

DOSSIER

TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

l'expertise technique et scientifique de référence

d3235

Applications des éléments piézoélectriques en électronique de puissance

Par :

Dejan VASIC

Maître de conférences à l'université de Cergy-Pontoise, Chercheur au laboratoire SATIE ENS Cachan

François COSTA

Professeur à l'université de Paris Est Créteil, Chercheur au laboratoire SATIE ENS Cachan

Ce dossier fait partie de la base documentaire

Composants actifs en électronique de puissance

dans le thème **Pack & laquo; Convertisseurs et machines électriques »**
et dans l'univers **Énergies**

Document délivré le **14/12/2012**

Pour le compte

7200045062 - universite de toulouse bu sciences // 130.120.121.79

Pour toute question :

Service Relation Clientèle • Éditions Techniques de l'Ingénieur • 249, rue de Crimée
75019 Paris – France

par mail : infos.clients@teching.com ou au téléphone : 00 33 (0)1 53 35 20 20

Applications des éléments piézoélectriques en électronique de puissance

par **Dejan VASIC**

*Maître de conférences à l'université de Cergy-Pontoise
Chercheur au laboratoire SATIE ENS Cachan*

et **François COSTA**

*Professeur à l'université de Paris Est Créteil
Chercheur au laboratoire SATIE ENS Cachan*

1. Applications de puissance des matériaux piézoélectriques	D 3 235 - 2
1.1 Généralités.....	— 2
1.2 Matériaux piézoélectriques utilisés en puissance	— 2
1.3 Classification des modes de conversions d'énergie au regard des applications	— 4
2. Conversion mécanique/électrique (récupération d'énergie)	— 5
2.1 Domaines d'applications	— 5
2.2 Modélisation	— 6
2.3 Convertisseurs associés à la récupération d'énergie.....	— 8
2.4 Microgénérateur à large bande passante	— 12
3. Conversion électrique/mécanique (génération ultrasonore et actionnement)	— 13
3.1 Généralités.....	— 13
3.2 Commande d'actionneur piézoélectrique	— 13
3.3 Commande des générateurs ultrasonores	— 14
4. Conversion électro-mécano-électrique (transformateur électrique)	— 16
4.1 Généralités.....	— 16
4.2 Rappel du modèle du transformateur	— 16
4.3 Étage d'entrée des convertisseurs à des transformateurs piézoélectriques	— 16
4.4 Alimentation de lampe à cathodes froides	— 19
4.5 Alimentation DC/DC	— 21
Pour en savoir plus	Doc. D 3 235

Les matériaux piézoélectriques, qui réalisent une conversion électromécanique directe, sont utilisés depuis de nombreuses années dans des applications de puissance telles que la **génération ultrasonore** ou l'**actionnement**. Le champ d'utilisation de ces matériaux ne cesse de croître en électronique de puissance notamment avec le transformateur piézoélectrique et les microsources d'énergie.

Le **transformateur piézoélectrique** a trouvé un débouché commercial dans les alimentations de lampe à cathodes froides pour le rétro-éclairage des écrans à cristaux liquides grâce à ses performances en élévateur de tension.

Les **microgénérateurs piézoélectriques** dont l'énergie est issue de vibration ambiante ont un avenir prometteur dans des applications telles que l'auto-alimentation des réseaux de capteurs abandonnés grâce à de bonnes performances de conversion électromécanique et une compatibilité avec les technologies de fabrication des microsystèmes.

L'objectif de ce dossier est de présenter les potentialités mais aussi les contraintes générées par l'utilisation des matériaux piézoélectriques dans différentes applications en électronique de puissance avec :

- une introduction sur les matériaux piézoélectriques et une classification des modes de conversion (§ 1) ;
- les systèmes de récupération d'énergie (§ 2) ;
- l'alimentation des générateurs ultrasonores de puissance et des actionneurs (§ 3) ;
- les structures de conversion statique utilisant des transformateurs piézoélectriques ainsi que les applications (§ 4).

1. Applications de puissance des matériaux piézoélectriques

1.1 Généralités

Les matériaux piézoélectriques, qui ont l'intrigante propriété de **convertir directement de l'énergie électrique en énergie mécanique (et inversement)**, constituent aujourd'hui un nouveau domaine d'application qui se situe entre la mécanique et l'électronique. Classiquement, le champ d'utilisation de ces matériaux est :

- la génération d'ultrasons avec le sonar, les transducteurs à usage médical (échographie) ;
- le positionnement (actionneurs et moteurs) ;
- les allume-gaz ou les injecteurs de carburant (injection directe dans les moteurs diesel).

Même si la piézoélectricité fut découverte par les frères Curie en 1880, les applications industrielles de puissance ne furent possibles qu'après la mise au point en 1954 d'une solution à base de plomb, de zirconium et de titanate présentant un effet piézoélectrique très élevé (100 fois plus élevé que le quartz). L'aptitude de cette céramique de type polycristalline, appelée **PZT** (Titano-Zirconate de Plomb), à la conversion d'énergie en fait naturellement aujourd'hui le matériau de référence. Le développement rapide des applications à base de transducteurs piézoélectriques a vu apparaître une nouvelle problématique liée à la complexité et au prix élevé de leur alimentation. Les principales contraintes d'une alimentation d'éléments piézoélectriques sont :

- d'une part, les niveaux de tension élevés mis en jeu, et cela en raison des relativement faibles déformations engendrées ;
- d'autre part, la nature capacitive de l'impédance d'entrée.

La piézoélectricité a su répondre par elle-même à la première contrainte avec la réalisation de **transformateur statique piézoélectrique** qui présente naturellement un gain important en tension. En effet, le transformateur piézoélectrique peut être un bon candidat pour remplacer le transformateur électromagnétique dans certaines applications à faible puissance. Avec des caractéristiques attrayantes comme une puissance volumique de 20 W/cm^2 , un rendement élevé et l'absence d'émission électromagnétique, le transformateur piézoélectrique devient plus approprié pour générer des hautes tensions à faible puissance.

Il est utilisé par exemple pour le rétro-éclairage des lampes fluorescentes à cathode froide placées derrière un écran à cristaux liquides ou encore pour la génération de haute tension pour le nettoyage par ultrasons.

Plus récemment, poussés par les besoins d'autonomie énergétique de certaines applications faible puissance et par la baisse de la consommation des composants électroniques, des **microsources d'énergie** basées sur la récupération d'énergie de vibration au moyen d'éléments piézoélectriques ont fait leur apparition. La récupération d'énergie, qui transforme l'énergie ambiante en énergie électrique est très intéressante dans des applications où la batterie ne peut pas être remplacée facilement.

L'exemple typique est le réseau de capteurs abandonnés servant au monitoring qui est déployé sur une grande surface ou placé dans des endroits difficiles d'accès.

Ces microgénérateurs sont généralement associés à un système de commutation mis en parallèle avec l'élément piézoélectrique et le circuit classique de conversion de façon à agrandir artificiellement les cycles de conversion électromécanique.

Les principaux avantages des composants piézoélectriques comparés aux magnétiques sont les suivants :

- bonne adaptation à la miniaturisation ; la structure est un bloc compact et facilement industrialisable car ne nécessitant pas de bobinage non standard ;
- pas de rayonnement électromagnétique, pas de couplage magnétique, ce qui est favorable en termes de CEM ;
- rendement élevé ; les actionneurs ont un rendement supérieur au magnétique pour une gamme de puissance inférieure à 10 W (figure 1) [1] ;
- non inflammable ; c'est un composant qui ne craint pas les surcharges et les courts-circuits.

1.2 Matériaux piézoélectriques utilisés en puissance

Afin d'obtenir une puissance de sortie élevée, les matériaux piézoélectriques sont excités à un niveau élevé de vibration, principalement à la résonance mécanique, sous un champ électrique alternatif élevé. Ces conditions de fonctionnement peuvent entraîner un échauffement et la dégradation des performances du matériau. C'est pour cette raison que les dispositifs de puissance,

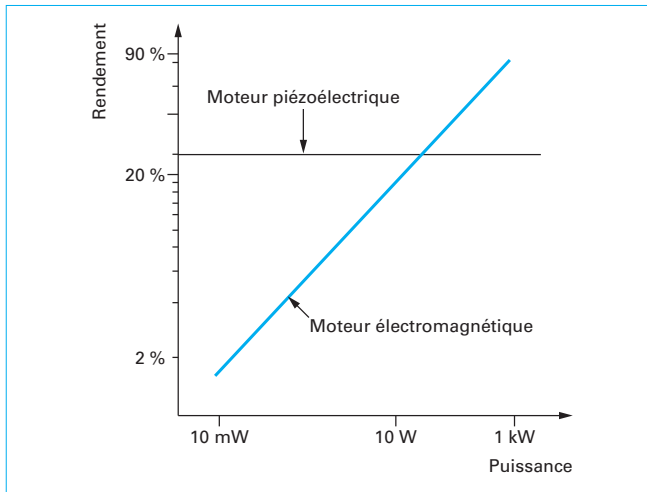


Figure 1 – Rendement en fonction de la puissance des actionneurs piézoélectrique et magnétique [1]

comme le transformateur ou le moteur ultrasonore, nécessitent l'utilisation de matériaux dits « durs » avec un facteur de qualité Q_m élevé. À la résonance, l'amplitude des vibrations est directement proportionnelle à ce facteur de qualité. La vitesse de vibration dépend, quant à elle, de plusieurs paramètres :

- la constante piézoélectrique ;
- la permittivité ;
- la raideur ;
- le facteur de couplage électromécanique.

Une diminution du facteur de qualité Q_m est observée à partir d'un certain niveau de vibration, ce niveau critique correspondant à la limite de puissance du matériau. Si l'on augmente davantage l'excitation, l'énergie sera uniquement convertie en chaleur.

Les céramiques massives, actuellement commercialisées, ont une vitesse limite de vibration de l'ordre de 0,5 m/s (définie pour une élévation de température inférieure à 20 °C). La vitesse de vibration limite diminue à 0,3 m/s pour les structures multicouches. La meilleure céramique, au stade de la recherche actuelle, peut avoir une vitesse de vibration limite de 1 m/s, et donc une puissance volumique de 4 à 10 fois supérieure, la puissance étant proportionnelle au carré de cette vitesse.

Les mécanismes de perte dans le matériau sont de deux types : diélectrique et mécanique. Les pertes diélectriques sont prépondérantes en dehors de la résonance alors que les pertes mécaniques apparaissent principalement à la résonance. À la résonance, si l'excitation est importante, les pertes diélectriques deviennent aussi non négligeables.

La puissance de sortie d'un élément piézoélectrique dépend de plusieurs paramètres, tels que :

- les propriétés du matériau ;
- la taille et la forme de l'élément ;
- le type d'excitation mécanique ou électrique.

Cependant, pour avoir une idée des caractéristiques nécessaires d'un matériau dans une application donnée, nous allons établir l'expression de la **puissance théorique disponible à la sortie**. Le système d'axes 1, 2 et 3 est habituellement utilisé pour identifier les directions (figure 2). L'axe 3 est l'axe de polarisation P du matériau. Deux modes de conversion sont classiquement exploités :

- le **mode 33** où la déformation est dans le même sens que la polarisation ;
- le **mode 31** où la déformation est perpendiculaire à la polarisation.

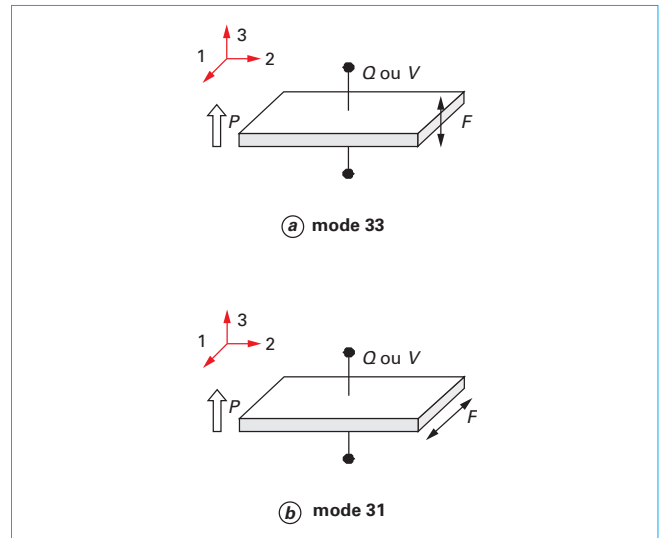


Figure 2 – Modes de couplage piézoélectrique

Les relations locales [2] lient les grandeurs électriques dans le matériau, telles que le champ électrique E_i (en V/m) et l'induction électrique D_i (en C/m²), aux grandeurs mécaniques, telles que la contrainte T_i (en Pa) et la déformation relative S_i sont données pour le mode 33 par :

$$\begin{cases} S_3 = s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 \\ D_3 = d_{33} T_3 + \epsilon_{33}^T E_3 \end{cases} \quad (1)$$

Et pour le mode 31 par :

$$\begin{cases} S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \\ D_3 = d_{31} T_1 + \epsilon_{33}^T E_3 \end{cases} \quad (2)$$

avec ϵ_{ij} (F/m) permittivité,
 s_{ij} (m²/N) souplesse,
 d_{ij} (C/N) constante piézoélectrique.

Les indices $i, j = 1, 2, 3$ se réfèrent aux axes orientés par rapport à la céramique piézoélectrique dans un système orthonormé. En exposant de s_{ij} , la grandeur considérée comme constante ou nulle.

L'énergie électrique à la sortie d'un élément piézoélectrique est égale au produit entre la tension V et la charge électrique Q . À partir des équations constitutives de l'élément piézoélectrique (1) et (2), on peut établir l'expression de la charge Q maximale théorique lorsque la tension est nulle (court-circuit) et la tension V maximale théorique lorsque la charge est nulle (circuit ouvert).

Pour le mode 33 :

$$Q = Fd_{33} \text{ et } V = \frac{Fg_{33}e}{LW} \quad (3)$$

Et pour le mode 31 :

$$Q = \frac{Fd_{31}L}{e} \text{ et } V = \frac{Fg_{31}}{W} \quad (4)$$

avec F (N) force appliquée,
 L, e et W (m) respectivement, longueur, épaisseur et largeur de l'élément,

Tableau 1 – Propriétés des matériaux piézoélectriques [3] [4]

Matériaux	d_{33} (10^{-12} C/N)	g_{33} (10^{-3} m ² /C)	d_{31} (10^{-12} C/N)	g_{31} (10^{-3} m ² /C)	$d_{33}g_{33}$ (10^{-15} m ² /N)	$d_{31}g_{31}$ (10^{-15} m ² /N)
PVDF	- 33	286	23	216	- 9 438	4 968
PZT-5H	593	20	- 274	- 9,1	11 860	2 493
PZT-5A	374	25	- 171	- 11,4	9 350	1 949
BaTiO ₃	149	14	78	5	2 086	390
PZN-7%PT	2 500	42	- 1 204	- 24,2	105 250	29 137

d_{ij} (C/N) constante piézoélectrique de charge traduisant la proportionnalité entre l'induction électrique et la contrainte,

g_{ij} (m²/C) constante piézoélectrique de tension traduisant la proportionnalité entre le champ électrique et la contrainte.

Si la fréquence d'excitation de l'élément est notée f (en s⁻¹), la puissance P (en W) pour les deux modes s'écrit :

$$P = F^2 d_{33} g_{33} \frac{e}{LW} f = T^2 d_{33} g_{33} L W e f \quad (5)$$

$$P = F^2 d_{31} g_{31} \frac{L}{eW} f = T^2 d_{31} g_{31} L W e f \quad (6)$$

En introduisant la contrainte T , nous constatons que la puissance est proportionnelle au volume de l'élément mais aussi au produit $d_{ij} \cdot g_{ij}$ qui dépend du matériau. Ce produit des constantes piézoélectriques caractérise donc la **densité d'énergie des matériaux piézoélectriques**.

Ainsi, pour des applications de puissance, il existe une gamme de matériaux piézoélectriques à forte densité énergétique dont les deux extrêmes sont :

- d'un côté, les polymères PVDF ($d_{33} = -33 \times 10^{-12}$ C/N, $\epsilon_{33} = 13\epsilon_0$, $g_{33} = 286,7 \times 10^{-3}$ m²/C) ;
 - de l'autre, les céramiques monocristallines PZN-PT ($d_{33} = 2 500 \times 10^{-12}$ C/N, $\epsilon_{33} = 6 700\epsilon_0$, $g_{33} = 42,1 \times 10^{-3}$ m²/C).
- avec ϵ_0 est la permittivité du vide.

On peut constater que le polymère a une grande constante piézoélectrique g_{33} et que le matériau monocristallin a un produit $d_{33}g_{33}$ très élevé ($105 250 \times 10^{-15}$ m²/N). Cependant, la fabrication de ces deux matériaux de taille centimétrique est aujourd'hui un

challenge technologique. Pour des applications de masse, les recherches se focalisent sur l'amélioration des propriétés des céramiques polycristallines PZT. Ces céramiques rassemblent des composés réalisés à partir d'oxyde de plomb, de zirconium et de titanate. Elles sont, depuis des années, largement utilisées dans bon nombre d'applications, grâce à leur très bonnes propriétés piézoélectriques. Dans le commerce, on trouve des matériaux PZT dont le produit $g_{ij} d_{ij}$ est compris entre $5 000 \times 10^{-15}$ m²/N et $14 000 \times 10^{-15}$ m²/N (tableau 1) [3] [4]. Le PZT-5H est le plus couramment utilisé. Le choix d'un matériau pour une application particulière dépend de paramètres comme :

- la plage de variation de la température ($-20 < T < 80$ °C) limitée par la température de Curie ;
- la fréquence de fonctionnement ;
- la force appliquée (0,1 à 3 N) ;
- la durée de vie ($> 10^6$ cycles).

