

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**  
**Centre Régional associé de Grenoble**

---

**Mémoire présenté en vue d'obtenir**  
**UE « Information et communication pour ingénieur »**  
**SESSION 2012 / 2013**

par

**Fabrice D'EUSTACHIO**

---

**« Interruption statique : état de l'art et perspectives »**

**Soutenu le 18 Juin 2013**

---

**JURY**

**PRESIDENT : Mr Jean-Luc THOMAS, Professeur de chaire Electrotechnique.**

**MEMBRES : Mr Pascal TIXADOR, Responsable de la filière Electrotechnique**  
**Mr Mathias VOISIN-FRADIN, Enseignant**

## Remerciements

---

Je souhaite remercier en premier lieu Bruno Reymond, Simon Tian et Sébastien Heraud pour m'avoir initié au sujet et m'avoir consacré du temps afin de répondre à mes différentes interrogations.

Je remercie également Eric Domejean pour m'avoir guidé vers les sources et bibliothèques correspondantes à mes besoins.

Mes remerciements vont ensuite vers Jean-Paul Ferrieux, Christophe Palermo et Thierry Lequeu pour m'avoir fourni la documentation que je recherchais, ou avoir répondu à mes questions.

Enfin, je souhaite remercier Pascal Tixador pour m'avoir proposé ce sujet.

En effet, bien que l'électronique de puissance soit assez loin de mon domaine de compétences professionnelles, ce sujet m'a permis de faire une analogie avec mon métier de tous les jours (concepteur sur disjoncteur électromécanique), de mieux appréhender les semi-conducteurs et leur intégration, et de prendre davantage de recul vis-à-vis de mon emploi.

## Liste des abréviations

---

<b>AC :</b>	Alternating Current
<b>CALC :</b>	Circuit d'Aide à La Commutation
<b>DC :</b>	Direct Current
<b>LED :</b>	Light Emitting Diode

## Glossaire

---

### A

Alternating Current : Courant alternatif. Le courant alternatif est un courant électrique qui change de sens. Ce courant alternatif est dit périodique s'il change régulièrement et périodiquement de sens.

### C

Calibre : Courant maximal que l'on peut faire passer indéfiniment dans un appareil électrique sans le détériorer.

Commutation : Action de commuter. Modification des liaisons électriques d'une installation.

Compatibilité électromagnétique : Aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique, de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement.

Contacteur : Appareil destiné à établir ou interrompre le passage du courant, à partir d'une commande électrique.

Courant de défaut : Courant résultant d'un défaut d'isolement.

Court-circuit : Un court-circuit est la mise en connexion volontaire ou accidentelle de deux points (ou plus) d'un circuit électrique entre lesquels existe une différence de potentiel, par un conducteur de faible résistance.

## **D**

Direct Current : Courant continu. C'est un courant électrique unidirectionnel : le courant circule continuellement (ou très majoritairement) dans le même sens.

Disjoncteur : Dispositif électromécanique, voire électronique, de protection dont la fonction est d'interrompre le courant électrique en cas d'incident sur un circuit électrique. Il est capable d'interrompre un courant de surcharge ou un courant de court-circuit dans une installation.

Différentiel : Dispositif assurant la protection des personnes. Il assure la détection d'un courant de fuite en effectuant la somme vectorielle des courants du circuit électrique.

## **E**

Ecrêter : Action de niveler un signal dans sa partie supérieure à partir d'une certaine limite.

## **F**

Force électromotrice : Lorsque le flux magnétique varie dans une bobine, il y a alors la création d'une force électromotrice énoncée par la loi de Lenz-Faraday.

## **I**

Interrupteur : Dispositif permettant d'interrompre ou d'établir le passage de courant dans un circuit à partir d'une commande manuelle.

## **M**

Monolithique : Qui forme un seul bloc

## **P**

Pouvoir de coupure : Il correspond à l'aptitude d'un appareil électrique à interrompre un courant de court-circuit sans se détériorer et sans mettre en danger l'entourage.

## **R**

Relai : Appareil destiné à établir ou interrompre le passage du courant, à partir d'une commande électrique.

Rayonnement électromagnétique : désigne une perturbation des champs électrique et magnétique.

## **S**

Surcharge : Intensité électrique supérieure à celle prévue par l'appareil ou par le circuit électrique. En général, il y a surcharge quand trop d'appareils sont branchés sur le même circuit. A la différence du court-circuit qui est une surintensité de forte valeur et de courte durée, la surcharge est une surintensité de faible valeur mais de longue durée.

# Table des matières

---

<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1.....</b>	<b>Interruption du courant électrique 2</b>
1.1	Définition de la fonction d'interruption ..... 2
1.2	Les différentes techniques d'interruption statique..... 3
1.3	L'interruption statique à base de semi-conducteurs ..... 3
<b>Chapitre 2.....</b>	<b>Interruption statique : structures de base 4</b>
2.1	Généralités ..... 4
2.2	L'isolation galvanique ..... 5
2.2.1	Circuit d'entrée pour la commande..... 5
2.2.2	Influence de la nature de la tension de commande (DC ou AC) ..... 5
2.3	La stratégie de commande ..... 6
2.3.1	Relais et contacteurs (AC) ..... 6
2.3.2	Disjoncteur ..... 7
2.4	L'interrupteur statique de puissance : structures..... 8
2.4.1	Quadrants de fonctionnement..... 9
2.4.2	Réseau d'alimentation électrique de type continu (DC) ..... 10
2.4.3	Réseau d'alimentation électrique de type alternatif (AC) ..... 10
<b>Chapitre 3.....</b>	<b>L'interruption statique : particularités 12</b>
3.1	Problèmes fondamentaux liés à l'interruption d'un courant ..... 12
3.2	Ecrêtage..... 13
3.2.1	Protection par diodes ..... 14
3.2.2	Protection par circuit RC..... 14
3.2.3	Protection par varistance ..... 14
3.2.4	Protection additive à la varistance..... 15
3.3	Limitation de la température de fonctionnement ..... 16
3.3.1	Nécessité d'un dissipateur thermique ..... 16
3.3.2	L'origine des pertes ..... 17
3.3.3	Dimensionnement ..... 17
3.4	Choix des composants ..... 18
3.4.1	Critères de choix ..... 18
3.4.2	Comparatif des différentes familles de semi-conducteur ..... 19
3.4.3	Dimensionnement : particularités pour le disjoncteur ..... 19
3.4.4	Choix du composant en fonction de l'application..... 21

<b>Chapitre 4.....</b>	<b>Synthèse et perspectives</b>	<b>22</b>
4.1	Synthèse.....	22
4.2	Evolutions.....	23
4.2.1	Nécessité d'évolution des interrupteurs de puissance .....	23
4.2.2	Solution palliative : l'interruption statique hybride.....	23
4.3	Perspectives.....	24
4.3.1	Quelques applications actuelles .....	24
4.3.2	Applications futures : protection des réseaux Supergrid .....	24
<b>Conclusion.....</b>		<b>25</b>

## Introduction

---

L'appareillage de technologie électromécanique est largement répandu dans le domaine de la distribution électrique.

Grâce à l'optimisation continue des matériaux utilisés ainsi qu'une meilleure compréhension et maîtrise des phénomènes internes et externes aux appareils, un certain niveau de maturité est atteint, permettant désormais de :

- Garantir un niveau de fiabilité et de performances satisfaisant
- Obtenir des coûts de revient à la fabrication « bon marché »

Cependant, leur durée de vie est compromise.

De part leur architecture, lors de chacune des manœuvres, correspondant à l'établissement ou l'interruption de courant, se développe un arc électrique énergétique entre les contacts, inhérent à cette technologie, et nécessaire [1], entraînant des dommages irréversibles tels qu'une érosion progressive des contacts, voire la soudure des contacts.

En parallèle, depuis les années 1955 environ [2], le marché des composants semi-conducteurs de puissance, principalement destinés à des fonctions d'interrupteurs, a connu une évolution spectaculaire.

Ainsi est née l'idée d'utiliser les interrupteurs statiques en guise d'appareillage électrique.

Aux premiers abords, l'idée paraît séduisante.

Ainsi, les contacts mécaniques et les problèmes liés au développement de l'arc électrique, problématiques majeures de l'électromécanique pourraient disparaître.

Aussi, de part les propriétés de l'interrupteur statique, de nouvelles performances et fonctionnalités peuvent voir le jour grâce :

- A la rapidité de commutation
- Une quantité théorique de commutations quasi illimitée
- Le choix d'instant précis de commutation pour les relais et contacteurs
- La commande électronique ouvrant de nombreuses possibilités

Parallèlement, de nouvelles contraintes liées à ces composants font leur apparition :

- Pertes à l'état passant, bloqué et en commutation
- Puissance dissipée limitée
- Choix des composants (tenue en tension et courant, rapidité de commutation)
- Fragilité aux surtensions

Pour aborder tous ces points évoqués, ce mémoire se présentera de la façon suivante :

Le premier chapitre effectuera une présentation succincte de l'interruption du courant électrique. Ensuite deux chapitres seront dédiés à l'état de l'art sur la technologie statique à base de semi-conducteurs, pour une utilisation en tant qu'appareillage électrique.

Enfin, le dernier chapitre synthétisera les différentes problématiques inhérentes à cette technologie et présentera les perspectives d'évolutions dans ce domaine.

# Chapitre 1. Interruption du courant électrique

## 1.1 Définition de la fonction d'interruption

Entre une source d'alimentation et un récepteur, se positionne l'appareillage électrique. Sa présence est indispensable.

Il est possible de synthétiser l'appareillage électrique selon trois familles :

- Les appareils de commande
- Les appareils de protection
- Les appareils de sectionnement

Les appareils de sectionnement ne possèdent aucun pouvoir d'interruption de courant.

Quant aux appareils de commande et de protection, ils ont pour fonctions principales de :

- Etablir ou interrompre la connexion entre la source et le récepteur
  - o Ce qui correspond à une fonction de commande
- (Limiter et) Interrompre le courant en cas de défaut (surcharge ou court-circuit)
  - o Ce qui correspond à une fonction de protection

**La fonction d'interruption** est donc assurée par **l'appareillage électrique**, qu'il soit destiné à la **commande**, la **protection**, ou bien encore les **deux simultanément**.

Ci-dessous une représentation schématique sur deux niveaux des appareils d'interruption.

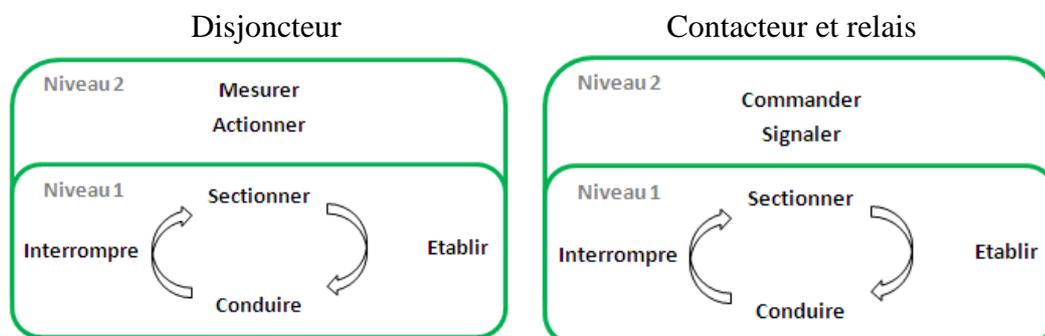


Figure 1 - Représentation schématique des deux niveaux d'un appareil d'interruption

Le niveau 1 constitue le cœur de l'appareil :

Ce niveau définit les fonctions principales ainsi que les performances et exigences.

