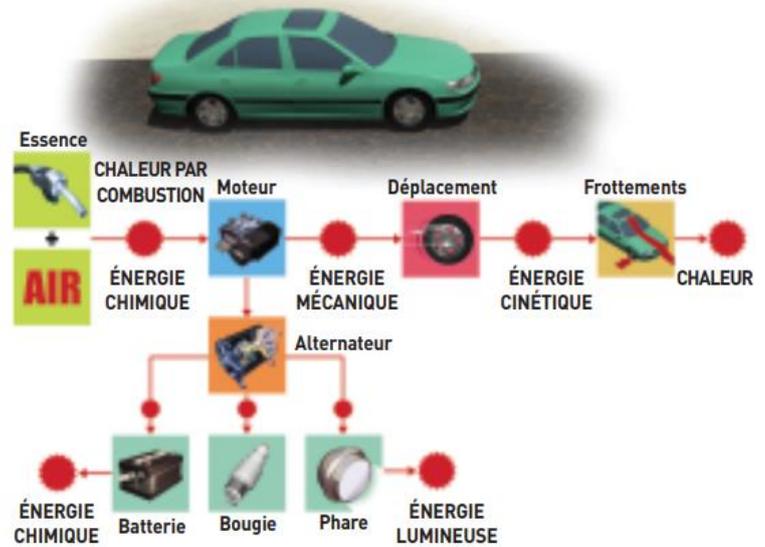


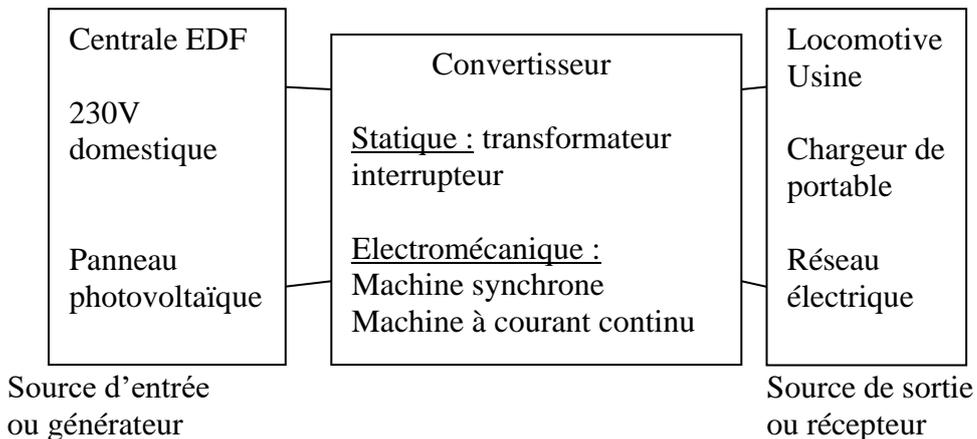
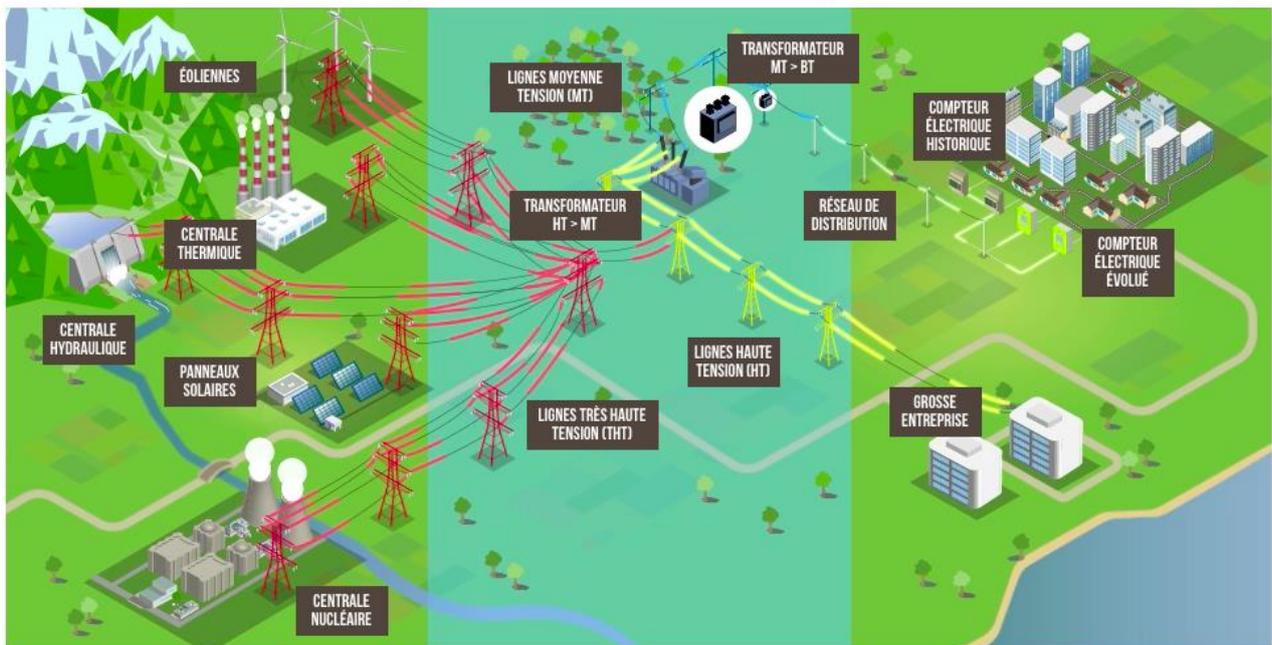
# Conversion électrique de puissance

La conversion électrique est l'étude des circuits permettant de transférer une large plage de puissance du  $\mu\text{W}$  au GW d'un générateur à une charge.

