



L'USINE NOUVELLE

SÉRIE | EEA

Michel Pinard

CONVERTISSEURS ET ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

Commande • Description
Mise en œuvre

DUNOD

CONVERTISSEURS ET ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

Électronique, électrotechnique, automatique, aux éditions DUNOD

- *Acquisition de données*, 2^e éd., Asch et coll., 528 p., 2003
- *Les capteurs en instrumentation industrielle*, 6^e éd., Asch et coll., 864 p., 2006
- *Radiocommunications numériques* (en deux volumes), Baudoin et Villegas, 640 p. et 464 p., 2002
- *Schémas et circuits électroniques* (en deux volumes), 5^e éd., Bourgeron, 512 p. et 536 p., 2005
- *Les spécifications fonctionnelles - Automatismes industriels en temps réel*, Brenier, 432 p., 2001
- *Maintenance électrotechnique*, Brown, Rawtani et Patil, 296 p., 2006
- *Compatibilité électromagnétique*, 2^e éd., Charoy, 696 p., 2005
- *Parasites et perturbations des électroniques - CEM* (en quatre volumes) 2^e éd., Charoy, 192 p., 2007
- *LabVIEW 6.1- Programmation et applications*, Cottet, 432 p., 2001
- *Systèmes temps réel de contrôle-commande*, Cottet et Grolleau, 568 p., 2005
- *Électronique appliquée aux hautes fréquences, principes*, De Dieuleveult, 440 p., 2001
- *Principes et applications de l'électronique* (en 2 volumes), De Dieuleveult, 344 p. et 384 p., 1997
- *Tracés des circuits imprimés*, 2^e éd., Dunand, 128 p., 2000
- *Micro et nano-électronique*, Fanet, 416 p., 2006
- *Perturbations harmoniques*, Félice, 192 p., 2001
- *Le Bus USB*, 3^e éd. (+ CD-Rom), Fenard, 160 p., 2007
- *Électricité pratique*, Fouchet, 392 p., 1984
- *Électronique pratique*, 2^e éd., Fouchet, 448 p., 1986
- *Instrumentation industrielle*, Grout, 544 p., 2002
- *Les antennes*, 3^e éd., Houzé, 376 p., 2006
- *Énergie solaire photovoltaïque*, 2^e éd, Labouret, 312 p., 2005
- *Systèmes électroniques embarqués et transport*, Louvel, 336 p., 2006
- *Aide-mémoire des composants électroniques*, 3^e éd., Mayé, 184 p., 2005
- *Les alimentations électroniques*, 2^e éd., Mayé, 480 p., 2006
- *Moteurs électriques industriels*, Mayé, 392 p., 2005
- *Moteurs électriques pour la robotique*, 2^e éd., Mayé, 296 p., 2006
- *Applications en identification radiofréquence et cartes à puces sans contact*, Paret, 424 p., 2003
- *Identification et traçabilité en UHF-SHF*, Paret, 550 p., AP 2007
- *Identification radiofréquence et cartes à puce sans contact - Description*, Paret, 336 p., 2001
- *Le bus CAN - Applications*, Paret, 368 p., 2001
- *Réseaux multiplexés pour systèmes embarqués*, Paret, 400 p., 2005
- *Sécurité et automatique*, PILZ, 328 p., 2005
- *Commande électronique des moteurs électriques*, Pinard, 600 p., 2004
- *Pratique des oscilloscopes*, Reghinot et Becker, 368 p., 1984
- *VHDL : méthodologie de design et techniques avancées*, Schneider, 304 p., 2001
- *300 schémas d'alimentation*, 2^e éd., Schreiber, 256 p., 1998
- *400 nouveaux schémas radiofréquences*, Schreiber, 368 p., 2000
- *Guide pratique de la CEM*, Tavernier, 208 p., 1999
- *Les cartes à puce* (+ CD-Rom), 2^e éd., Tavernier, 360 p., 2007
- *Les microcontrôleurs PIC* (+ 2 CD-Rom) - *Description et mise en œuvre*, 2^e éd., Tavernier, 224 p., 2002
- *Microcontrôleurs PIC : programmation en Basic* (+ CD-Rom), Tavernier, 272 p., 2006
- *Microcontrôleurs PIC - Recueil d'applications* (+ CD-Rom) / 2^e éd., Tavernier, 368 p., 2005
- *Programmation en C des PIC* (+ CD-Rom), Tavernier, 224 p., 2005
- *Automatisation en hors procédés*, Vogt, 320 p., 2003
- *Automatisation en hors procédés*, Vogt, 320 p., 2003
- *Aide-mémoire d'électrotechnique*, Mayé, 320 p., 2007
- *Guide pratique de la mesure électrique*, Peutot, Félice, Kholer, 450 p., 2007
- *Guide de la protection électrique des équipements*, Hewitson, 336 p., 2007
- *Génie électrotechnique*, Warne, 544 p., 2007
- *PSPICE* (+ CD-ROM) - *Méthodologie d'utilisation et techniques avancées*, 288 p., 2007

