

# **Cours d'Electronique de Puissance**

**A. ABOULOIFA**

# Plan:

**Introduction générale**

**Chapitre 1: Les semiconducteurs de puissance**

**Chapitre 2: La conversion AC-DC (les redresseurs)**

**Chapitre 4: La conversion DC-DC (les hacheurs)**

# **Introduction générale**

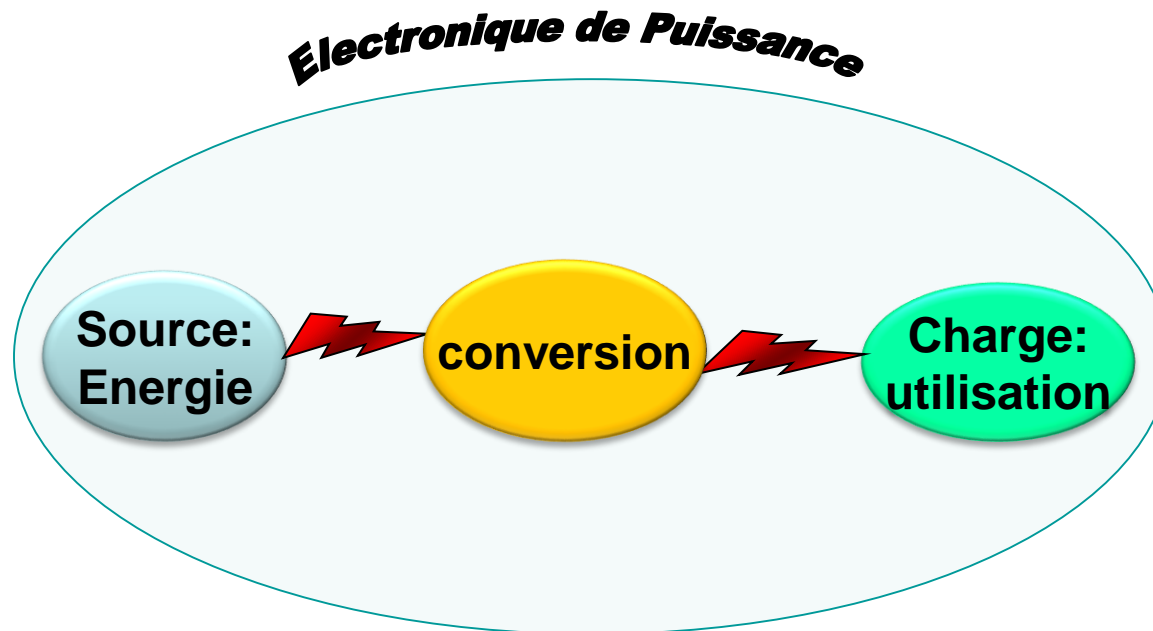
# 1. L'électrotechnique

- L'électrotechnique est l'étude des applications techniques de l'électricité.
- Son domaine d'intervention est la production, le transport, la distribution, le traitement, la transformation, la gestion et l'utilisation de l'énergie électrique.

- l'Electrotechnique d'aujourd'hui est une science pluridisciplinaire au carrefour de :
  - l'Electrotechnique traditionnelle (machines tournantes, transformateurs),
  - l'Electronique de puissance (convertisseurs statiques),
  - l'Electronique du signal (composants, commandes),
  - l'Automatique et l'Informatique (commande d'ensemble)
  - la Mécanique (charges entraînées),
  - l'Electrochimie (piles et accumulateurs).
  - etc,...

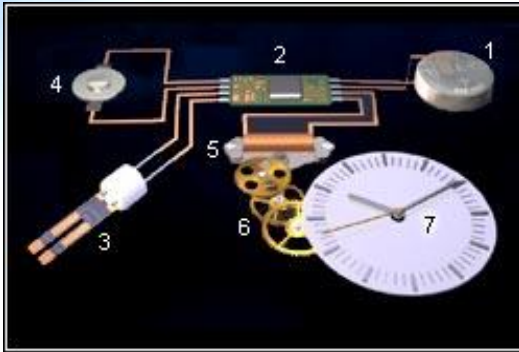
### **2.1. Définition**

- L'Electronique de puissance (ENPU) est la branche de l'Electrotechnique qui a pour objet l'étude de la conversion statique d'énergie électrique (notamment les structures, les composants, les commandes et les interactions avec l'environnement, ...).



