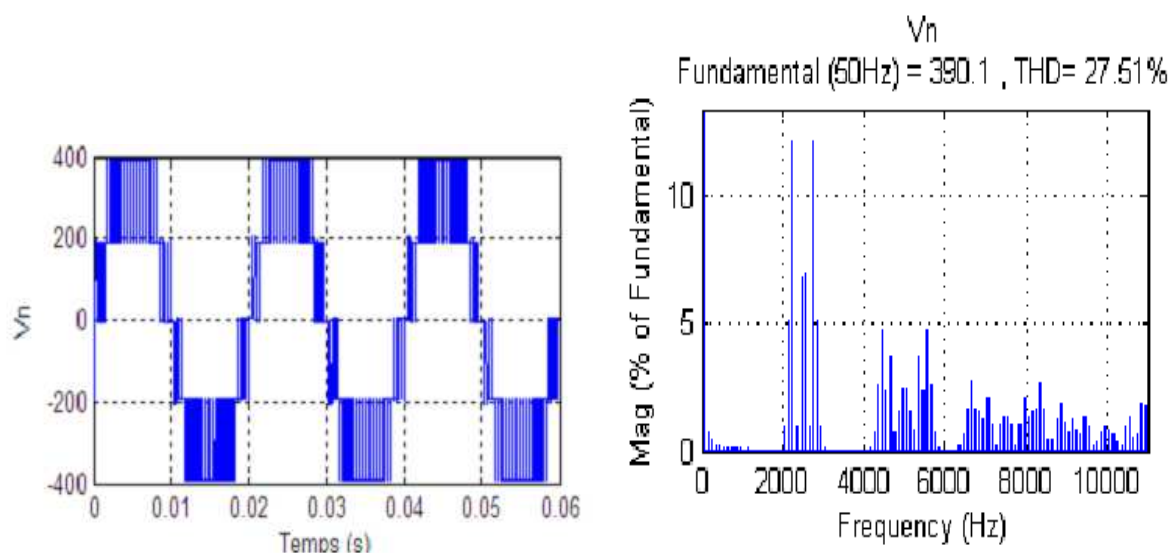


Figure IV.9 Référence et quatre porteuses décalées verticalement

Figure IV.10 Tension de sortie et son spectre d'harmonique pour $m=25$ Figure IV.11 Tension de sortie et son spectre d'harmonique pour $m=50$

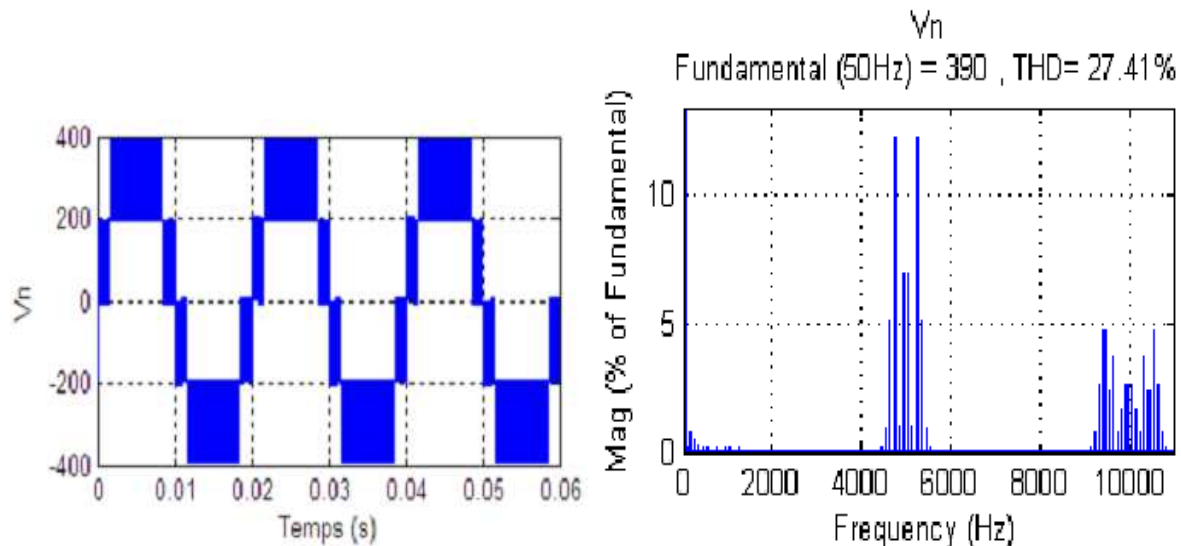


Figure IV.12 Tension de sortie et son spectre d'harmonique pour $m=100$

IV.4. Application de la MLI sur un onduleur à cinq niveaux à structure à diodes flottantes

IV.4.1. Commande MLI avec porteuses en opposition de phase deux par deux décalées verticalement :

Dans cette commande, quatre porteuses sont comparés avec un signal de référence généralement sinusoïdal pour générer les signaux de commande des différents interrupteurs électroniques constituant l'onduleur (figure IV.13). La tension sortie par rapport au point milieu du bus continu (v_{ao}) aura une fréquence égale à la fréquence du signal de référence avec 5 niveaux de tension (figure IV.13).