MICHEL PINARD

CONVERTISSEURS ET ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

Commande, description,
mise en œuvre
Applications avec LabVIEW

L'USINENOUVELLE

DUNOD

Consultez nos catalogues sur le Web



www.dunod.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2007
ISBN 978-2-10-049674-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
--------------	---

A

Systèmes électroniques de commande

1 • Commande analogique et numérique. Utilisation de composants programmables	5
1.1 Commande analogique de convertisseurs à découpage	5
1.2 Commande analogique de convertisseurs à thyristors	10
1.3 Commande numérique	13
1.4 Étude de composants de commande numérique	17
1.5 Le DSP TMS320LF2407 de Texas Instruments	21
1.6 Exemple de commande de MLI bipolaire par composant programmable	31
1.7 Utilisation du logiciel LabVIEW	37
2 • Composants électroniques. Utilisation en interrupteurs de puissance	41
2.1 Composants et interrupteurs de puissance	41
2.2 Interrupteurs réels de puissance	44
2.3 Caractéristiques techniques des composants (<i>data sheets</i>)	54
2.4 Dissipation thermique des composants	60
2.5 Utilisation du logiciel PSpice	65
2.6 Tableaux de caractéristiques de composants	68
3 • Les interfaces de commande des composants interrupteurs. Drivers. Déclencheurs	75
3.1 Interface signal-puissance	75
3.2 Drivers pour transistors	76
3.3 Déclencheurs pour thyristors ou triacs	83
3.4 Utilisation du logiciel LabVIEW	88

B

Convertisseurs : Description

4 • Approche théorique des convertisseurs de puissance	93
4.1 Structure matricielle des convertisseurs	93
4.2 Étude plus particulière des convertisseurs classiques	101
4.3 Convertisseurs continu-alternatif	108
4.4 Étude du changeur de fréquence	109
5 • Les convertisseurs statiques	115
5.1 Présentation	115
5.2 Les hacheurs (choppers)	119
5.3 Les onduleurs autonomes (inverters)	127
5.4 Les redresseurs (rectifiers)	153
6 • Fonctionnement pratique des convertisseurs	167
6.1 Les régimes transitoires	167
6.2 Régimes transitoires dans les hacheurs	178
6.3 Les alimentations à découpage (switched power DC supplies)	191
6.4 Régimes transitoires dans les onduleurs	196
6.5 Régimes transitoires dans les redresseurs à thyristors	200
6.6 Les gradateurs	209
6.7 Utilisation des logiciels PSpice et LabVIEW	215

C

Convertisseurs : Études de cas

7 • Étude de systèmes réels	223
7.1 L'analyse et le contrôle des systèmes	223
7.2 Les capteurs dans un système	226
7.3 Modélisation en boucle ouverte d'un système	232
7.4 Étude en boucle fermée d'un système	238
7.5 Système hacheur-moteur à courant continu en boucle fermée	249
7.6 Système redresseur-moteur à courant continu	253
7.7 Système onduleur-moteur asynchrone ou synchrone triphasé	258