Transports terrestres et aériens  
 Gestion d'énergie sur les réseaux de distribution  
 Gestion de la production d'énergie  
 Applications domestiques et industrielles  
 Applications mobiles



> PRODUCTION      > TRANSPORT ET DISTRIBUTION      > CONSOMMATION



CONVERSION DE PUISSANCE Chapitre 1 : Conversion électronique - statique

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.4. Conversion électronique statique</b>	
Formes continue et alternative de la puissance électrique. Structure d'un convertisseur.	Citer des exemples illustrant la nécessité d'une conversion de puissance électrique. Décrire l'architecture générale d'un convertisseur électronique de puissance : générateur, récepteur, processeur de puissance utilisant des interrupteurs électroniques, commande des fonctions de commutation.
Fonction de commutation spontanée. Fonction de commutation commandée. Sources. Réversibilité. Interconnexion. Cellule de commutation élémentaire.	Décrire la caractéristique idéale courant-tension de la diode. Décrire la caractéristique idéale courant-tension du transistor. Définir les notions de sources de courant et de tension. Expliquer le rôle des condensateurs et des bobines comme éléments de stockage d'énergie assurant le lissage de la tension ou de l'intensité à haute fréquence. Caractériser les sources par leur réversibilité en tension, en intensité, en puissance. Citer des exemples. Citer les règles d'interconnexions entre les sources. Expliquer le fonctionnement d'une cellule élémentaire à deux interrupteurs assurant le transfert d'énergie entre une source de courant et une source de tension.
Hacheur.	Tracer des chronogrammes. Exploiter le fait que la moyenne d'une dérivée est nulle en régime périodique établi. Calculer des moyennes de fonctions affines par morceaux. Utiliser un bilan de puissance moyenne pour établir des relations entre les tensions et les intensités. Justifier le choix des fonctions de commutation pour un hacheur série assurant l'alimentation d'un moteur à courant continu à partir d'un générateur idéal de tension continue. Exprimer les valeurs moyennes des signaux. Calculer l'ondulation en intensité dans l'approximation d'un hachage haute fréquence réalisant une intensité affine par morceaux.
Onduleur.	Décrire la structure en pont à quatre interrupteurs et les séquences de commutation permises. Étudier, pour un générateur de tension continue et une charge (R, L), la réalisation d'une intensité quasi-sinususoïdale par modulation de largeur d'impulsion.
Convertisseur statique.	<b>Mettre en œuvre un convertisseur statique.</b>

## Conversion de puissance chapitre 1 : conversion électronique-statique

# CONVERSION ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

La conversion électronique est l'étude des circuits permettant de transférer une forte puissance (de 100 W à 100 kW) d'un générateur à une charge à l'aide de circuits électroniques de puissance ; on l'appelle **électronique des courants forts**.

Alimentation d'une chaîne hi-fi ou d'un microordinateur : 100 à 500 W

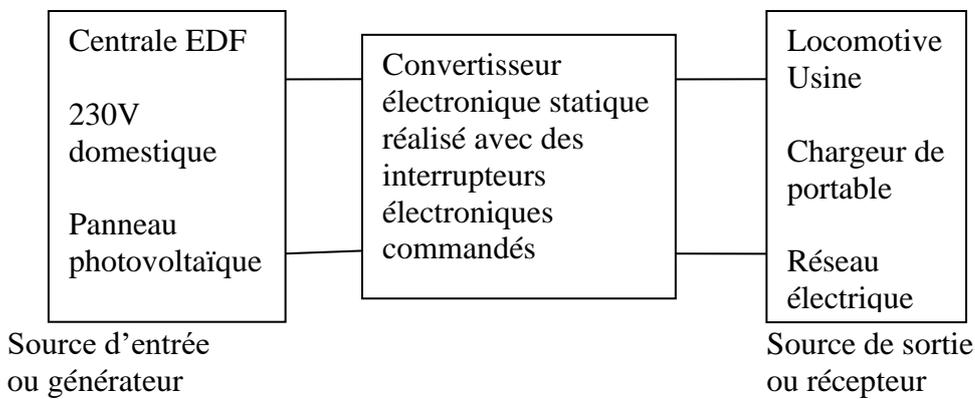
Petit moteur (perceuse électrique, machine à laver) : 500 à 2 kW

Moteurs industriels, émetteurs de télédiffusion, sonorisation de concerts : 100 kW

Motrice de TGV : 8 MW

En électronique des courants faibles, les puissances mises en jeu sont faibles ; la principale caractéristique est le gain souhaité.

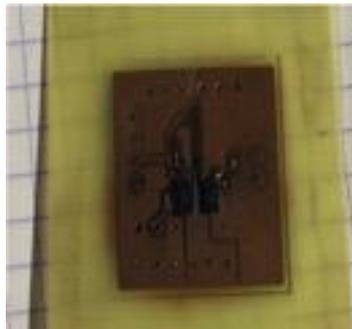
En électronique de puissance, les puissances sont importantes et coûteuses ; la première caractéristique à laquelle on s'intéresse est le rendement ; on travaille alors en **commutation**.



La conversion électronique qui utilise des composants semi-conducteurs a connu des bouleversements profonds depuis quelques décennies. La technologie des interrupteurs électroniques ne cesse de progresser (puissance supportée, rapidité de commutation, efficacité de la commande). On note une diminution du poids des équipements et une amélioration du rendement à même puissance convertie.



1970 : Thyristor 5 kg ;  
4 000 V ; 3940 A  
 $f_{\max} = 100$  kHz



2015 : transistor NiGa  
200 V ; 30 A  
 $f_{\max} = 30$  MHz  
utilisé dans l'industrie



2015 : prototype de  
chargeur d'ordinateur  
portable.