Selon son analyse spectral, la tension sortie par rapport au point milieu du bus continu (v_{ao}) a un fondamental d'amplitude de 350 V et une fréquence de 50 Hz plus des harmoniques basse fréquence quasiment nulles et des harmoniques haute fréquence largement répartis autour du rang égal à l'indice de modulation $m=21$ (figure IV.13) et $m=50$ (figure IV.14).

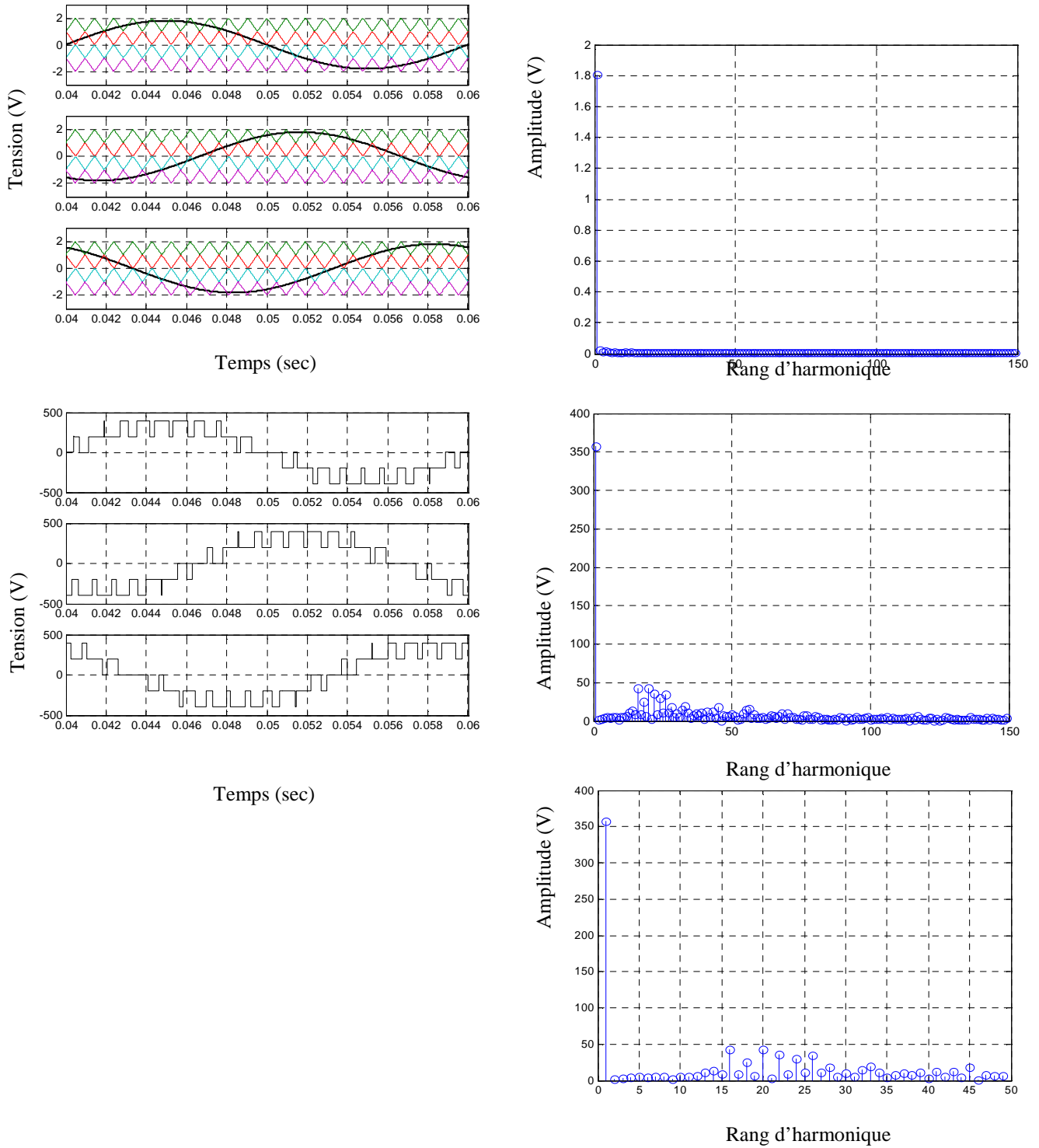


figure IV.13 .a: Signaux de référence avec porteuses en opposition de phase deux par deux, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase (vao) (Amplitude du fondamental de vao=350 V , fréquence du fondamental de vao=50 Hz et fréquence des porteuses $f_p=21 \times 50$ Hz) .