Enfin, le tableau 1 montre que l'usage du mode 33 est intrinsèquement le plus intéressant quel que soit le matériau.

1.3 Classification des modes de conversions d'énergie au regard des applications

Les applications de puissance de la piézoélectricité peuvent être classées en trois catégories suivant les modes de conversion d'énergie :

- la conversion électromécanique ;
- la conversion mécano-électrique ;
- la conversion électro-mécano-électrique.

Les applications sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2 – Applications de puissance des éléments piézoélectriques

Conversion	Applications	Puissance/Énergie	Fréquence
Électromécanique	Sonar	Jusqu'à quelques kW	3 à 300 kHz
	Nettoyage par ultrasons	100 W	100 kHz
	Soudure par ultrasons	3 kW	20 à 70 kHz
	Actionneurs	mW à 100 W	1 Hz au MHz
Mécano-électrique	Allume-gaz	10 mJ	Choc
	Interrupteur sans-fil	200 µJ	Choc
	Microsources	0,1 µW à 100 µW	1 à 200 Hz
Électro-mécano-électrique	Transformateur statique convertisseur DC/DC	µW à 100 W	50 kHz à 2 MHz

1.3.1 Conversion électromécanique

La conversion électromécanique concerne principalement la **génération d'ultrasons de puissance** (sonar, nettoyeur, soudure) et l'**actionnement**.

Les **sonars** sont utilisés pour détecter et situer les objets sous l'eau. L'amplificateur de puissance qui alimente le transducteur est généralement linéaire ; cependant, des techniques à haut rendement existent. Elles consistent à approximer une onde sinusoïdale par une association convenable de rampes de courant. Ces dernières ont des pentes différentes et sont réalisées à partir de plusieurs inductances par des convertisseurs entrelacés. La fréquence d'émission est choisie en fonction de l'application. Les hautes fréquences (plusieurs dizaines ou centaines de kHz) permettent d'avoir une bonne résolution. Plus les fréquences sont basses, plus les distances de détection sont grandes, mais la résolution diminue. Les puissances d'émission sont de l'ordre de quelques kW.

Les **nettoyeurs à ultrasons** sont utilisés par exemple pour le nettoyage de bijoux ou de pièces. La fréquence est d'environ 100 kHz et la puissance d'une centaine de watts.

Le **soudage par ultrasons** (cf [BM 7 775]) est une technique d'assemblage pour les matériaux thermofusibles comme le plastique. Les fréquences typiquement utilisées sont la dizaine de kHz et les amplitudes des vibrations varient entre 10 et 120 μm , en fonction du type de matériel et de la forme des pièces à assembler.

Les générateurs à ultrasons sont utilisés aussi pour l'**homogénéisation**. C'est un procédé mécanique qui permet de réduire les particules dans un liquide pour qu'elles deviennent uniformément petites et correctement distribuées. Un traitement ultrasonique peut encore être utilisé pour désintégrer les fibres, matériaux celluloseux en fines particules et casser les parois des structures de cellules, ce qui permet de plus libérer les substances intracellulaires comme l'amidon ou le sucre dans le liquide.

L'alimentation des **actionneurs piézoélectriques** est réalisée par des convertisseurs statiques fonctionnant en élévateur de tension. Leur efficacité est améliorée par des techniques de récupération de l'énergie stockée dans la capacité d'entrée de l'élément piézoélectrique.

1.3.2 Conversion mécano-électrique

L'application la plus connue en conversion mécano-électrique est l'**allume-gaz**. L'énergie de l'étincelle qui est libérée par le générateur piézoélectrique à chocs est de l'ordre de 10 mJ. La durée est d'environ 100 μs , pour une tension d'environ 10 kV et un courant d'environ 10 mA.

L'application qui se développe donc aujourd'hui est la **micro-source** dont l'énergie est issue des vibrations ambiantes permettant l'alimentation des réseaux de capteurs abandonnés WSN (*Wireless Sensor Network*) [5] (figure 3). La gamme de puissance visée est comprise entre 0,1 et 100 μW [6] [7] [8].

On peut citer aussi comme application, l'**interrupteur sans-fil** pour l'éclairage. L'énergie utile (200 μJ) pour la transmission d'un signal par RF est fournie par la pression que le doigt exerce sur le bouton de l'interrupteur. La portée du signal est de maximum 30 m à l'intérieur du bâtiment et de maximum 300 m à l'extérieur. La bande de fréquence allouée est 868 MHz.

La société ENOCEAN propose pour l'habitat un ensemble de capteurs sans batterie alimentés par des sources autonomes récupérant l'énergie mécanique, thermique ou lumineuse (pression sur un bouton, récupération de chaleur, etc.) qui permet de contrôler les dispositifs de confort de la maison et d'optimiser la gestion de l'énergie (figure 4).

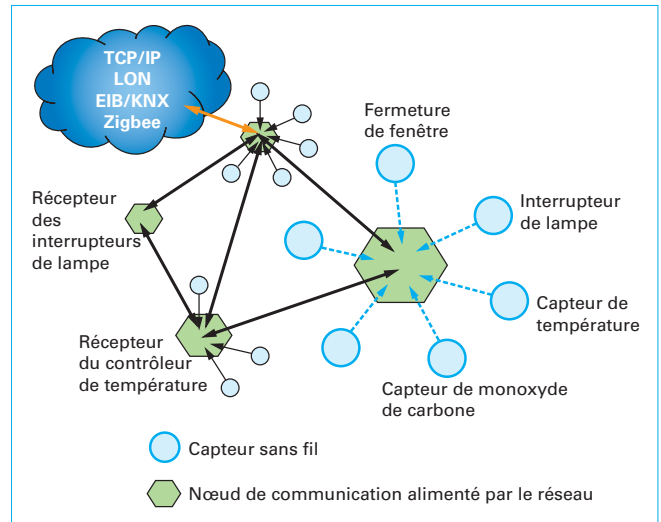


Figure 3 – Structure d'un réseau de capteurs abandonnés

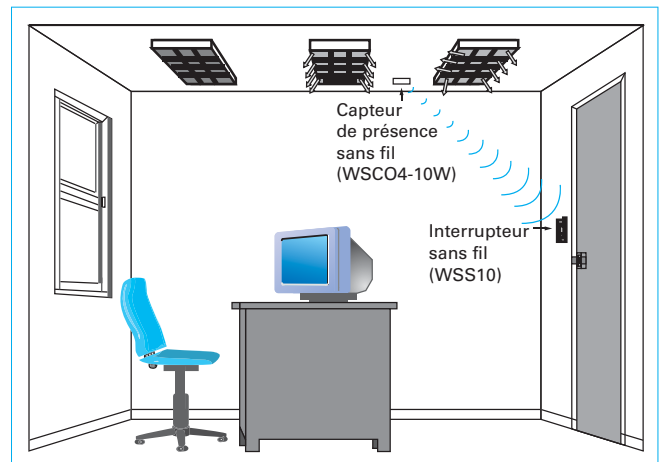


Figure 4 – Principe de l'interrupteur sans-fil

1.3.3 Conversion électro-mécano-électrique

La conversion électro-mécano-électrique concerne le transformateur piézoélectrique utilisé principalement dans les alimentations de **lampes fluorescentes**. La gamme de puissance est comprise entre 1 μW et 100 W et la fréquence de fonctionnement entre 50 kHz et 2 MHz.

2. Conversion mécano/électrique (récupération d'énergie)

2.1 Domaines d'applications

L'exploitation de l'effet piézoélectrique direct constitue un processus de génération d'énergie électrique à partir d'une source mécanique. Si un élément piézoélectrique est placé dans un dispo-

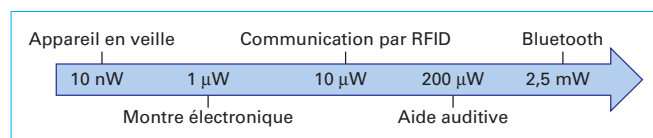


Figure 5 – Puissance consommée par des appareils électroniques

stitif vibrant, il apparaît un champ électrique alternatif à ses bornes. Si cette énergie électrique est dissipée par effet joule dans une résistance, les vibrations du dispositif sont significativement diminuées ; c'est ce que l'on appelle l'amortissement passif des structures. Si maintenant l'énergie électrique est stockée dans une capacité ou une batterie, un système de récupération d'énergie est obtenu [9]. La récupération d'énergie piézoélectrique apparaît aujourd'hui comme un thème éminent dont l'intérêt des chercheurs ne fait que croître. Une large gamme d'applications est visée par les dispositifs de récupération, on peut citer :

- les réseaux de capteurs abandonnés sans-fil servant au monitoring des structures ;
- la recharge de batterie ;
- l'augmentation de l'autonomie de différents appareils ;
- la mesure de pression des pneus ;
- l'interrupteur sans-fil pour l'éclairage, etc.

L'application la plus plus prometteuse semble être les **réseaux de capteurs abandonnés** en raison du coût élevé du déploiement d'un réseau filaire ou du remplacement des batteries dont la durée de vie n'est pas suffisante.

Exemple : la puissance moyenne consommée par un nœud de capteur est de l'ordre de 100 μW ; ainsi, la durée de vie pour 1 cm^3 de batterie au lithium (800 W/L) est de 1 an.

La consommation de quelques appareils électroniques pouvant être alimentés par des dispositifs de récupération d'énergie est présentée figure 5.

Les vibrations ambiantes sont présentes dans différents environnements comme l'automobile, les immeubles, les structures (ponts, voies ferrées), les machines industrielles, etc. Le tableau 3 [10] donne des valeurs d'amplitude et de fréquence du fondamental de l'accélération pour différentes sources de vibrations. Ces données sont d'autant plus importantes que la puissance récupérée est proportionnelle à l'accélération au carré et inversement proportionnelle à la fréquence, comme nous allons le voir par la suite. Les vibrations peuvent être continues, impulsives ou intermittentes :

- les vibrations continues ont une amplitude constante ;
- les impulsives concernent les chocs ;
- les intermittentes ont une amplitude qui varie avec le temps.

Les vibrations continues sont les plus attrayantes pour la récupération d'énergie.

La densité de puissance des dispositifs de récupération piézoélectrique d'énergie est de l'ordre de 200 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ (tableau 4).

En comparaison, les panneaux solaires ont une densité de puissance de l'ordre de 10 000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, ce qui est de deux ordres de grandeur supérieurs aux autres sources. Mais, dans un environnement fermé éclairé artificiellement, cette densité de puissance chute à environ 50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

La récupération de l'énergie de vibration peut être aussi réalisée par des dispositifs magnétique ou capacitif (cf. [RE 135]). Mais c'est la solution piézoélectrique qui est la plus prometteuse car elle a le coefficient de couplage électromécanique le plus élevé, ne nécessitant pas de polarisation et le matériau est bien adapté aux technologies de fabrication des microsystèmes.

 Tableau 3 – Accélération (m/s^2) et fréquence du fondamental pour différentes sources de vibration [10]

Source de vibration	Accélération (m/s^2)	$F_{\text{fondamental}}$ (Hz)
Compartiment moteur thermique	12	200
Machine-outil	10	70
Broyeur	6,4	121
Sèche-linge	3,5	12
Personne tapant du talon	3	1
Tableau de bord de voiture	3	13
Cadre de porte après fermeture	3	123
Four à micro-onde	2,5	12
HVAC dans un immeuble	0,2 à 1,5	60
Lecteur CD sur ordinateur	0,6	75
Sol d'une pièce très fréquentée	0,2	100

Tableau 4 – Données typiques pour différentes techniques de récupération d'énergie

Énergie	Conditions	Densité de puissance
Vibration piézoélectrique	1 m/s^2	200 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Vibration électrostatique	1 m/s^2	50 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Vibration électromagnétique	1 m/s^2	15 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Solaire	Extérieur	10 000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Solaire	Intérieur	50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Thermique	$\Delta T = 5^\circ\text{C}$	60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Ondes RF téléphone portable	Extérieur	0,1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Les bases théoriques permettent la modélisation des systèmes de récupération d'énergie (§ 2.2) et différentes structures de convertisseur assurent la bonne alimentation de la charge (§ 2.3).

2.2 Modélisation

Le principe d'un dispositif piézoélectrique de récupération d'énergie est représenté figure 6. Il est typiquement constitué d'une poutre dont une extrémité est rigidement liée à la structure vibrante. À l'autre extrémité est placée une masselotte, qui a l'avantage d'engendrer un plus grand débattement. Elle permet aussi un ajustement de la fréquence de résonance et augmente la bande passante. Les éléments piézoélectriques sont collés d'un côté (unimorphe) ou de chaque côté (bimorphe) de la poutre, près de l'encastrement, à l'endroit de contrainte maximale. Le mode de conversion piézoélectrique 33 est difficilement exploitable ici au regard des faibles niveaux de forces appliquées. Le mode 31 permet, quant à lui, à travers la flexion de la poutre, d'optimiser la contrainte appliquée au niveau du matériau piézoélectrique. Les

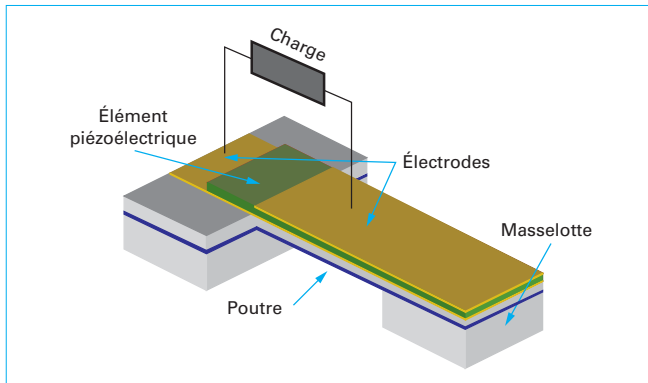


Figure 6 – Dispositif piézoélectrique de récupération d'énergie

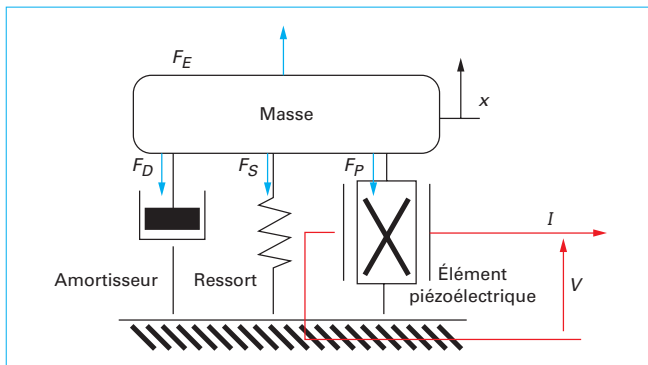


Figure 7 – Modèle à constante localisée du générateur

dimensions sont généralement centimétriques ou millimétriques, le but étant d'intégrer ce dispositif dans une puce.

Le comportement électromécanique du générateur est étudié de façon simplifiée. En effet, autour de la fréquence de résonance de la structure, et dans le cas d'un faible déplacement pour lequel le mouvement reste linéaire, le générateur piézoélectrique peut être modélisé par un ensemble « masse + piézo + ressort + amortisseur » comme le montre la figure 7 [11]. Avec cette approche simple, la structure considérée équivaut à une masse M reposant à la fois sur un ressort de raideur K , représentant la rigidité mécanique de la structure, sur un amortisseur ou dissipateur d'amortissement D (en kg/s), correspondant aux pertes mécaniques de la structure, et sur un élément piézoélectrique idéal collé sur la structure. Le déplacement de la masse est noté x , I et V étant le courant et la tension de sortie récoltés sur l'élément piézoélectrique.

Les équations constitutives de l'élément piézoélectrique sont les équations (7). F_P est la force appliquée sur l'élément piézoélectrique. Ces équations sont dérivées des équations standards (figure 2), qui relient la contrainte T_3 , la déformation S_3 , le champ électrique E_3 et l'induction électrique D_3 . Elles font intervenir les dimensions géométriques de l'élément piézoélectrique :

$$\begin{cases} F_P = K_P x + \alpha V \\ I = \alpha \dot{x} - C_0 \dot{V} \end{cases} \quad (7)$$

avec K_P rigidité de l'élément piézoélectrique quand il est court-circuité,

C_0 capacité bloquée de l'élément piézoélectrique,

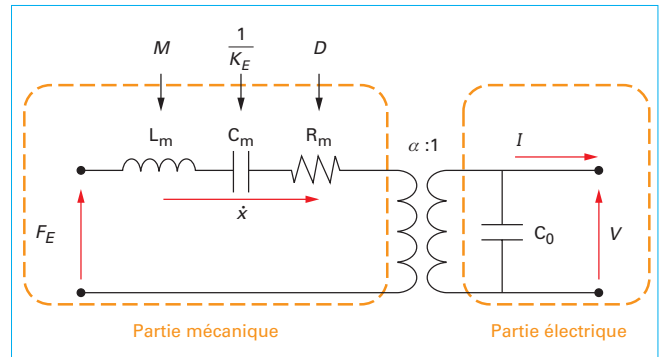


Figure 8 – Schéma électrique équivalent du générateur

α (N/V) facteur de force, c'est-à-dire le rapport entre la force F_P et la tension V à déformation nulle.

