

I.1. Introduction

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie connectée au réseau (source éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...).

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. On trouve un convertisseur alternatif continu dans l'alimentation d'appareils électroniques (TV, ordinateurs, chargeurs de téléphones...) qui transforment la tension alternative sinusoïdale du réseau en tension continue.

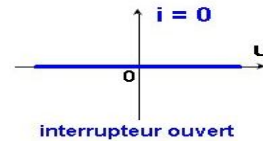
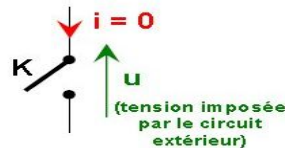
Un onduleur de secours transforme la tension continue des batteries en tension alternative pour alimenter, par exemple, du matériel informatique.

I.2. Interrupteurs statiques

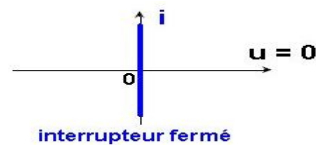
Interrupteur parfait

Un interrupteur parfait possède deux états: "Ouvert (OFF)" et "Fermé (ON)"

♦ Interrupteur ouvert (position OFF: $i = 0$)



♦ Interrupteur fermé (position ON : $u = 0$)



I.2.1 Généralités et classification des convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs à composants électroniques semi-conducteurs capables de modifier la forme et/ou la fréquence d'une onde électrique. Ils sont réalisés à l'aide de circuits électroniques qui permettent la liaison entre deux réseaux électriques parcourus par des courants de natures différentes, cette liaison est obtenue en reliant entre elles, d'une manière déterminée périodique et unidirectionnelle. Les bornes des deux réseaux de façon à obtenir la conversion désirée.

On distingue deux types de source:

- Les sources de tension continue caractérisée par la valeur U de la tension.
- Les sources de tension alternative définie par les valeurs de la tension efficace et de fréquence F . Les interrupteurs électroniques les plus couramment utilisés actuellement dans les convertisseurs statiques sont les diodes, les thyristors, les thyristors **GTO**, les transistors bipolaires, **MOSFET**, **IGBT**.

Les convertisseurs statiques peuvent être classés de la manière suivante :

- a) **Les redresseurs:** Ce sont des convertisseurs alternatif-continu qui permettent de convertir une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle, s'ils sont commandés, la

- valeur moyenne de la tension obtenue est alors réglable.
- b) **Les hacheurs:** Ce sont des convertisseurs continu-continu délivrant une tension continue réglable à partir d'une tension continue de valeur fixe, ils jouent aussi le rôle de transformateur à courant continu.
 - c) **Les onduleurs:** Ce sont des convertisseurs continu-alternatif, ils permettent donc de convertir une tension continue en une tension alternative. On les désigne alors d'onduleurs de tension (ou un courant continu en un courant alternatif, on parle alors de mutateurs).
 - d) **Les gradateurs:** Ce sont des convertisseurs alternatif-alternatif. Les gradateurs produisent des tensions et des courants alternatifs à partir d'une alimentation alternative sans modifier la fréquence des tensions, ils jouent ainsi le rôle des autotransformateurs abaisseurs réglables.
 - e) **Les cyclo-convertisseurs:** Ce sont des convertisseurs alternatif-alternatif (ou convertisseur de fréquence), c'est-à-dire, ils émettent la conversion d'une tension alternative de fréquence f_1 en tension alternative de fréquence f_2 .

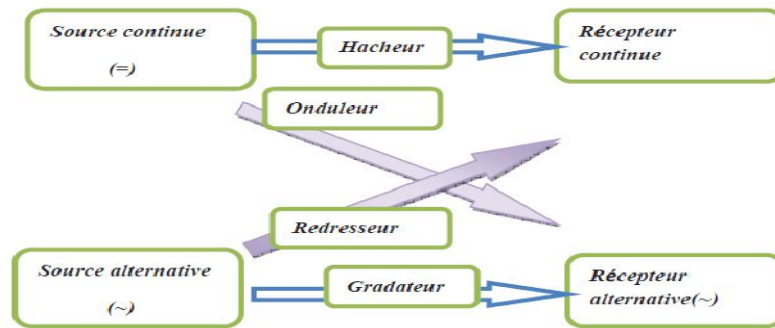


Figure I. 1. Les différents types de convertisseurs statiques.