L'évolution des moteurs de TGV a suivi celle des composants électroniques :

Moteur continu-série pour le TGV Sud-Est (1981)

Moteur synchrone autopiloté pour le TGV Atlantique (1989)

Moteur asynchrone autopiloté pour le TGV transManche (1993) et le TGV Est (2007)

Mars/Avril 2022 : Un chargeur compact à très haut rendement

<https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/les-defis-du-cea/LES-DEFIS-DU-CEA-248.pdf>

## MOBILITÉ DURABLE

# Un chargeur compact à très haut rendement

Alors que Sony et Honda forment une alliance stratégique pour les véhicules électriques, le CEA et Renault Group présentent un chargeur embarqué pour batteries dernier cri. Il équipera les voitures du constructeur dès 2025.

PAR AUDE GANIER

Lancé il y a à peine cinq ans, le projet du CEA et de Renault Group aboutit à un chargeur embarqué de batteries aux performances inégalées. Une première: il réduit de 30% les pertes d'énergie lors de la conversion de l'électricité en tension et en courant, ce qui réduit d'autant l'échauffement du convertisseur et améliore son efficacité et sa durée de vie. Bidirectionnel (il peut à la fois délivrer et stocker l'électricité), avec une capacité de charge jusqu'à 22 kVA (celle des prises murales), il permet d'envisager les futurs usages de la maison autonome alimentée en partie par le véhicule!

### Le graal de l'électronique de puissance

Cela, on le doit au pari audacieux des chercheurs du CEA-Leti dans les années 2010. Pour l'électronique de puissance embarquée, ces pionniers ont misé sur le potentiel du « GaN » (nitrure de gallium). Pour différentes raisons: les composants GaN peuvent être produits sur les lignes standard

de la microélectronique et ils peuvent être bidirectionnels. De fait, les coûts s'avèrent moins élevés qu'avec d'autres technologies comme celle à base de carbure de silicium, et les performances garanties. « Dès le début, nous avons évolué sur deux axes de recherche. D'une part, la fabrication des composants dans nos salles blanches et dont le transfert de technologie est actuellement en cours chez STMicroelectronics. D'autre part, la conception de systèmes applicatifs tests pour améliorer dès la phase amont les composants selon les usages. À l'arrivée, nous obtenons des performances à l'état de l'art mondial », relate Philippe Despreste, ingénieur au CEA-Leti.

### Réduction de la taille des composants

Renault Group s'est également appuyé sur l'expertise du CEA-Liten en matière de procédés de fabrication et de matériaux pour réduire la taille du convertisseur. Les gains en compacité ont notamment été obtenus grâce à un procédé dit de *Powder Injection Molding* qui permet de fabriquer des formes complexes pour s'adapter à l'espace utile, autorisant ainsi une miniaturisation.

Un transfert est en cours auprès d'un équipementier, futur fournisseur de Renault. L'objectif étant d'intégrer ce chargeur dans les véhicules électriques du constructeur dès 2025. ●



#### Ci-dessous

Tests de vérification du chargeur embarqué de batteries.

#### LEXIQUE

##### Électronique de puissance

Branche récente de l'électronique (moins de 50 ans), autrement appelée « électronique de conversion d'énergie », qui permet de convertir l'électricité en d'autres formes d'énergie comme l'alimentation des batteries, l'induction des plaques de cuisson, etc.



#### CEA-Leti

Institut des micro et nanotechnologies et de leur intégration dans les systèmes (Grenoble).

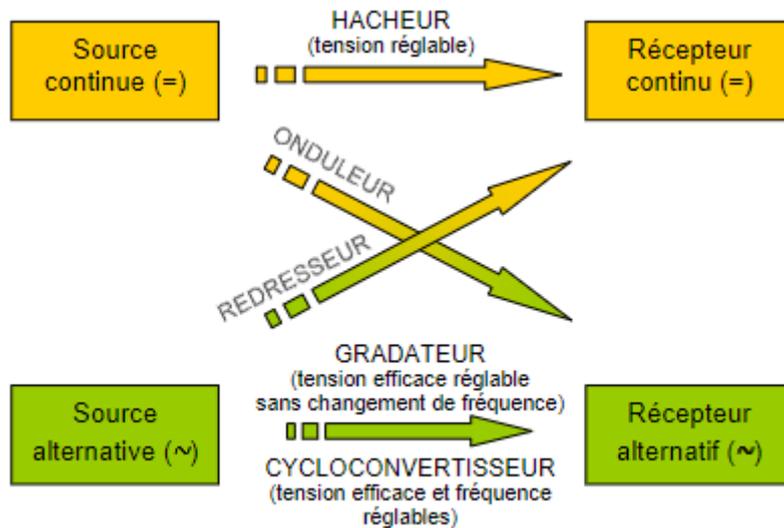
#### CEA-Liten

Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Grenoble).