Les équations constitutives du modèle à constante localisée du générateur sont les équations (8). La première équation traduit l'équilibre dynamique du système et la seconde correspond à l'équilibre électrique.

$$\begin{cases} M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx + K_P x + \alpha V = F_E \\ I = \alpha \dot{x} - C_0 \dot{V} \end{cases} \quad (8)$$

À partir des équations (8), nous pouvons établir un **schéma électrique équivalent du générateur**. La partie électrique est séparée de la partie mécanique par un transformateur parfait de gain α comme représenté figure 8. Par analogie, dans la branche mécanique la raideur équivalente $K_E = K + K_P$ est représentée par une capacité C_m , la masse M par une inductance L_m et l'amortissement D par une résistance R_m .

Afin d'évaluer la puissance fournie par l'élément piézoélectrique, nous allons établir l'expression de la tension de sortie. On considère comme hypothèse que le système est faiblement couplé, c'est-à-dire que l'extraction d'énergie vient très peu perturber le système en vibration. Ainsi, la fréquence de résonance f_0 (9) est celle de la structure mécanique et reste fixe quelle que soit la charge :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K + K_P}{M}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_m C_m}} \quad (9)$$

Dans le cas d'une excitation mécanique entretenue à la fréquence de résonance, le schéma électrique peut donc être simplifié comme présenté à la figure 9a. Les formes d'ondes associées sont présentées sur la figure 9b. La consommation du circuit auquel est destinée l'énergie électrique est modélisée par une résistance R . Le courant I_{eq} est l'image de la vitesse de vibration.

L'expression de la tension de sortie est donc :

$$V = \frac{\alpha R}{(\alpha^2 R + D) + j\omega_0 R D C_0} F_E$$

et celle de la puissance :

$$P = \frac{VV^*}{2R} = \frac{\alpha^2 R}{\alpha^4 R^2 + 2\alpha^2 R D + D^2 + \alpha_0^2 R^2 D^2 C_0^2} \frac{F_E^2}{2} \quad (10)$$

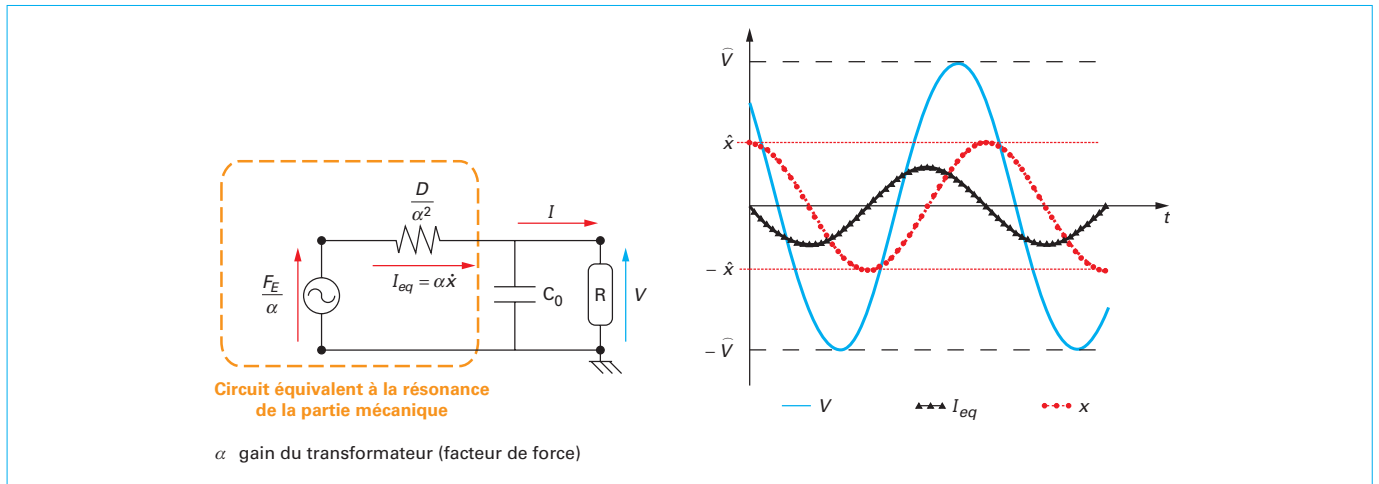


Figure 9 – Schéma électrique à la résonance et formes d'onde

Le facteur de force α étant très faible, nous pouvons simplifier l'expression de la puissance ($\alpha \rightarrow 0$) :

$$P = -\frac{\alpha^2 R}{1 + C_0^2 \omega_0^2 R^2} \frac{F_E^2}{2D^2} \quad (11)$$

Le maximum de puissance est obtenu pour la résistance :

$$R_{\text{opt}} = \frac{1}{C_0 \omega_0}$$

et son expression est :

$$P = -\frac{\alpha^2 R}{4C_0 \omega_0 D^2} F_E^2 \quad (12)$$

Nous remarquons que la puissance est proportionnelle au carré de la force appliquée (ou de l'accélération γ car $F_E = M\gamma$) et inversement proportionnelle à la fréquence.

2.3 Convertisseurs associés à la récupération d'énergie

La tension alternative fournie par l'élément piézoélectrique ne permet pas une alimentation directe des circuits électriques en raison de la forte dépendance de la tension et de la puissance de sortie avec la charge. Il est donc nécessaire d'introduire un **circuit de conversion** permettant l'adaptation d'impédance. Classiquement, cela revient à faire du *tracking* du point de puissance maximale (MPPT *Maximum Power Point Tracking*). Cependant, en raison des faibles niveaux de puissance mis en jeu (la centaine de μW) et du besoin d'autoalimentation des circuits de commande, la mise en œuvre de ces montages est délicate. C'est pour cette raison que des structures simples de convertisseur sont souvent utilisées, composées d'un redresseur avec filtrage capacitif, auxquelles est généralement ajouté un dispositif non linéaire qui permet d'augmenter la puissance de sortie en optimisant la conversion électromécanique. Le principe consiste à inverser la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique lorsqu'elle atteint son maximum. De cette manière, une plus grande quantité d'énergie est fournie au cycle suivant. Cette technique non linéaire de récupération d'énergie, mise au point par l'équipe du professeur D. Guyomar du laboratoire de Génie Électrique et de Ferroélectricité de Lyon, est appelée SSHI pour *Synchronized Switch Harvesting on*

Inductor [12] [13]. Nous allons d'abord présenter le circuit classique constitué d'un simple pont redresseur, puis nous détaillerons trois techniques non linéaires.

2.3.1 Circuit classique composé d'un redresseur avec filtrage capacitif

C'est la structure la plus simple : un **pont redresseur complet** est directement relié à l'élément piézoélectrique. Le filtrage est effectué par une capacité. La tension de sortie redressée V_{DC} est considérée comme parfaitement continue. Dans ce cas, la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique n'est plus sinusoïdale, le déplacement x et la vitesse de vibration I_{eq} restent sinusoïdaux. Lorsque le pont redresseur est passant, une tension continue positive ou négative est appliquée à l'élément piézoélectrique. En revanche, lorsque le pont est bloqué, la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique évolue sinusoïdalement, car la dérivée de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique \dot{V} est proportionnelle à \dot{x} , cf. équation (8). Le schéma électrique de l'élément piézoélectrique et du circuit redresseur, ainsi que les formes d'ondes associées sont représentées sur la figure 10.

La période est notée T , les instants T_1 et T_3 correspondent au passage par zéro de la vitesse de vibration, ou encore, au minimum et au maximum du déplacement. Durant une demi-période, on peut donc écrire la relation suivante :

$$\int_{T_1}^{T_3} \dot{V} dt = V_{\text{DC}} - (-V_{\text{DC}}) = 2V_{\text{DC}} \quad (13)$$

Si l'on considère que la structure est sans pertes, la valeur moyenne du courant I délivré par l'élément piézoélectrique sur une demi-période est égale au courant moyen dans la charge :

$$\int_{T_1}^{T_3} I dt = \frac{V_{\text{DC}}}{R} \frac{T}{2} \quad (14)$$

L'intégration de l'équation (14) dans la deuxième équation de (7) nous donne :

$$2\alpha \hat{x} - 2C_0 V_{\text{DC}} = \frac{V_{\text{DC}}}{R} \frac{T}{2} \quad (15)$$

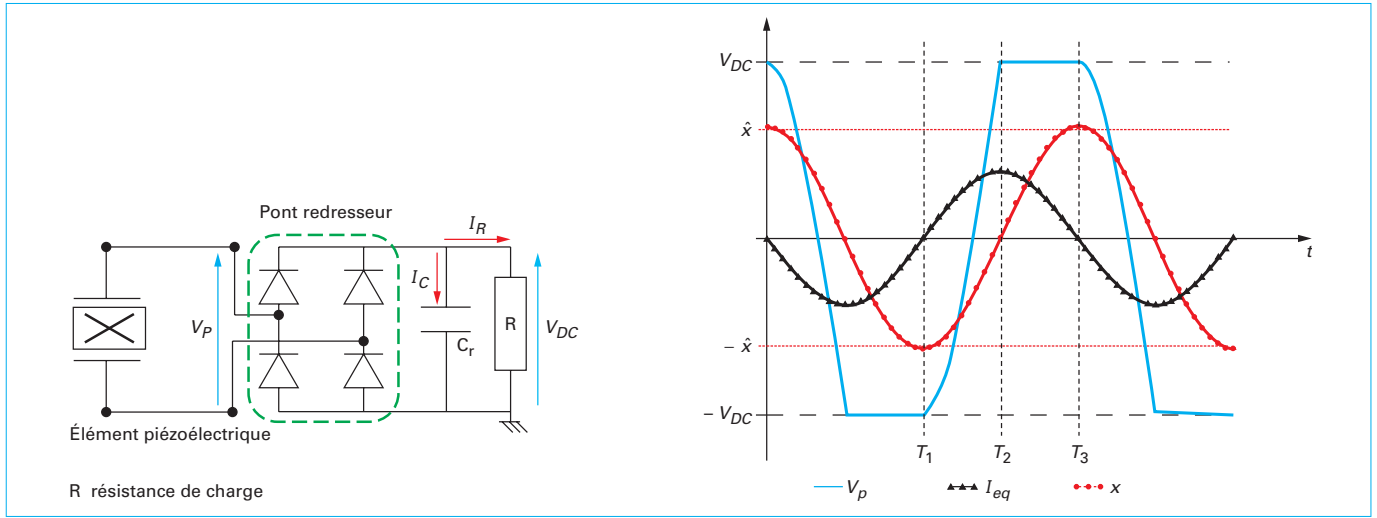


Figure 10 – Circuit classique de récupération d'énergie et formes d'onde associées

Ainsi, la tension V_{DC} en fonction de l'amplitude maximale du déplacement a pour expression :

$$V_{DC} = \frac{2R\alpha\omega_0}{\pi + 2RC_0\omega_0} \hat{x} \quad (16)$$

La tension de sortie dépend donc du déplacement maximal \hat{x} . Pour l'exprimer en fonction de la force appliquée F_E , on réalise plusieurs hypothèses :

- d'abord, la fréquence de résonance est celle de la structure, elle n'est pas influencée par le circuit électrique ;
- ensuite, on néglige le terme αV dans la première équation (7).

Cela revient à écrire que :

$$F_E = D\omega_0 \hat{x}$$

L'expression de la tension de sortie est donc :

$$V_{DC} = \frac{2R\alpha}{\pi + 2RC_0\omega_0} \frac{F_E}{D}$$

et celle de la puissance :

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R} = \frac{4R\alpha^2}{(\pi + 2RC_0\omega_0)^2} \frac{F_E^2}{D^2} \quad (17)$$

Le maximum de puissance est obtenu pour la résistance :

$$R_{opt} = \frac{\pi}{2C_0\omega_0}$$

et son expression est :

$$P_{Max} = \frac{\alpha^2}{2\pi C_0\omega_0} \frac{F_E^2}{D^2} \quad (18)$$

Il est à noter que lors du fonctionnement à puissance maximale avec l'adaptation d'impédance, l'instant T_2 est égal à $T/4$.

2.3.2 Techniques d'optimisation

Le principe d'optimisation non linéaire est basé sur l'ajout d'un interrupteur et d'une inductance L en parallèle ou en série avec

l'élément piézoélectrique. La loi de contrôle de cette technique consiste à fermer brièvement l'interrupteur à chaque extremum de la déformation ou au passage par zéro de la vitesse dans les éléments piézoélectriques. Cela revient à mettre en phase la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique et la vitesse de vibration, et donc de minimiser l'énergie stockée dans la capacité C_0 . Ou, plus exactement, cela revient à modifier les conditions électriques de façon à ce que l'énergie électrostatique sur les électrodes des éléments piézoélectriques soit toujours croissante. Plus l'accumulation de charges électriques sur l'électrode se fait à tension élevée et plus la conversion électromécanique est efficace.

2.3.2.1 SSHI parallèle

Le schéma de l'élément piézoélectrique et du circuit SSHI parallèle, ainsi que les formes d'ondes associées sont présentés sur la figure 11.

Les instants T_1 et T_4 correspondent au passage par zéro de la vitesse de vibration, ou encore, au minimum et au maximum du déplacement. À l'instant T_1 , l'interrupteur K est fermé, l'inductance L et la capacité interne C_0 de l'élément piézoélectrique se mettent à osciller, le courant I_P et la tension V_P évoluent alors sinusoïdalement. À la moitié de la période d'oscillation T_{LC} (instant T_2), le courant s'annule (circuit unidirectionnel en courant) et la tension atteint la valeur :

$$V_{DC} \exp\left(-\frac{\pi}{2Q_{LC}}\right) = V_{DC} q_{LC}$$

avec Q_{LC} facteur de qualité du circuit résonant représentant les pertes dans l'inductance et l'interrupteur.

À l'échelle de la vibration mécanique, on peut considérer ce temps d'inversion de la tension comme quasi-instantané $T_{LC} \ll T$. Comme précédemment, le courant moyen à la sortie de l'élément piézoélectrique durant une demi-période d'oscillation mécanique est égal au courant moyen dans la charge :

$$\int_{T_1}^{T_4} Idt = 2\alpha\hat{x} - C_0(1 - q_{LC}) V_{DC} = \frac{V_{DC}}{R} \frac{T}{2} \quad (19)$$

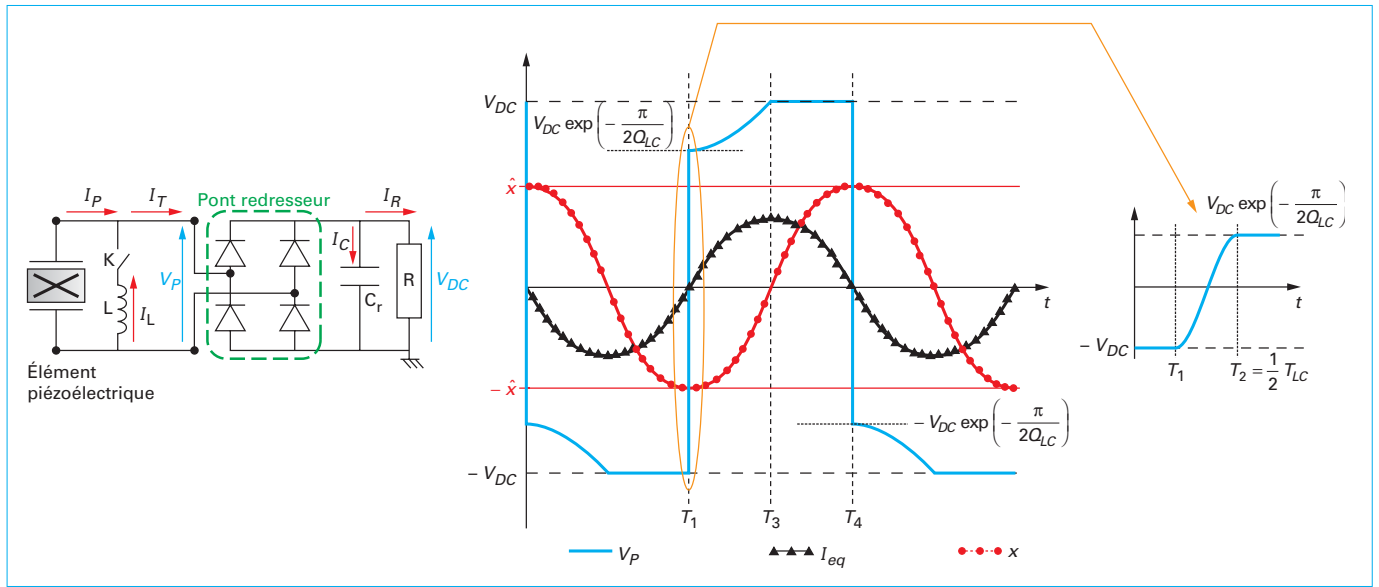


Figure 11 – Technique non linéaire parallèle de récupération d'énergie et formes d'onde associées