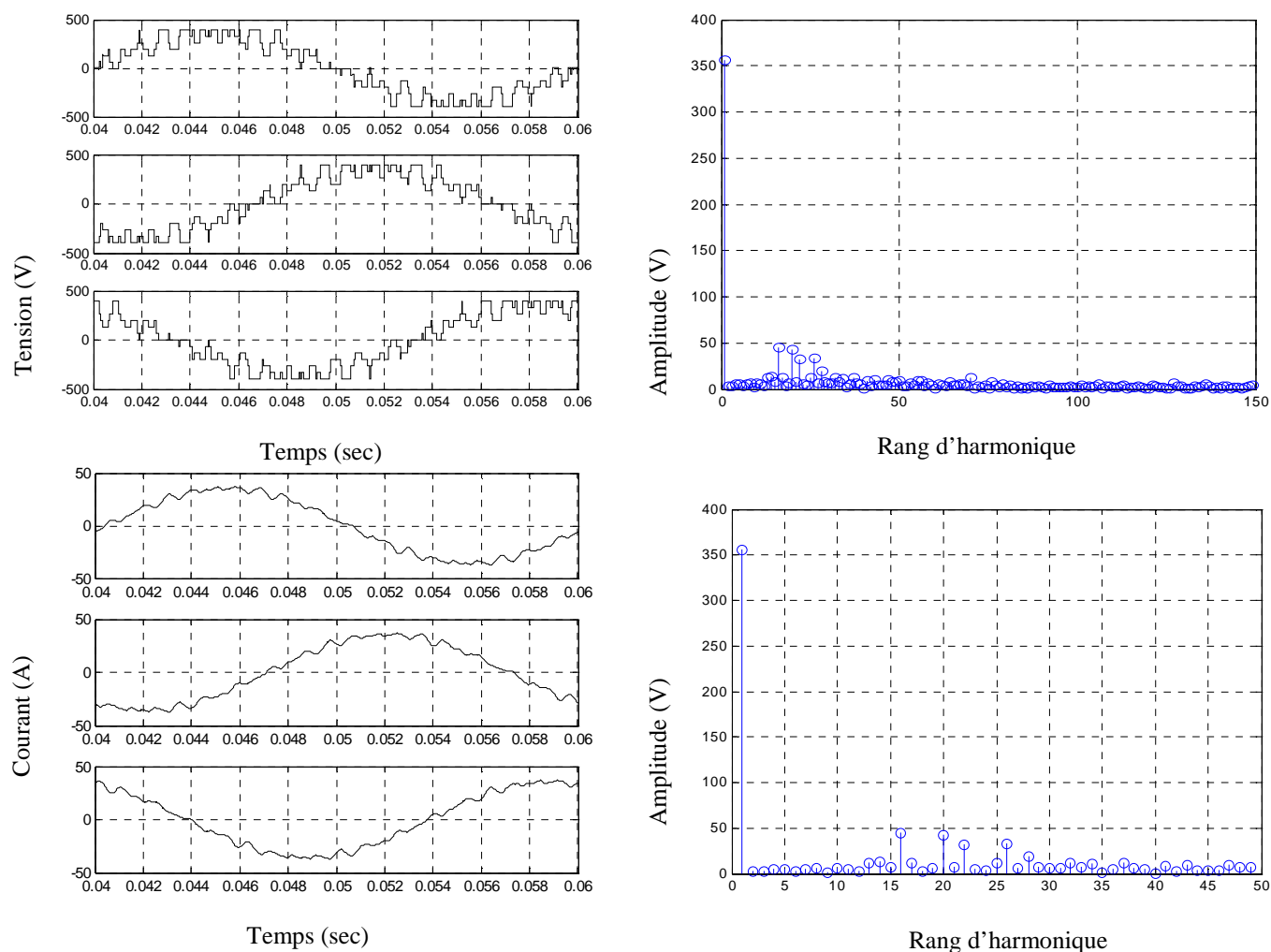


figure IV.14 .a: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge (van) (Amplitude du fondamental de van=350 V fréquence du fondamental de van=50 Hz et et fréquence des porteuses $f_p=21 \times 50 \text{ Hz}$) et courants de charge