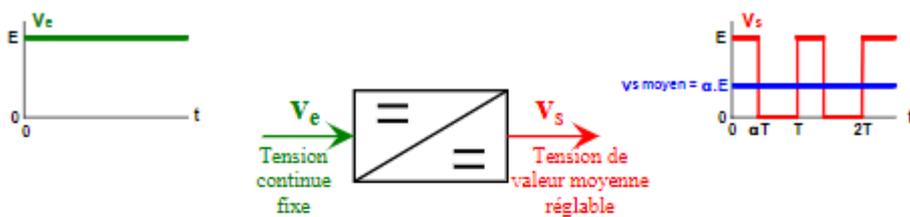
Les différents types de conversion électronique :

énergie continue  $\langle u \rangle \neq 0$  ;  $\langle i \rangle \neq 0$  ou alternative  $\langle u \rangle = 0$  ;  $\langle i \rangle = 0$   
 $\langle u.i \rangle \neq 0$



### Utilisation

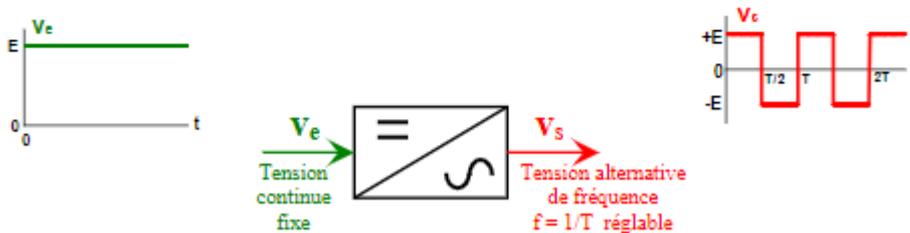
■ **Hacheur :** continu → continu (rapport cyclique  $\alpha$  réglable)



Clé USB sur allume cigare

Variation de vitesse d'une machine à courant continu

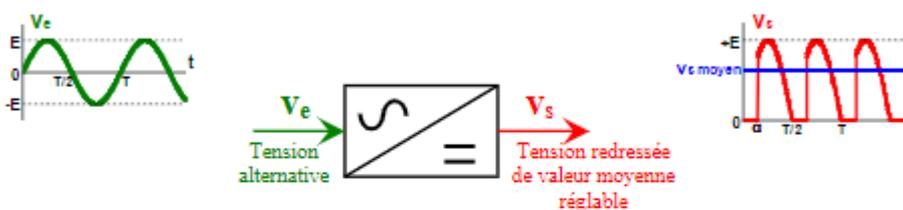
■ **Onduleur :** continu → alternatif (valeur moyenne = 0)



Alimentation de secours

Raccordement d'un panneau photovoltaïque au réseau électrique

■ **Redresseur :** alternatif → continu (valeur moyenne éventuellement réglable)



Chargeur de téléphone portable

Alimentation stabilisée en TP

■ **Gradateur :** alternatif → alternatif (valeur efficace réglable)



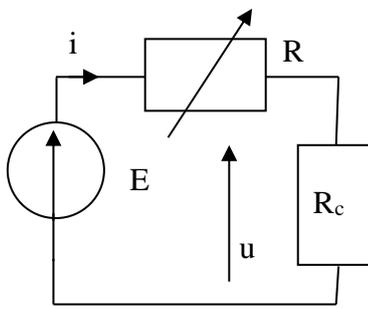
Variateur des ampoules halogènes

Alimentation du magnétron d'un four micro ondes

## I. Principe de la conversion de puissance en continu, interrupteur idéal

But : Fournir à une charge de la puissance réglable de 0 à  $P_{Max}$  avec le meilleur rendement possible.

### 1. Par l'intermédiaire d'un rhéostat :



Tracer la puissance reçue par la charge en fonction de R.  
 Définir le rendement en puissance, le tracer en fonction de R.

## 2. Par un interrupteur idéal commutant régulièrement

K est fermé pour  $0 < t < \alpha T$  ; K est fermé pour  $\alpha T < t < T$ .

Tracer la puissance reçue par la charge en fonction de  $\alpha$ .  
 Définir le rendement en puissance, le tracer en fonction de  $\alpha$ .

## 3. Cahier des charges d'un convertisseur électronique



Ne pas consommer d'énergie :

D'une manière générale un convertisseur électronique ne met en jeu que des composants dont le fonctionnement est idéal et non dissipatif.

Il est composé d'interrupteurs et d'élément de stockage d'énergie, bobines et condensateurs parfaits, dont la puissance moyenne dissipée est nulle :

$$\langle P(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{dE_{EM}}{dt} dt = \frac{1}{T} \int_{E(0)}^{E(T)} dE_{EM} = \frac{1}{T} (E_{EM}(T) - E_{EM}(0)) = 0 \text{ car } E_{EM}(t) \text{ est } T \text{ périodique.}$$

Fonctionnement périodique permanent

Conversion fidèle d'énergie

## II. Caractérisation des sources d'entrée ou de sortie :

Une source est un dipôle ne pouvant pas subir de discontinuités de tension ou de courant.

### 1. Sources parfaites :

Un dipôle est une **source idéale de tension** lorsque la tension  $u$  à ses bornes ne peut être modifiée par le courant  $i$  qu'il débite ou reçoit. Son impédance interne est nulle.

Un dipôle est une **source idéale de courant** lorsque le courant qui le traverse ne peut être modifié par la tension à ses bornes. Son impédance interne est infinie.

**Source réversible** : peut être traversée par un courant dans les deux sens ; la tension à ses bornes peut-être positive ou négative, exemple Machine à Courant Continu.

### 2. Règles de connexion :

Une source de tension :

- peut être mise en circuit ouvert ;
- ne doit pas être mise en court-circuit ;
- ne doit pas être branchée directement sur une autre source de tension de tension différente.

Une source de courant :

- peut être mise en court-circuit ;
- ne doit pas être mise en circuit ouvert ;
- ne doit pas être branchée directement en série avec une autre source de courant parcourue par un courant différent.

### 3. Sources réelles

#### a) Amélioration d'une source de tension

L'association source de tension réelle + condensateur en parallèle, transforme la source réelle en une source idéale.

C est un condensateur de lissage.

Pour améliorer une source de tension, il faut diminuer son impédance interne, en mettant un condensateur à ses bornes. (condensateur de lissage)

En électronique de commutation, cela se traduit par une inductance interne assez faible pour :

- ne pas s'opposer aux rapides variations du courant  $i$  lors des commutations;
- que ces variations ne produisent pas des pics ou des creux trop importants dans la tension  $u$  à ses bornes.