Le niveau 2 rassemble les fonctions permettant au niveau 1 de fonctionner lorsque cela est nécessaire :

- Surcharge ou court-circuit dans le cas du disjoncteur
- Ordre de commande (télécommande ou manuel) dans le cas du relais et du contacteur

L'appareillage électrique peut-être basé sur l'un des deux principes technologique suivants :

- Le dynamique basé sur de l'électromécanique
- Le statique

La technologie statique est celle sur laquelle cette étude va porter.

Il existe différentes familles au sein même de celle-ci

## 1.2 Les différentes familles d'interruption statique

La technologie statique fait référence au fait que le dispositif ne comporte aucune pièce interne en mouvement pour assurer la fonction d'interruption du courant électrique.

Il est possible de citer pour exemple différentes familles :

- le fusible [1]
  - ⇒ Ce dispositif nécessite son remplacement après chaque utilisation
  - ⇒ N'autorise pas l'établissement de courant d'un circuit
- la résistance à coefficient de température positif [3]
- le limiteur supraconducteur de courant [4] [5].

Une autre famille de la technologie **statique**, est le **semi-conducteur**.

## 1.3 L'interruption statique à base de semi-conducteurs

Le rôle d'un interrupteur de puissance est d'autoriser ou de stopper le passage du courant.

Il présente deux états statiques, bloqué ou passant, et remplit les fonctions suivantes :

- A l'état bloqué :

S'oppose à tout passage de courant (faible courant de fuite constaté, du  $\mu\text{A}$  au mA)

Supporte la tension (et surtensions) appliquée à ses bornes

L'analogie est un interrupteur mécanique en position ouverte

Attention, un composant de puissance à l'état bloqué ne constitue en aucun cas une isolation galvanique [6].

- A l'état passant :

Conduit un courant (de quelques A à plusieurs kA).

Possède une faible chute de tension à ses bornes (quelques volts)

L'analogie est un interrupteur mécanique en position fermée.

Le concept, simpliste de base, consiste à remplacer l'interrupteur mécanique de puissance de l'appareillage électrique par un interrupteur statique commandé.

Cependant, l'étude démontrera que le remplacement de cet interrupteur n'est pas aussi simple que cela ne le paraît.

L'interrupteur statique est un élément fragile nécessitant des dispositions particulières.

On notera, sans être exhaustif, en guise d'exemples :

- sa sensibilité à la température de fonctionnement et ses pertes par puissance dissipée
- Sa sensibilité aux grandeurs électriques (surtension, variation brusque de tension  $dv/dt$  et de courant  $di/dt$ , courant de surcharge ou de court-circuit etc...)
- La nécessité d'un circuit de commande

Mais attention à ne pas se méprendre, il peut offrir de nombreux avantages que l'électromécanique ne peut atteindre aujourd'hui.

## Chapitre 2. Interruption statique : structures de base

### 2.1 Généralités

Il est possible de décomposer l'architecture de base d'un appareil d'interruption statique selon quatre parties principales (numérotées ci-dessous de 1 à 4).

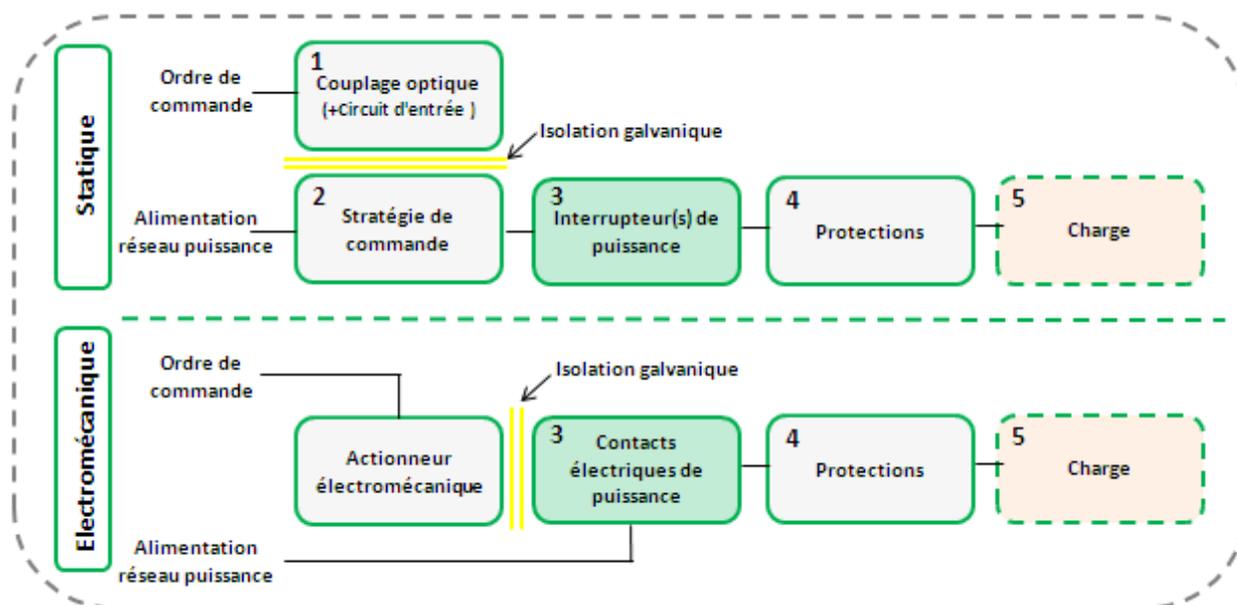


Figure 2 – Comparaison d'une architecture statique vs électromécanique : appareil de commande

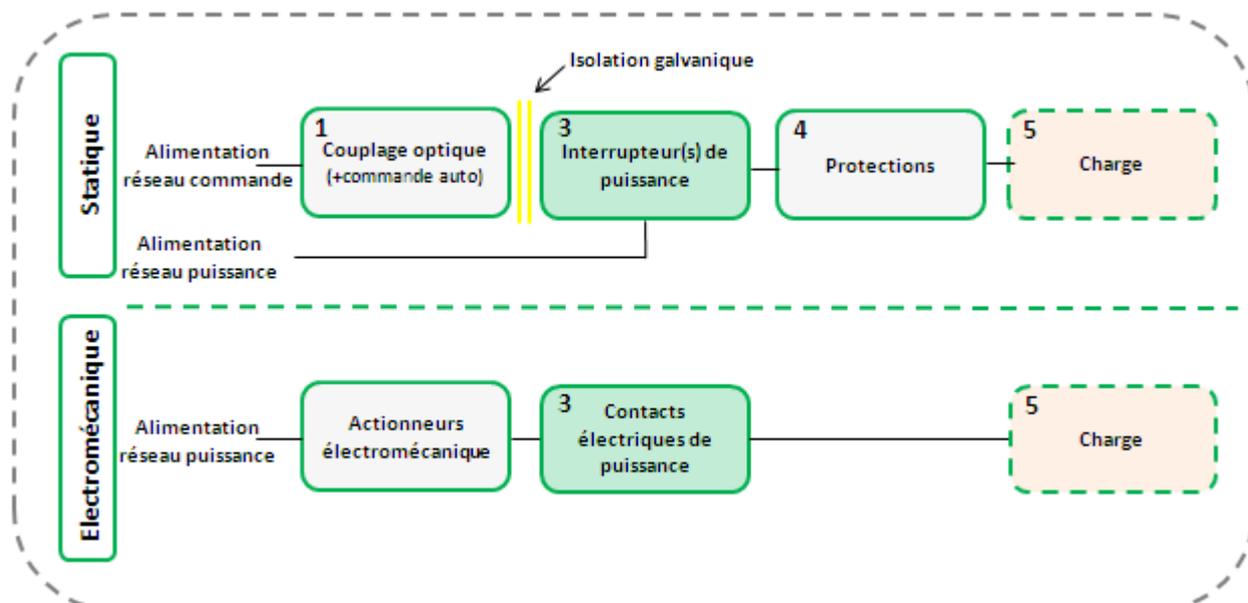


Figure 3 – Comparaison d'une architecture statique vs électromécanique : appareil de protection

Chacune de ces quatre parties seront développées dans les sous-parties suivantes.

## 2.2 L'isolation galvanique

Selon la figure 2 et la figure 3, la première partie de l'architecture de base d'un appareil d'interruption statique est la fonction d'isolation galvanique.

Elle permet d'assurer qu'aucune liaison par conducteur électrique (fil électrique, châssis métallique ou autre) ne peut se faire entre le circuit de commande et le circuit de puissance.

Elle peut-être effectuée de différentes manières.

Pour une conception d'appareil statique, afin d'assurer la fonction d'isolation galvanique, il est préférable d'opter pour une commande optique dénommée optocoupleur ou encore photocoupleur. [7]

C'est un flux lumineux qui assure la transmission d'information entre les deux circuits.

### 2.2.1 Circuit d'entrée pour la commande

On notera que le disjoncteur électromécanique ne possède pas de commande externe à proprement dit (et donc pas d'isolation galvanique).

L'ordre d'ouverture des contacts est donné par les actionneurs électromécaniques de surcharge (bilame) ou de court-circuit (bobine magnétique à noyau plongeur) tous deux placés en série de la chaîne de conduction et ne nécessitant aucune alimentation externe [8].

Cependant, en faisant recours à la technologie statique, ces actionneurs ne seront plus présents. Ils seront remplacés par un circuit dit intelligent, qui surveillera en permanence le circuit d'alimentation de la charge sur lequel le disjoncteur est installé, et en fonction de la stratégie utilisée (seuil de courant, durée de la surcharge ou du court-circuit), une commande sera générée pour donner l'ordre au circuit de puissance d'interrompre le circuit.

### 2.2.2 Influence de la nature de la tension de commande (DC ou AC)

En fonction du type de tension de commande d'entrée, DC ou AC, le circuit est différent :

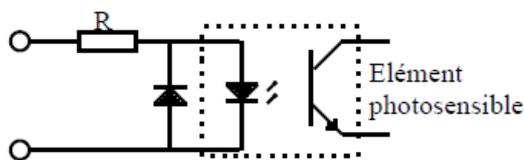


Figure 4 – Circuit d'entrée pour commande DC  
(Source : CELDUC Relais)

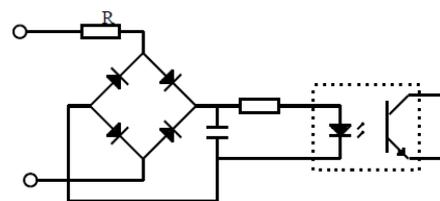


Figure 5 – Circuit d'entrée pour commande AC  
(Source : CELDUC Relais)

Pour une commande en tension DC, le nombre de composants est faible (figure 4).

La diode électroluminescente (LED) est alimentée lors de l'application d'une tension de commande, qui génère un courant, limité par la résistance R, proportionnel à la tension d'entrée.

Un flux lumineux est alors émis et le photorécepteur réceptionne l'information.

La diode en anti-parallèle de la LED protège celle-ci d'une erreur de polarité par l'utilisateur.

Pour une commande en tension AC, des composants supplémentaires sont nécessaires (figure 3).

Un pont redresseur ainsi qu'un filtre permettent de transformer le signal AC en DC.

Ainsi le fonctionnement de l'optocoupleur reste inchangé.

## 2.3 La stratégie de commande

Selon qu'il s'agisse d'un appareil de commande ou de protection, la stratégie de commande sera complètement différente.

On notera que grâce à l'électronique, il est possible d'intégrer des fonctions intelligentes non réalisables aujourd'hui avec une technologie électromécanique.