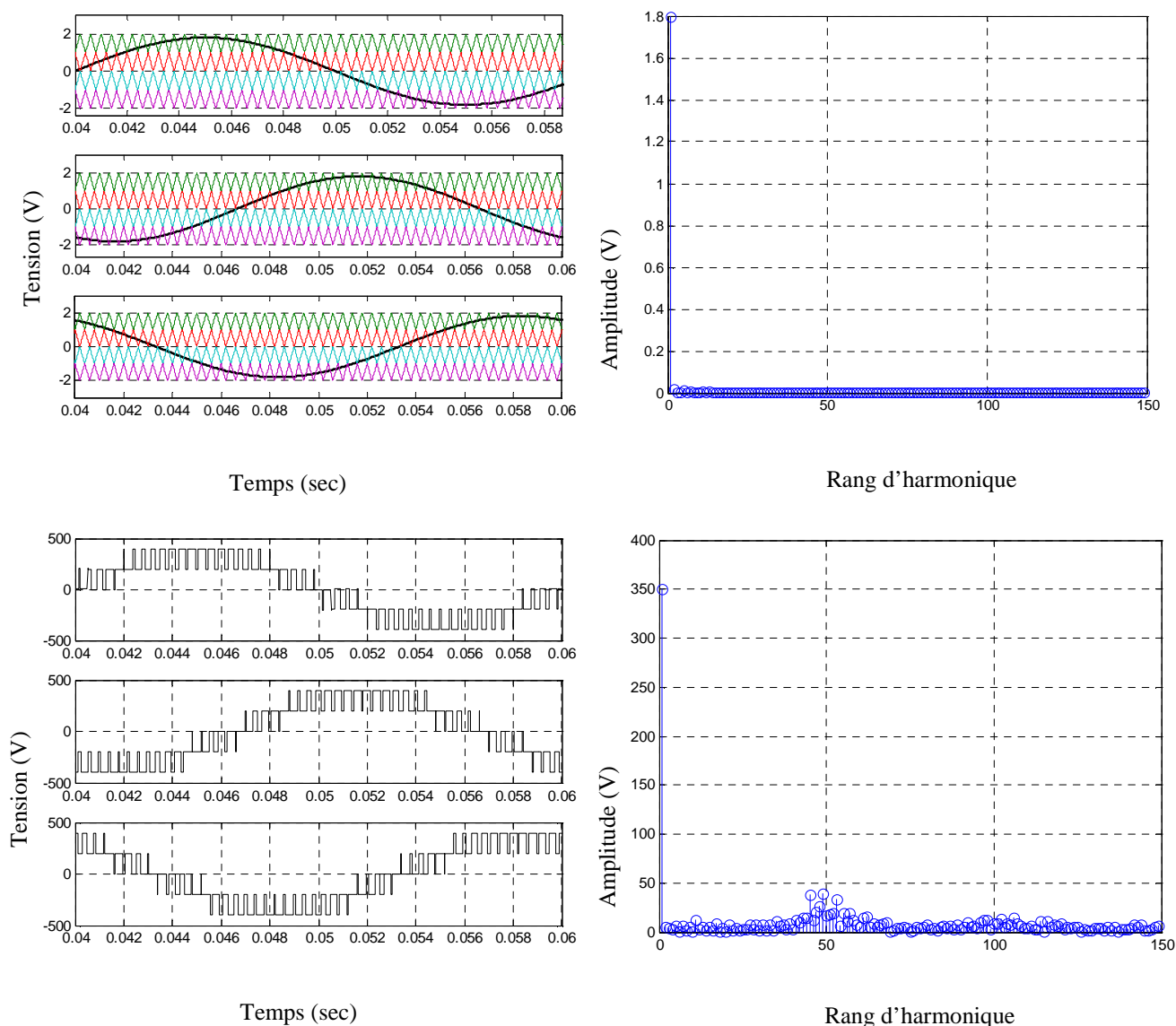


figure IV.14.b: Signaux de référence avec porteuses en opposition de phase deux par deux, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase (vao) (**THD** de vao=33.5 %, amplitude du fondamental de vao=350 V, fréquence du fondamental de vao=50 Hz et fréquence des porteuses $f_p=50*50$ Hz).