8 • Conception de convertisseurs	269
8.1 Analyse et synthèse de convertisseurs	269
8.2 Action des parasites sur la commande d'un système	271
8.3 Alimentation des convertisseurs	274
8.4 Amélioration de l'utilisation des convertisseurs	287
8.5 Aide à la conception du cahier des charges	290
8.6 Aide à la réalisation d'un prototype	293
8.7 Simulation d'un système complet sur Simulink	296
9 • Critères de choix de convertisseurs industriels	301
9.1 Définir une démarche	301
9.2 Normes relatives à l'alimentation des convertisseurs par le réseau alternatif	302
9.3 Critères techniques de réception d'un convertisseur industriel	307
9.4 Étude d'un compensateur d'harmoniques industriel	310
9.5 Étude d'un onduleur Sysdrive de marque Omron	313
9.6 Étude d'un onduleur Eurotherm Drives pour moteur asynchrone	317
9.7 Étude d'un convertisseur Eurotherm Drives pour moteur synchrone	318
9.8 Mesures effectuées sur un onduleur industriel	319
Annexe mathématique	325
A.1 Les grandeurs relatives à la transmission de la puissance	325
A.2 Les grandeurs intervenant en régime sinusoïdal monophasé	326
A.3 Les grandeurs intervenant en régime sinusoïdal triphasé	326
A.4 Cas où la commande est sous forme d'impulsions	327
A.5 Transformée de Laplace	336
A.6 Développement en série de Fourier. Applications	338
A.7 Applications du développement en série de Fourier dans le cas de tensions et de courants non sinusoïdaux	341
A.8 Modulation de largeur d'impulsions (MLI)	343
A.9 Réseaux de Pétri et applications	350
A.10 Graphe informationnel de causalité	354
Bibliographie	359
Index	361

INTRODUCTION

Cet ouvrage s'intéresse à l'électronicien de puissance, dont la préoccupation est de gérer une transmission de la puissance dans des convertisseurs grâce à une commande composée de signaux électroniques.

L'électronique de puissance n'est possible que par le composant électronique, créateur ou transmetteur de signal. C'est ainsi que l'on expose dans le premier chapitre les commandes des convertisseurs à partir d'un composant analogique (amplificateur opérationnel) ou numérique (PIC, DSP ou FPGA). On obtient ainsi les signaux qui vont aller vers les composants de puissance.

Ensuite, les composants seront les interfaces ou « drivers » reliant la petite puissance des signaux de commande à la forte puissance obtenue par commutation dans les transistors MOS ou IGBT ou bien les triacs et, bien sûr, les thyristors.

L'ouvrage a pour ambition de présenter, de la manière la plus complète possible, le fonctionnement et les formulaires détaillés concernant les principaux convertisseurs, qu'il y ait ou non réversibilité :

- hacheurs à transistors, à thyristors;
- onduleurs à transistors;
- redresseurs à diodes, à thyristors;
- gradateurs à triac ou à thyristors.

Dans le cas des onduleurs, l'auteur s'est intéressé tout particulièrement à la modulation de largeur d'impulsions, à sa commande et ses effets.

L'étude des perturbations introduite par les interrupteurs est abordée, avec une présentation de la compatibilité électromagnétique (CEM), des filtrages possibles, et surtout des systèmes permettant la réduction des harmoniques de courant du réseau.

Les régimes transitoires jouent un rôle important dans le comportement des convertisseurs. L'auteur s'est efforcé de montrer comment un contrôle et une protection efficaces des composants de puissance peuvent éviter leur destruction.

Il a poursuivi en développant son discours sur les convertisseurs précédents, des résultats obtenus expérimentalement ou par simulation, jusqu'à l'aspect le plus concret et le plus industriel possible de leur application.

Cela explique les trois principales parties du livre :

- Partie A : on s'intéresse aux systèmes électroniques de commande qui permettent une action sur le transfert de puissance, soit par un opérateur, soit automatiquement.

- Partie B : on présente les divers types de convertisseurs possibles et on étudie leurs caractéristiques.
- Partie C : on considère des convertisseurs industriels, en montrant leurs qualités et leur limite d'utilisation.

Les développements mathématiques sont présentés en Annexe, en fin d'ouvrage. Nous y renvoyons le lecteur chaque fois que c'est nécessaire.

Certains chapitres ainsi que l'Annexe sont complétés par une analyse de certaines fonctions (spectre de Fourier) ou de fonctionnement (étude de formes d'onde) de convertisseurs en utilisant trois logiciels différents : Simulink, Pspice et LabVIEW. Le choix de ces logiciels a surtout un but pédagogique.

Cet ouvrage s'adresse aussi bien aux élèves ingénieurs, aux étudiants de maîtrise ou de troisième cycle, qu'aux industriels qui s'intéressent aux opportunités et aussi aux difficultés rencontrées dans la commande et le fonctionnement des convertisseurs. Je dédie cet ouvrage à mes deux petites filles Ariane et Maud, nées dans ce XXI^e siècle prometteur en avancées scientifiques et technologiques.