I.3. Interrupteurs de l'électronique de puissance

I.3.1 La diode

La diode est un élément redresseur non commandé constitué d'une jonction PN, sa représentation symbolique est donnée sur la figure I.2.
Principe de fonctionnement

Une diode conduit le courant dans le sens anode (**A**) - cathode (**K**), tandis qu'elle est bloquée dans l'autre sens. Dans le cas d'une caractéristique parfaite, on suppose que la chute de tension entre (**A**) et (**K**) est nulle dans le sens de la conduction et que le courant est nul dans le sens du blocage [1]-[2], comme le montre la figure 1.3.

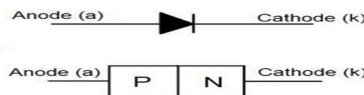


Figure I.2. Représentation symbolique d'une diode.

La figure qui suit montre les caractéristiques statiques d'une diode

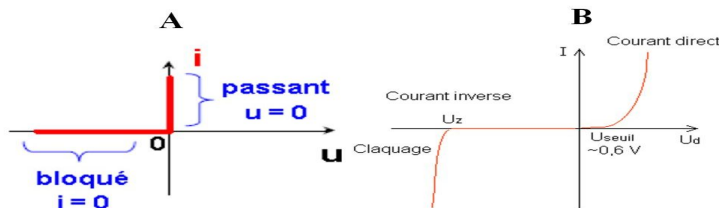


Figure I.3. a) : Caractéristique idéale – b) : Caractéristique réelle.

I.3.2 Le thyristor

Le thyristor est un élément semi-conducteur qui possèdent quatre couches respectivement **PNPN**, trois jonctions **PN** et trois électrodes: l'Anode (**A**), la cathode (**K**) et la gâchette (**G**). Comme la diode, le thyristor laisse passer le courant électrique dans un seul sens, de l'anode vers la cathode.

Mais le thyristor ne conduira que si un courant minimum positif est fourni à la gâchette. En fait, s'il est polarisé en direct ($V_{AK} > 0$), une impulsion positive suffira pour le rendre conducteur.

C'est donc une diode commandée et plus spécifiquement un redresseur commandé, d'où son nom anglais "SiliconControlled Rectifier" (**SCR**), ce qui signifie (Redresseur commandé au silicium) [2].

La figure I.4 donne la représentation symbolique d'un thyristor.

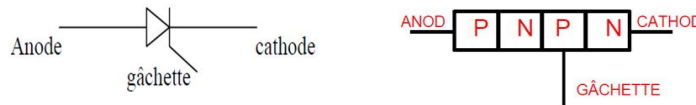


Figure I.4. Représentation symbolique d'un thyristor.

Principe de fonctionnement

- **Amorçage**

L'amorçage d'un thyristor est obtenu par différents phénomènes physiques. Dans tous les cas l'amorçage rend le thyristor conducteur et un courant circule de l'anode vers la cathode ($I_{AK} > 0$).

La tension V_{AK} est alors faible, elle est de l'ordre de quelques dixièmes de volts environ. Il est à noter que pour le thyristor reste conducteur, son courant d'anode I_{AK} doit rester supérieur à une certaine valeur appelée courant de maintien.

- **Blocage**

Sous tension inverse, la tension anode cathode notée V_{AK} est négative, la première et les dernières jonctions sont polarisées en inverse et donc bloquées. Le courant de fuite possède une intensité très faible en raison des différences de dopage entre les couches. C'est la jonction d'onde qui supporte la plus grande partie de la tension inverse. Pour bloquer un thyristor il suffit de lui imposer une tension V_{AK} négative, alors même une impulsion positive appliquée sur la gâchette ne pourra l'amorcer dans ces conditions.

- **Caractéristique statique**

La caractéristique statique réelle d'un thyristor est représentée sur la figure I.5.

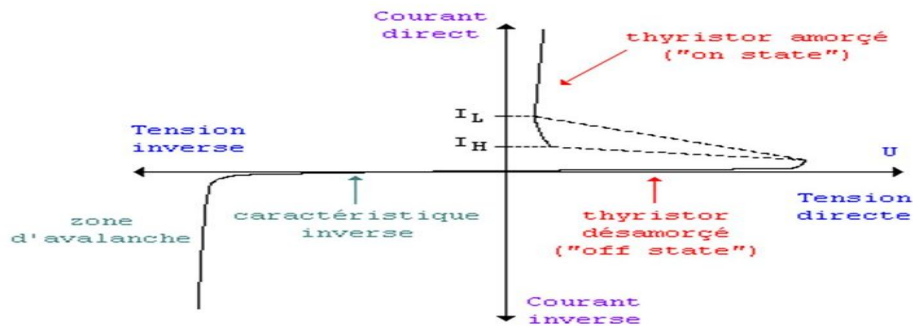


Figure I.5. Caractéristiques statique réelle d'un thyristor.