#### b) Amélioration d'une source de courant

L'association source de courant réelle + bobine en série, transforme la source réelle en une source idéale.

L est une bobine de lissage.

Pour améliorer une source de courant, il faut augmenter son impédance interne, en mettant en série une inductance supplémentaire. (bobine de lissage)

Cela se traduit par une inductance interne assez élevée pour :

- ne pas s'opposer aux rapides variations de tension  $u$  lors des commutations;
- que ces variations ne produisent pas des pics ou des creux trop importants dans le courant  $i$  qui la traverse.

*En présence de commutations :*

*Un dipôle se comporte comme une source de tension si la tension à ses bornes reste quasiment constante*

*Un dipôle se comporte comme une source de courant si l'intensité qui le traverse reste quasiment constante*

*Une source de tension autorise des variations brusques de courant*

*Une source de courant autorise des variations brusques de tension*

### III. Cellule de commutation élémentaire :

#### 1. Problématique : comment transférer de la puissance d'une source parfaite de tension à une source parfaite de courant via un convertisseur continu-continu

#### 2. Nature des interrupteurs :

Les composants de base sont des semi-conducteurs fonctionnant en commutation.

##### a) Fonction diode :

La commutation est spontanée : elle ne nécessite aucun dispositif extérieur.

La fonction diode est réalisée par une diode.

##### b) Fonction transistor :

Dans l'état ouvert  $u > 0$  ;

dans l'état fermé  $i > 0$ .

Une électrode de commande permet de commander l'amorçage (a) ou le blocage (b).

La fonction transistor est réalisée avec un transistor : il comporte trois bornes : base, émetteur, collecteur. C'est un interrupteur commandé par le courant  $i_b$  envoyé dans la commande base-émetteur.

La tension considérée est la tension  $v_{CE}$  entre collecteur et émetteur ; le courant commandé est le courant de collecteur  $i_c$ .

Lorsque le courant de base est nul, le transistor est bloqué :  $i_c$  est alors nul et  $v_{CE} > 0$ .

Lorsque le courant de base est non-nul, le transistor est passant et  $v_{CE}$  est nul.

#### 3. Bilan de puissance

### IV. Hacheur série

#### 1. Commande d'une MCC

#### 2. Hacheur série sur charge RL

<https://sitelec.org/animations.htm>

A compter du 31 décembre 2020, ADOBE ne prend plus en charge Flash Player

Les fichiers SWF ne peuvent plus être exécutés dans un navigateur

Télécharger et exécuter [Flash Player](#)

puis télécharger le fichier SWF choisi et le faire glisser dans la fenêtre de Flash Player

Animation :

Animation flash

<http://fisik.free.fr/ressources/hacheurserie.swf>

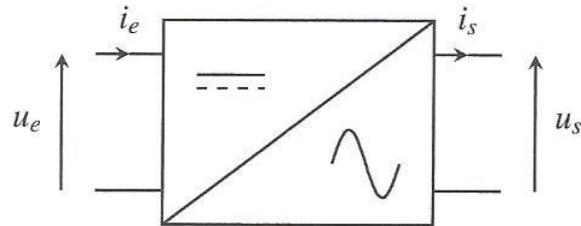
## V. Onduleur

Fort puissance : tension de commande des moteurs synchrones TGV

Faible puissance : alimentés par une batterie autonome gènère une tension de fréquence 50 Hz pour palier aux ruptures d'alimentation du réseau

Entrée :  
tension  
continue

$$\langle u_e(t) \rangle = E$$

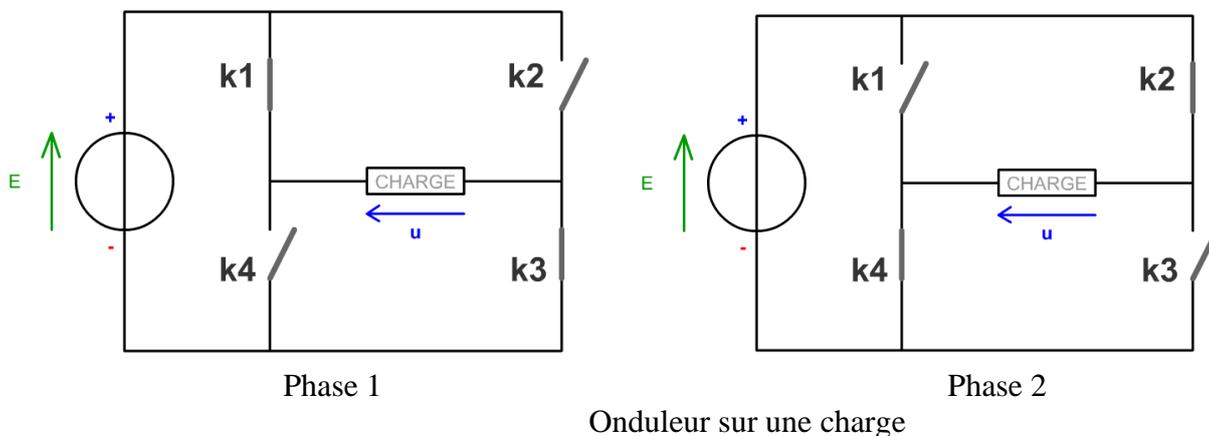


Sortie :  
tension  
alternative

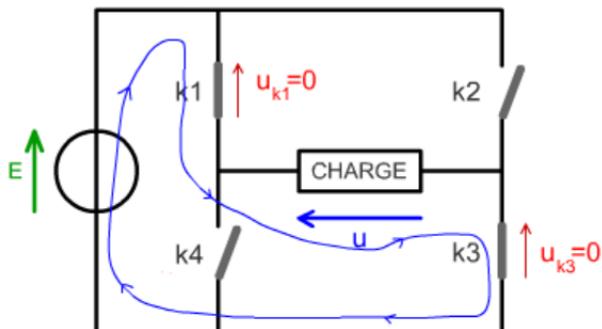
$$\langle u_s(t) \rangle = 0$$

Figure 26.47 – Symbole de l'onduleur.