A

Systèmes électroniques de commande

1 • COMMANDE ANALOGIQUE ET NUMÉRIQUE. UTILISATION DE COMPOSANTS PROGRAMMABLES

1.1 Commande analogique de convertisseurs à découpage

1.1.1 Principe de la commande des convertisseurs à découpage

En électronique de puissance, on utilise de plus en plus des convertisseurs utilisant des interrupteurs électroniques fonctionnant soit à l'état passant (ou fermé), soit à l'état bloqué (ou ouvert). Le passage d'un état à l'autre s'effectue périodiquement. On note T_e cette période. On dit que le convertisseur fonctionne « en découpage » si la période T_e est très faible devant T , celle des sources de puissance utilisées par le convertisseur (voir le chapitre 5). En pratique, on choisit une période T_e entre

$$T_e = \frac{T}{100} \text{ et } T_e = \frac{T}{1\,000} \text{ selon les composants électroniques utilisés.}$$

Dans le cas des redresseurs ou des gradateurs, la période T_e est un sous-multiple simple de la période T de la source alternative d'alimentation. En pratique, on a $T_e = T/2$ ou $T/3$.

Les fonctions triangulaires, qu'elles soient symétriques ou asymétriques, servent à la commande des composants constituant ces convertisseurs. La tension $v_e(t)$ est comparée à une tension continue de contrôle U_c pour obtenir la variation du transfert de puissance (voir chapitre 5).

1.1.2 Principe de la commande analogique

En première étude, il est nécessaire d'élaborer un signal (ou plusieurs signaux) de commande pour agir sur les interrupteurs (voir les chapitres 2 et 3). Il s'agit le plus souvent de créer des fonctions, triangulaire symétrique $tri(t)$, triangulaires asymétriques ou « dents de scie » $scie_m(t)$, $scie_d(t)$ ou même triangulaires asymétriques décalées $scie_dec_m(t)$ et $scie_dec_d(t)$ par un montage électronique (voir annexe mathématique en fin d'ouvrage).

Ces fonctions sont obtenues sous forme de tension (notée $v_e(t)$). Ce signal de commande est alors analogique. On fait très souvent appel à des amplificateurs opérationnels.

Dans cet ouvrage, on préfère présenter un schéma synoptique pour chacune des fonctions triangulaires, en utilisant des schémas blocs.

1.1.3 Réalisation de la fonction triangulaire $tri(t)$

Pour réaliser la fonction triangulaire symétrique $tri(t)$, on utilise un amplificateur inverseur, un intégrateur, et un comparateur à hystérésis. Le schéma bloc est présenté à la figure 1.1.

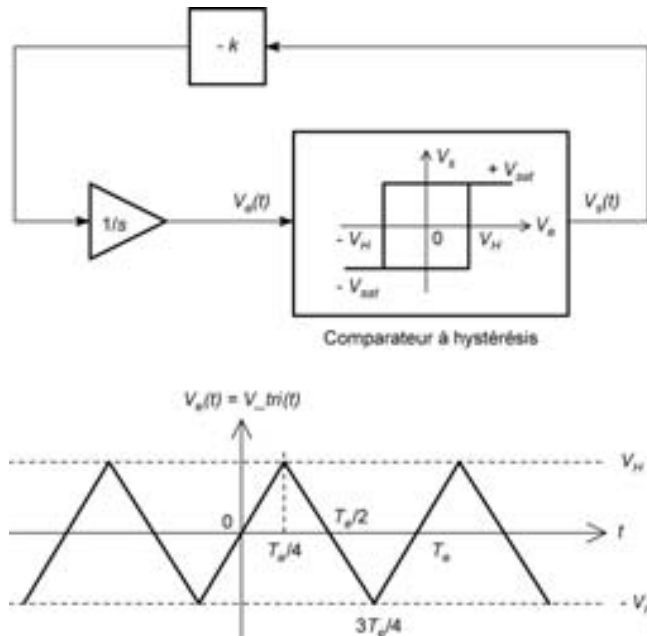


Figure 1.1 – Schéma bloc pour obtenir le signal triangulaire $tri(t)$.

Selon l'état du comparateur à hystérésis, la tension $v_s(t)$ vaut $+V_{sat}$ ou $-V_{sat}$. Les niveaux de basculement sont $-V_H$ et $+V_H$. Le signal de commande $v_e(t)$ varie donc entre $-V_H$ et $+V_H$. L'amplificateur est de gain k .