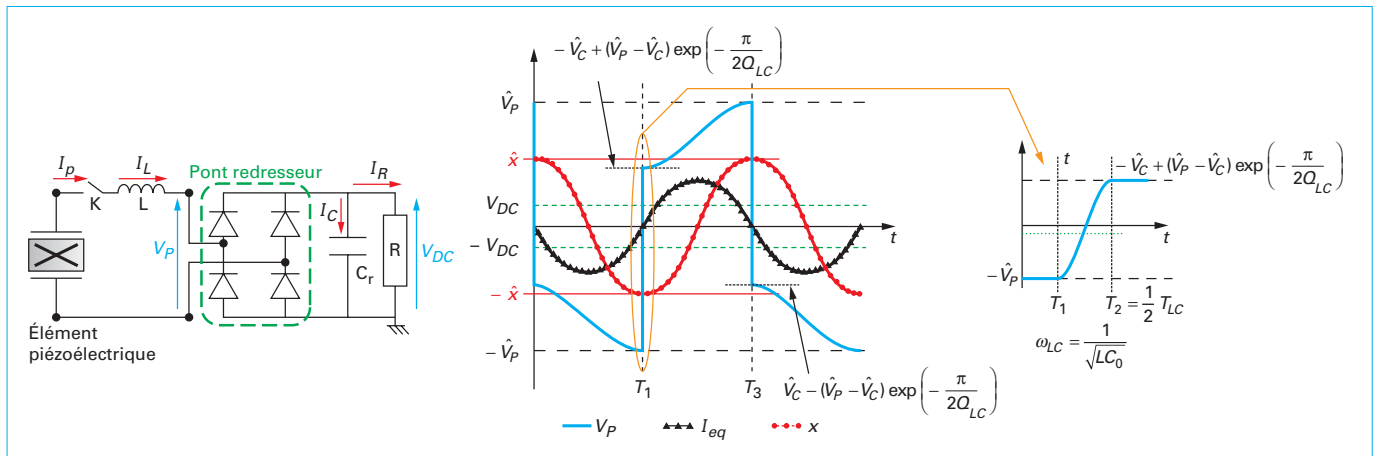


Figure 12 – Technique non linéaire série de récupération d'énergie et formes d'onde associées

L'expression de la tension de sortie en fonction de l'amplitude de la force appliquée est donc :

$$V_{DC} = \frac{2R\alpha}{\pi + (1 - q_{LC})RC_0\omega_0} \frac{F_E}{D} \quad (20)$$

Celle de la puissance est :

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R} = \frac{4R\alpha^2}{[\pi + (1 - q_{LC})RC_0\omega_0]^2} \frac{F_E^2}{D^2} \quad (21)$$

Le maximum de puissance est obtenu pour la résistance :

$$R_{opt} = \frac{\pi}{(1 - q_{LC})C_0\omega_0}$$

et son expression est :

$$P_{Max} = \frac{\alpha^2}{\pi C_0\omega_0(1 - q_{LC})} \frac{F_E^2}{D^2} \quad (22)$$

Ici aussi, lors du fonctionnement à puissance maximale avec l'adaptation d'impédance, l'instant T_3 est égal à $T/4$.

2.3.2.2 SSHI série

Le schéma de la variante, dite SSHI série, de cette technique d'optimisation non linéaire, ainsi que les formes d'ondes associées sont présentés sur la figure 12.

Cette version a l'inconvénient de ne transférer l'énergie que pendant un temps très court (temps de fermeture de K), correspondant à la demi-période d'oscillation du circuit LC_0 .

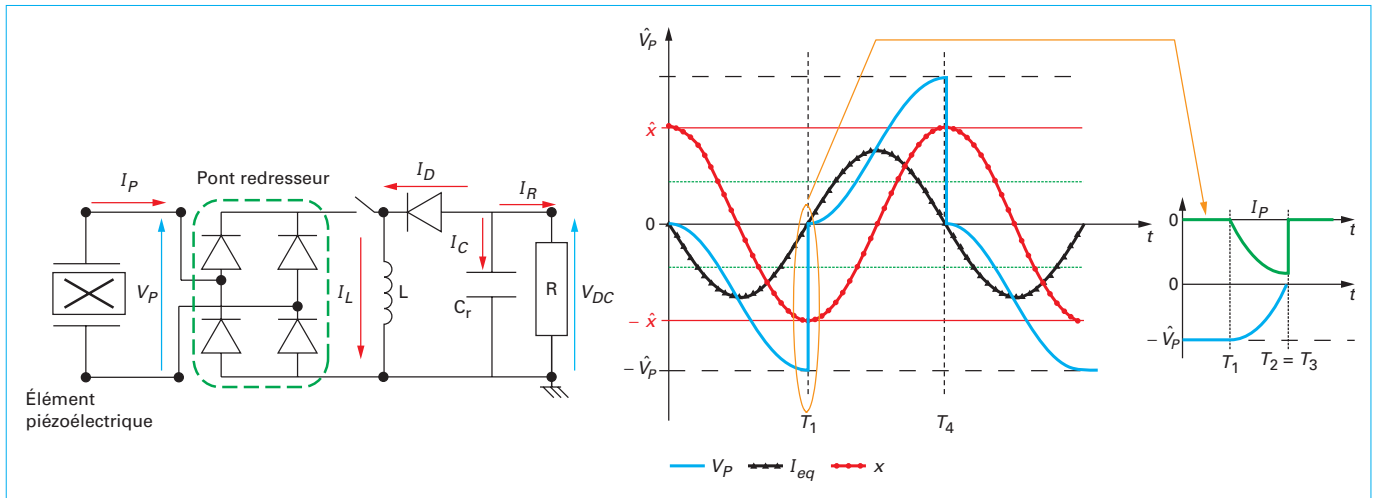


Figure 13 – Structure Buck-Boost et formes d'onde associées

Comme précédemment, le courant moyen à la sortie de l'élément piézoélectrique durant une demi-période d'oscillation mécanique est égal au courant moyen dans la charge :

$$\int_{T_1}^{T_4} I_D dt = C_0 (V_P - V_{DC}) (1 + Q_{LC}) = \frac{V_{DC}}{R} \frac{T}{2} \quad (23)$$

L'expression de la tension de sortie en fonction de l'amplitude de la force appliquée est donc :

$$V_{DC} = \frac{2\alpha R (1 + q_{LC})}{2C_0 R \omega_0 (1 + q_{LC}) + (1 - q_{LC}) \pi} \frac{F_E}{D} \quad (24)$$

Celle de la puissance est :

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R} = \frac{4R\alpha^2 (1 + q_{LC})^2}{[\pi (1 - q_{LC}) + 2RC_0 \omega_0 (1 + q_{LC})]^2} \frac{F_E^2}{D^2} \quad (25)$$

La puissance présente un maximum qui est atteint pour la résistance :

$$R_{opt} = \frac{\pi (1 - q_{LC})}{2C_0 \omega_0 (1 + q_{LC})}$$

et son expression est :

$$P_{Max} = \frac{\alpha^2 (1 + q_{LC})}{2\pi C_0 \omega_0 (1 - q_{LC})} \frac{F_E^2}{D^2} \quad (26)$$

2.3.2.3 Structure Buck-Boost

Une autre structure, alliant la technique non linéaire et un convertisseur à stockage inductif, est présentée sur la figure 13 [14]. L'inductance servant à l'inversion de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique est aussi utilisée comme réservoir d'énergie dans le hacheur de sortie. Cette structure a l'avantage d'optimiser conjointement la conversion électromécanique et le circuit électrique.

Le principe de fonctionnement est le suivant, l'interrupteur K est fermé lorsque la tension V_p est à son maximum. Ce maximum coïncide avec un extremum de la déformation du matériau. L'énergie stockée dans la capacité interne C_0 de l'élément est alors transférée à l'inductance L , ce qui a pour effet de ramener la tension à zéro. Puis, à l'ouverture de l'interrupteur, l'inductance se décharge

dans la capacité de sortie. Le temps d'extraction de l'énergie est très bref, le circuit reste ouvert la plus grande partie de la période. Ainsi, le courant I_P à la sortie de l'élément est pratiquement toujours nul, d'où l'expression de la tension piézoélectrique maximale :

$$\hat{V}_P = 2 \frac{\alpha}{C_0} \hat{x}$$

L'expression de la puissance à la sortie de l'élément piézoélectrique est :

$$P = 2 \frac{1}{2} C_0 \hat{V}_P^2 f = 2 \frac{\alpha^2 \omega}{\pi C_0} \hat{x}^2 \quad (27)$$

L'expression de la puissance de sortie en fonction de l'amplitude de la force est donc :

$$P = 2 \frac{\alpha^2}{\pi C_0 \omega_0 D^2} F_E^2 \quad (28)$$

La puissance de sortie de ce montage ne dépend pas de la résistance de charge. Ainsi, cette structure, en plus d'optimiser la conversion électromécanique, assure une adaptation d'impédance vis-à-vis de la charge.

2.3.3 Comparaison

La variation de la puissance, normalisée par rapport à la puissance obtenue avec le pont redresseur sans SSHI, en fonction de la résistance de charge normalisée pour les différentes techniques de récupération d'énergie, ainsi que le cycle de travail sont présentés figure 14. L'intérêt des techniques SSHI y apparaît clairement. Ces graphiques sont indépendants des paramètres du modèle. Seul le coefficient d'inversion q_{LC} est nécessaire pour le tracé. Pratiquement, il est difficile d'obtenir une valeur de q_{LC} supérieure à 0,7, ce qui correspond à une augmentation de la puissance d'un rapport 8. La structure Buck-Boost permet d'augmenter la puissance d'un facteur 4. L'aire des cycles correspond à l'énergie échangée sur une période, ils sont tracés pour la charge optimale.

Il est à noter que cette technique est intéressante pour les structures faiblement couplées ou lors d'un fonctionnement en dehors de la fréquence de résonance. Dans le cas contraire, la puissance récupérée tend vers la même valeur.

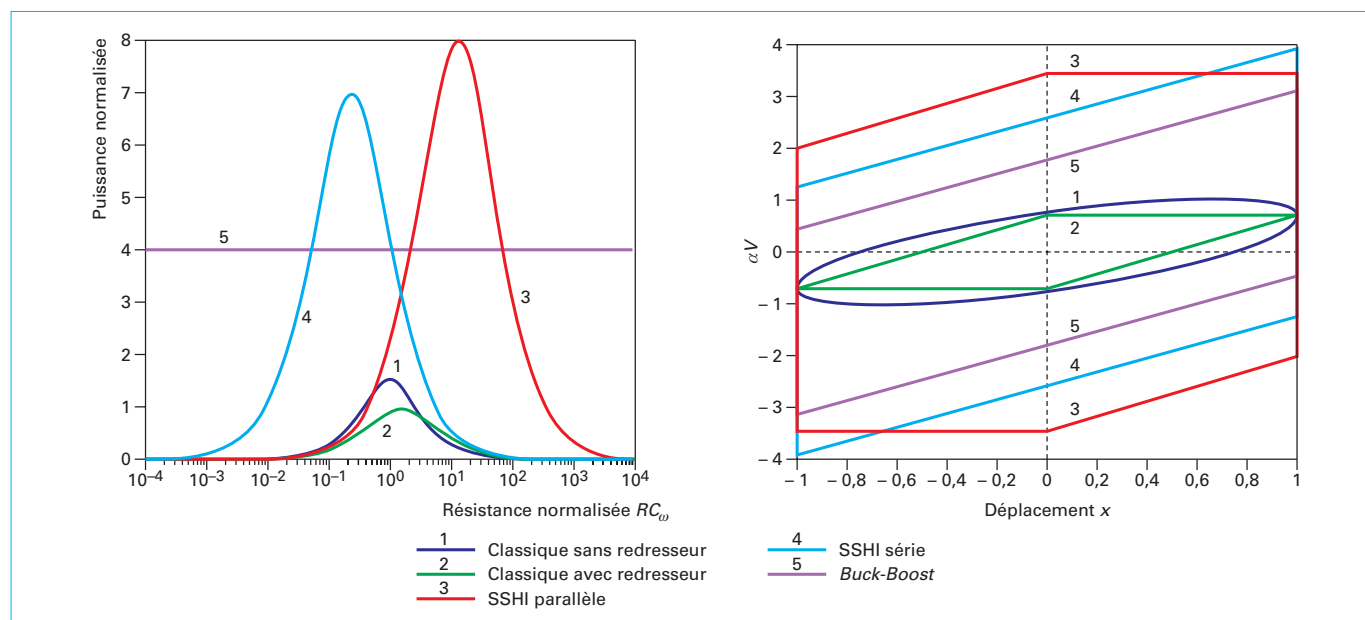


Figure 14 – Variation de la puissance normalisée en fonction de la résistance de charge et cycle de travail

2.4 Microgénérateur à large bande passante

Le dispositif de récupération d'énergie précédent, basé uniquement sur la vibration d'une poutre, présente le défaut de ne fonctionner qu'à une seule fréquence et donc de ne pouvoir récupérer l'énergie que du fondamental de la vibration. Afin d'augmenter la bande passante du dispositif et de permettre la récupération de l'énergie d'une vibration quelconque, il est possible d'utiliser un système non linéaire constitué d'une poutre piézoélectrique couplée à un aimant [15]. Ainsi, grâce à un autre aimant, de même pôle, placé en regard, le dispositif devient bistable et l'extrémité de la poutre présente deux positions stables. Le schéma de principe d'un microgénérateur non linéaire est donné à la figure 15.

Les deux aimants de même pôle créent une force de répulsion verticale F_{mag} , qui est non linéaire et dont une expression approchée en fonction du déplacement x est :

$$F_{\text{mag}} = Ax - Bx^3$$

avec A et B sont deux constantes positives.

Cette force est conservative et agit uniquement sur la raideur de la poutre. La nouvelle raideur K_{NL} due aux aimants a pour valeur :

$$K_{\text{NL}} = F_{\text{mag}}/x = A - Bx^2$$

Ainsi, le modèle du microgénérateur reste le même mais avec une nouvelle raideur équivalente non linéaire :

$$K_{\text{NL}}^E = K - K_{\text{NL}}$$

L'énergie potentielle élastique $U(x)$ de la poutre est représentée sur la figure 16. Nous constatons que lorsque le coefficient $K - A$ est négatif, l'énergie potentielle présente deux minima qui correspondent à deux positions stables de la poutre. Ainsi, en dehors de la résonance, il suffit d'une faible énergie pour faire passer la poutre d'une position à une autre et obtenir un fort débattement.

La figure 17 présente un exemple de mesures expérimentales de la tension crête à la sortie des éléments piézoélectriques en

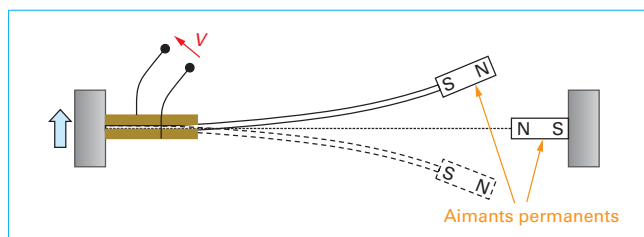


Figure 15 – Dispositif piézoélectrique de récupération d'énergie à large bande passante

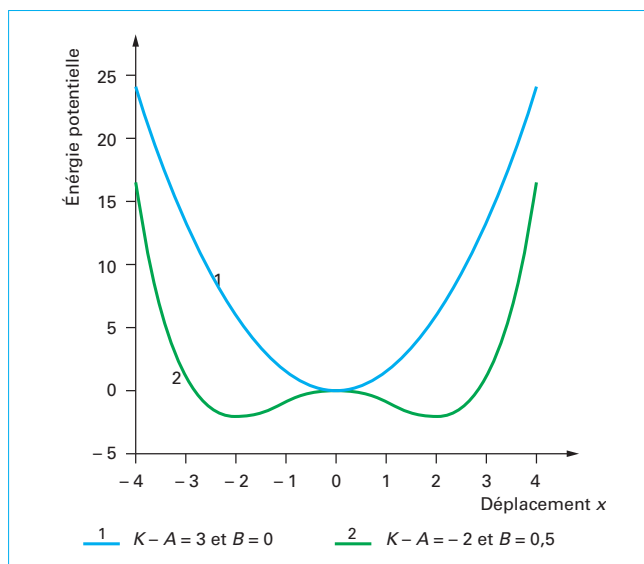


Figure 16 – Énergie potentielle élastique de la poutre

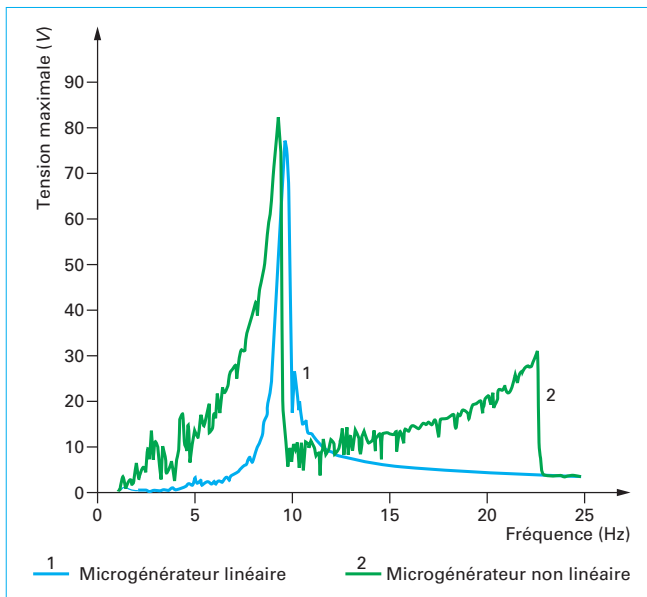


Figure 17 – Tension récupérée en fonction de la fréquence de vibration

fonction de la fréquence pour une même poutre dans le cas linéaire et dans le cas d'ajout des deux aimants. Le dispositif non linéaire permet un fonctionnement sur une plus large gamme de fréquence.