On prendra pour exemples :

- La reconnaissance de la nature et du type de la charge autorisant :
  - o un auto-calibrage du dispositif pour protéger efficacement la charge
  - o un établissement du circuit au moment opportun afin d'éviter les appels de courant et la dégradation de la charge
- La communication suivi un mode communication au choix pouvant permettre de:
  - o Visualiser l'état du disjoncteur (ouvert, fermé, en défaut)
  - o Visualiser les grandeurs électrotechniques d'alimentation de la charge
  - o Commander à distance

Et il est bien encore possible d'en imaginer d'autres...

### 2.3.1 Relais et contacteurs (AC)

Dans le cas des contacteurs et relais, en fonction de la nature de la charge, une stratégie de commande peut-être appliquée.

En effet, il est possible d'établir ou d'interrompre le circuit, suite à un ordre de commande, selon le niveau de tension du réseau, afin d'éviter certains désagréments explicités ci-dessous.

Cette stratégie ne peut fonctionner que sur des charges alimentées par un réseau AC.

#### 2.3.1.1 Etablissement et interruption au zéro de tension

Pour les charges ayant un facteur de puissance  $\cos\phi$  (déphasage courant/tension) compris entre  $1 < \cos\phi < 0,7$ , c'est-à-dire des charges plutôt de nature résistive, il est préférable d'établir ou d'interrompre le circuit à l'instant où la tension passe par zéro.

Du fait du quasi synchronisme de la tension et du courant dans ce cas, il ne se produit quasi aucun appel de courant.

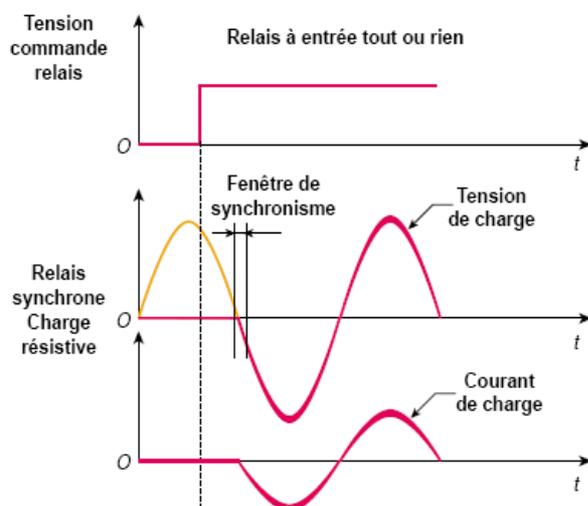


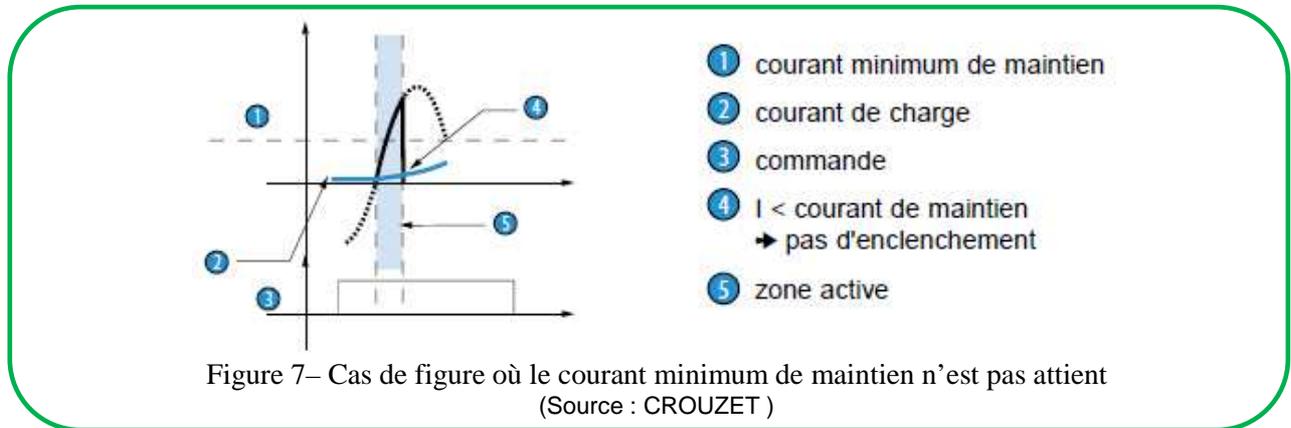
Figure 6 – Etablissement du circuit au zéro de tension

(Source : TENDANCE )

Ainsi, les dispositifs de commande et de protections seront ménagés, la durée de vie des charges augmentées, telles que les lampes tungstènes.

Un autre avantage de ce type de commande est la limitation du rayonnement électromagnétique.

Attention, utiliser la stratégie de commande au zéro de tension peut entraîner des dysfonctionnements lorsque le facteur de puissance  $\cos\phi$  est très inférieur à 0,7. Ceci s'explique par le fait que le courant dans la charge peut ne peut pas atteindre suffisamment rapidement la valeur minimum de maintien nécessaire au type d'interrupteur statique utilisés dans les relais et contacteurs (TRIAC ou Thyristors) que nous évoquerons dans la sous-partie 2.4.



### 2.3.1.2 Etablissement et interruption instantanés

La commutation du circuit s'effectue en quasi simultanéité de la commande, au retard près dû à la durée de commutation de l'interrupteur statique de puissance.

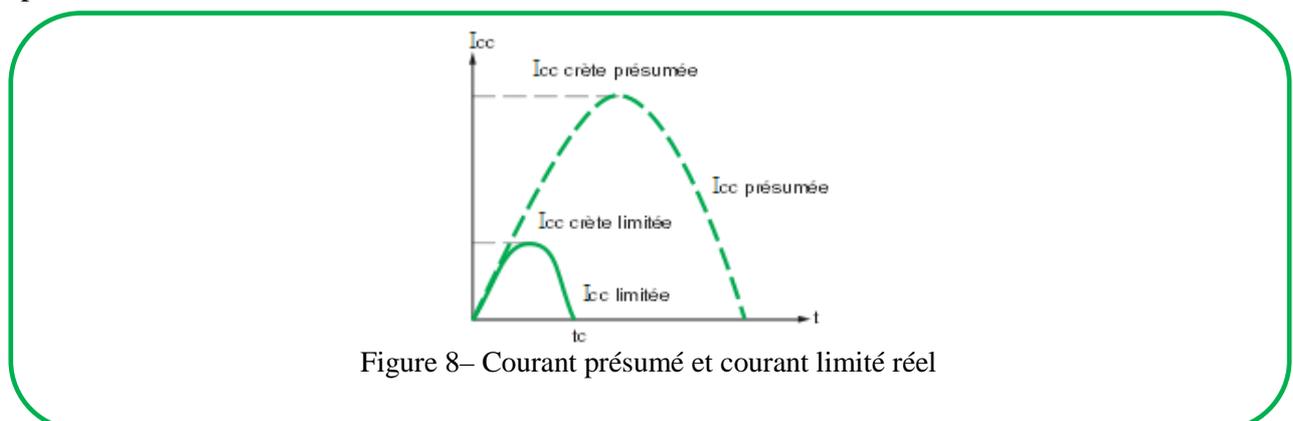
### 2.3.1.3 Etablissement et interruption à la crête de tension

La commutation du circuit s'effectue à la crête de tension du réseau. Cette stratégie est destinée à la commande des charges de type transformateur. De cette manière on évite les pointes importantes de courants magnétisants et la saturation du transformateur.

## 2.3.2 Disjoncteur

Dans le cas du disjoncteur, la stratégie consiste plutôt à mesurer et surveiller la valeur du courant de circuit de puissance, et donner l'ordre d'**interrompre le circuit de façon instantanée** lorsque cela est nécessaire (surcharge ou court-circuit).

En effet, le disjoncteur est un limiteur de courant, c'est-à-dire qu'il doit agir le plus tôt possible de façon à interrompre le circuit avant que le courant-circuit ne puisse atteindre sa valeur présumée.



(Source : CROUZET )

## 2.4 L'interrupteur statique de puissance : structures

L'interrupteur statique (commandé) est le cœur de l'appareil, la pièce maîtresse.

Ces composants interrupteurs peuvent être séparés en deux familles [2] :

- **Les interrupteurs naturels**
  - ⇒ diodes de puissance, TRANSIL, TRISL, etc...

Ils commutent de l'état ON/OFF ou OFF/ON sans aucune commande extérieur.

- **Les interrupteurs commandés**
  - Uniquement à la fermeture
  - ⇒ TRIAC et Thyristors
  - A la fermeture et à l'ouverture
  - ⇒ Transistors bipolaires, MOSFET, IGBT, GTO, IGCT, etc...

En ce qui concerne cette étude, seuls les interrupteurs commandés seront étudiés, condition nécessaire pour donner un ordre de fermeture ou d'ouverture du circuit de puissance.

Le choix de la structure du ou des interrupteurs se définit suivant plusieurs critères :

- le type d'interruption recherché (instantané, zéro de tension, crête de tension)
- la nature du réseau d'alimentation (continue ou alternative, de courant ou de tension)
- l'application désirée (charge réversible ou non, quadrants de fonctionnement)

On notera que les structures électriques des interrupteurs statiques ne dépendent pratiquement pas du composant utilisé.

Elles sont imposées par la nature du réseau électrique (AC ou DC).

Ci-dessous, une figure démontrant les caractéristiques nécessaires à l'interrupteur de puissance en fonction de la nature de la tension et du courant le traversant.

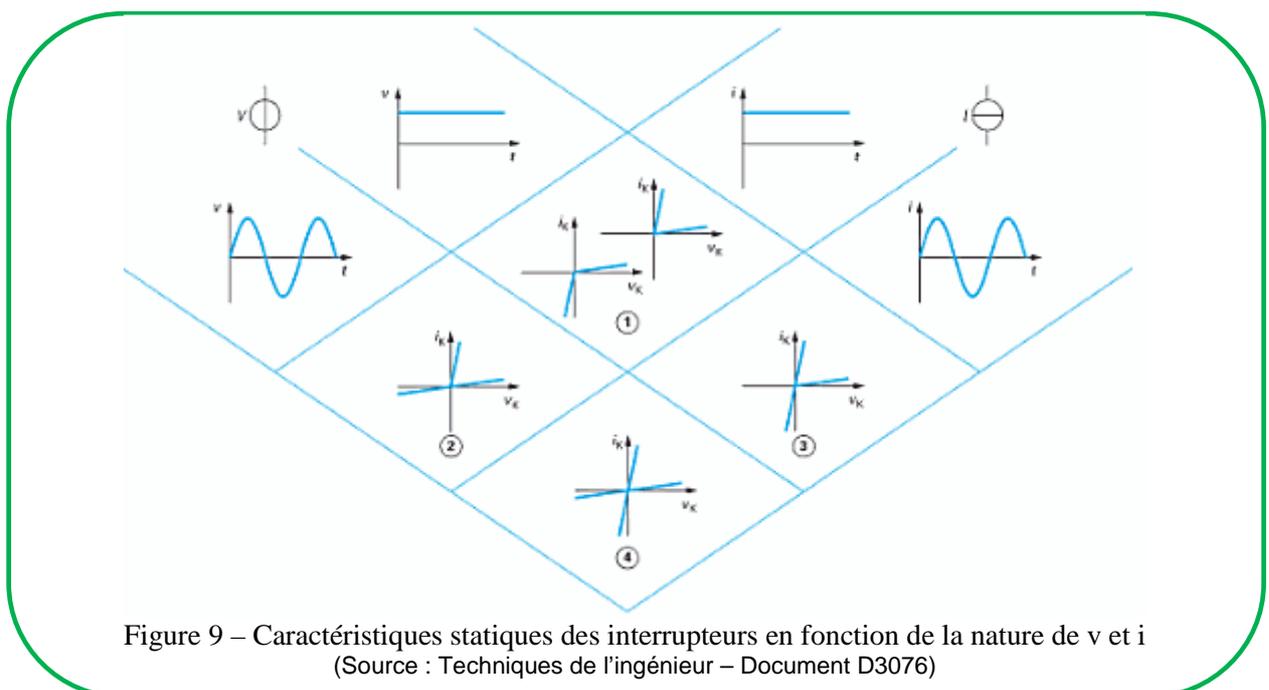


Figure 9 – Caractéristiques statiques des interrupteurs en fonction de la nature de  $v$  et  $i$   
(Source : Techniques de l'ingénieur – Document D3076)

### 2.4.1 Quadrants de fonctionnement

Le type d'interruption permet de définir le type de commande de l'interrupteur.