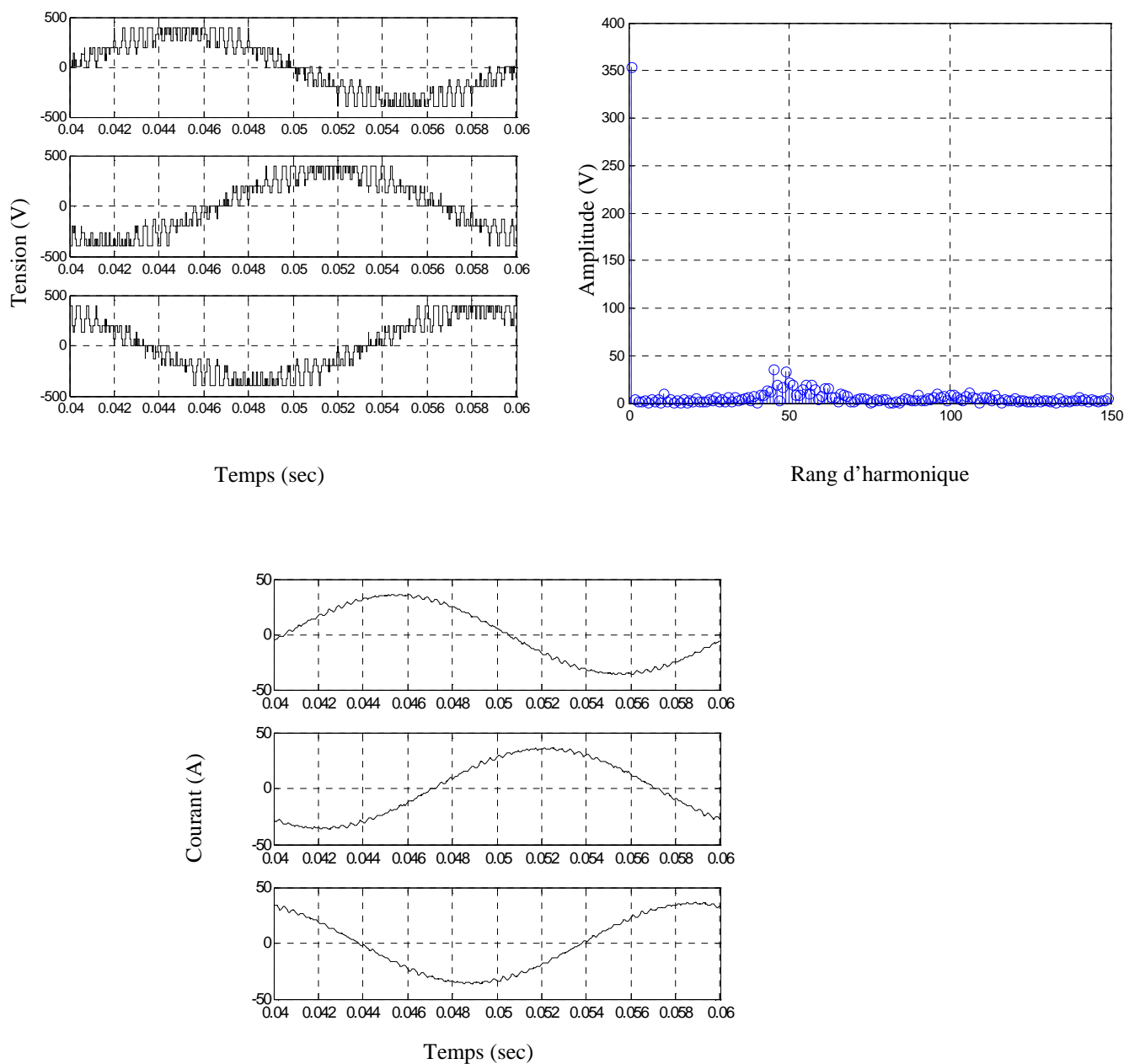


figure IV.14.b: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge (van) (**THD** de van=29 %, amplitude du fondamental de van=350 V fréquence du fondamental de van=50 Hz et fréquence des porteuses $f_p=50 \times 50$ Hz) et courants de charge.

IV.4.2. Commande MLI avec porteuses en phase décalées verticalement :

Dans cette commande, quatre porteuses en phase et décalées verticalement sont comparés avec un signal de référence généralement sinusoïdal pour générer les signaux

de commande des différents interrupteurs électroniques constituant l'onduleur (figure IV.15).

La tension sortie par rapport au point milieu du bus continu (vao) aura une fréquence égale à la fréquence du signal de référence avec 5 niveaux de tension (figure IV.15).

Selon son analyse spectral, la tension sortie par rapport au point milieu du bus continu (vao) a un fondamental d'amplitude de 350 V et une fréquence de 50 Hz plus des harmoniques basse fréquence quasiment nulles et des harmoniques haute fréquence étroitement répartis autour du rang égal à l'indice de modulation $m=21$ (figure IV.15) et $m=50$ (figure IV.16).