### 1. Cahier des charges et choix de l'architecture



Pour la phase 1 :  $0 < t < \alpha T$



Lorsque les interrupteurs  $k_1$  et  $k_3$  sont fermés:

En appliquant la loi des mailles :

$$E - u_{k1} - u - u_{k3} = 0$$

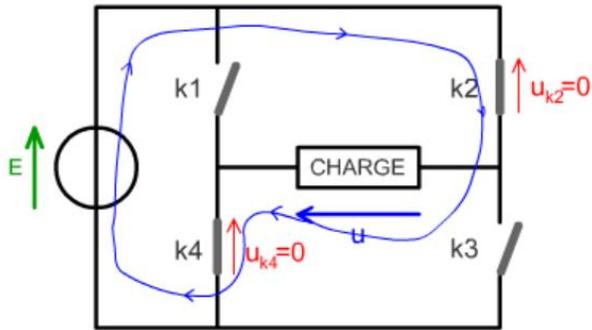
$$\text{soit : } E - u = 0 \text{ d'où}$$

La tension aux bornes de la charge

$$u = E$$



Pour la phase 2 :  $\alpha T < t < T$



Lorsque les interrupteurs k2 et k4

sont fermés:

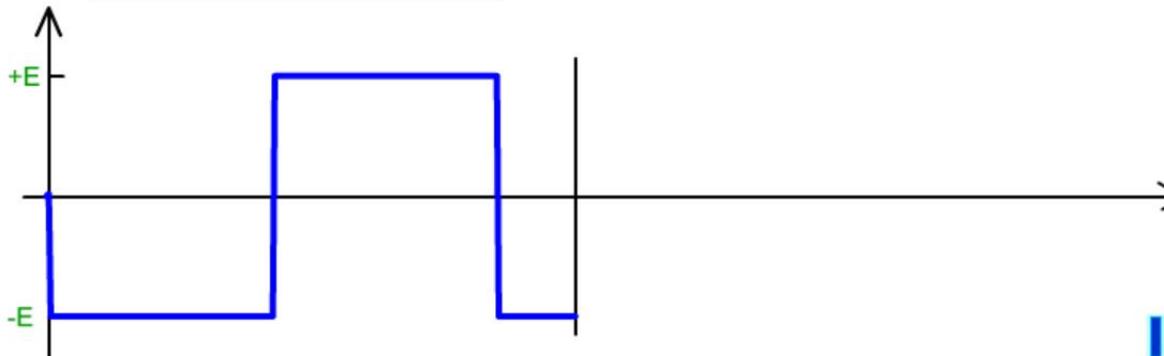
En appliquant la loi des mailles :

$$E - u_{k2} + u - u_{k4} = 0$$

soit :  $E + u = 0$  d'où

La tension aux bornes de la charge

$$u = -E$$



Cahier des charges :  $\langle u(t) \rangle = 0$  donc le rapport cyclique  $\alpha = 1/2$

Animation : sur le site de la classe onduleur.swf ou <http://fisik.free.fr/ressources/onduleur.swf>

<https://sitelec.org/animations.htm>

A compter du 31 décembre 2020, ADOBE ne prend plus en charge Flash Player

Les fichiers SWF ne peuvent plus être exécutés dans un navigateur

Télécharger et exécuter [Flash Player](#)

puis télécharger le fichier SWF choisi et le faire glisser dans la fenêtre de Flash Player

## 2. Fonctionnement de l'onduleur sur une charge (R, L)

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt}$$

### Cahier des charges :

$u_R(t) = Ri(t)$  est continue par la présence de la bobine,  
T périodique de valeur moyenne nulle  $u_R(t=0) = u_R(t = T)$

$$\frac{du_R}{dt} + \frac{u_R(t)}{\tau} = \frac{u(t)}{\tau} \text{ avec } u(t) = +/- E \text{ et } \tau = L/R$$

### **Pour la phase 1 : $0 < t < T/2$**

$$\frac{du_R}{dt} + \frac{u_R(t)}{\tau} = \frac{E}{\tau} \text{ si le régime permanent est atteint pour } t < T/2 \quad u_R(t) = E$$

Si on néglige R, ou si la fréquence de hachage est élevée

$$\frac{du_R}{dt} = \frac{E}{\tau} > 0 \text{ donc } u_R(t) = Ri(t) \text{ est une fonction affine croissante,}$$

lorsque  $t = T/2$  le courant atteint sa valeur maximale  $I_{MAX}$

### **Pour la phase 2 : $T/2 < t < T$**

$$\frac{du_R}{dt} + \frac{u_R(t)}{\tau} = \frac{-E}{\tau} \text{ si le régime permanent est atteint pour } t < T \quad u_R(t) = -E$$