La nature du réseau et l'application désirée permettent de définir les quadrants de fonctionnement dans lesquels l'interrupteur doit fonctionner.

Définition des quadrants de fonctionnement des interrupteurs de puissance existants :

- Unidirectionnel en courant et en tension

L'interrupteur peut conduire le courant et supporter de la tension que dans un sens.

- Bidirectionnel en courant et unidirectionnel en tension

L'interrupteur peut conduire le courant dans les deux sens et supporter de la tension que dans un sens (Tableau 2)

- Unidirectionnel en courant et bidirectionnel en tension

L'interrupteur peut conduire le courant dans un sens uniquement et supporter de la tension dans les deux sens

- Bidirectionnel en courant et bidirectionnel en tension

L'interrupteur peut conduire le courant et supporter une tension dans les deux sens.

**Dans ce cas de figure, il n'existe pas de composant pouvant être commandé à l'ouverture et à la fermeture.** Il sera alors nécessaire d'assembler plusieurs composants de caractéristiques différentes pour obtenir un fonctionnement selon les quatre quadrants.

Tableau I : Elements semi-conducteurs commandés à la fermeture  
(Source : Thèse Jean-Marc MEYER, 2000)

No	Désignation	Symbole	Caractéristique	
			idéale	réelle
1	Thyristor (SCR)			
2	Triac			

Tableau II : Elements semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture  
(Source : Thèse Jean-Marc MEYER, 2000)

No	Désignation	Symbole	Caractéristique	
			idéale	réelle
1	Bipolaire (BJT)			
2	MOSFET			
3	IGBT			
4	GTO/IGCT			

## 2.4.2 Réseau d'alimentation électrique de type continu (DC)

L'interrupteur statique sera obligatoirement un composant pouvant être commandé à l'ouverture et à la fermeture de part le non passage naturel par zéro du courant.

Ainsi, on notera que la structure électrique de l'interrupteur sera identique pour un appareil de type relais/contacteur ou de type disjoncteur : dans les deux cas il faut interrompre le courant instantanément.

De part une interruption instantanée, donc une commutation commandée.

L'interrupteur sera de type Transistor bipolaire, MOSFET, IGBT, GTO, IGCT etc...

L'aide au choix de ces composants sera décrite au chapitre 3.

## 2.4.3 Réseau d'alimentation électrique de type alternatif (AC)

On notera qu'une alimentation électrique de type AC impose obligatoirement des composants semi-conducteurs **bi-directionnels en courant et en tension**.

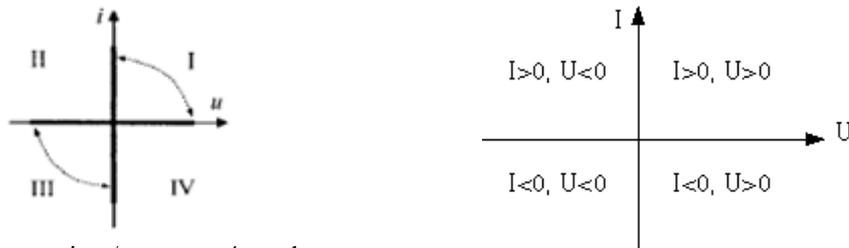


Figure 10 – Axes tension / courant : 4 quadrants  
(Source : Thèse Jean-Marc MEYER, 2000)

Selon le choix du type d'interruption, l'interrupteur pourra être :

- Uniquement commandé à fermeture  
⇒ interruption au zéro de courant
- Commandé à la fermeture et à l'ouverture dans le cas d'une interruption instantanée.

### 2.4.3.1 Interruption au zéro de courant

Le courant dans le circuit sera interrompu après l'arrêt de la commande du composant et du passage par zéro du courant.

L'appareil n'effectue pas le rôle de limiteur de courant.

Le courant maximal est uniquement limité par les impédances du circuit d'alimentation.

Ce type d'interruption est celui des relais et contacteurs.

Les composants semi-conducteurs utilisés sont des thyristors montés tête-bêche ou des TRIACS.



Figure 11 – TRIAC

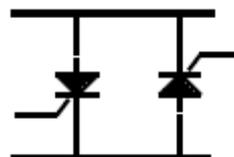


Figure 12 – Thyristors tête-bêche

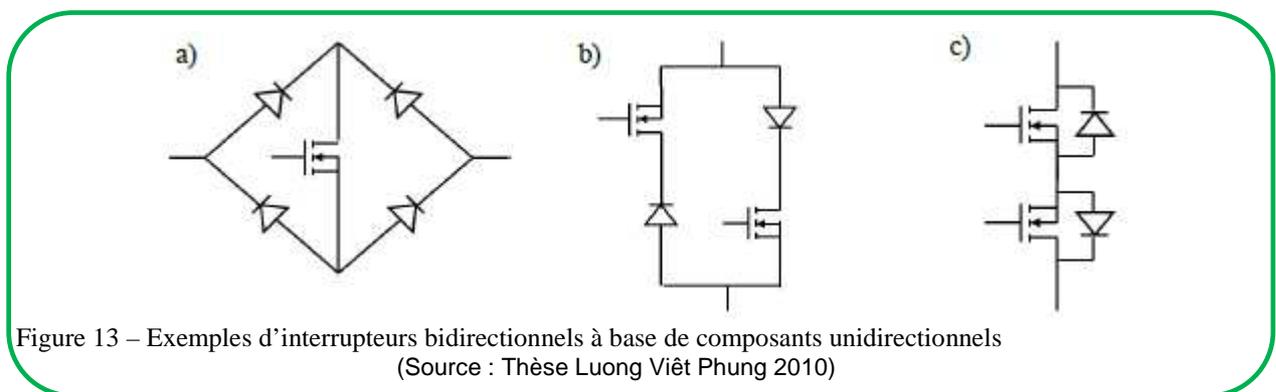
### 2.4.3.2 Interruption instantanée

L'interruption du courant dans le circuit s'effectuera dès l'application d'un ordre d'ouverture. Dans ce cas l'appareil joue un rôle de limiteur de courant (figure 8).

L'interrupteur sélectionné pourra être commandé à la fermeture et à l'ouverture. Pour rappel, du fait de l'alimentation via un réseau de type alternatif (AC), le composant devra être bidirectionnel en courant et bidirectionnel en tension.

Or il n'existe pas de composant monolithique le permettant. Une association de plusieurs composants existants est alors nécessaire.

Ci-dessous un exemple de différentes solutions :



Le principe de la figure 13a) consiste à utiliser un pont de diodes (pont de Graetz), dans lequel est inséré l'interrupteur statique, qui de ce fait, ne perçoit qu'une tension et un courant continu (continu ne veut pas dire constant).

Cette structure permet un montage économique : un seul interrupteur commandé est utilisé.

Cependant, on notera en inconvénient une puissance dissipée élevée (2W/A [9]).

Cette solution devra être réservée aux très faibles courants, ou nécessitera des dissipateurs thermiques de taille relativement conséquente.

L'idée du schéma 13b) est de connecter deux interrupteurs en anti-parallèle, ainsi que d'associer une diode en série de chacun des interrupteurs pour bloquer la tension inverse.

En comparatif à la solution précédente, 13a) une diode de moins est utilisée, ce qui permet d'abaisser les pertes par puissance dissipée.

On notera que dans les cas d'une utilisation d'interrupteurs bidirectionnels en tension (GTO symétriques par exemple), alors les diodes peuvent être supprimées.

L'inconvénient majeur réside dans le fait que la commande des interrupteurs n'est pas référencée au même potentiel, ce qui complexifie la commande.

De plus, deux composants commandés sont utilisés, ce qui rend cette solution onéreuse.

La solution de la figure 13c) référence deux interrupteurs commandés en anti-série.

La commande est donc simplifiée vis-à-vis de la solution 13b) car un seul circuit peut-être utilisé pour commander les deux interrupteurs.

On notera que les diodes représentées sur la figure 13c) sont des diodes « parasites » inhérentes à la structure interne des composants MOSFET et IGBT.

Attention, cette solution ne convient pas aux interrupteurs de type IGBT, sous peine de destruction du composant, lié au fait que leur diode parasite inverse est de type avalanche.

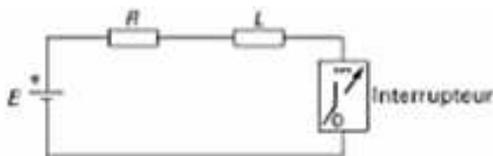
## Chapitre 3. L'interruption statique : particularités

### 3.1 Problèmes fondamentaux liés à l'interruption d'un courant

Que ce soit un réseau de type DC ou AC, l'interruption **instantanée** du courant dans un circuit inductif provoque deux phénomènes :

- une énergie d'interruption dissipée sous effet Joules par l'interrupteur
- une surtension, force électromotrice développée par l'inductance, aux bornes de l'interrupteur

Prenons l'exemple de l'interruption d'un courant continu :



La loi d'Ohm régissant ce circuit s'écrit :

$$E - RI - L \frac{dI}{dt} - rI = 0$$

Figure 14 – Circuit inductif alimenté en courant continu  
(Source : Techniques de l'ingénieur – D4700)

Pour réaliser l'interruption du courant parcourant ce circuit, il faut et il suffit que la résistance interne  $r$  de l'interrupteur, supposée initialement nulle, croisse et devienne infinie.

C'est la condition unique pour que l'appareil puisse interrompre le circuit de courant.

L'énergie d'interruption dissipée dans l'interrupteur vaut :

$$\int_0^T r \cdot i^2 = \int_0^T [E - RI] I dt - \int_{I_{\text{initial}}}^0 L I dI$$

La première intégrale est dépendante de  $T$  correspondant à la durée de l'interruption.

La deuxième intégrale présente l'énergie électromagnétique emmagasinée dans le circuit.

$$- \int_{I_{\text{initial}}}^0 L I dI = \frac{1}{2} L I^2$$

Ceci démontre que même en considérant l'interruption infiniment rapide, donc  $T$  quasi nul, **l'interrupteur doit absorber au minimum** la dissipation d'une énergie égale à l'énergie électromagnétique contenue initialement dans l'inductance du circuit.

C'est un critère minimal d'un bon fonctionnement.

Cependant, ce critère n'est pas le seul.

Si on considère, comme ci-dessus, une variation de résistance infiniment rapide (pour que  $T$  soit quasi nul), alors la variation du courant l'est également.

En conséquence, la force électromotrice induite ( $L di/dt$ ) dans l'inductance propre du circuit devient infiniment grande.