Par ailleurs, le convertisseur associé au microgénérateur non linéaire, dont la fréquence est amenée à varier, pose le problème d'optimisation de la puissance vis-à-vis de la charge. Le circuit qui est bien adapté pour ce dispositif large bande est la structure Buck-Boost car, comme on l'a vu, la puissance extraite ne dépend pas de la charge.

3. Conversion électrique/mécanique (génération ultrasonore et actionnement)

3.1 Généralités

Les matériaux piézoélectriques se déforment lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique, c'est ce que l'on appelle l'**effet piézo-électrique inverse**. Ce phénomène est à la base de différentes applications dans le domaine de l'actionnement et de la génération des ultrasons [16].

Aujourd'hui, les **actionneurs piézoélectriques** sont utilisés pour :

- le positionnement de précision dans les microscopes à sonde locale, les microscopes à force atomique ou le microscope à effet tunnel ;
- dans l'automobile, pour la suspension active, pour le réglage des appuis-tête (Toyota) ou pour l'injection directe dans les moteurs diesel (Siemens).

Les moteurs sont principalement utilisés dans les systèmes autofocus d'appareils photographiques (Canon) et dans les montres (Seiko). Les déplacements sont compris entre 10 et

2 000 μm avec des forces appliquées comprises entre 1 et 50 000 N. Les convertisseurs associés à ces actionneurs doivent fournir des niveaux de tension élevés avec des temps de réponse très courts (10 μs).

Il n'est pas possible d'examiner tous les systèmes de **génération ultrasonore de puissance** utilisant des matériaux piézoélectriques, en raison de la multitude d'applications (sonar, soudure, nettoyage, sonochimie, etc.) et de la très large gamme de fréquences utilisées (50 kHz-10 MHz). De plus, dans la majorité des cas, on utilise des alimentations linéaires de classe A.

Néanmoins, nous présentons la technique de commande d'éléments piézoélectriques pour l'échographie et une technique de précontrainte électrique pour la génération d'onde de choc.

3.2 Commande d'actionneur piézoélectrique

Les actionneurs piézoélectriques nécessitent des tensions élevées, de plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de volts afin d'avoir un champ électrique élevé et ainsi produire suffisamment de forces électrostatiques. Le gain en tension des convertisseurs associés peut alors être supérieur à plusieurs centaines. En raison des pertes dans les composants (inductance, transistor), ainsi que de la fréquence élevée de commande des actionneurs, le convertisseur élévateur conventionnel ne peut pas convenir. L'une des solutions consiste à utiliser un transformateur piézoélectrique en élévateur de tension, ce qui sera détaillé dans le paragraphe 4. Deux autres techniques sont présentées ici permettant d'obtenir des tensions élevées :

- le hacheur élévateur avec multiplicateur de tension ;
- le hacheur élévateur combiné à un autotransformateur.

Une technique permettant l'optimisation de l'énergie transférée à l'actionneur est aussi détaillée.

3.2.1 Multiplicateur de tension

Le circuit est composé d'un hacheur élévateur conventionnel mis en cascade avec un circuit à capacités commutées de type pompe de charge, comme le montre la figure 18. Il est utilisé pour des actionneurs de faible puissance. Le gain en tension du hacheur élévateur d'entrée est fortement augmenté par le réseau de diode et de capacité fonctionnant en doubleur de tension. Idéalement, ce système de pompe de charge multiplie la tension de sortie du hacheur élévateur par un facteur égal au nombre de cellules. Les condensateurs ne doivent tenir qu'une fraction de la haute tension de sortie. L'inconvénient de cette structure est la faible dynamique de variation possible de la tension de sortie liée au fait que la charge du réseau de condensateurs nécessite un certain temps.

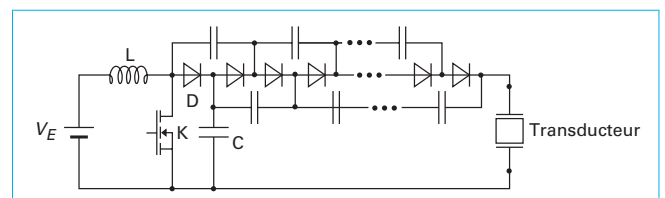


Figure 18 – Schéma électrique du montage multiplicateur de tension

3.2.2 Hacheur élévateur combiné à un autotransformateur

Le remplacement de l'inductance dans un hacheur élévateur standard par un autotransformateur, comme le montre la figure 19, permet d'obtenir une combinaison des topologies de la Flyback et du hacheur élévateur. Comme dans un hacheur élévateur, lorsque l'interrupteur est fermé, le courant croît linéairement dans le primaire de l'inductance couplée. Lorsque l'interrupteur est ouvert, la diode voit une combinaison de la tension d'entrée, de la tension de l'enroulement primaire et de la tension de l'enroulement secondaire, qui dépend du rapport de transformation entre les enroulements primaire et secondaire. Le gain en tension est alors déterminé par le rapport cyclique de commutation du transistor et le nombre de spires du transformateur.

Cette structure nécessite beaucoup moins de composant que la précédente. L'introduction d'une inductance à point milieu présente l'intérêt d'accroître la tension de sortie.

■ En régime continu :

$$V_S = \frac{V_E}{1-\alpha} [1 + 2m(1+m)\alpha] \quad (29)$$

avec $m = n_2/n_1$.

On constate que par rapport à la structure Boost classique, la tension de sortie disponible est multipliée par le terme $1 + 2m(1+m)$. Si le condensateur doit être dimensionné pour la pleine tension V_S , l'interrupteur K doit l'être pour :

$$V_{KM} = \frac{V_S}{1 + 2m(1+m)\alpha} \quad (30)$$

On constate donc que le terme de gain permet de réduire la contrainte de dimensionnement de cet interrupteur.

■ En régime discontinu :

$$V_S = V_E + \frac{[(1+m)\alpha V_E]^2}{2L_1 f I_S} \quad (31)$$

avec L_1 inductance du bobinage des n_1 spires (vue entre la source et K),

f fréquence de commutation.

Si on assimile la charge à un réseau RC où R représente la puissance consommée, cette expression peut encore s'exprimer par :

$$V_S = V_E \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{2R}{L_1 f} [(1+m)\alpha]^2}}{2} \right) \quad (32)$$

Toutefois, l'interrupteur K doit être muni d'un circuit écrêteur qui limite la surtension à ses bornes lors de l'ouverture, due à l'inductance de fuite.

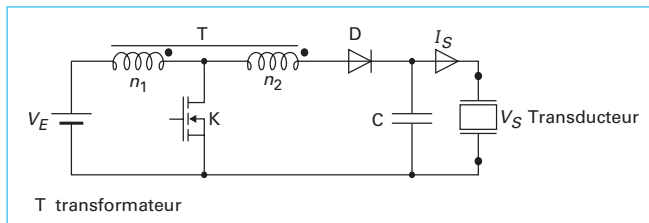


Figure 19 – Schéma électrique du montage autotransformateur

3.2.3 Technique de commande avec récupération d'énergie

Dans des applications embarquées telles que les microrobots où la quantité d'énergie est limitée, il peut être intéressant de commander un actionneur piézoélectrique, tout en récupérant le surplus d'énergie stockée dans le composant réactif constitué par la capacité d'entrée [17] [18]. Cette méthode consiste à faire osciller la capacité interne du transducteur avec une inductance L mise en série, et ainsi pouvoir transférer l'énergie de la capacité vers l'inductance puis vers la source. La figure 20 montre le circuit simplifié du convertisseur en demi-pont et les formes d'ondes associées. Lors de la commande de l'actionneur, c'est-à-dire à la fermeture de l'interrupteur K_1 , la capacité interne C_0 se charge à travers l'inductance L , le temps de charge est :

$$t_r = \frac{\pi}{2} \sqrt{LC_0}$$

ce qui correspond au quart de la période d'oscillation.

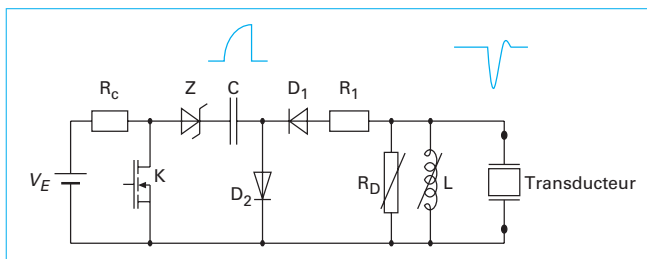
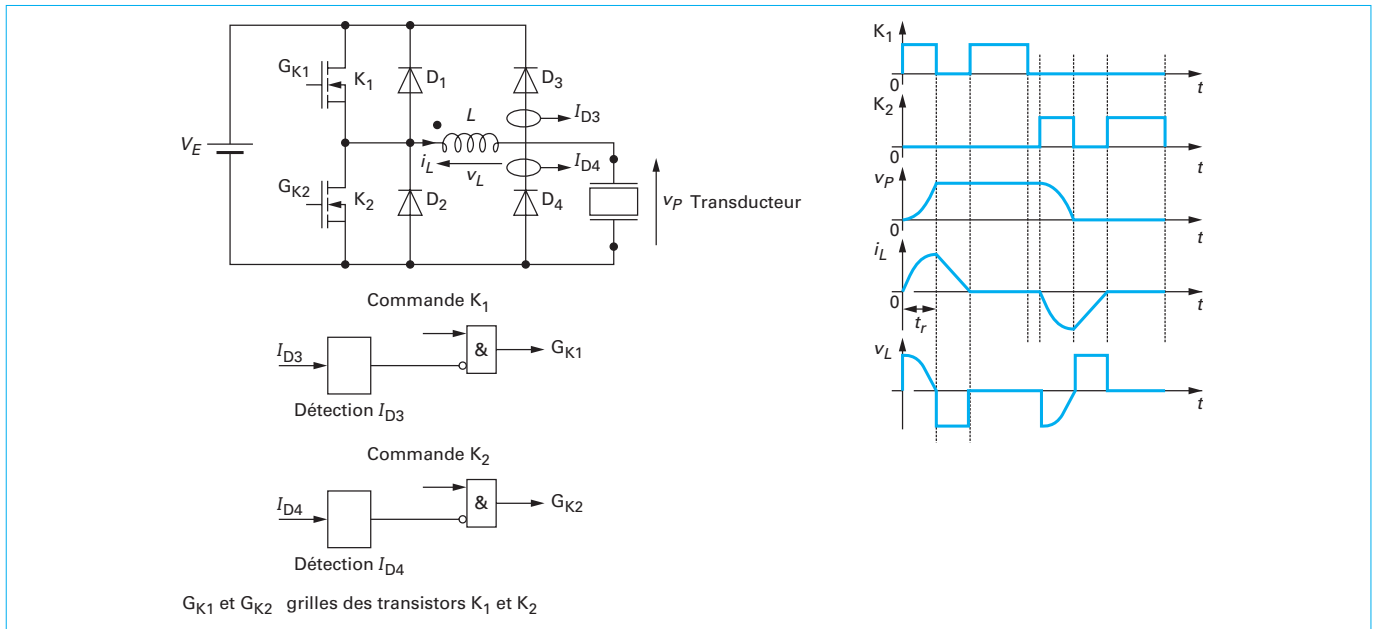
Lorsque la tension v_p atteint la tension d'alimentation V_E , la diode D_3 devient passante et maintient la tension v_p à V_E . Si l'on garde l'interrupteur K_1 fermé, l'énergie stockée dans l'inductance L est dissipée dans la boucle K_1 - L - D_3 . Si maintenant, on ouvre K_1 au moment où D_3 devient passante, l'énergie peut être alors renvoyée vers la source à travers les diodes D_2 et D_3 . L'interrupteur K_1 doit être à nouveau commandé à la fin de ce cycle pour maintenir la tension V_E sur l'actionneur.

Pour le retour à la position initiale de l'actionneur, on ferme l'interrupteur K_2 . Nous retrouvons ici les mêmes phases que précédemment, mais en sens inverse. D'abord, la capacité C_0 se décharge dans l'inductance L . Lorsque la tension v_p atteint zéro, la diode D_4 devient passante ; si l'interrupteur K_2 est maintenu fermé, l'énergie est dissipée dans la boucle K_2 - L - D_4 . Dans le cas contraire, cette énergie est renvoyée à la source à travers les diodes D_1 et D_4 . Les diodes D_1 et D_2 peuvent être constituées par les diodes de structure des transistors MOSFET. Un exemple de principe d'une telle commande est représenté à la figure 20, l'information de conduction des diodes D_3 et D_4 est fournie par des capteurs de courants.

3.3 Commande des générateurs ultrasonores

Le transducteur permettant la génération des ondes sinusoïdales ultrasonores, dans les montages industriels de puissance, est constitué de l'assemblage de **deux céramiques montées dos à dos** et d'une **électrode commune** entre les deux céramiques. L'ensemble est monté en compression entre un pavillon et une contre-masse (cf. [AF 6 310]). L'émetteur ainsi constitué est accordé de manière à vibrer à la fréquence imposée par le choix de la céramique, qu'il n'est pas possible de modifier. Une conséquence importante est que la fréquence de fonctionnement d'un émetteur ultrasonore n'est pas un paramètre réglable. La variation de puissance apportée par l'étage d'amplification permet de faire varier l'amplitude de la vibration. Dans les applications sonar, les alimentations sont majoritairement constituées d'amplificateurs linéaires ayant un très mauvais rendement (< 25 %).

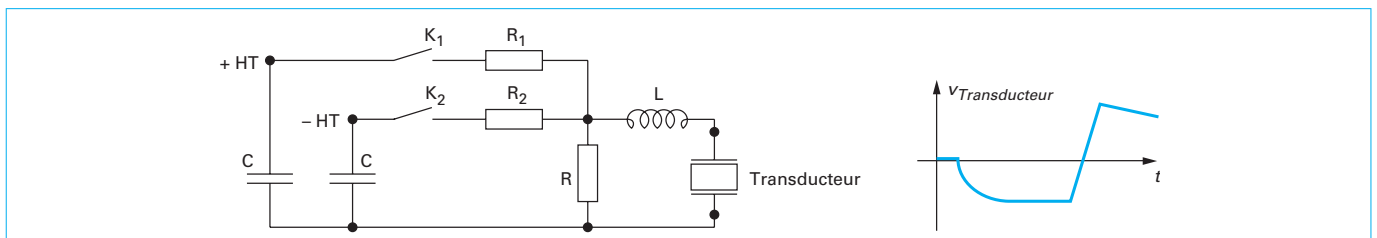
■ En ce qui concerne la **génération d'onde pour le contrôle non destructif par ultrasons**, pour des applications d'échographie ou de détection de défaut interne de diverses structures, l'alimentation doit fournir à l'élément piézoélectrique une impulsion de tension de quelques nanosecondes qui peut atteindre 1 000 V. Le transducteur piézoélectrique la transforme alors en une impulsion élastique qui se propage dans le milieu sous la forme d'un train d'ondes ultrasonores. La fréquence de l'onde émise est comprise entre 0,5 et 10 MHz suivant l'application. Pour des applications spécifiques de sonar nécessitant une haute résolution, la fré-



quence peut aller jusqu'à 20 MHz. Le circuit classiquement utilisé pour générer une **onde large bande** est représenté sur la figure 21. Lorsque l'interrupteur K est ouvert, la capacité C se charge au potentiel V_E à travers la résistance R_C et les diodes D_2 et Z. Lors de la fermeture de K, la capacité se décharge brusquement dans le transducteur à travers la diode zener Z. Cette diode zener assure d'une part, que le transistor K soit bien saturé et, d'autre part, elle évite une distorsion du lobe positif de l'écho qui serait écrêté par la diode D_1 . Le circuit parallèle composé de l'inductance L et de la résistance réglable R_D , ainsi que la résistance série R_1 permettent d'ajuster la forme d'onde de la tension appliquée au transducteur.

■ La problématique de la **génération d'ondes de choc** pour des applications médicales (lithotripsie, traitement de la tendinite, destruction de tissus non tumoraux) est de générer des pressions suffisantes, sans détériorer le transducteur. Malgré l'utilisation de matériau composite, la pression maximale est trop faible. Une solution consiste à utiliser un empilement d'éléments piézo-électriques dont chaque couche est excitée avec un temps de retard correspondant à la longueur d'onde e/c où e est l'épaisseur et c la vitesse de l'onde. Ainsi, les différentes ondes générées s'additionnent et se renforcent. Une autre méthode consiste à faire une précontrainte électrique dans le matériau. En effet, les matériaux piézoélectriques obtenus par frittage résistent très bien à la compression, mais nettement moins à l'élongation. Le principe consiste à appliquer d'abord un champ électrique dans le sens opposé à celui de la polarisation (le transducteur se comprime) puis, d'appliquer un champ électrique dans le même sens que la polarisation, mais avant que le matériau ait eu le temps de se relaxer. L'optimisation se fait avec le temps d'inversion de la tension. Des études comparatives sur le vieillissement ont montré que la précontrainte permet d'augmenter la pression de surface d'environ 40 %.

Le schéma de principe d'un générateur d'ondes de choc est présenté sur la figure 22. Les condensateurs C sont chargés en général par l'intermédiaire d'un transformateur HT associé à une diode. Lorsque l'un des interrupteurs est fermé, C se décharge à travers l'inductance L dans le transducteur. Les résistances R_1 , R_2 et R



servent comme précédemment à contrôler les constantes de temps de front et de queue de l'onde. Ainsi, un temps de front bref requiert une charge rapide, et un temps de queue long nécessite une décharge plus lente.