I.3.3 Le thyristor *GTO*

Le thyristor *GTO* (*Gate Trun Off*) est une évolution du thyristor classique ayant la propriété de pouvoir être bloqué à l'aide de la gâchette. Contrairement aux thyristors classiques il est utilisé pour les commutations de fortes puissances, avec des tensions de **2500 V**, **4500 V**, et **6000 V** et des courants de **600 A** à **6000 A** environ [3].

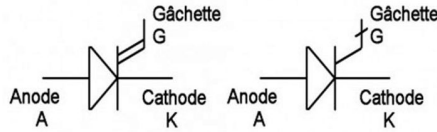


Figure I.6. Deux symboles différents un peu au niveau de la gâchette.

- **Amorçage**

Un *GTO* s'amorce par la gâchette, avec $V_{AK} > 0$ comme pour un thyristor classique. La commande de l'amorçage par la gâchette doit être énergique et donc le courant de gâchette peut être de quelques ampères. Une fois la conduction l'amorçage, elle se maintient, et la gâchette doit être alimentée de manière permanente par un courant I_G . Ce courant permet de réduire la chute de tension directe à l'état passant aux bornes du *GTO*.

- **Blocage**

Le blocage du thyristor *GTO* peut se faire de deux façons :

- Par interruption naturelle du courant principal I_{AK} , ce qui se produit par exemple à chaque alternance s'il est utilisé sous tension alternative,
- Par extraction du courant au niveau du circuit de gâchette, obtenue par application d'une tension négative sur la gâchette, par un circuit appelé "extracteur de charges". En effet, l'application d'une tension négative V_{GK} fait apparaître un courant de gâchette négatif bloquant le *GTO*.

Cette phase d'extinction forcée doit impérativement être terminée avant de commander à nouveau le passage vers l'état passant, sinon il y a risque de destruction du composant. Il y a donc un temps minimal de blocage (typiquement **100 μs**), ce qui est à l'origine de la limitation en fréquence de commutation du *GTO*.

I.3.4 Le transistor bipolaire

Un transistor bipolaire est un dispositif électronique à base de semi-conducteur. Son principe de fonctionnement est basé sur deux jonctions *PN*, l'une en direct et l'autre en inverse. La polarisation de la jonction *PN* inverse, par un faible courant électrique (parfois appelé effet transistor), permet de commander un courant beaucoup plus important, suivant le principe de l'amplification de courant [3].

- **Caractéristiques du transistor *NPN***

Pour débloquer (rendre passant) le transistor, il faut que la jonction base-émetteur soit polarisée en direct avec une tension supérieure à la tension de seuil, V_S de cette jonction (figure I.7) [3].

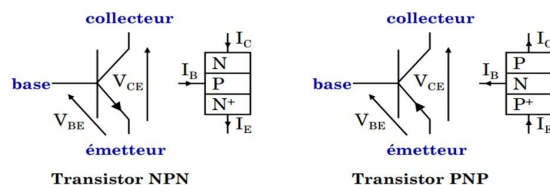


Figure I.7. Représentation symbolique des transistors *NPN* et *PNP*.

Si la jonction **BC** est polarisée en inverse, alors le courant des électrons peut traverser cette jonction, dans ce cas le courant de collecteur I_C est indépendant de la tension collecteur/émetteur V_{CE} (régime linéaire: $I_C = \beta \cdot I_B$).

Le basculement entre ces deux fonctionnements se produit à la tension V_{CEsat} (sat pour saturation), le courant I_C n'est proportionnel à I_B . (Figure I.8) [3].