Cette surtension illimitée aux bornes de l'inductance, et par conséquent, aux bornes de l'interrupteur est évidemment inacceptable.

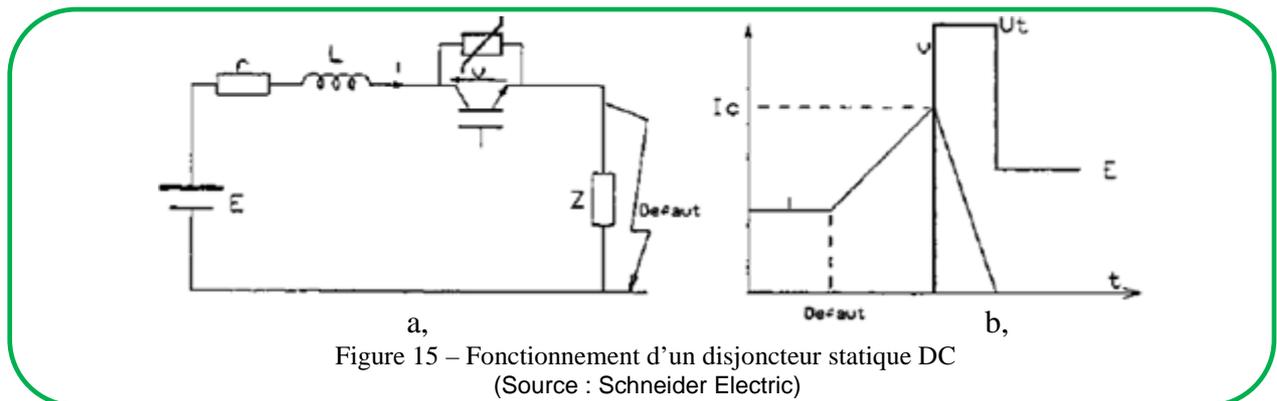
### 3.2 Ecrêtage

Dans un disjoncteur électromécanique, l'arc électrique est indispensable pour générer la force contre électromotrice s'opposant à la croissance du courant, la chambre de coupure pour l'absorption de l'énergie d'interruption.

Dans le cas de l'interruption statique instantanée, les mêmes composants assureront cette double fonction : l'écrtage.

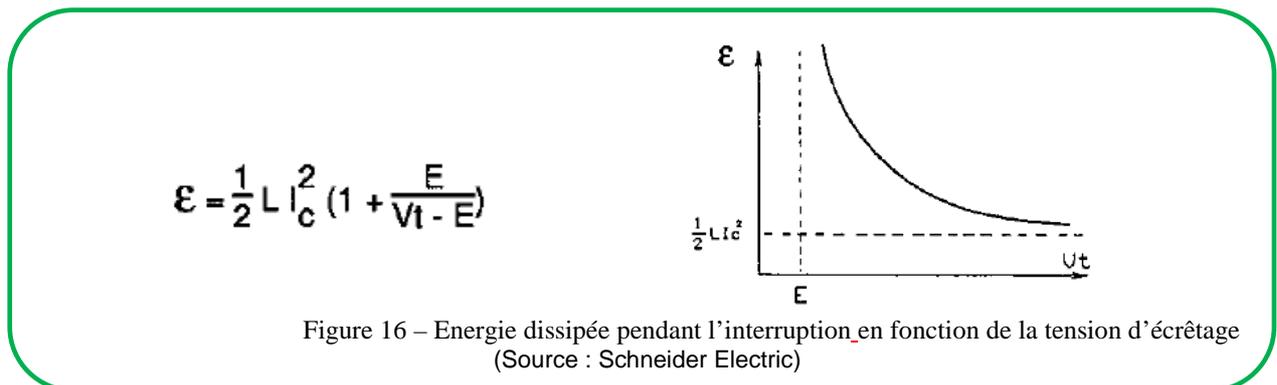
En fonction de la nature des composants, passifs ou actifs, l'écrtage en sera appelé de même.

En exemple, un circuit continu de tension  $E$ , débitant dans une charge  $Z$  à travers un disjoncteur statique (Fig 15-a).



Quand un court-circuit se produit, le courant dans le disjoncteur augmente jusqu'à la valeur de déclenchement où l'interrupteur est commandé pour ouvrir le circuit. Le courant dans le réseau est alors dévié dans la varistance, ce qui impose une tension supérieure à celle du réseau, forçant ainsi le courant vers 0 (Fig.15-b).

Si on néglige la résistance  $r$  du réseau, l'énergie dissipée dans l'écrtateur pendant l'interruption peut s'exprimer par :



On constate que cette énergie, qui dépend de la tension d'écrtage  $V_t$  (Fig.7), est toujours supérieure à celle stockée dans l'inductance du circuit.

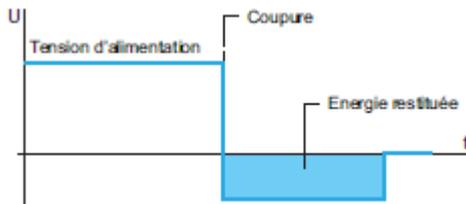
Un **compromis** est à faire dans le choix de la tension d'écrtage :

- D'un côté, au plus la tension est élevée, plus l'énergie à absorber est faible et le temps de d'interruption est court.
- De l'autre côté, une tension aux bornes de l'interrupteur ( $V_t$ ) trop élevée entraîne l'utilisation d'un interrupteur à forte tenue en tension, donc un coût élevé.

Les trois solutions généralement retenues sont les suivantes.

### 3.2.1 Protection par diodes

Combinaison d'une Diode Roue libre en série d'une diode TRANSIL



Avantage(s) :

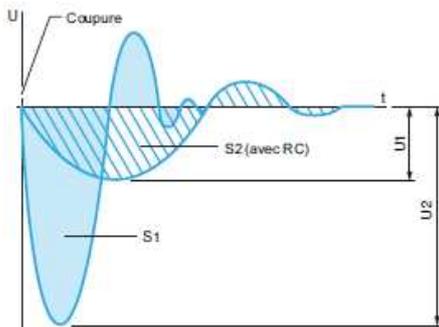
- Absence de surtension

Inconvénient(s) :

- Puissance dissipée admissible faible
- Unidirectionnel

Figure 17 – Ecrêtage : protection par diodes  
(Source : Schneider Electric – Catalogue relais Zélio – 2009)

### 3.2.2 Protection par circuit RC



Avantage(s) :

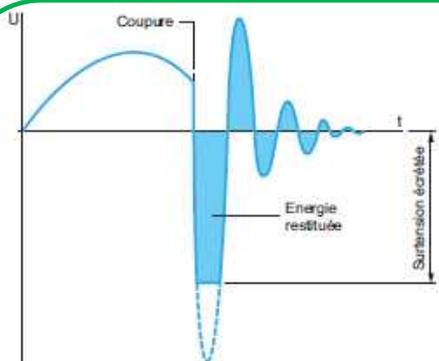
- Ecrêtage de la surtension à  $3 \cdot U_n$
- Diminution de la fréquence oscillatoire (AC)

Inconvénient(s) :

- Aucune protection pour les faibles surtensions
- Uniquement pour circuits AC

Figure 18 – Ecrêtage : protection par circuit RC  
(Source : Schneider Electric – Catalogue relais Zélio – 2009)

### 3.2.3 Protection par varistance



Avantage(s) :

- Ecrêtage de la surtension à  $\sim 2 \cdot U_n$
- Compatible pour circuits AC et DC

Inconvénient(s) :

- Aucune limitation de la fréquence oscillatoire

Figure 19 – Ecrêtage : protection par varistance  
(Source : Schneider Electric – Catalogue relais Zélio – 2009)

La varistance (ou autrement appelée MOV pour Metal Oxyde Varistance) est le composant le plus apte en terme de ratio avantages/inconvénients à être utilisé.

Cette varistance est installée en parallèle de l'interrupteur.

### 3.2.4 Protection additive à la varistance

Cependant, dans le cas pratique, il existe encore, dû aux inductances parasites entre l'inductance du circuit et la varistance, un pic de surtension qui s'ajoute à la tension d'écrêtage.

Cette surtension, proportionnelle à l'inductance entre l'interrupteur et l'écrêteur, et à la variation du courant ( $\Delta V = L di/dt$ ), est très brève, mais suffisamment longue pour détruire le composant semi-conducteur.

Plusieurs précautions sont à prendre :

- bien soigner le câblage pour diminuer les inductances parasites.
- réduire volontairement la rapidité du composant à l'ouverture au prix d'une augmentation des pertes dans l'interrupteur pendant la coupure.
- ajouter un condensateur (ou un circuit RCD) qui peut filtrer efficacement le pic de surtension.

Malgré toutes ces précautions, il est prudent de choisir des composants ayant une tenue en tension 3 fois supérieure à la tension du réseau.

Cette surtension est souvent le principal facteur de limitation dans la réalisation des disjoncteurs statiques à fort courant.

### 3.3 Limitation de la température de fonctionnement

La dissipation thermique est le problème technique le plus contraignant de l'interruption statique.

#### 3.3.1 Nécessité d'un dissipateur thermique

La plupart des composants semi-conducteurs actuels sont réalisés en **silicium**.

Si l'on ne veut pas que les composants subissent des dommages irréversibles, il est essentiel que la température de fonctionnement ne dépasse pas une valeur maximum, déclarée par le constructeur, directement liée aux caractéristiques physiques générales intrinsèques du composant au silicium.

Ainsi, à partir d'une certaine puissance, variable en fonction du type d'interrupteur et de son environnement, il est nécessaire de refroidir le semi-conducteur.

Pour cela, on utilise un dissipateur thermique ou plus communément appelé radiateur thermique. Pour donner un ordre de grandeur, en ce qui concerne les relais statiques, on estime à environ 5A efficaces le seuil à partir duquel le radiateur est indispensable.

On notera également qu'au-delà du respect de la température maximum admissible du composant, sa température de fonctionnement a directement un impact sur ses performances nominales.

Pour exemple, ci-dessous, les données caractéristiques du constructeur INFINEON pour un MOSFET.

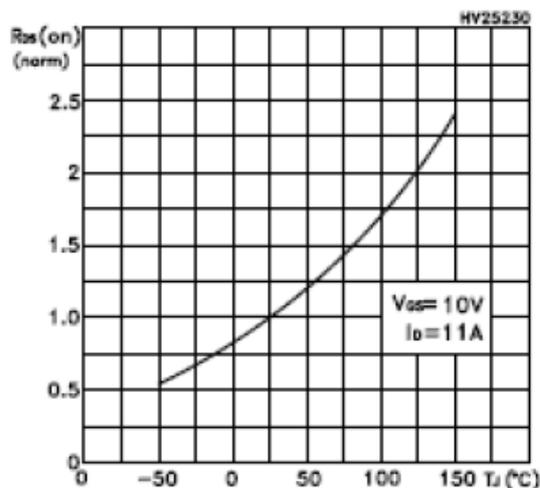


Figure 20 – MOSFET : Evolution de la résistance  $R_{DSon}$  en fonction de la température de jonction  
(Source : Jean-Paul Ferrieux)

Nous pouvons remarquer sur cet exemple de caractéristique que la résistance  $R_{DSon}$  augmente d'un facteur 2 entre 25°C et 125°C.

Les pertes, à l'état passant du semi-conducteur, par puissance dissipée, sont directement proportionnelles à la valeur de la résistance  $R_{DSon}$ .

Dans le cas du MOSFET :

$$P_{cond} = R_{DSon} * I_{eff}^2$$

D'où la seconde importance de bien refroidir les composants semi-conducteur.