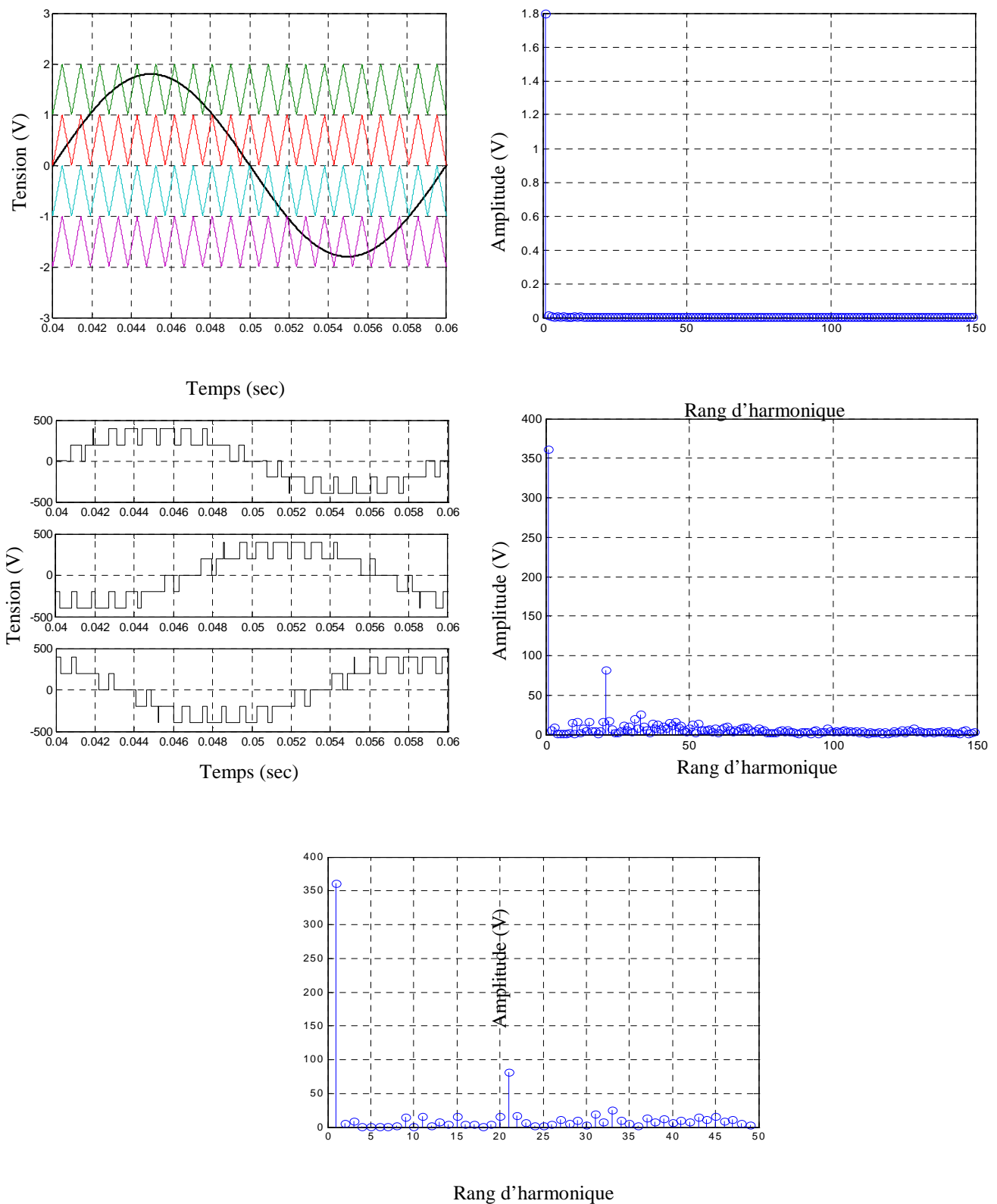


figure IV. 15.a: Signal de référence avec porteuses en phase, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase (vao) (**THD** de vao=33.3%, amplitude du fondamental de vao=355V , fréquence du fondamental de vao=50Hz et fréquence des porteuses $f_p=21*50\text{Hz}$)

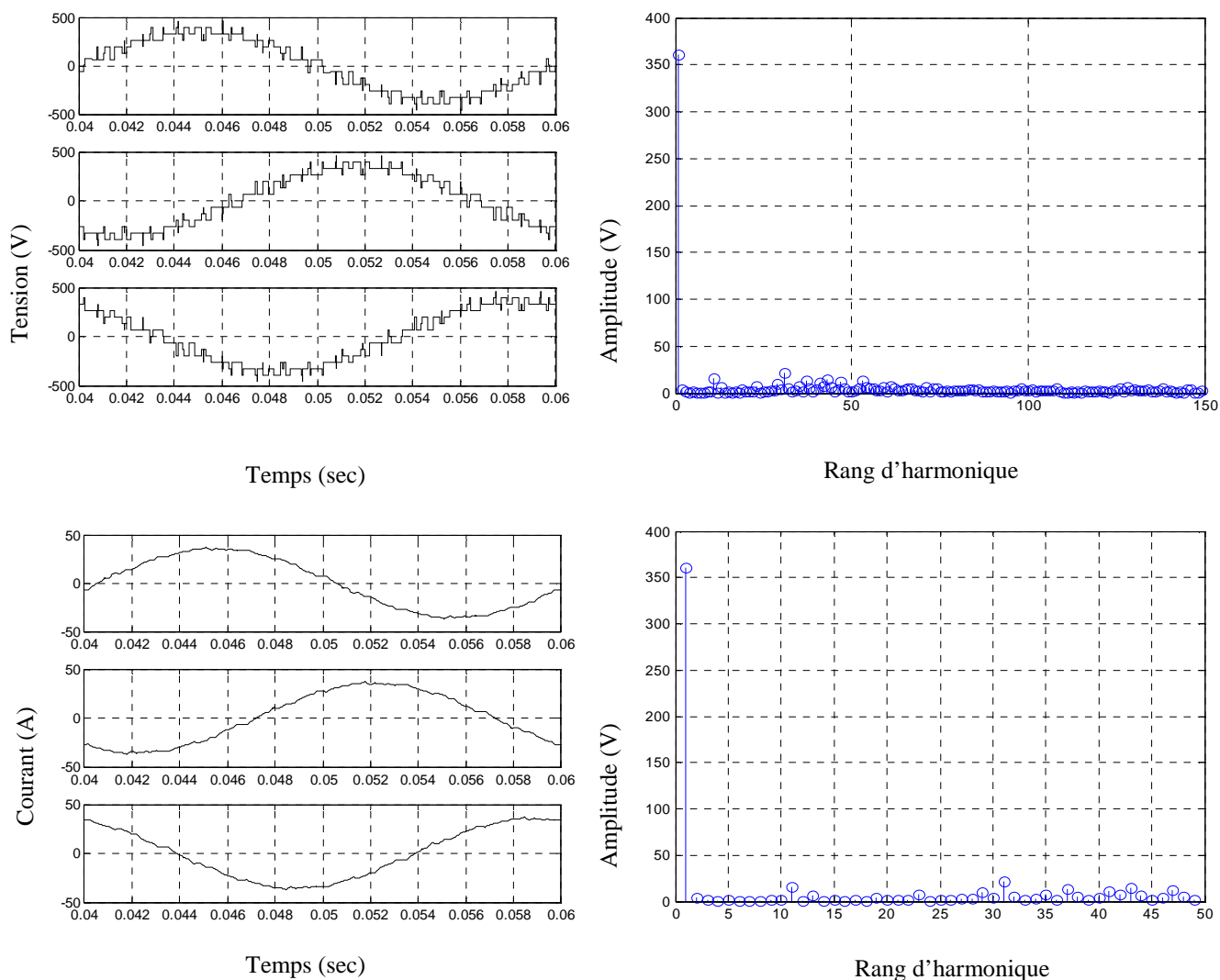


figure IV.15.b: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge (van) (**THD** de van=17 %, amplitude du fondamental de van=355 V fréquence du fondamental de van=350 Hz et fréquence des porteuses $f_p=21 \times 50 \text{ Hz}$) et courants de charge