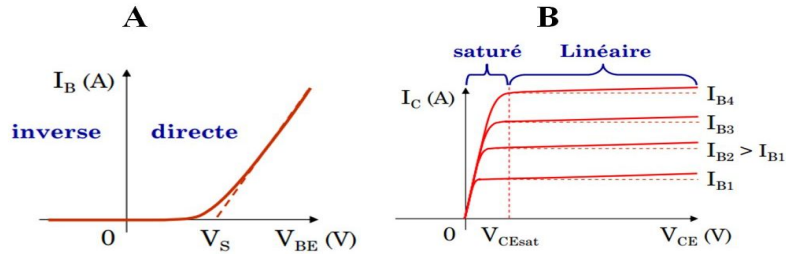


Figure I.8. Caractéristiques du transistor *NPN*.

I.3.5 Le transistor *MOSFET*

Les transistors *MOS* (*Métal Oxyde Semi Conducteur*) sont des transistors à effet de champ (*Field Effect Transistor*), parfois appelés *MOSFET*.

Ses trois bornes (Figure 1.8) sont le drain **D**, la source **S** et la grille **G** qui constitue l'électrode de commande. Celle-ci est isolée du reste du composant par une couche d'oxyde [2].

- **Principe de fonctionnement**

Le transistor *MOSFET* est commandé par une tension V_{GE} qui lorsqu'elle devient suffisamment grande $V_{GE} > V_{th}$ provoque l'établissement d'un courant entre le drain et la source. Le mode de fonctionnement dépend alors de la tension V_{DS} , donc de la polarisation. Le transistor *MOSFET* ne consomme pas d'énergie sur son circuit de commande le courant de gâchette étant nul $I_G = 0$.

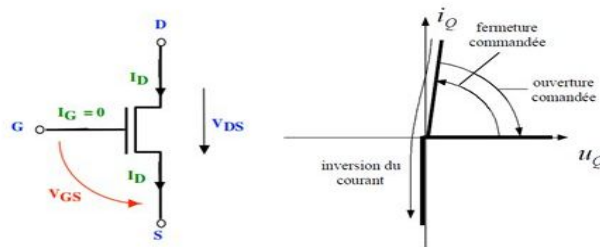


Figure I.9. Représentation symbolique et caractéristiques d'un *MOSFET*.

I.3.6 Le transistor *IGBT*

Le transistor bipolaire à grille isolée (*IGBT*) est un transistor bipolaire à commande par effet de champ. Dans le même composant, il réunit les avantages :

- du transistor bipolaire (chut de tension faible à l'état passant, tension directe blocable élevée),
- du transistor *MOS* (commande en tension, vitesse de commutation élevée). En effet, coté commande, entre la grille **G** et l'émetteur **E**, il équivaut exactement à un *MOS*; coté commandé, entre collecteur **C** et émetteur **E**, il équivaut sensiblement à un bipolaire à jonction [3].

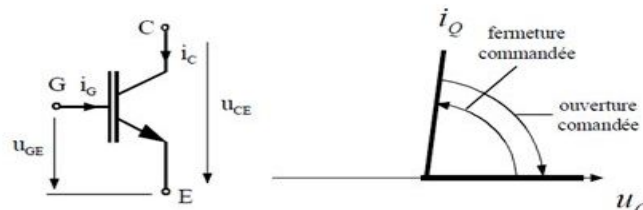


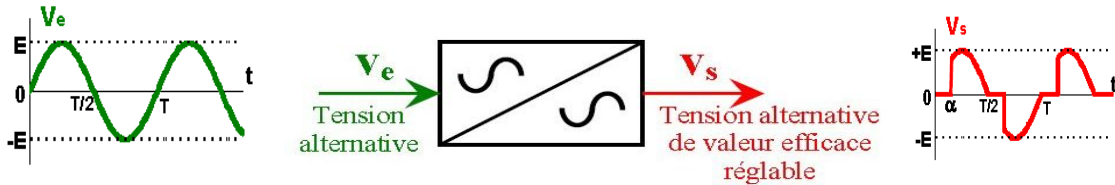
Figure I.10. Représentation symbolique et caractéristique d'un *IGBT*.

I.4 Les types de conversion de l'énergie

I.4.1 Conversion ALTERNATIF/ALTERNATIF: GRADATEUR

Le gradateur est un montage qui permet de faire varier la valeur de la tension efficace aux bornes d'une charge telle qu'un moteur sans changer la fréquence de l'onde alternative de la source.