### 3.3.2 L'origine des pertes

La puissance dissipée d'un composant est relative à 3 différentes familles de pertes :

- Les pertes à l'état passant
- Les pertes en commutation
- Les pertes à l'état bloqué

Les pertes à l'état bloqué sont souvent négligeables (hormis certaines applications très spécifiques où la température de fonctionnement est élevée).

Cependant on notera la particularité suivante :

Le semi-conducteur est inapte à bloquer totalement le passage du courant à l'état bloqué.

Il subsiste un courant de fuite.

Par conséquent, sans dispositif mécanique complémentaire, l'appareil statique ne peut être apte au sectionnement.

En ce qui concerne les pertes en commutation, celles-ci ne sont applicables que pour les appareils de commande, pouvant effectuer des cycles d'interruption soutenus.

Il peut alors être utilisé des circuits d'aide à la commutation (CALC)

Pour l'appareil de protection, le disjoncteur, les pertes en commutations ne seront pas prises en considération pour sa conception.

En effet, l'interruption dure au maximum quelques millisecondes, temps à la limite de la constante de temps thermique des composants semi-conducteurs qui est comprise entre 0,1seconde et 1 seconde.

Enfin, les pertes à l'état passant sont bien sûr à prendre en compte, quelque soit le type d'appareil.

Quelques soient les interrupteurs statiques commandés utilisés, ils possèdent, dans leur état passant, une chute de tension résiduelle à leurs bornes non nulle alors que la densité de courant qui les traverse peut être importante. [10]

Leur dissipation de puissance électrique sous forme de chaleur à l'état passant est souvent loin d'être négligeable.

Pour un même type de composant, cette chute de tension est d'autant plus importante que la tenue en tension est élevée.

### 3.3.3 Dimensionnement

En ce qui concerne les pertes en commutation, elles ne seront pas prises en compte dans le cas de la conception d'un disjoncteur statique.

En effet, le disjoncteur n'est pas conçu pour effectuer des commutations à une cadence soutenue.

De plus, l'interruption ne dure au plus quelques millisecondes, temps à la limite de la constante de temps thermique des composants semi-conducteurs comprise entre 0,1seconde et 1 seconde.

Si l'appareillage statique doit laisser passer un courant de surcharge pendant quelques secondes, c'est ce régime de surcharge que doit être considéré le fonctionnement permanent pour le dimensionnement du refroidisseur.

## 3.4 Choix des composants

### 3.4.1 Critères de choix

L'exigence sur les caractéristiques des composants n'est pas la même que l'on conçoit un appareil statique de commande ou de protection.

Dans le cas d'un appareil de protection statique, le disjoncteur, les critères de choix ne seront pas focalisés sur les pertes par commutation, le nombre de commutations étant très faible et espacées dans ce cas de figure.

Ci-dessous un tableau synthétique répertoriant les caractéristiques recherchées des composants en fonction du type d'appareillage : commande ou protection

<i>Commande</i>	<i>Protection</i>
Pertes par commutation faibles	
Composant commandé à la fermeture	Composant commandé à la fermeture et à l'ouverture
	Tenue en tension élevée (Permet d'augmenter la tension d'écrêtage : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminution de l'énergie de coupure</li> <li>• Diminution de la taille de la varistance)</li> </ul>
	Aptitude à accepter des courants transitoires <ul style="list-style-type: none"> <li>• Courant de court-circuit (Attente du seuil de déclenchement requis)</li> </ul>
Chute de tension la plus faible possible Pour diminuer les pertes par conduction => réduction du volume du dissipateur thermique	
Courant de fuite le plus faible possible Pour autoriser la mise en parallèle d'un nombre plus important de composants	
Commande simple et aisée (et peu coûteuse)	
Coût faible	

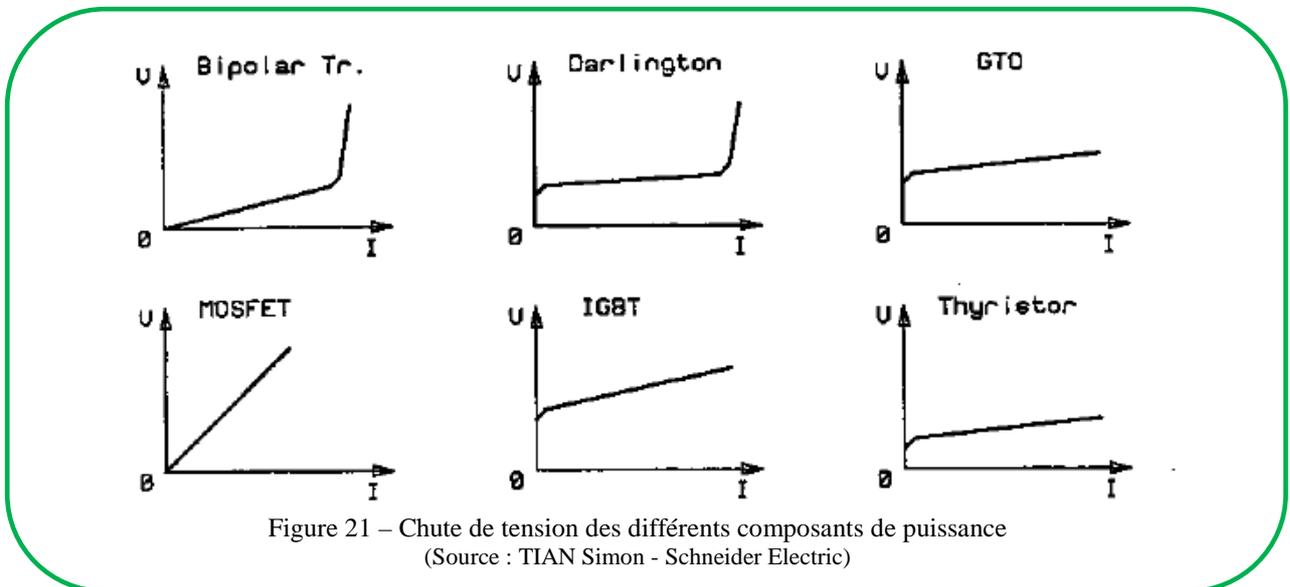
Il faut garder en mémoire que le dimensionnement du courant nominal du composant correspond au courant de surcharge auquel le disjoncteur fait référence et qu'il doit conduire en permanence.

Ensuite, il convient de comparer les différents types de composants existants sur le marché afin de choisir le plus apte à répondre aux caractéristiques recherchées.

### 3.4.2 Comparatif des différentes familles de semi-conducteur

Le premier critère comparatif des composants de puissance est l'évolution de la chute de tension en fonction du courant à l'état passant.

Ci-dessous, la figure 21 illustre ces caractéristiques :



Les transistors bipolaires et MOSFET ont un comportement résistif à l'état passant. De ce fait, pour des faibles valeurs de courant, ceux-ci permettent une faible chute de tension.

Pour les autres transistors, la chute de tension se présente sous la forme  $V = V_0 + rI$ . De ce fait, même pour un courant faible d'utilisation, ils possèdent une chute de tension plus importante, et ne peut être réduite indéfiniment par leur mise en parallèle.

### 3.4.3 Dimensionnement : particularités pour le disjoncteur

La particularité d'un disjoncteur est qu'il doit laisser passer en permanence un courant correspond à son calibre nominal, mais aussi :

- Laisser passer un courant de surcharge minimal en permanence :
  - o  $1,05 * I_n$  (courant nominal) selon la norme IEC 60947-2
  - o  $1,13 * I_n$  (courant nominal) selon la norme IEC 60898-1
- Interrompre un courant de surcharge :
  - o  $1,3 * I_n$  (courant nominal) selon la norme IEC 60947-2
  - o  $1,45 * I_n$  (courant nominal) selon la norme IEC 60898-1
- Interrompre un courant de court-circuit selon une courbe enveloppe :
  - o Entre  $3$  et  $5 * I_n$  pour une courbe de déclenchement magnétique de type B
  - o Entre  $5$  et  $10 * I_n$  pour une courbe de déclenchement magnétique de type C
  - o Entre  $10$  et  $14 * I_n$  pour une courbe de déclenchement magnétique de type D

**Ceci à une incidence directe sur le dimensionnement du composant semi-conducteur.**

Prenons un exemple :

- un disjoncteur de courant nominal de 10A ( $I_n$ ).
    - o Sa courbe de déclenchement magnétique est de type D (entre 10 et 14\* $I_n$ )
- ⇒ Le disjoncteur devra interrompre au minimum un courant de 100A.

Le composant semi-conducteur devra être capable de supporter et d'interrompre ce courant.

Les composants MOSFET ou IGBT sont capables d'interrompre environ 4 fois leur courant nominal ( $I_D$ ). [10]. On notera donc  $I_{DM}=4*I_D$

Ce qui est insuffisant pour remplir la fonction de disjoncteur, puisque celui-ci doit interrompre au minimum 10 fois son courant nominal pour une courbe D.

Ainsi, la solution est de sur-dimensionner le composant.

Le calcul de surdimensionnement, pour obtenir une performance équivalente ( $I_{\text{interruption}} = I_{DM}$ ) est le suivant :

$$\text{Valeur de surdimensionnement} = \frac{10*I_n}{4*I_D} = \frac{I_{\text{interruption}}}{I_{DM}} = 2,5$$

Il faudra donc choisir des composants ayant un courant nominal au minimum égal à 2,5\* $I_D$  (exemple 25A)

On notera que le transistor bipolaire ne peut interrompre un courant au-delà de 1,5fois son courant nominal, ce qui oblige à dimensionner le composant à 6,7 fois le courant nominal du disjoncteur.

Dans le cas d'un tel surdimensionnement, il est préférable d'utiliser des composants ayant un comportement résistif à l'état passant (MOSFET et Bipolaire), voir paragraphe 3.4.2.

En effet, ils offrent une chute de tension bien plus faible au courant nominal de l'appareil ( $I_n$ ), même si au courant du composant semi-conducteur ( $I_{nc}$ ), ils présentent une chute de tension quasi identique.