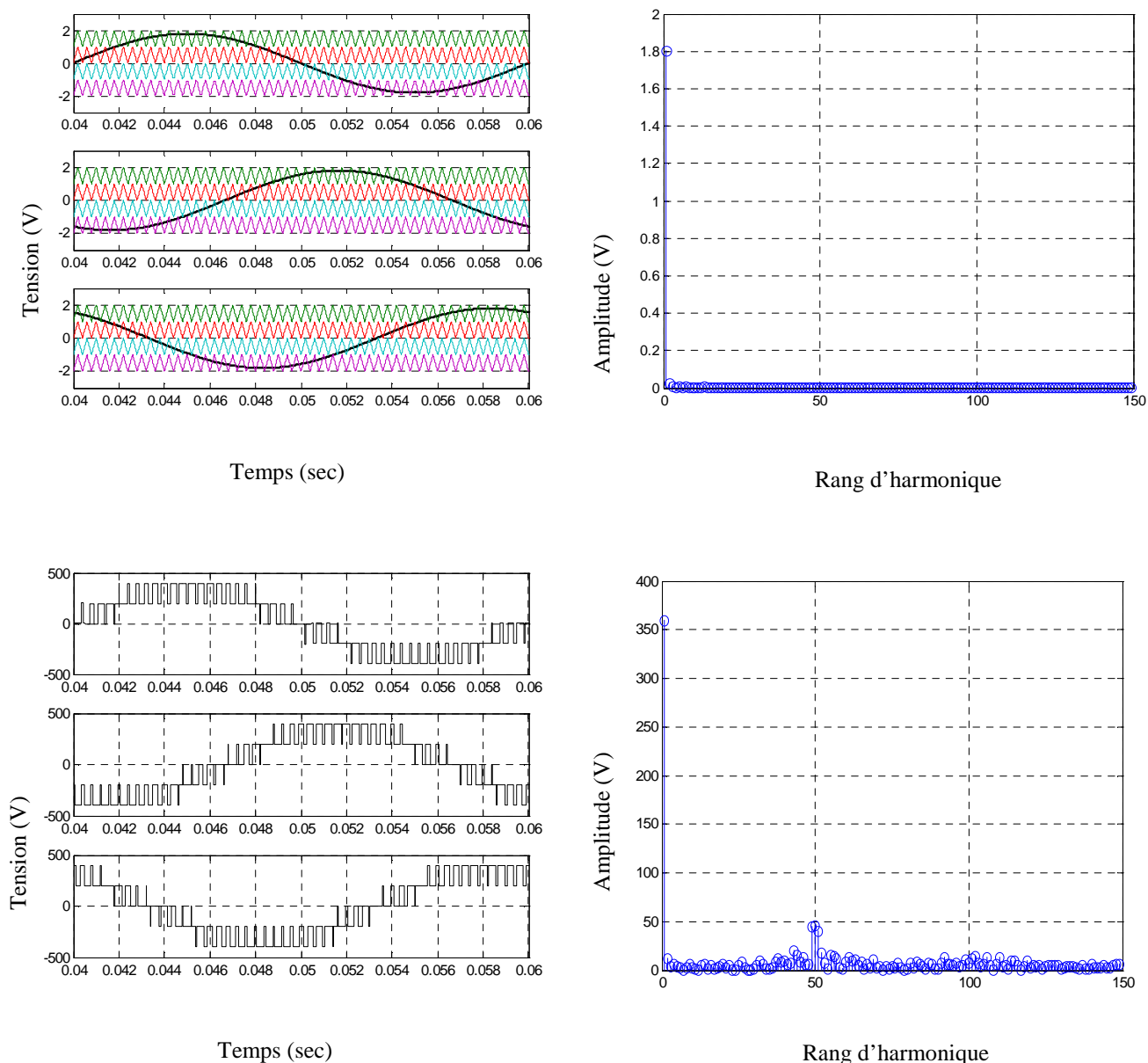


figure IV.16.a: Signaux de référence avec porteuses en phase, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase (vao) (**THD** de vao=33.5 %, amplitude du fondamental de vao=355 V , fréquence du fondamental de vao=50Hz et fréquence des porteuses fp=50*50Hz)