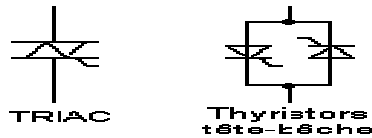
Ce montage est très fréquent dans le domaine domestique, au niveau notamment des variateurs de lumière pour lampes halogènes.



La structure de base repose sur un interrupteur électronique capable de conduire dans les deux sens à l'état passant et de supporter une tension également dans les deux sens à l'état bloqué.

Cet interrupteur peut être alors réalisé :

- Soit avec 1 seul composant: le triac,
- Soit en assemblant deux thyristors tête-bêche.



Tout comme les montages redresseurs à thyristors, on ménage un retard de commande à variable à partir de cet instant. Il s'ensuit un "découpage" de l'onde sinusoïdale qui réduit la tension efficace appliquée à la charge.

Les chronogrammes correspondant à ce fonctionnement sont tracés ci-contre.

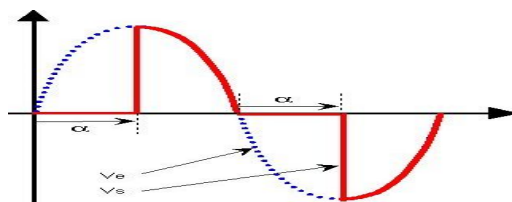
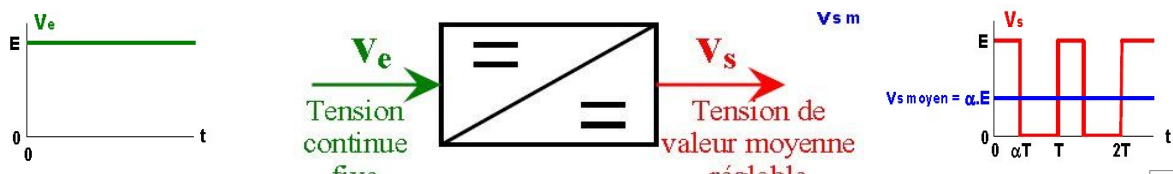


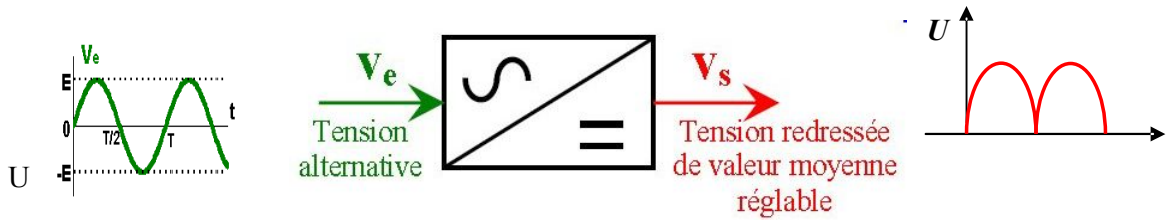
Figure I.11. Tension de la charge.

I.4.2 Conversion CONTINU/ CONTINU: HACHEUR

L'hacheur permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable à partir d'une source continue fixe. Cette source peut être par exemple une batterie d'accumulateurs ou provenir d'une autre conversion préalable comme un redresseur à diodes. On obtient une tension de valeur moyenne variable en établissant et interrompant périodiquement l'alimentation de la charge par la source grâce à des interrupteurs électroniques.



I.4.3 Conversion ALTERNATIF/ CONTINU: le REDRESSEUR



Le redressement est la conversion d'une tension alternative en une tension continue. On l'utilise pour alimenter un récepteur en continu à partir du réseau de distribution alternatif.

Le **redresseur non commandé** est composé de diodes montées en pont. Ici en pont monophasé (appelé pont de **GRAETZ**).

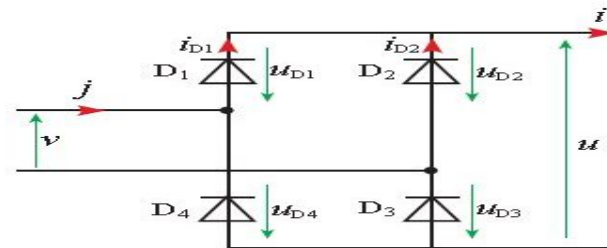
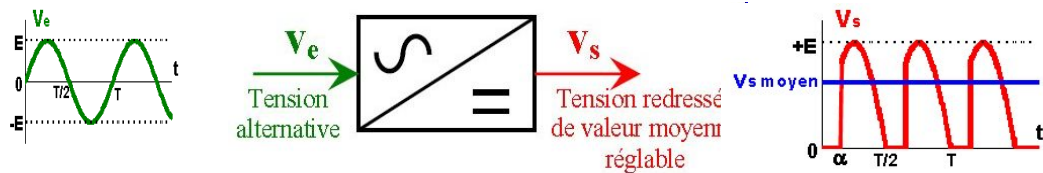


Figure I.12. Montage de redresseur en pont monophasé.