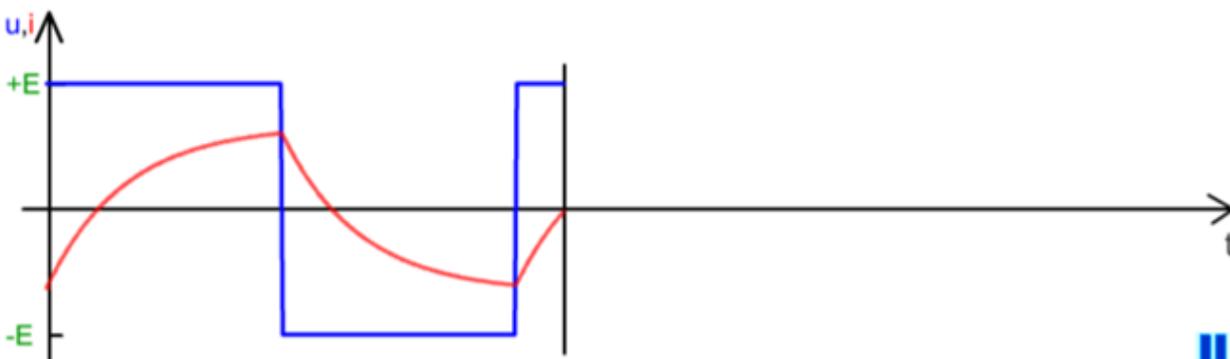
Si on néglige R, ou si la fréquence de hachage est élevée

$$\frac{du_R}{dt} = \frac{-E}{\tau} < 0 \text{ donc } u_R(t) = Ri(t) \text{ est une fonction affine décroissante,}$$

lorsque  $t = T$  le courant atteint sa valeur minimale  $I_{min} = i(t=T) = i(t=0)$

Or  $I_{moy} = \frac{1}{2} (I_{MAX} + I_{min})$  et  $I_{moy} = 0$ , d'après le cahier des charges, donc  $I_{min} = -I_{MAX}$   
 $I_{MAX} > 0$  et  $I_{min} < 0$ .

Les interrupteurs doivent accepter un courant négatif -> mettre une diode branchée en inverse en parallèle de chaque interrupteur.

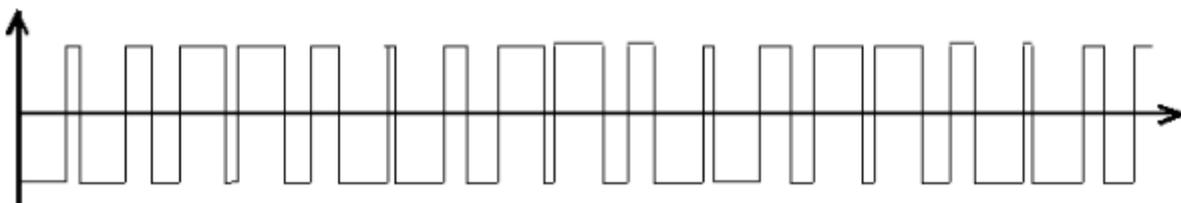
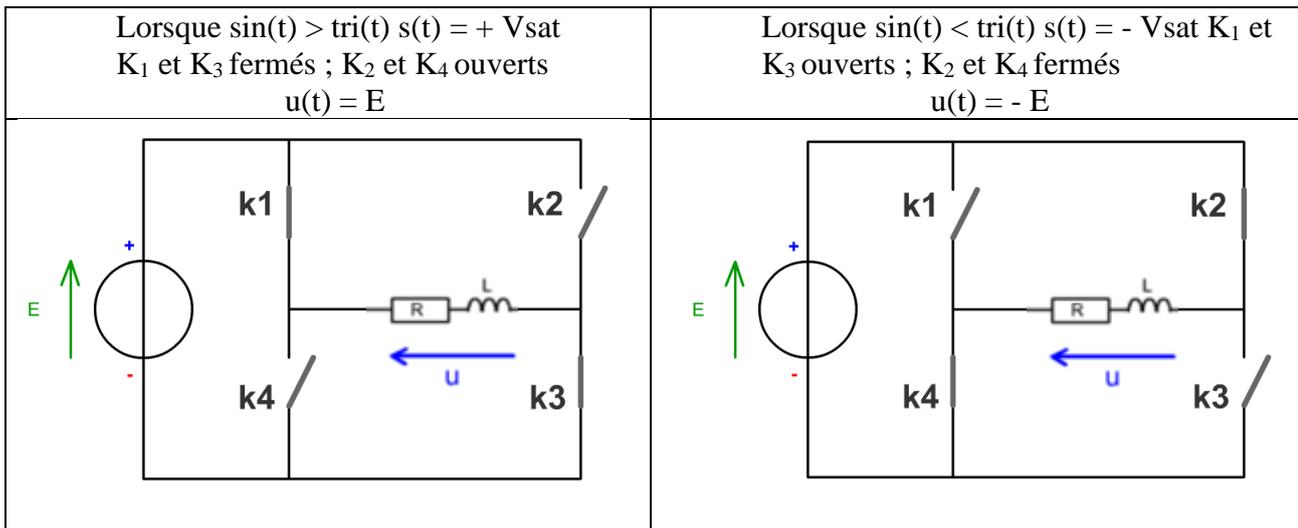
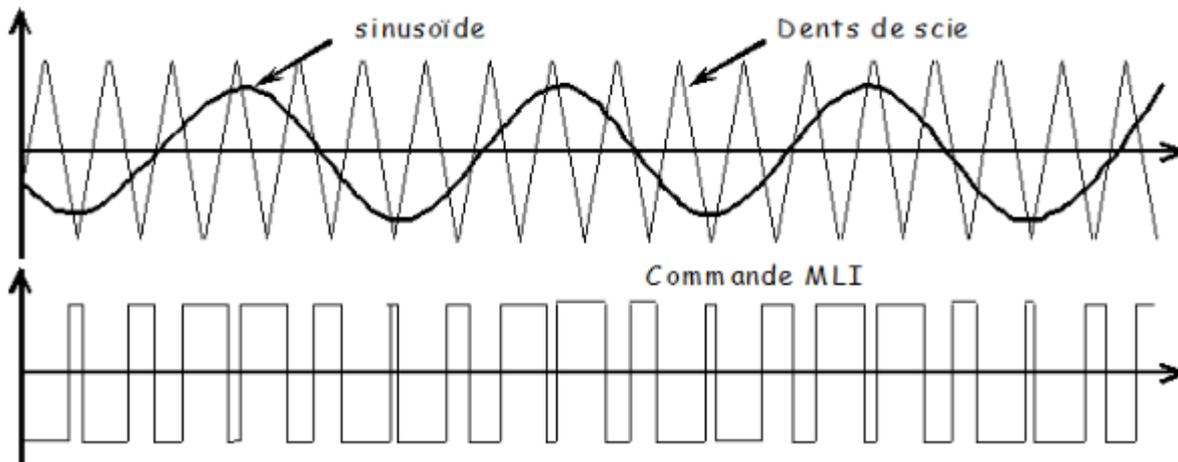