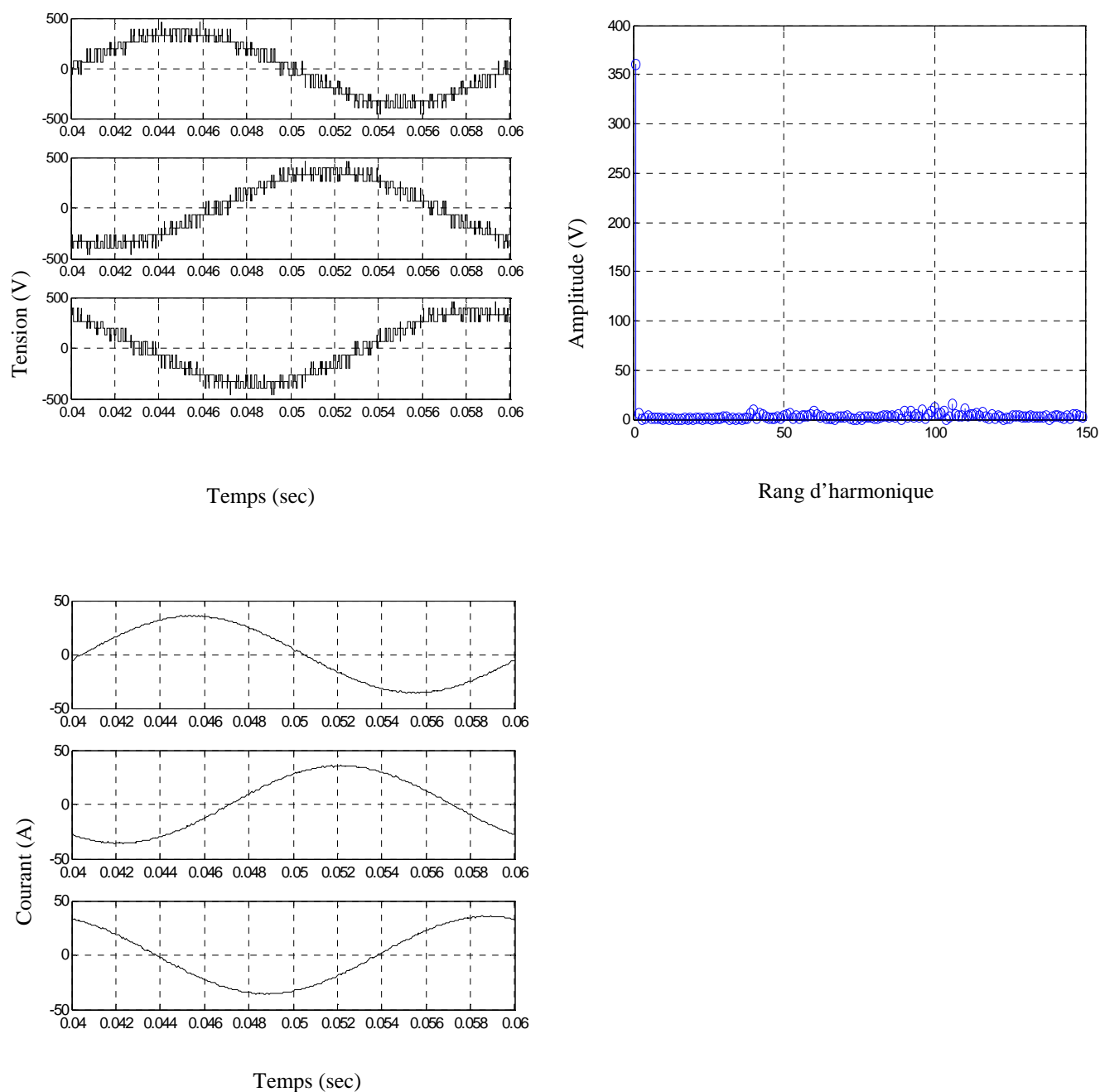


figure IV.16.b: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge (van) (**THD** de van=17 %, amplitude du fondamental de van=355 V fréquence du fondamental de van=50 Hz et fréquence des porteuses $f_p=21 \cdot 50$ Hz) et courants de charge

IV.5. Discussions des résultats

- On peut conclure que la commande **MLI** applique sur l'onduleur cascade à 5 niveaux la moins pollué avec des harmoniques par rapport à l'onduleur NPC à diodes flottantes à 5 niveaux.
- L'augmentation du nombre de niveaux N fait diminuer nettement l'amplitude des harmoniques rapportés au fondamental.
- Les harmoniques de tension, pour toutes les structures, sont regroupées en familles d'harmonique centrées autour des fréquences $k \cdot m \cdot f_p$ ($k=1,2,3 \dots$).
- L'augmentation de l'indice de modulation permet de pousser les harmoniques vers les fréquences $k \cdot m \cdot f_p$ ($k=1,2,3 \dots$) plus élevées, ce qui facilite leur filtrage.
- Il faut noter que la référence doit toujours être en intersection périodique avec les différentes porteuses décalées verticalement pour générer une tension MLI avec un nombre de niveau permis par la structure d'onduleur. Si l'amplitude de la référence diminue résultant la perte de l'intersection périodique de la référence avec les porteuses la plus haute et la plus basse, on aura une perte de niveaux de tension de deux ponts. Cela peut se répercuter sur la qualité de tension produit par l'onduleur.

IV.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la comparaison entre les différentes structures des onduleurs multi niveaux. Les résultats de simulation de ces différentes structures alimentant une charge RL ont montrés que :

- Plus on augmente en nombre de niveaux de tension, plus on améliore la qualité de tension de sortie de l'onduleur (plus le THD diminue) avec un minimum de fréquence de commutation des composants d'électronique de puissance.
- Peu importe le type de la porteuse (dents de scie ou triangulaire), la commande MLI permet de repousser les harmoniques de tension vers des rangs élevés.
- Le type de MLI avec porteuses à décalage horizontal est le plus performant par rapport à celui avec porteuse à décalage horizontal (superposé). Cela est dû au fait que le premier type permet non seulement d'éliminer les harmoniques de tension de basse fréquence mais aussi de contrôler l'amplitude de la tension de sortie tout en gardant le même nombre de niveaux de cette tension de sortie.