Le redresseur **commandé** est composé de thyristors montés en pont. Ici en pont triphasé.

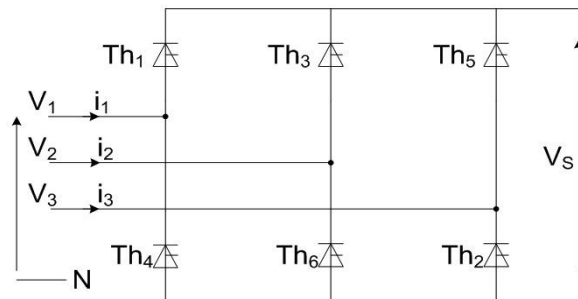
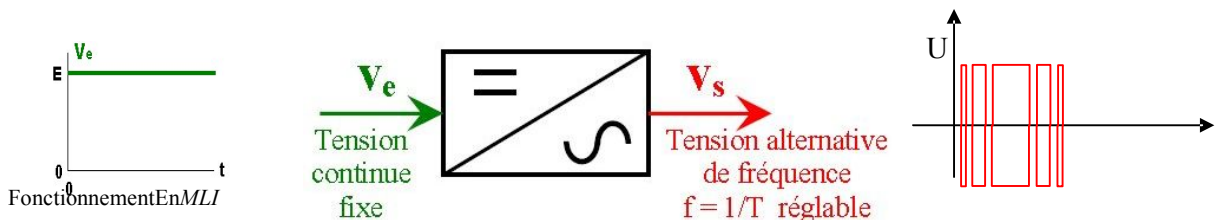


Figure I.13. Montage de redresseur commande de thyristors en pont triphasé.

I.4.4 Conversion CONTINUE /ALTERNATIVE: ONDULEUR

Un convertisseur continu-alternatif permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue.



I.5 Choix des composants

Les composants de l'électronique de puissances (interrupteurs) sont déterminés par les niveaux de la puissance et la fréquence de commutation.

En règle générale, plus les composants sont rapides, plus la puissance commutée est faible et inversement. A titre indicatif, les transistors *MOSFET*, sont considérés comme des composants très rapides mais de puissance relativement faible.

Les transistors bipolaires sont moins rapides que les transistors *MOSFET* mais davantage puissants (quelques *kHz* à une dizaine de *kW*).

Les transistors *IGBT* sont des composants de gamme standard (jusqu'à *20 kHz* à une des dizaines de *kW*).

Les thyristors *GTO* commutent très lentement les grandes puissances.

Ces composants sus indiqués sont du type commandable à l'ouverture et à la fermeture; ce qui n'est pas le cas pour le thyristor classique [4,5].

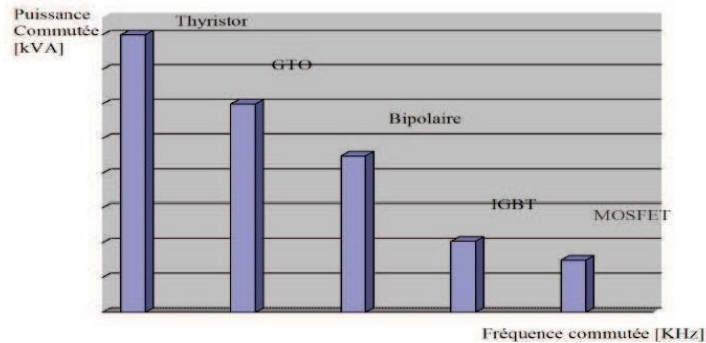


Figure I.14. Choix de composant selon la puissance et la fréquence.

I.6 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté différents types d'interrupteurs de puissance. Ces derniers peuvent être classés selon leur commande comme suit

- non commandable comme la diode,
- commandable à la fermeture comme le thyristor,
- commandable à l'ouverture et à la fermeture comme le transistor.