### 3. Commande MLI (Modulateur à largeur d'impulsion ; PWM Pulse Width Modulation)

Objectif : obtenir une tension  $u_R(t)$ , T périodique, le plus sinusoïdale possible pour commander les stators de machines alternatives.

Les interrupteurs sont commandés par comparaison (comparateur simple à ALI) entre un signal sinusoïdal  $\sin(t)$  de période T et un signal triangulaire  $\text{tri}(t)$  de période  $T_t < T$ .

Ici  $T = 5T_t$ .

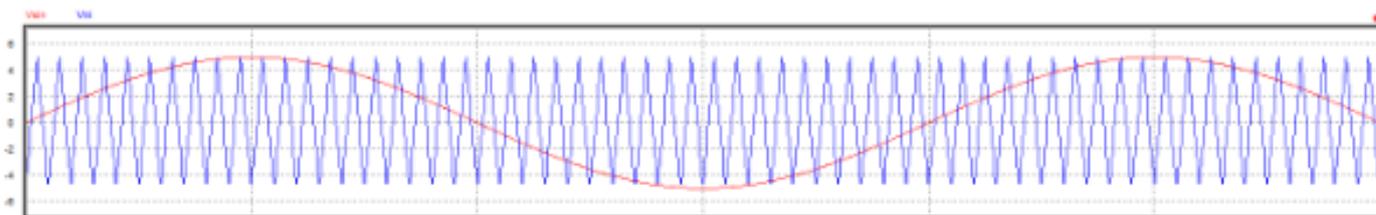


Cahier des charges :  $u_R(t)$  est T périodique de valeur moyenne nulle  $u_R(t=0) = u_R(t = T)$

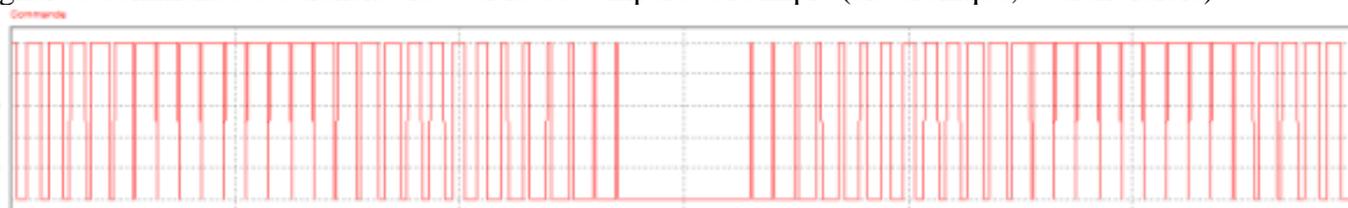
$$\frac{du_R}{dt} + \frac{u_R(t)}{\tau} = \frac{u(t)}{\tau} \text{ avec } u(t) = \pm E \text{ et } \tau = R/L$$

Construire  $u_R(t)$  sur la commande MLI ->  $u_R(t)$  tend vers une fonction sinusoïdale de période T (= période de la commande sinusoïdale)

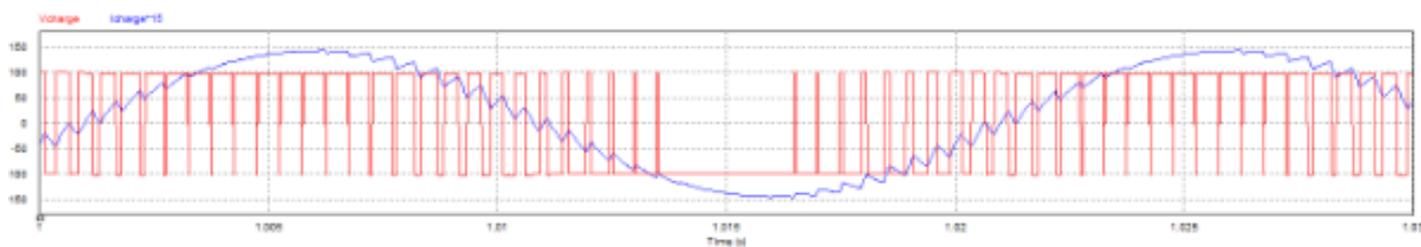
tri(t) et sin(t) avec  $T_{\text{sin}} = 40 T_{\text{tri}}$  (électronique, courant faible)



Signal de commande des transistors : sortie du comparateur simple (électronique, courant faible)



En bleu  $u_R(t)$  qui s'approche d'une fonction sinusoïdale de période  $T =$  période de la sinusoïde de commande. Electronique de puissance, courant fort



<http://sa.ge.sts.free.fr/Wiki/pmwiki.php?n=SA.OnduleurMLI>

consulté le 23 septembre 2022