4. Conversion électro-mécano-électrique (transformateur électrique)

4.1 Généralités

Les premières structures de **transformateurs piézoélectriques (TP)** sont apparues dans les années 1950, suite aux travaux menés par Charles A. **Rosen** à l'université de Syracuse aux États-Unis. Ces premiers transformateurs, qui portent aujourd'hui son nom, permettaient d'obtenir une forte élévation de tension, du fait du rapport de forme entre le primaire et le secondaire, mais avaient une faible densité de puissance (5 W/cm^3) et étaient très fragiles. 50 ans après, cette technologie est devenue celle qui semble pouvoir remplacer les transformateurs électromagnétiques dans certaines applications spécifiques, grâce notamment à son principe de conversion d'énergie qui utilise des ondes acoustiques et sa structure compacte.

Différentes structures de transformateurs piézoélectriques existent. Il est possible de les faire fonctionner en **élévateur** ou en **abaisseur de tension**. Dans la mesure où le fonctionnement est basé sur la mise en vibration d'une céramique piézoélectrique, les performances du transformateur ne sont vraiment intéressantes qu'au **voisinage de la résonance mécanique**. Jusqu'au début des années 1990, cette technologie n'a pas eu de succès commercial. À partir de cette période, des compagnies japonaises, comme par exemple la société NEC, ont introduit ce type de transformateur dans des applications nécessitant un faible encombrement, un grand rapport d'élévation de tension et peu d'interférences électromagnétiques (CEM) pour des gammes de puissance de 5 à 20 W. Le transformateur piézoélectrique fabriqué par NEC est une amélioration de la structure initiale de Rosen, grâce à l'utilisation de **matériaux multicouches** et une augmentation de la durée de vie, avec une meilleure gestion des contraintes dans le matériau. Aujourd'hui, le transformateur est utilisé pour le rétro-éclairage des écrans LCD dans les ordinateurs portables et autres appareils électroniques portables. La vente annuelle de transformateurs piézoélectriques en 2000 est estimée à plus de 20 millions de pièces et la croissance annuelle au Japon est de 10 %. Grâce aux applications LCD, cette technologie est aujourd'hui mature en termes de matériaux, de circuits électroniques et de processus de fabrication, ce qui fait espérer son développement dans d'autres champs d'application. Même si le prix des transformateurs diminue, la tendance est plutôt à son utilisation dans des produits à forte plus-value.

L'autre structure de transformateur, alternative au transformateur Rosen, est le **multicouche radial** qui permet de fonctionner aussi bien en élévateur qu'en abaisseur de tension. La compagnie FACE a réalisé un transformateur radial appelé *Transoner* d'une puissance de 100 W avec une densité de puissance proche des 40 W/cm^3 , alors que, classiquement le TP a une densité de puissance de 20 W/cm^3 .

D'autres structures, exploitant le couplage en **cisaillement**, d'une puissance de 160 W, ont été développées à l'université de Nanyang de Singapour [19]. Connecté à la charge optimale, le transformateur peut transférer une puissance volumique atteignant 53 W/cm^3 pour un échauffement de 20°C .

La figure 23 [21] montre l'évolution des géométries et des densités de puissance des transformateurs piézoélectriques depuis les années 1950.

Par ailleurs, des microtransformateurs piézoélectriques sont en cours de développement de taille inférieure à quelques millimètres. La puissance visée est de plusieurs centaines de milliwatts avec un gain en tension d'au moins 50. L'application envisagée est l'intégration dans les MEMS de puissance [20].

4.2 Rappel du modèle du transformateur

Différentes structures de transformateurs piézoélectriques ont été imaginées et proposées dans la littérature. De façon synthétique, on peut distinguer deux structures de transformateurs piézoélectriques (figure 24) qui exploitent deux modes de couplage électromécaniques :

- le mode couplé (longitudinal/transversal) ;
- le mode radial.

Le transformateur utilisant le **mode couplé** est le Rosen. Il permet d'obtenir des gains en tension très importants en utilisant au mieux les effets piézoélectriques inverse et direct. Ainsi, une relativement faible tension primaire et un rapport longueur/épaisseur de quelques unités permettent, par effet transversal, de générer une amplitude de vibration importante. Par effet longitudinal, on récupère au secondaire une tension, qui là aussi, est d'autant plus importante que la longueur est grande. Le gain en tension global est directement proportionnel au rapport de la longueur sur l'épaisseur L/e . Pour augmenter encore ce gain, on réalise un primaire feuilleté où les couches sont connectées en parallèle.

La structure exploitant le **mode radial** est réalisée par la superposition d'au moins deux couches piézoélectriques primaire et secondaire, polarisées en épaisseur, et séparées par une couche diélectrique assurant l'isolation galvanique. Le gain en tension est directement proportionnel au rapport des épaisseurs des couches secondaires sur les couches primaires. C'est donc en jouant sur le nombre de couches primaires et secondaires, leurs épaisseurs, ainsi que sur les couplages des électrodes en série ou en parallèle, que l'on peut moduler le gain en tension de ce transformateur. La fréquence d'utilisation est inversement proportionnelle au rayon r de la structure.

Le schéma électrique équivalent du transformateur, valable quelle que soit la structure, est donné figure 25 [22]. Nous pouvons distinguer trois parties :

- les deux branches électriques avec la capacité d'entrée C_1 et la capacité de sortie C_2 ;
- la branche mécanique constituée du circuit RLC série résonnant.

Deux transformateurs parfaits font le lien entre ces trois parties et représentent la conversion électromécanique d'énergie. Le courant mécanique i_m est le courant traversant la branche mécanique. Par analogie électromécanique, il représente la vitesse de vibration de la céramique piézoélectrique. En fonctionnement normal, ce courant est sinusoïdal et ne peut subir de discontinuité. Dans certains schémas, il est remplacé par une source de courant. Le circuit n'est valable qu'autour de la fréquence de résonance du transformateur. Les expressions des éléments de ce schéma dépendent de la structure et des dimensions du transformateur et des propriétés du matériau, cf. [D 3 015].

4.3 Étage d'entrée des convertisseurs à des transformateurs piézoélectriques

Les deux circuits exploités classiquement dans l'étage d'entrée des convertisseurs utilisant des transformateurs piézoélectriques

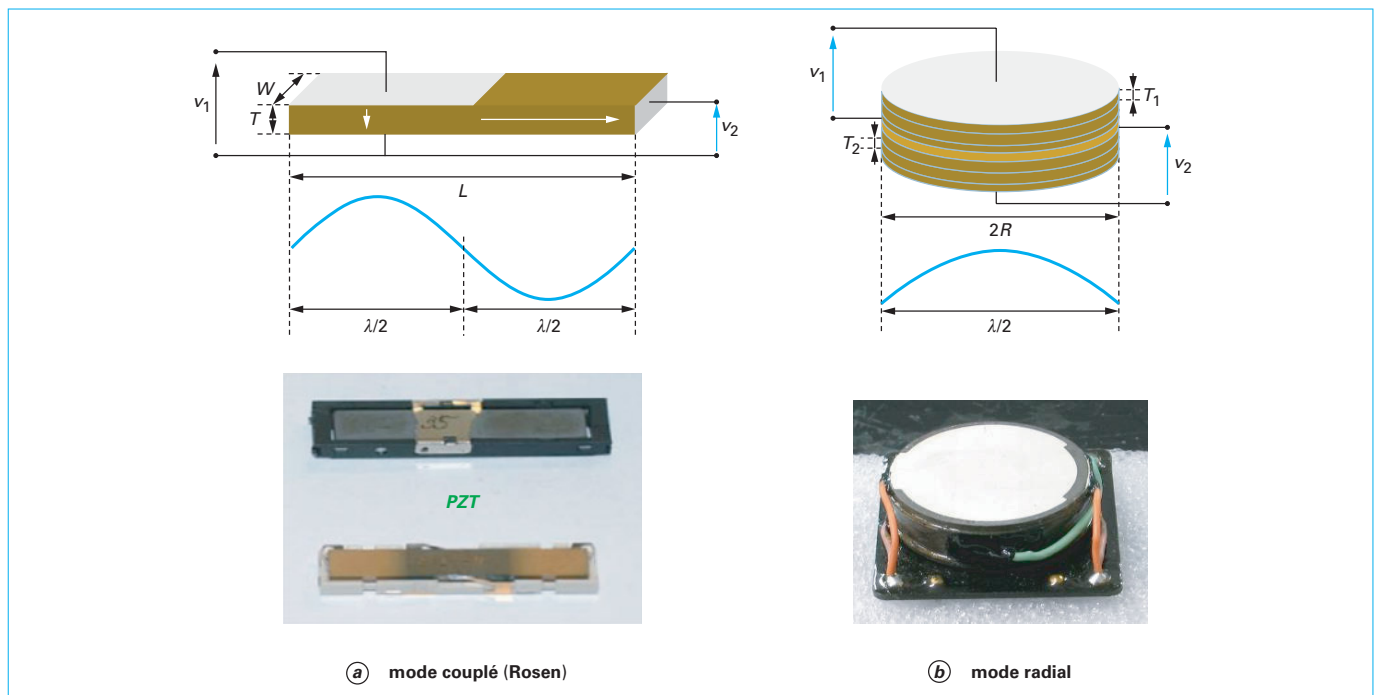
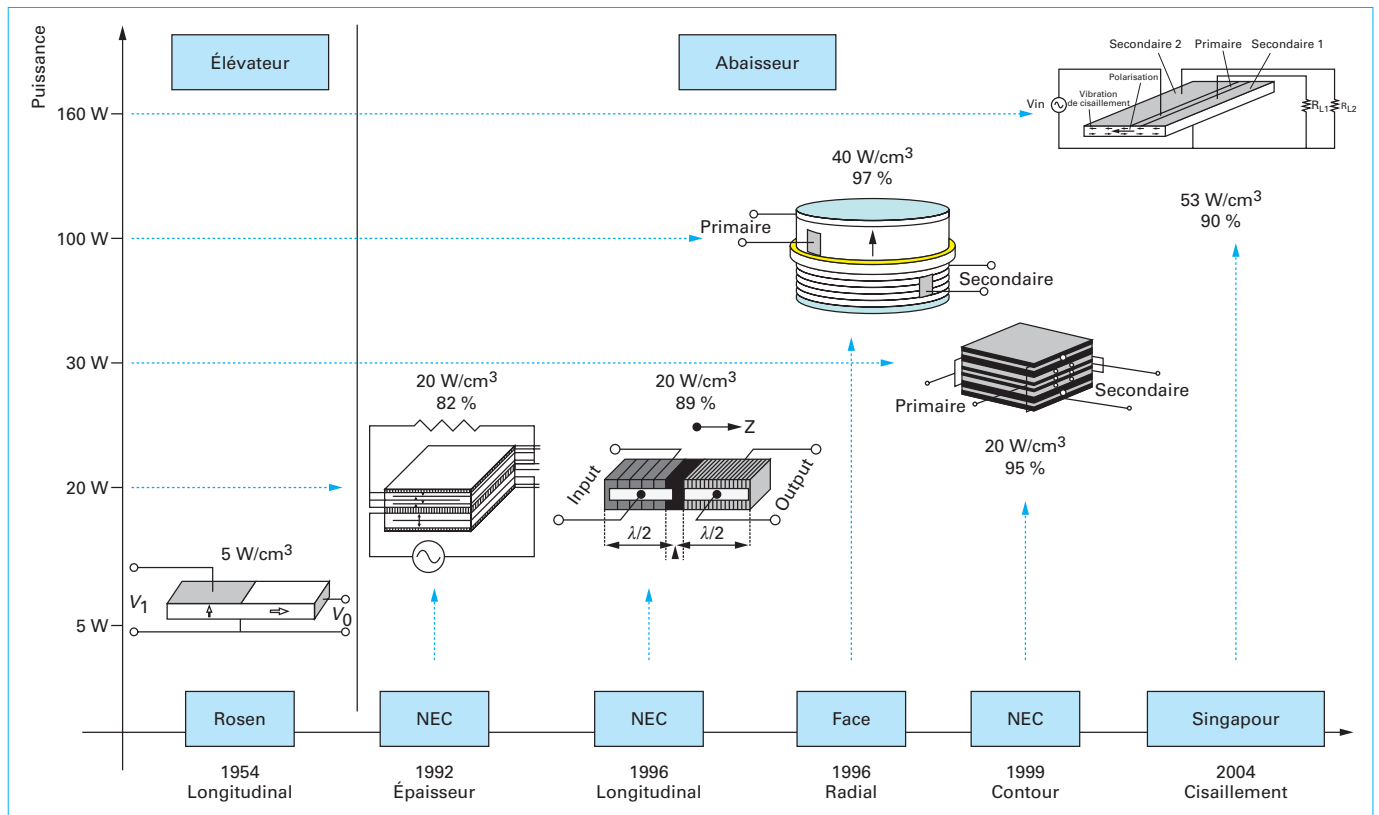


Figure 24 – Structures de transformateurs piézoélectriques

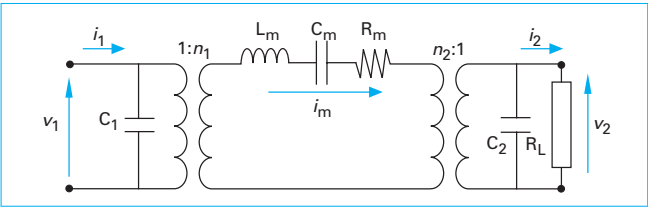


Figure 25 – Schéma électrique équivalent d'un transformateur piézoélectrique

sont le **montage en demi-pont à résonance** et le **montage en demi-push-pull en courant**. Une comparaison simple entre ces deux structures est donnée figure 26.

Le demi-push-pull est la structure la plus utilisée car elle comporte peu de composants et la tension appliquée au TP est constituée d'arche de sinus. Cependant, le fonctionnement de ce montage est celui d'un circuit LC résonant, ce qui implique une limitation de la variation du rapport cyclique. De plus, ce montage est sensible à la variation de la charge. Il est donc bien adapté aux applications à charge constante comme les alimentations de lampe à cathode froide ou les ballasts.

Le montage en demi-pont à résonance n'a pas cette limitation, mais comporte plus de composants.

Ces structures de convertisseur utilisent le principe consistant à modifier la nature capacitive du transformateur piézoélectrique en lui ajoutant en série une inductance L_1 . L'intérêt réside dans le fait que le circuit L_1C_1 constitue un filtre passe-bas qui réduit le contenu harmonique de la tension appliquée au transformateur et limite l'excitation des modes supérieurs.

Par ailleurs, il est possible de faire fonctionner la structure en **commutation à zéro de tension ZVS** (*Zero Voltage Switching*) si le courant d'entrée i_1 est en retard sur la tension v_{ds2} . Le mode ZVS est nécessaire si l'on souhaite obtenir un rendement élevé du convertisseur. Cela évite que des pertes importantes apparaissent

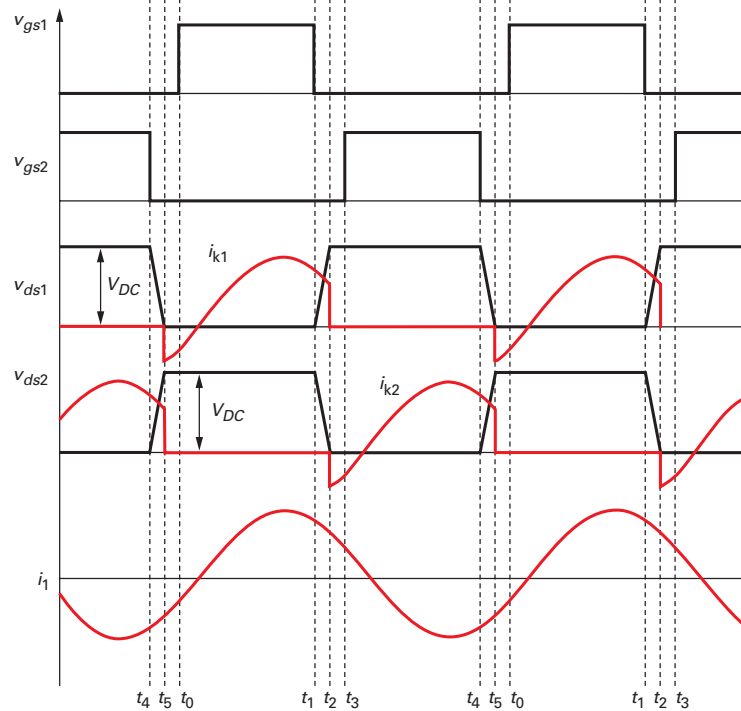
dans les transistors, dues à la décharge rapide des capacités parasites drain-source C_{ds} . Le fonctionnement en mode ZVS assure que la capacité parasite soit complètement déchargée avant la fermeture de l'interrupteur et donc évite les pics de courant. L'impédance d'entrée d'un transformateur piézoélectrique peut être inductive sous certaines conditions, il est donc possible d'obtenir un mode ZVS sans adjonction d'inductance, mais le fonctionnement doit se faire alors à charge constante et rapport cyclique constant. La figure 27 présente les formes d'onde obtenues avec le montage en demi-pont. Le courant dans l'inductance i_1 est sinusoïdal. Lorsque l'interrupteur K_1 est passant, la capacité C_{ds2} de l'interrupteur du bas se charge à la tension V_{DC} . À l'ouverture de K_1 ($t = t_1$), la tension étant encore positive, le courant i_1 se reboucle à travers les capacités parasites. La tension v_{ds2} décroît, alors que la tension v_{ds1} croît. Le temps mort avant la fermeture de K_2 doit être supérieur au temps de décharge des capacités. Cette condition peut être obtenue naturellement si le *driver* assure une commande en thyristor dual (cf. [D 3 077], [D 3 230]). Lorsque C_{ds2} est totalement déchargée ($t = t_2$), les deux interrupteurs sont ouverts et c'est la diode du bas qui prend en charge le courant i_1 . L'interrupteur K_2 est commandé : à l'instant t_3 , il commence à conduire lorsque le courant i_{K2} devient positif. À l'ouverture de K_2 ($t = t_4$), on retrouve les mêmes phases que pour K_1 . La capacité C_{ds1} se décharge et la capacité C_{ds2} se charge. Une condition supplémentaire est l'amplitude du courant qui doit être suffisante pour permettre la décharge des capacités.