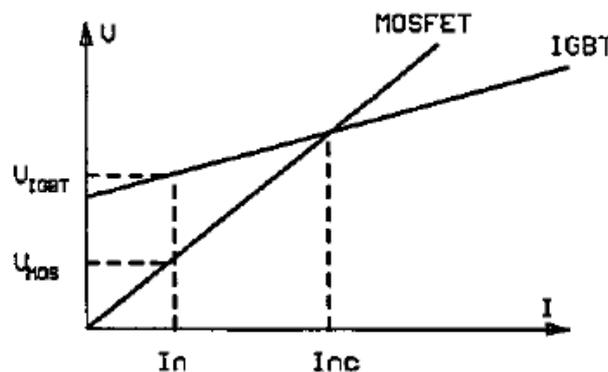


Figure 22 – Evolution de la chute de tension des MOSFETs et IGBTs  
(Source : TIAN Simon - Schneider Electric)

### 3.4.4 Choix du composant en fonction de l'application

Le choix optimum d'un composant est une opération complexe. Il n'existe pas de règle générale. Cependant, il est possible d'évoquer les critères principaux de choix :

- Type d'appareil : commande ou protection

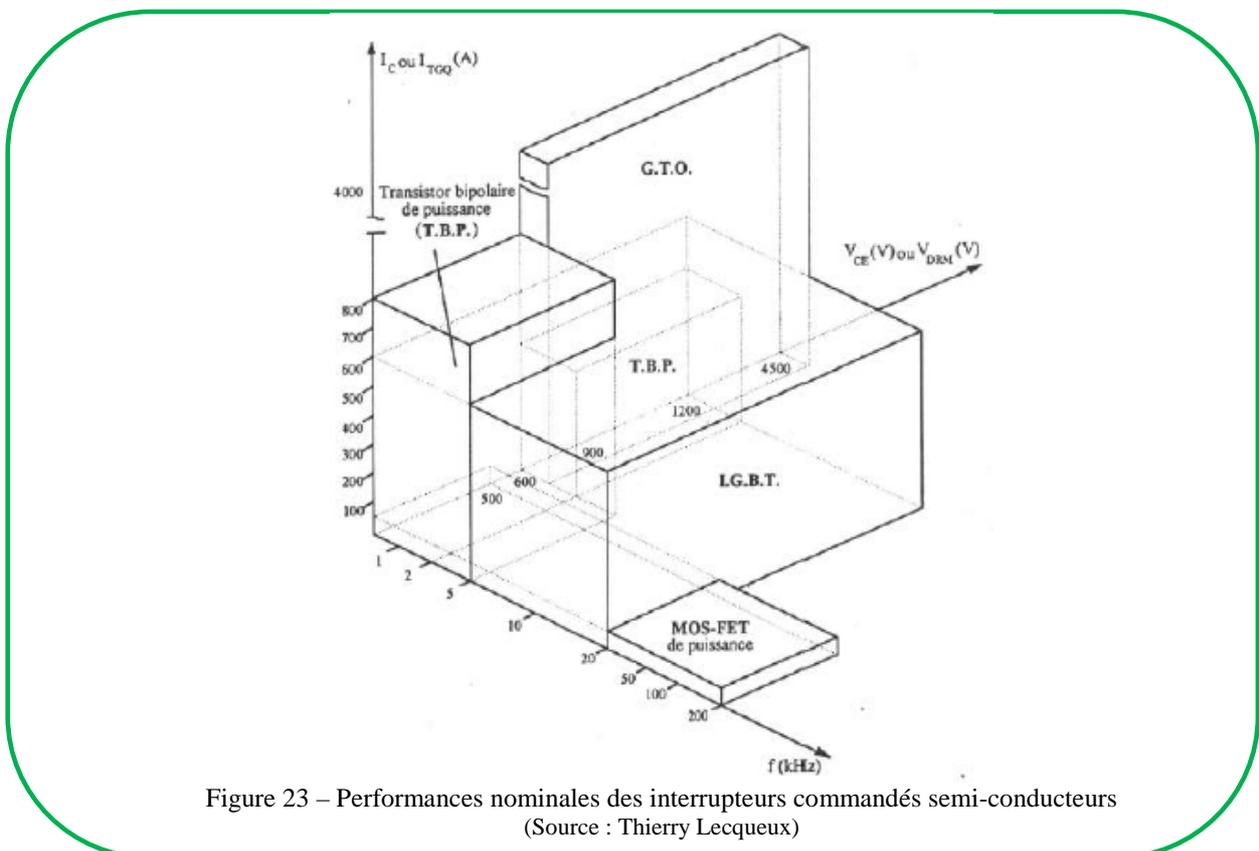
Permet de définir le type d'interrupteur semi-conducteur (paragraphe 2.3)

- o Relais/contacteur en AC : uniquement commandé à la fermeture
- o Relais/contacteur en DC : commandé à la fermeture et à l'ouverture
- o Disjoncteur en AC : commandé à la fermeture et à l'ouverture
- o Disjoncteur en AC : commandé à la fermeture et à l'ouverture

Permet de déterminer les contraintes de dimensionnement du composant (paragraphe 3.4.3)

- Nature du réseau (AC ou DC)
  - ⇒ Détermine la structure de l'interrupteur (paragraphe 2.4)
- Domaine d'application (Tension et courant nominal)
  - ⇒ Détermine les caractéristiques générales du composant

La figure 23 est une représentation des performances nominales de chacun des composants



Les MOSFET sont des composants plutôt dédiés à la très basse tension. Ils possèdent une commande simple, et leur chute de tension relativement faible

Pour la moyenne tension, les GTO et les IGBT sont adaptés.

Pour le même domaine de tension, on notera l'arrivée d'un nouveau composant, l'IGCT, développé par l'entreprise ABB, alliant les avantages du GTO et de l'IGBT [11]

Pour le domaine de la basse tension l'IGBT est un bon candidat.

## Chapitre 4. Synthèse et perspectives

### 4.1 Synthèse

La technologie statique à base de semi-conducteurs permet d'apporter des avantages non négligeables vis-à-vis de l'actuelle technologie qui est l'électromécanique.

Cependant, en dehors des apports bénéfiques, de nouvelles problématiques ont émergées. L'interrupteur statique est le maillon faible. Ces composants ne sont pas vraiment optimisés pour ce type d'application à l'heure d'aujourd'hui, mais plutôt développés pour des applications tels que les convertisseurs, nécessitant davantage de performances en commutation et ne fonctionnant que très peu continuellement à l'état bloqué ou passant.

Or l'appareillage électrique d'interruption nécessiterait quasiment le contraire.

L'amélioration des performances du l'interrupteur statique à base de semi-conducteur est la clef de voûte.

Une évolution radicale de l'interruption statique n'est concevable que dans le cas d'une rupture technologique dans le domaine des composants de puissance.

Ci-dessous, il est proposé un tableau comparatif [12] des caractéristiques de la technologie statique à la technologie électromécanique synthétisant les avantages et inconvénients deux technologies.

Tableau IV : Comparatif de la technologie statique semi-conducteurs et électromécanique  
(Source : Thèse Mahfudz Surya Atmadji Ali)

Feature	mechanical breaker	semiconductor breaker
Switching mechanism	metallic contact and arc	PN-junction
Contact resistance	$\mu\Omega$ - $m\Omega$	few $m\Omega$
Power loss	very small	relative high
Voltage drop at rated current	less than 10mV	1-2V
Galvanic isolation	Yes	No
Isolation capability	very high	limited (sensitive for overvoltage)
Overload capability	very high	limited by $I^2t$ value
Delay/response time	few ms-20ms	few $\mu s$
Life expectancy	limited by contact erosion	theoretically unlimited
Contact reliability	high	very high
Frequent switching ability	high	very high
Surge capabilities	high	limited (device dependence)
Overvoltage protection	not necessary	snubber circuit/varistor
Size & volume	compact and small	relatively big due to cooling being necessary
Maintenance	necessary	not necessary
Cost	relatively low	relatively high

## 4.2 Evolutions

Le développement de l'appareillage électrique à technologie statique semi-conducteur est principalement freiné par les pertes par puissance dissipée dû à l'interrupteur semi-conducteur.

### 4.2.1 Nécessité d'évolution des interrupteurs de puissance

De nombreux travaux sont entrepris afin de faire évoluer ces composants commandés semi-conducteur dans l'optique de diminuer leur chute à l'état passant principalement, et également de concevoir des composants monolithiques bidirectionnels en courant et tension.

On citera en exemple les travaux de [Luong Viêt Phung - 2010], thèse forte intéressante, portant sur l'étude de structures d'interrupteurs intégrables bidirectionnels en tension et en courant.

On citera également les travaux de [Dominique Tournier – 2003], dont le sujet de thèse portant sur composant limiteur de courant commandé en carbure de silicium.

### 4.2.2 Solution palliative : l'interruption statique hybride

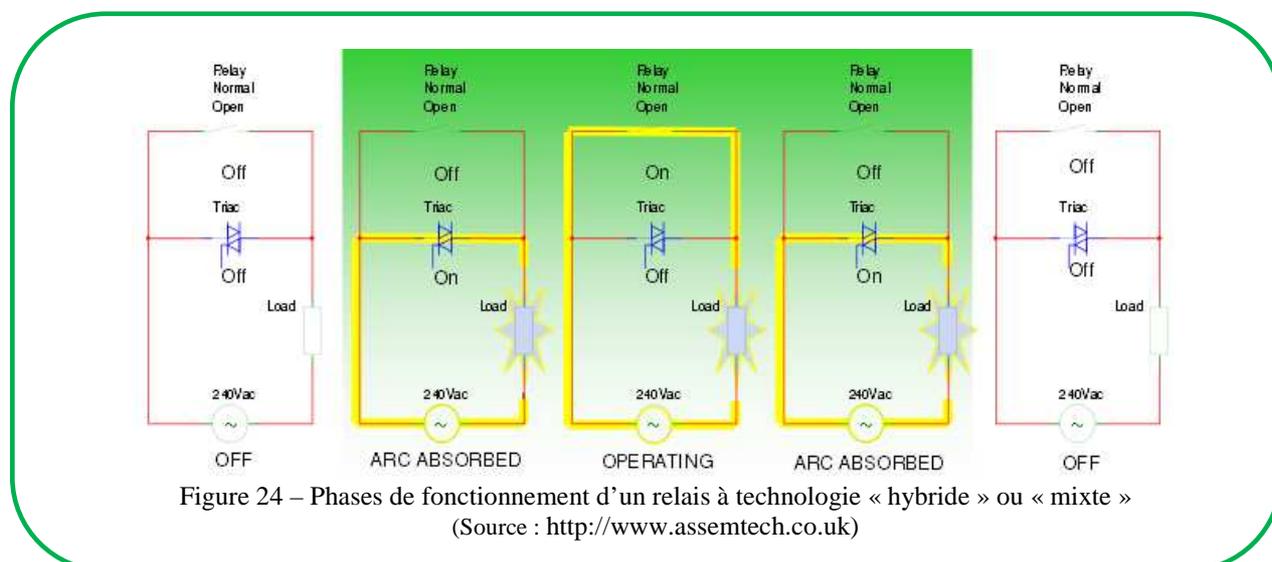
Que ce soit la technologie électromécanique ou la technologie statique à semi-conducteurs, toutes les deux ont leurs propres avantages, mais aussi leurs propres inconvénients.

Certains constructeurs proposent désormais des appareils dits « hybride » ou « mixte » combinant en réalité les deux technologies.

Des contacts électriques sont placés en parallèle du semi-conducteur et ceux-ci viennent court-circuiter le circuit du semi-conducteur lorsque le circuit est établi en phase stable de fonctionnement (courant passant).

Ainsi le courant électrique traverse en permanence les contacts électriques, possédant une très faible résistance de contact, et dissipant donc peu de pertes par puissance dissipée.

L'inconvénient de ce mixte technologique est majoritairement le coût.



## 4.3 Perspectives

### 4.3.1 Quelques applications actuelles

De nombreuses applications utilisent la technologie statique à base de semi-conducteurs. Cependant, il s'agit uniquement d'appareillage de type commande (relais et contacteurs). Quant au disjoncteur statique, il n'est nullement utilisé, ces contraintes étant rédhibitoires.

Ces applications sont bien souvent dédiés à de faibles courant d'utilisation, limitant ainsi les pertes dissipées et ainsi permettant de ne pas utiliser de dissipateur thermique, ou alors dans des milieux industriels, là où la durée de vie des appareils est primordial.

Il s'agit d'applications portant sur de petits segments de marchés.

En clair, leur utilisation s'applique là où les avantages sont tels que l'on est prêt à en subir les inconvénients.

On citera en exemples, sans être exhaustif :

- Les milieux nécessitant une ambiance silencieuse

Hôtels et hôpitaux : télérupteur silencieux pour ne pas déranger les clients

- Les milieux nécessitant un nombre de manœuvre soutenu et élevé de l'appareil

Régulation de température : contacteur de dalle chauffante

Enclencheur des stations d'essais d'interruption en court-circuit

⇒ rapide, fiable, endurant et permet un contrôle précis pour les angles d'enclenchement

- Les milieux en atmosphère explosive

La technologie statique sans arc électrique autorise leur utilisation dans ces domaines.