On a $\frac{V_e(s)}{V_s(s)} = -\frac{k}{s}$, ce qui correspond à une intégration. Si v_s vaut $-V_{sat}$, on obtient :

$$v_e(t) = -k \int v_s(t) dt = k \cdot V_{sat} \cdot t$$

Le basculement a lieu pour $v_e = V_H$ et pour $t = T_e/4$.

$$\text{Soit } k \cdot V_{sat} \cdot T_e = 4 V_H.$$

On obtient ainsi le signal de commande $v_e(t) = V_H \times tri(t)$ avec $T_e = \frac{4 \times V_H}{k \times V_{sat}}$.

1.1.4 Réalisation des fonctions triangulaires asymétriques *scie_m(t)* et *scie_d(t)*

On utilise encore un amplificateur inverseur, un intégrateur, et un comparateur à hystérésis.

Mais, pour la fonction *scie_m(t)*, un amplificateur de gain k est réservé à la montée, tandis que la descente (très rapide) est obtenue par un autre amplificateur de gain k' beaucoup plus élevé ($k' \gg k$). Un commutateur analogique commandé par le signe de $v_s(t)$ fait agir l'un ou l'autre amplificateur. Le schéma bloc est présenté à la figure 1.2.

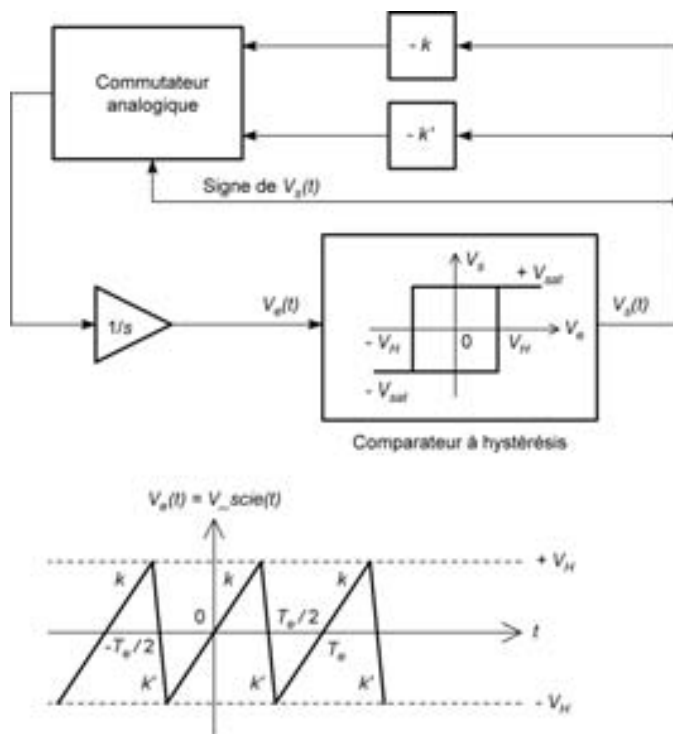


Figure 1.2 – Schéma bloc pour obtenir le signal triangulaire *scie_m(t)*.

On a toujours $v_e(t) = -k \int v_s(t) dt = k \cdot V_{sat} \cdot t$.

Le basculement a lieu pour $v_e = V_H$ et pour $t = T_e/2$.

Le signal de commande est donc $v_e(t) = V_H \times scie_m(t)$.

On a alors $k \cdot V_{sat} \cdot T_e \approx 2V_H$, soit approximativement $T_e = \frac{2 \times V_H}{k \times V_{sat}}$ si $k' \gg k$.

Pour la fonction *scie_d(t)*, l'amplificateur de gain k , est réservé à la descente, tandis que la montée est obtenue par un autre amplificateur de gain k' beaucoup plus élevé ($k' \gg k$).

On obtient encore approximativement $T_e = \frac{2 \times V_H}{k \times V_{sat}}$ si $k' \gg k$. On obtient alors le signal de commande :

$$v_e(t) = V_H \times \text{scie}_d(t)$$

1.1.5 Réalisation des fonctions triangulaires asymétriques décalées *scie_dec_m(t)* et *scie_dec_d(t)*

On utilise encore le diagramme précédent. Mais on a modifié le cycle d'hystérésis. Selon l'état du comparateur à hystérésis, la tension $v_s(t)$ vaut $+V_{sat}$ ou $-V_{sat}$. Les niveaux de basculement sont 0 et $+V_H$. Le signal $v_e(t)$ varie donc entre 0 et $+V_H$.