Il est à noter que les conditions d'obtention de la commutation en mode ZVS dans l'interrupteur du haut (courant négatif à l'amorçage) sont indépendantes de celle de l'interrupteur du bas. En effet, la fréquence du courant d'entrée i_1 n'est pas obligatoirement la même que celle de la tension aux bornes des interrupteurs du fait de la spécificité du transformateur piézoélectrique dont la fréquence de résonance varie avec la charge. La fréquence du courant est donnée par la résonance du circuit L_1C_1 :

– si cette fréquence de résonance est proche de la fréquence de commutation, il n'y a pas de problème, les deux interrupteurs peuvent fonctionner en mode ZVS ;

	Demi-pont à résonance	Demi-Push-Pull en courant
Topologies		
Formes d'onde		
Composants	2 interrupteurs et 1 inductance	1 interrupteur et 1 inductance
Commande	1. MLI avec rapport cyclique 50 % 2. Modulation de fréquence	Modulation de fréquence
Conditions de ZVS	Facile à réaliser dans une large gamme de variation de la charge	Sensible à la variation de charge

Figure 26 – Comparaison de deux étapes d'entrée



v_{gs1} et v_{gs2} : tensions entre grille et sources des transistors K_1 et K_2

Figure 27 – Formes d’ondes du mode ZVS du montage demi-pont associé à un transformateur piézoélectrique

– maintenant, si la fréquence de résonance est supérieure, l’interrupteur du haut est en mode ZVS alors que l’interrupteur du bas ne peut être en mode ZVS que dans certains cas. Il faut que la fréquence de résonance soit inférieure à deux fois la fréquence de commutation ;

– dans le cas où la fréquence de résonance est inférieure à la fréquence de commutation, il n’est jamais possible d’obtenir un mode ZVS pour l’interrupteur du bas.

Ainsi, nous pouvons conclure que la valeur de l’inductance d’entrée L_1 doit être choisie de telle sorte à ce que la fréquence de résonance du courant d’entrée soit légèrement supérieure à celle de commutation. Ces différents cas sont illustrés figure 28.

4.4 Alimentation de lampe à cathodes froides

4.4.1 Lampes à cathodes froides

Aujourd’hui, la principale application industrielle du transformateur piézoélectrique est la **commande des lampes fluorescentes à cathode froide (CCFL) servant au rétro-éclairage des écrans plats à cristaux liquides (LCD)**. Le transformateur est plus particulièrement utilisé dans les appareils nomades, comme les ordinateurs portables, en raison de son faible encombrement et de son rendement supérieur de 10 à 15 % à celui d’un transformateur électromagnétique.

Le principe de fonctionnement des lampes fluorescentes classiques repose sur l’ionisation d’un gaz (souvent du mercure) qui génère une lumière dans les ultra-violet. Cette lumière est

transformée et rendue visible à la surface du tube par une poudre fluorescente, couche filtre spécifique à la couleur de la lumière que l’on désire obtenir. Les lampes à cathode froide sont une évolution des lampes fluorescentes classiques. La lumière est générée par un arc électrique particulier dû au gaz sous haute pression que renferme l’ampoule. Ces lampes ont un bien meilleur rendement car elles ne nécessitent pas d’échauffement du gaz. En contrepartie, elles nécessitent des tensions alternatives élevées et doivent être associées à des ballasts car la tension nécessaire au démarrage de la lampe est sensiblement plus élevée de celle nécessaire en régime permanent. Ces ballasts sont généralement constitués d’un circuit résonant, composé d’une inductance et d’une capacité. De par leurs caractéristiques, les transformateurs piézoélectriques peuvent remplacer avantageusement ces circuits en réduisant l’encombrement de ces éléments avec des performances égales, sinon supérieures.

Par exemple, les tensions d’alimentation des lampes de 3 mm de diamètre pour les trois longueurs suivantes : 100 mm, 150 mm et 250 mm sont, respectivement, 300 V, 500 V et 700 V (figure 29).

La tension d’alimentation de ces lampes dépend donc fortement de leur longueur et du courant les traversant. La luminosité de la lampe est proportionnelle au courant et c’est l’élément de contrôle du rétro-éclairage. Ces lampes doivent être alimentées par une tension sinusoïdale afin d’obtenir le meilleur rendement de conversion.

Les écrans d’ordinateur portable étant très fins, les contraintes géométriques de l’alimentation du rétro-éclairage sont très importantes. Il en résulte que le convertisseur doit avoir une structure

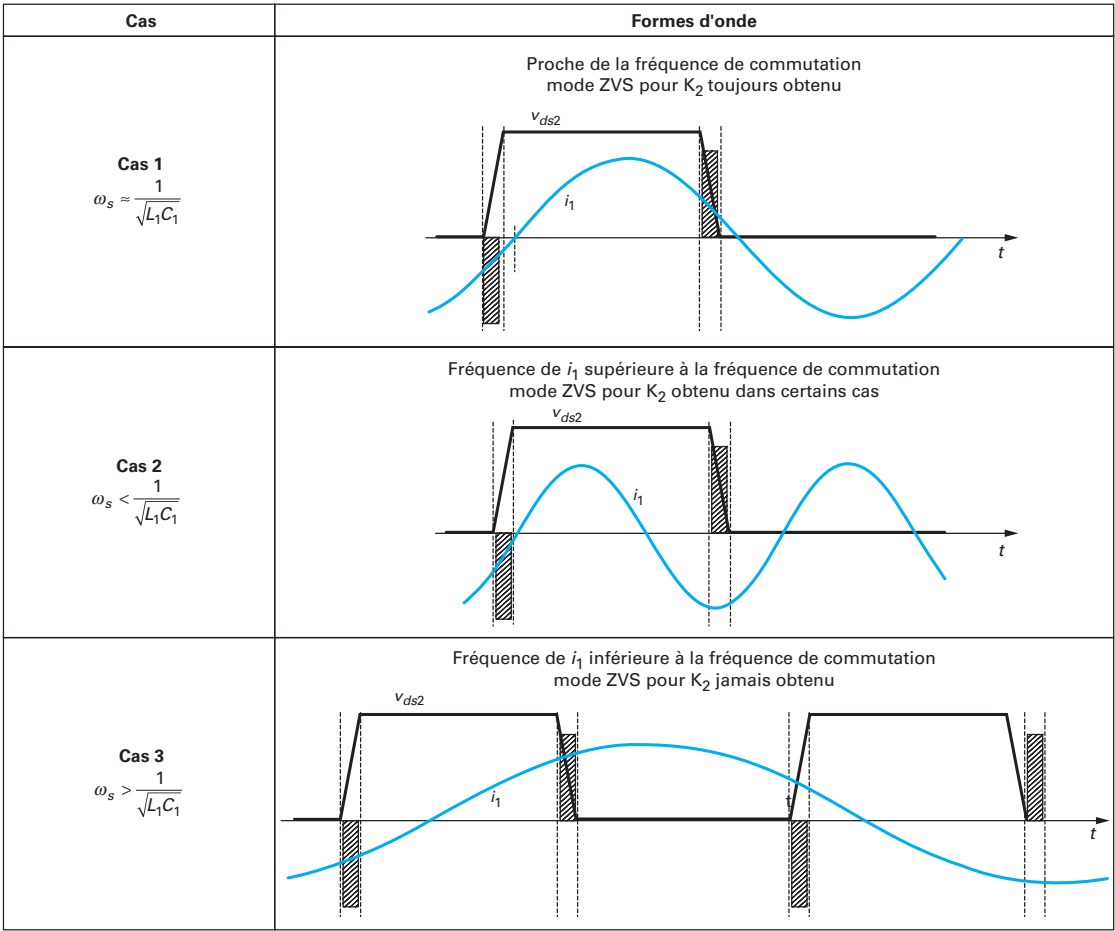


Figure 28 – Conditions sur la fréquence du courant i_1 d’obtention du mode ZVS

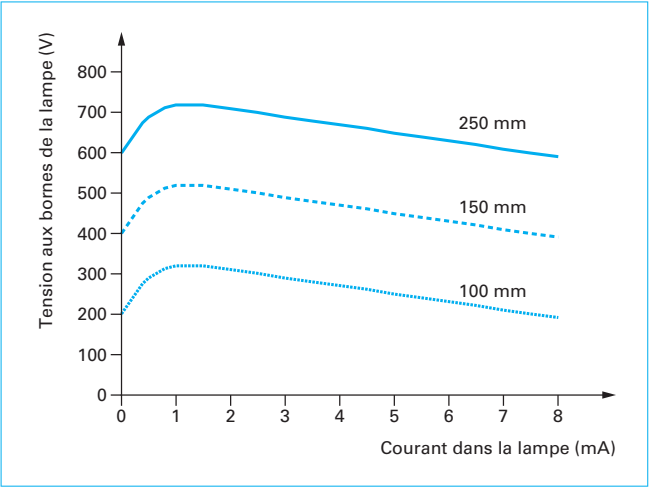


Figure 29 – Caractéristiques tension-courant des lampes à cathode froide

extra-plate tout en fournissant une tension sinusoïdale très élevée. Le transformateur électromagnétique, à cause de l’isolement renforcé à haute tension qu’il nécessite, est plus épais, plus lourd avec un rendement plus faible que le **transformateur piézo-électrique** pour un point de fonctionnement donné. En revanche, il a l’avantage d’être moins cher et de fonctionner dans une plus grande gamme de fréquences et de conditions de charge. Le transformateur piézoélectrique a, quant à lui, l’avantage de fournir facilement une tension élevée parfaitement sinusoïdale.

Le fabricant NEC TOKIN commercialise des alimentations piézo-électriques de plus de 30 W (figure 30). Quatre alimentations de ce type sont nécessaires pour l’alimentation des écrans plats de plus de 30 pouces.

Le transformateur utilisé dans cette application est le **Rosen**. La figure 31 donne un exemple de gain en tension du transformateur en fonction de la fréquence, paramétré par la résistance de charge. On remarque que le transformateur présente à vide un gain important (grand facteur de qualité Q), ce qui lui permet d’amorcer facilement la lampe. Une fois la lampe allumée, le transformateur se voit chargé, son gain diminue et la fréquence de résonance est décalée vers la gauche. Ces caractéristiques électriques particu-



Figure 30 – Alimentations piézoélectriques pour le rétro-éclairage (NEC TOKIN)

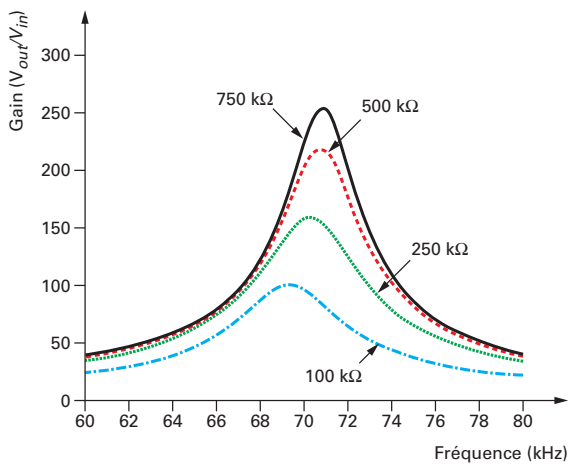


Figure 31 – Gain du transformateur piézoélectrique paramétré par la résistance de charge R_L

lières lui permettent d'alimenter les lampes CCFL sans l'adjonction d'autres éléments au secondaire, contrairement aux montages avec un transformateur électromagnétique.

4.4.2 Différentes structures des alimentations de lampe CCF

Le transformateur piézoélectrique se comportant principalement comme un filtre sélectif, la tension à sa sortie est parfaitement sinusoïdale, ce qui est un avantage pour les lampes à cathodes froides car le rendement de conversion est amélioré. Les lampes sont donc reliées directement au secondaire du transformateur. L'étage d'entrée est généralement constitué des deux structures présentées précédemment : en demi-pont à résonance et push-pull en courant. Dans les deux cas, une régulation du courant dans la lampe est nécessaire. La figure 32 présente les schémas de principe des deux alimentations de lampe à cathode froide.

La structure push-pull à deux bras, utilisée ici, permet d'appliquer une tension quasi sinusoïdale à l'entrée du transformateur. La régulation du courant dans la lampe est obtenue par l'ajustement de la fréquence d'alimentation du TP et non par la variation du rapport cyclique. Le courant mesuré dans la lampe est comparé à une référence. Un VCO fournit les signaux de commande des transistors dont la fréquence est proportionnelle au résultat de la comparaison précédente. Les circuits intégrés UCC3976 et UCC3977 du fabricant Texas Instrument sont dédiés à ce type d'application. Ils permettent de réaliser la commande des interrupteurs, ainsi que leur régulation.

La figure 33 donne un exemple de rendement d'une alimentation de 3 W avec la topologie push-pull et délivrant une tension de 600 V à la lampe. Le rendement est supérieur à 85 % pour de faibles tensions d'entrée.

4.5 Alimentation DC/DC

Une autre application importante des transformateurs piézoélectriques est leur intégration au sein de structures de conversion AC/DC et DC/DC [23]. La gamme de puissance visée est comprise entre quelques centaines de milliwatts et quelques dizaines de watt. Des alimentations pouvant être directement connectées sur

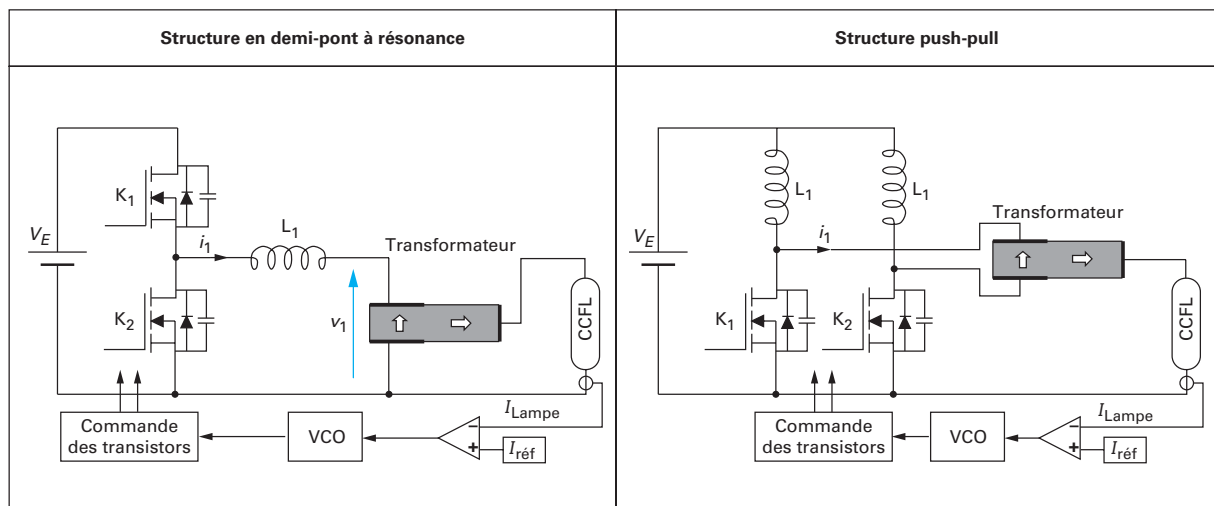


Figure 32 – Alimentation de lampe à cathode froide

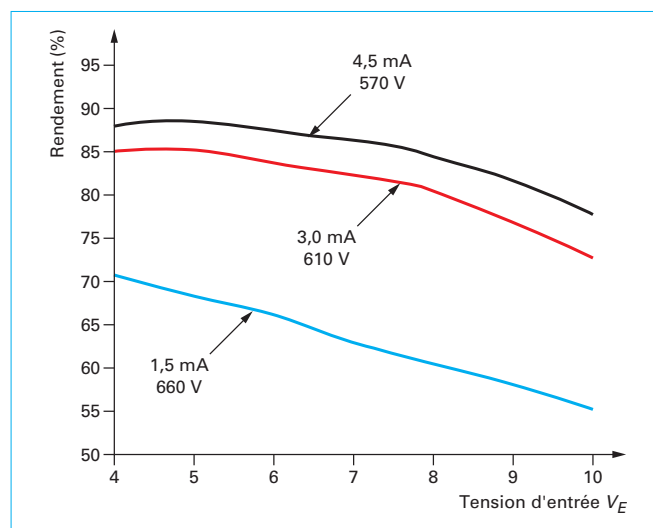


Figure 33 – Rendement en fonction de la tension d'entrée et de la charge (topologie push-pull)

Le réseau avec une plage de variation de la tension d'entrée de 100 à 250 V ont été développées. La tension de sortie est généralement de 3 ou 5 V. Le rendement peut atteindre des valeurs comprises entre 75 et 85 %.