### 4.3.2 Applications futures : protection des réseaux Supergrid

Les objectifs européens favorisent un développement des Energies nouvelles Renouvelables (EnR). Le projet « supergrid » consiste à développer une interconnexion des réseaux électriques afin de rendre possible le partage entre tous les pays européens de l'électricité produite par les installations d'EnR les plus efficaces tout en levant la problématique de stockage de l'énergie.

Le Supergrid implique de transporter l'électricité sur de longues distances, ce qui nécessite des réseaux capables d'acheminer de fortes puissances avec de faibles pertes.

Pour afficher des pertes inférieures aux lignes de courant traditionnelles, il est de plus en plus fréquent de remplacer les lignes de courant alternatif par du courant continu.

[13]

Cependant, à l'heure d'aujourd'hui, aucun appareil n'est capable d'assurer la protection d'un réseau THT en courant continu contre les courts-circuits [14].

La structure actuelle des interrupteurs statiques est unidirectionnelle, donc mieux adaptés aux réseaux à courant continu qu'alternatif.

Ainsi, on peut imaginer à l'avenir un disjoncteur statique remplissant le rôle de protection de ces réseaux THT en courant continu.

Cependant cela nécessite auparavant une évolution des composants semi-conducteurs pour leur tenue en tension, et la diminution de leur chute de tension à l'état passant.

## Conclusion

---

Force est de constater que l'idée initiale, bien que séduisante, d'utiliser des interrupteurs statiques en guise d'appareillage électrique d'interruption n'est pas une opération aussi simple que cela aurait pu en avoir l'air.

En effet, en dehors des apports bénéfiques liés à cette technologie, de nouvelles problématiques ont émergées, rendant même, dans certains cas particuliers (courant élevé), leur utilisation impossible dans ce type d'application.

Ceci est principalement dû aux limites intrinsèques des composants semi-conducteurs :

- Chute de tension en régime permanent
  - o Siège d'échauffements importants dont il faut évacuer
    - Pertes d'énergie
- Courant de fuite au blocage
- Coût élevé

Il faut noter que ces interrupteurs statiques, composants semi-conducteurs, sont unidirectionnels, donc mieux adaptés au réseau de type DC que de type AC.

C'est justement en continu que l'électromécanique a quelques difficultés d'interruption.

A noter que les composants actuels ne sont pas vraiment optimisés pour ce type d'application.

A l'heure d'aujourd'hui, leurs performances sont développées pour des applications telles que les convertisseurs, nécessitant davantage de performances en commutation et ne fonctionnant que très peu continuellement à l'état bloqué ou passant.

Or, un appareillage électrique d'interruption, nécessite des composants de performances opposées.

L'amélioration des performances de l'interrupteur statique à base de semi-conducteur est la clef de voûte du succès de cette technologie.

Une évolution radicale de l'interruption statique n'est concevable que dans le cas d'une rupture technologique dans le domaine des composants de puissance.

En attendant ces évolutions, il est possible de s'orienter vers une structure dite « mixte » ou « hybride » : Combiner les avantages de l'appareillage électromécanique (faible puissance dissipée et aptitude au sectionnement) et les avantages de l'appareillage statique (rapidité, durée de vie, nuisances sonores nulles).

Cependant, leur conception est davantage complexe et onéreuse, et leur utilisation est réservée à des applications très particulières.

L'appareillage électrique comporte de plus en plus d'électronique, permettant d'intégrer des fonctions communicantes et de mesure d'énergie par exemple.

L'utilisation d'interrupteurs statiques de puissance permet davantage d'intelligence aux appareils, autorisant le potentiel de les piloter à distance via une interface au choix.

L'évolution de l'appareillage électrique vers une technologie statique est une certitude.

Cependant, on est en mesure de se poser la question suivante : quand aura lieu cette évolution ?

En attendant, l'appareillage électromécanique à encore de beaux jours devant lui.

## Bibliographie

- [1] Schneider Electric, 2000. Coupure par la technique fusible  
Techniques de coupure des disjoncteurs BT, cahier technique n°154.
- [2] LETURCQ Philippe. Techniques de l'ingénieur, document D3100.  
Composants semi-conducteurs de puissance : caractères propres.
- [3] Square D Company, 2004. Disjoncteurs comportant des éléments résistants à coefficient de température positif. [en ligne]  
Disponible sur : < <http://www.google.com/patents/EP0934596B1?cl=fr> >  
(consulté en Mai 2013)
- [4] TIXADOR Pascal, BRUNET Yves. Techniques de l'ingénieur, document D2705 [en ligne].  
Applications de puissance à haute température critique.  
Disponible sur : < <http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=A-F5g8IrmNIC&oi=fnd&pg=PA2&dq=limiteur+courant+supraconduction&ots=dNdxznLS0n&sig=86Rmcr29kIsVX-vc1DUI24dgV5A#v=onepage&q=limiteur%20courant%20supraconduction&f=false> >  
(consulté en Mai 2013)
- [5] COINTE Yannick, 2007. Limiteur supraconducteur de courant continu [en ligne].  
Institut National Polytechnique de Grenoble.  
Disponible sur : < [http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/30/05/52/PDF/These\\_COINTE.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/30/05/52/PDF/These_COINTE.pdf) >  
(consulté en Mai 2013)
- [6] MEYER Jean-Marc, 2000. Etude et réalisation d'un disjoncteur hybride ultra-rapide à base de thyristors IGCT.  
Lausanne, EPFL.
- [7] Académie de Rennes. L'optocoupleur, [en ligne].  
Disponible sur : < <http://bonemine.lycee-ledantec.ac-rennes.fr:2008/pdf/fiches/Optocoupleur.PDF> >  
(consulté en Mai 2013)
- [8] Académie de Nice. La protection des canalisations par disjoncteur, [en ligne].  
Disponible sur : < <http://www.ac-nice.fr/apollinaire/GEET/distribution/les-disjoncteurs.pdf> >  
(consulté en Mai 2013)
- [9] Viêt PHUNG Luong, 2010. Etude des structures d'interrupteurs intégrables bidirectionnels en tension et en courant : le transistor bipolaire symétrique.  
Université François RABELAIS, Tours.
- [10] Ferrieux Jean-Paul. Composants semi-conducteurs de puissance. Université Joseph Fourier
- [11] ABB. Composants IGCT de haute puissance au silicium pour applications dans le secteur moyenne tension [en ligne].

Disponible sur : <

[http://library.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/3ed3db03e797bdb1c1256b9d004c46f9/\\$File/Zh97hs\\_F.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/3ed3db03e797bdb1c1256b9d004c46f9/$File/Zh97hs_F.pdf) >

(consulté en Mai 2013)

[12] Mahfudz Surya Atmadji Ali, 2000. Direct current hybrid breakers : a design and its realization [en ligne].

Disponible sur : < <http://alexandria.tue.nl/extra2/200001242.pdf> >

(consulté en Mai 2013)

[13] Enerzine. Les enjeux technologiques R&D du Supergrid ,2011 [en ligne]

Disponible sur : < <http://www.enerzine.com/15/12372+les-enjeux-technologiques-r-d-du-supergrid+.html> >

(consulté en Mai 2013)

[14] <http://www.audeladeslignes.com>. R&D : protéger un réseau THT en courant continu contre les court-circuits,2012 [en ligne]

Disponible sur : < <http://www.audeladeslignes.com/proteger-reseau-tht-courant-continu-court-circuits-18182> >

(consulté en Mai 2013)

## Liste des Figures

Figure 1 - Représentation schématique des deux niveaux d'un appareil d'interruption .....	2
Figure 2 – Comparaison d'une architecture statique vs électromécanique : appareil de commande.....	4
Figure 3 – Comparaison d'une architecture statique vs électromécanique : appareil de protection .....	4
Figure 4 – Circuit d'entrée pour commande DC    Figure 5 – Circuit d'entrée pour commande AC.....	5
Figure 6 – Etablissement du circuit au zéro de tension.....	6
Figure 7– Cas de figure où le courant minimum de maintien n'est pas atteint.....	7
Figure 8– Courant présumé et courant limité réel.....	7
Figure 9 – Caractéristiques statiques des interrupteurs en fonction de la nature de v et i .....	8
Figure 10 – Axes tension / courant : 4 quadrants.....	10
Figure 11 – TRIAC .....	10
Figure 12 – Thyristors tête-bêche .....	10
Figure 13 – Exemples d'interrupteurs bidirectionnels à base de composants unidirectionnels.....	11
Figure 14 – Circuit inductif alimenté en courant continu .....	12
Figure 15 – Fonctionnement d'un disjoncteur statique DC .....	13
Figure 16 – Energie dissipée pendant l'interruption en fonction de la tension d'écrêtage .....	13
Figure 17 – Ecrêtage : protection par diodes .....	14
Figure 18 – Ecrêtage : protection par circuit RC .....	14
Figure 19 – Ecrêtage : protection par varistance.....	14
Figure 20 – MOSFET : Evolution de la résistance $R_{DS(on)}$ en fonction de la température de jonction.....	16
Figure 21 – Chute de tension des différents composants de puissance.....	19
Figure 22 – Evolution de la chute de tension des MOSFETs et IGBTs.....	20
Figure 23 – Performances nominales des interrupteurs commandés semi-conducteurs .....	21

## Liste des tableaux

Tableau I : Elements semi-conducteurs commandés à la fermeture .....	9
Tableau II : Elements semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture .....	9
Tableau III : Caractéristiques recherchées des composants semi-conducteurs.....	18
Tableau IV : Comparatif de la technologie statique semi-conducteurs et électromécanique .....	22

## Interruption statique : Etat de l'art et perspectives

Mémoire présenté en vue d'obtenir l'UE « Information et communication pour ingénieur »  
Spécialité : ENERGETIQUE option Electrotechnique  
Grenoble, 2013

---

### RESUME

L'appareillage électrique d'interruption est indispensable dans tous les circuits électriques. A l'heure d'aujourd'hui, la technologie statique à base de semi-conducteur est peu répandue, à contrario de la technologie électromécanique.

Les composants semi-conducteurs commandés souffrent d'une problématique majeure : une chute de tension à l'état passant engendrant des pertes par puissance dissipée. Cette particularité est d'autant plus problématique pour la conception d'un disjoncteur statique dont sa fonction principale est de conduire en permanence le courant dans l'attente d'un courant de défaut.

Cependant, la technologie statique à base de semi-conducteurs peut résoudre les désavantages de la technologie électromécanique : l'érosion des contacts provoquée par l'arc électrique lors de la séparation des contacts électriques, ainsi que les nuisances sonores émises lors de chaque cycle d'ouverture/fermeture des contacts de l'appareil.

**Mots clés:** semi-conducteur, statique, interruption, électromécanique, appareillage électrique

---

### SUMMARY

The electrical interrupting device is essential in all electrical circuits. In today's time, the static technology based on semiconductor is uncommon, in contrast with the electromechanical technology.

The controlled semiconductor components suffer from a major problem: a voltage drop in the state "on" which generate dissipated power losses. This characteristic is especially problematic for the design of a static circuit breaker of which its main function is to drive continuously the current in waiting a fault current.

However, static technology based on semiconductors can solve the disadvantages of electromechanical technology: contact erosion caused by arcing during the separation of the electrical contacts, and noise emitted during each cycle of opening / closing device contacts.

**Key words:** semiconductor, static, interrupting, electromechanical, electrical device