Dans le cas de la fonction *scie_dec_m(t)*, on procède comme pour la fonction *scie_m(t)* : un amplificateur de gain k est réservé à la montée, tandis que la descente (très rapide) est obtenue par un autre amplificateur de gain k' beaucoup plus élevé ($k' \gg k$). Un commutateur analogique commandé par le signe de $v_s(t)$ fait agir l'un ou l'autre amplificateur.

On a encore $v_e(t) = -k \int v_s(t) dt = k \cdot V_{sat} \cdot t$. On obtient alors le signal de commande :

$$v_e(t) = V_H \times \text{scie}_{dec_m}(t)$$

Le basculement a lieu pour $v_e = V_H$ et pour $t = T_e$.

On a alors $k \cdot V_{sat} \cdot T_e = V_H$, soit approximativement $T_e = \frac{V_H}{k \times V_{sat}}$ si $k' \gg k$.

Dans le cas de la fonction *scie_dec_d(t)*, on procède comme pour la fonction *scie_d(t)* : un amplificateur de gain k , est réservé à la descente, tandis que la montée est obtenue par un autre amplificateur de gain k' beaucoup plus élevé ($k' \gg k$). Le comparateur à hystérésis est identique à celui du cas précédent. On obtient approxi-

mativement $T_e = \frac{V_H}{k \times V_{sat}}$ si $k' \gg k$. Alors le signal de commande sera $v_e(t) = V_H \times \text{scie}_{dec_d}(t)$.

1.1.6 Réalisation pratique de la fonction $d_\alpha(t)$

Voir annexe mathématique en fin d'ouvrage.

On rappelle le cas considéré à la *figure 1.3*.

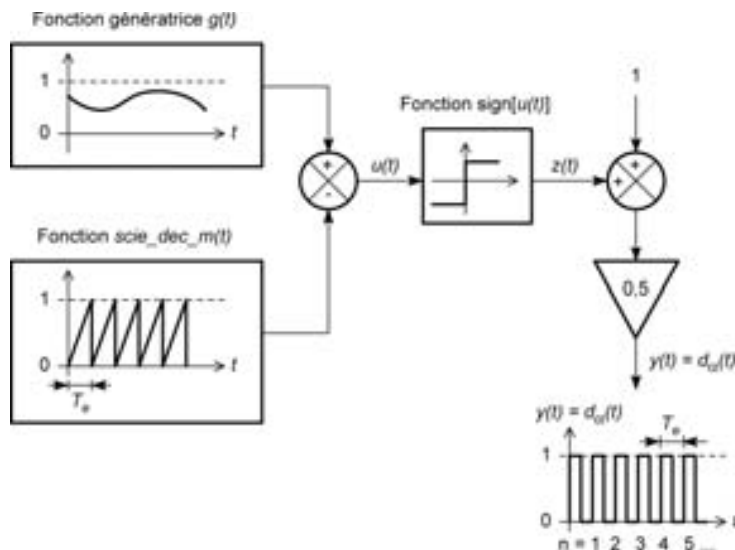


Figure 1.3 – Génération d'une forme d'onde impulsionnelle.

On a :

$$z(t) = \text{sign} [u(t)] = \text{sign} [g(t) - \text{scie_dec_m}(t)]$$

$$y(t) = 0,5 \times [z(t) + 1] = d_{\alpha}(t)$$

On rappelle que la **forme d'onde impulsionnelle de découpage** $d_{\alpha}(t)$, est une grandeur formée d'impulsions de niveau « 0 » ou « 1 » disposées selon des intervalles de temps réguliers et constants (période T_e) à une largeur αT_e souvent variable $0 < \alpha < 1$. Cette forme d'onde permet la commande des hacheurs. C'est la fonction génératrice $g(t)$ qui impose le rapport cyclique α . On obtient tout simplement :

$$\alpha(t) = g(t) \text{ avec } 0 \leq g \leq 1, \forall t$$

En pratique, à la place de $d_{\alpha}(t)$, on considère la tension $v_e(t) = V_H \times \text{scie_dec_m}(t)$ (voir § 1.1.4). On considère également le **signal de commande** U_c une tension continue choisie généralement telle que :

$$U_c = g \times V_H$$

Cela donne :

$$v_e(\alpha T_e) = U_c$$

Comme $v_e(t)$ est **proportionnelle à t sur l'intervalle $[0, T_e]$** le rapport cyclique α est proportionnel à la tension de commande U_c .