La régulation de la tension de sortie peut être effectuée grâce à la **variation de la fréquence** de fonctionnement du transformateur,

avec l'utilisation d'un VCO (Voltage Controlled Oscillator) dans la boucle de régulation, ce qui revient à réaliser une PLL (Phase Locked Loop). La solution consistant à utiliser un **contrôle par MLI** (modulation de largeur d'impulsion) a été envisagée, mais elle pose le problème de la commutation en mode ZVS des interrupteurs. La technique permettant d'optimiser le rendement consiste à faire un **contrôle par hystérésis** en mode tout-ou-rien (Burst Mode). Dans ce cas, le transformateur fonctionne à fréquence fixe et à rapport cyclique fixe à son point optimum et la régulation de la tension de sortie se fait par marche/arrêt de l'étage d'entrée du convertisseur.

Le schéma de principe des deux types de régulation rencontrée dans les alimentations DC/DC, utilisant un transformateur piézo-électrique, est présenté à la figure 34.

Une comparaison de trois stratégies de commande d'un convertisseur piézoélectrique est donnée dans le tableau 5. C'est la commande par hystérésis qui donne le meilleur rendement, car elle permet de maintenir en permanence les conditions de commutation en mode ZVS, même lorsque la charge varie. La dynamique est également meilleure, mais elle présente l'inconvénient de générer plus de bruit et donc nécessite des filtres CEM plus importants.

Trois structures de redresseur utilisées dans l'étage de sortie, ainsi que les formes d'onde associées sont présentées figure 35 (θ étant le déphasage entre la tension de sortie du transformateur v_{rec} et le courant mécanique i_m). La comparaison est effectuée en considérant la même tension et la même puissance fournies à la charge (tableau 6). Le pont redresseur simple comporte le moins de composants mais, à puissance égale, il nécessite un surdimensionnement du transformateur car le courant moyen dans les diodes est deux fois plus important et donc le courant mécanique, image de la vitesse de vibration, doit être deux fois élevé. La

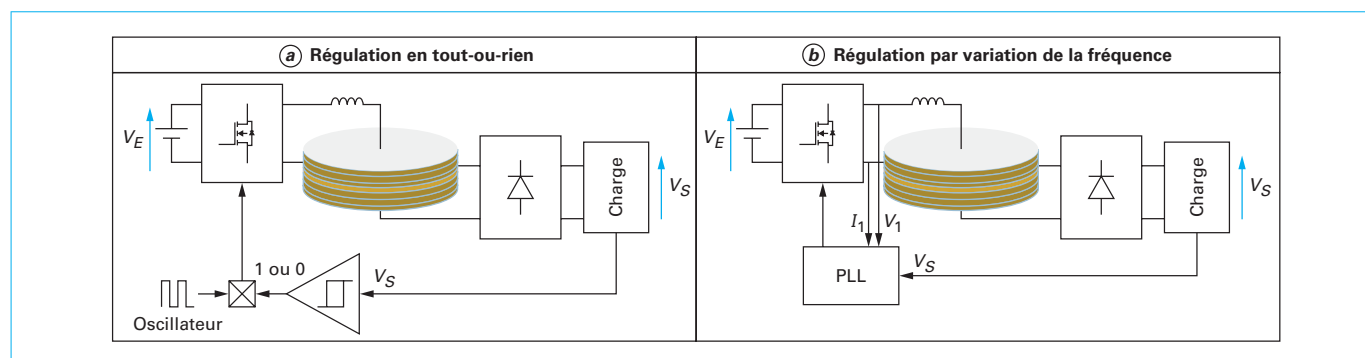


Figure 34 – Régulation des alimentations piézoélectriques

Tableau 5 – Comparaison de trois stratégies de commande

Caractéristique	Régulation par MLI	Régulation par variation de la fréquence	Régulation par hystérésis tout-ou-rien
Rendement	Mauvais	Moyen	Bon
Ondulation de la tension de sortie	Faible	Faible	Très faible
Dynamique	Bonne	Bonne	Très bonne
Conditions ZVS	Petite plage	Plage assez grande	Toujours
Bruit	Faible	Moyen	Élevé

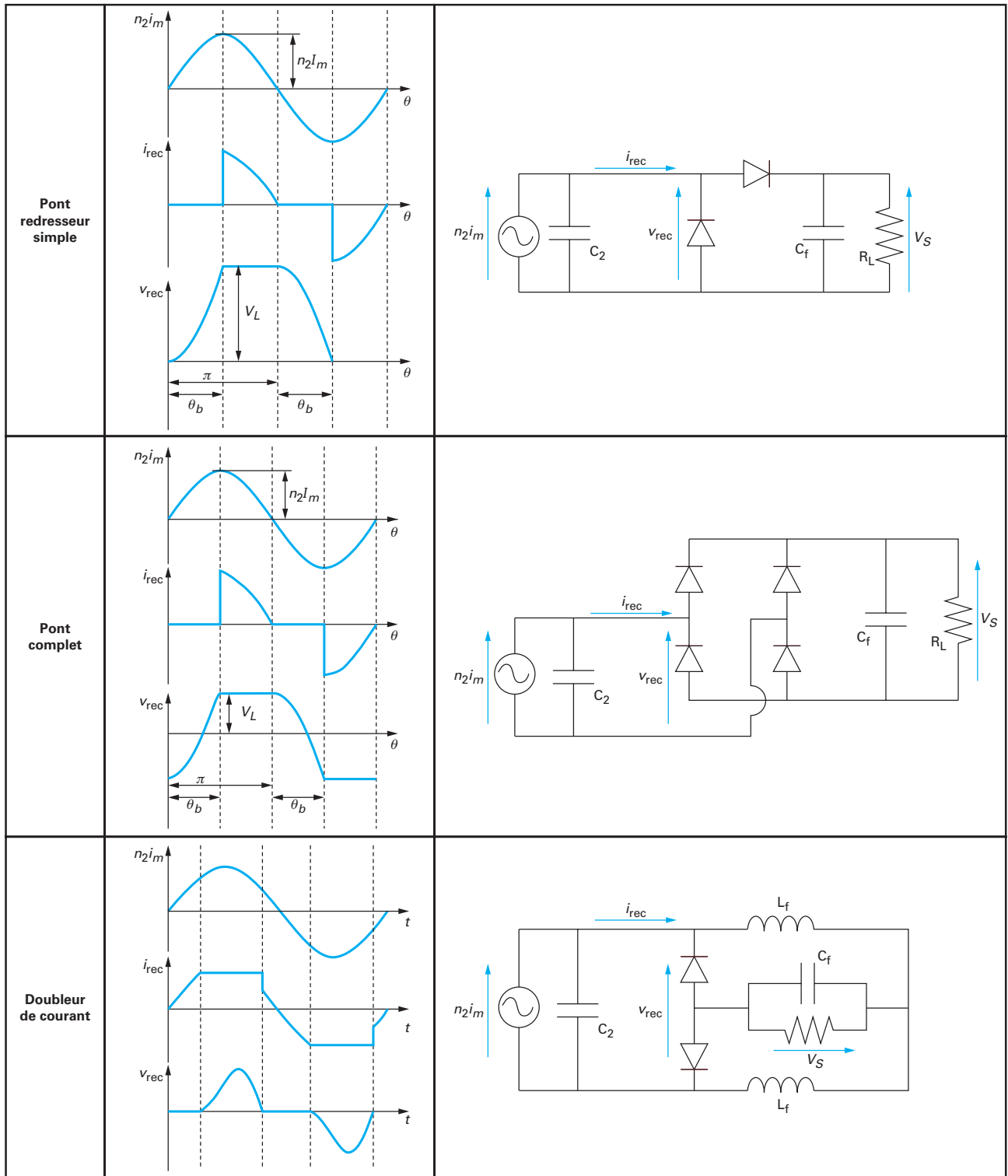


Figure 35 – Étages de sortie

Tableau 6 – Comparaison des trois étages de sortie

Caractéristique	Redresseur pont complet	Redresseur en demi-pont	Doubleur de courant
Courant dans la charge pour un même fonctionnement du transformateur	moyen	faible	élevé
Taille du transformateur pour une même charge	moyen	élevé	petit
Chute de tension dans les diodes	2	1	1
Courant dans les diodes	1 fois	2 fois	2 fois
Inductance	non	non	2
Pertes dans le redresseur	faibles	faibles	élevés à cause des inductances

structure qui semble être bien adaptée pour les transformateurs piézoélectriques est le doubleur de courant. En effet, le courant mécanique est un paramètre important pour le dimensionnement du transformateur et c'est cette structure qui le minimise à puissance égale. Cependant, il est nécessaire d'ajouter deux inductances qui augmentent les pertes globales du convertisseur et son volume [24].

5. Conclusion

Au travers de ce dossier, nous avons essayé de mettre en évidence les spécificités de la mise en œuvre d'un convertisseur électrique comportant un élément piézoélectrique. La principale contrainte induite par l'utilisation d'un matériau piézoélectrique est la **gestion de l'énergie réactive** due à la capacité intrinsèque et les **forts niveaux de tension** mis en jeu. Cette spécificité des éléments piézoélectriques trouve donc des conséquences vis-à-vis des structures de conversion dans lesquelles ils sont plongés ainsi que de leurs modes de commande. De façon générale, le caractère intrinsèquement capacitif conduit à devoir gérer dans la structure des énergies réactives qui contribuent soit à dégrader le facteur de puissance, soit à complexifier la structure.

Ainsi dans les applications de récupération d'énergie, nous devons obligatoirement associer au micro-générateur un **système de commutation de la tension piézoélectrique** de façon à agrandir artificiellement le cycle de conversion électromécanique. Cela revient à mettre en phase la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique et la vitesse de vibration et donc à minimiser l'énergie stockée dans la capacité de structure tout en augmentant l'amplitude de la tension.

Dans les **applications convertisseurs DC/DC** à base de transformateur, le caractère intrinsèquement capacitif du transformateur conduit à devoir gérer dans la structure des énergies réactives qui contribuent soit à dégrader le facteur de dimensionnement des interrupteurs lorsque des inductances sont associées (existence de régimes oscillants), soit à dégrader le taux de transmission de puissance (rapport entre le temps pendant lequel le transfert de puissance s'opère et la période de découpage).

Enfin, dans le cas des **alimentations des actionneurs piézoélectriques**, les convertisseurs doivent fournir des tensions élevées, de plusieurs centaines voire plusieurs milliers de volts afin d'avoir un champ électrique élevé et ainsi produire suffisamment de forces électrostatiques. Le gain en tension des convertisseurs associés peut alors être supérieur à plusieurs dizaines. Il faut également gérer l'énergie réactive stockée dans la capacité d'entrée et la récupérer dans le cas d'application embarquées tels que les micro-robots où la quantité d'énergie est limitée.

Applications des éléments piézoélectriques en électronique de puissance

par **Dejan VASIC**

*Maître de conférences à l'université de Cergy-Pontoise
Chercheur au laboratoire SATIE ENS Cachan*

et **François COSTA**

*Professeur à l'université de Paris Est Créteil
Chercheur au laboratoire SATIE ENS Cachan*

Sources bibliographiques

- [1] HEYWANG (W.), LUBITZ (K.) et WERSING (W.). – *Piezoelectricity, evolution and future of a technology*. Springer (2008).
- [2] IKEDA (T.). – *Fundamentals of piezoelectricity*. Oxford science publication (1996).
- [3] SAFARI (A.) et KORAY (A.). – *Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications*. Springer (2008).
- [4] BEEBY (S.P.), TUDOR (M.J.) et WHITE (N.M.). – *Energy harvesting vibration sources for microsystems applications*. Meas. Sci. Technol., 17, p. R175-R195 (2006).
- [5] LI (P.), WEN (Y.), LIU (P.), LI (X.) et JIA (C.). – *A magnetolectric energy harvester and management circuit for wireless sensor network*. Sensors and Actuators A, 157, p. 100-106 (2010).
- [6] ANTON (R.S.) et SODANO (A.H.). – *A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)*. Smart Mater. Struct., 16, p. R1-R21 (2007).
- [7] KIM (H.-U.), LEE (W.-H.), RASIKI (D.) et PRIYA (S.). – *Piezoelectric microgenerators current status and challenges*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 56, n° 8, août 2009.
- [8] KHALIGH (A.), ZENG (P.) et ZHENG (C.). – *Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies-state of the art*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, n° 3, mars 2010.
- [9] INMAN (D.) et PRIYA (S.J.). – *Energy harvesting technologies*. Springer (2009).
- [10] ROUNDY (S.), WRIGHT (K.P.) et RABAEY (J.). – *A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes*. Computer Communications, 26, p. 1131-1144 (2003).
- [11] MINAZARA (E.), VASIC (D.), COSTA (F.) et POULIN (G.). – *Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting*. Ultrasonics, 44, p. e699-e703 (2006).
- [12] LALLART (M.), GUYOMAR (D.), JAYET (Y.), PETIT (L.), LEFEUVRE (E.), MONNIER (T.), GUY (P.) et RICHARD (C.). – *Synchronized switch harvesting applied to self-powered smart systems : Piezoactive microgenerators for autonomous wireless receivers*. Sensors and Actuators A, 147, p. 263-272 (2008).
- [13] GUYOMAR (D.) et LALLART (M.). – *Energy conversion improvement in ferroelectrics : application to energy harvesting and self-powered systems*. IEEE Ultrasonics symposium (2009).
- [14] LEFEUVRE (E.), AUDIGIER (D.), RICHARD (C.) et GUYOMAR (D.). – *Buck-boost converter for sensorless power optimization of piezoelectric energy harvester*. IEEE transactions on Power Electronics, vol. 22, n° 5, sept. 2007.
- [15] STANTON (C.S.), McGEHEE (C.C.) et MANN (P.B.). – *Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting : investigation of a bistable piezoelectric inertial generator*. Physica D, 239, p. 640-653 (2010).
- [16] ARNAU (A.). – *Piezoelectric transducers and applications*. Springer (2008).
- [17] ROBBINS (P.W.). – *Simplified unipolar, quasi-square wave energy recovery drive circuits for piezoelectric actuators*. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 52, n° 8, août 2005.
- [18] CAMPOLO (D.), SETTI (M.) et FEARING (S.R.). – *Efficient charge recovery method for driving piezoelectric actuators with quasi-square waves*. IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, vol. 60, n° 3, mars 2003.
- [19] DU (J.), HU (J.) et TSENG (K.J.T.). – *High-power, multioutput piezoelectric transformers operating at the thickness-shear vibration mode*. IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, vol. 51, n° 5, mai 2004.
- [20] VASIC (D.), SARRAUTE (E.) et COSTA (F.). – *Piezoelectric micro-transformer based on SOI structure*. Sensors and Actuators A : Physical, vol. 117, Issue 2, p. 317-324, 14 janv. 2005.
- [21] MAGNET (C.). – *Traitement non linéaire de la tension de sortie d'éléments piézoélectriques. Applications aux transformateurs piézoélectriques et au contrôle de vibration de cartes électriques* Thèse INSA de LYON. (2006).
- [22] VASIC (D.). – *Apports des matériaux piézoélectriques pour l'intégration hybride et monolithique des transformateurs* Thèse ENS Cachan. (2003).
- [23] LIU (Y.-P.), VASIC (D.), COSTA (F.) et WU (W.-J.). – *Design of fixed frequency controlled radial-mode stacked disk-type piezoelectric transformers for DC/DC converter application*. Journal of Smart Materials and Structures, vol. 18, issue 8, n° 085025 (2009).
- [24] IVENSKY (G.), BRONSTEIN (S.) et BEN-YAAKOV (S.). – *A comparison of piezoelectric transformer AC/DC converters with current doubler and voltage doubler rectifiers*. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, n° 6, nov. 2004.

À lire également dans nos bases

JOLY (G.). – *Soudage des thermoplastiques*. [BM 7 775] Travail des matériaux. Assemblage (2005).

JEAN-MISTRAL (C.) et BASROUR (S.). – *Récupération de l'énergie des vibrations mécaniques pour générer de l'électricité*. [RE 135] Recherche et innovation (2010).

PÉTRIER (C.), GONDREXON (N.) et BOLDO (P.). – *Ultrasons et sonochimie*. [AF 6 310] Cinétique chimique (2008).

SARRAUTE (E.), COSTA (F.) et VASIC (D.). – *Transformateurs statiques piézoélectriques*. [D 3 015] Convertisseurs et machines électriques (2005).

MEYNARD (T.), FOCH (H.), RICARDEAU (F.), PIQUET (H.) et METZ (M.). – *De la gestion des contraintes de commutation à la commutation douce*. [D 3 077] Convertisseurs et machines électriques (2008).

LEFEBVRE (S.) et MULTON (B.). – *Commande des semi-conducteurs de puissance : contextes*. [D 3 230] Convertisseurs et machines électriques (2002).

Sites Internet

ENOCEAN

<http://www.enocean.com/en/radio-technology/>

Annuaire

Fabricants (liste non exhaustive)

Noliac

<http://www.noliac.com/>

PI (Physik Instrumente)

<http://www.physikinstrumente.com/>

Eleceram Technologie

<http://www.eleceram.com.tw/>

Face

<http://www.faceinternational.com/>