## **2.2. Gamme de puissance de l'ENPU**

*Indépendant de la puissance (du mW au MW)*



**Montre 10 $\mu$ W**



**Lampes fluorescentes 15W**



**Véhicule hybride 35kW**



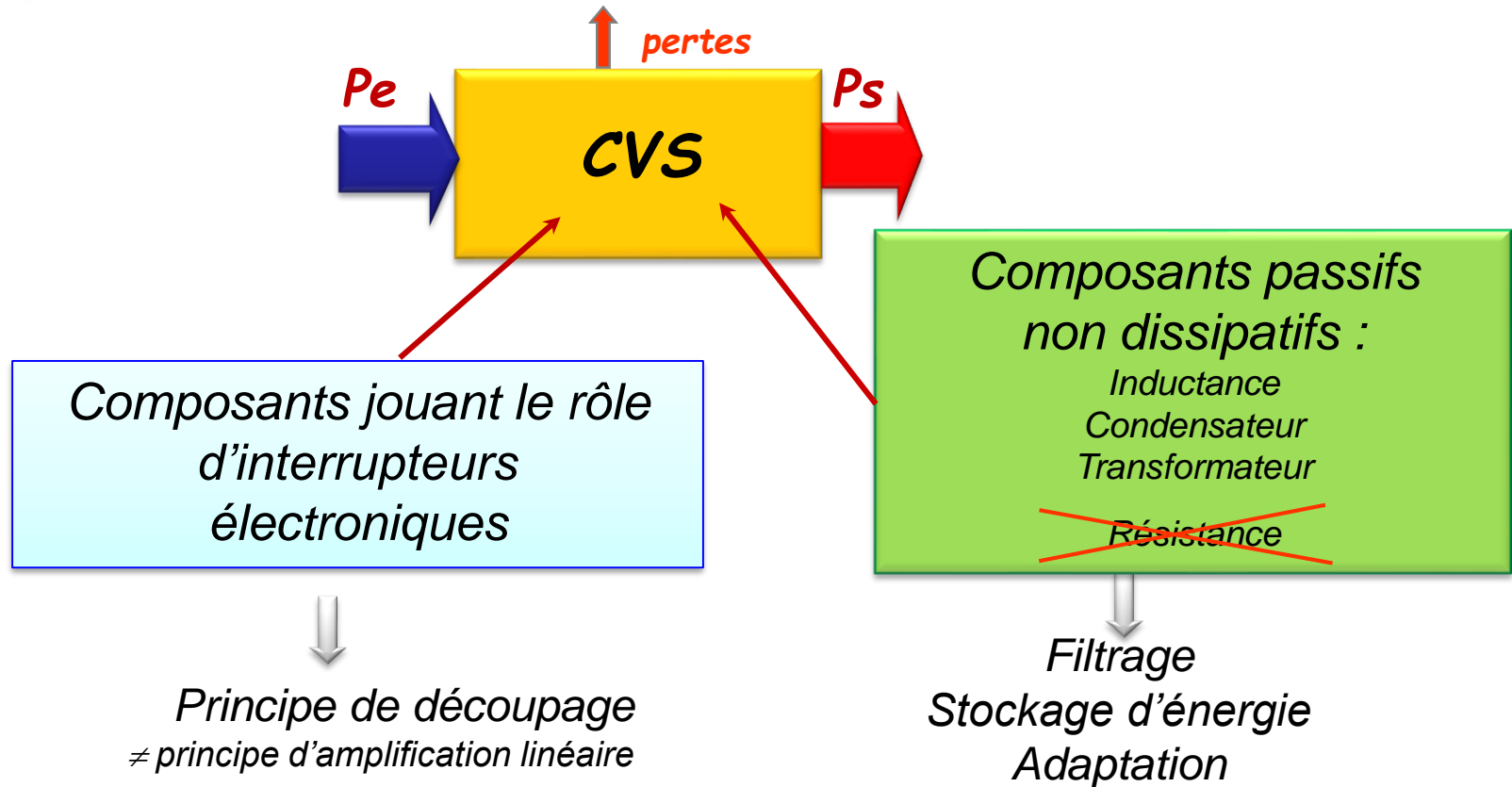
**Locomotive 4,2MW**

## 2.3. Composants en l'ENPU

*Pertes* aussi faibles que possible

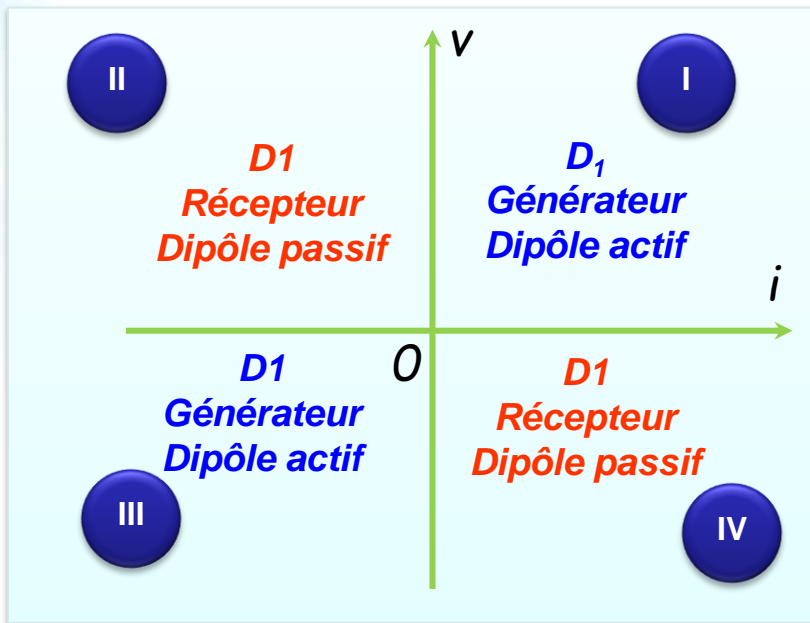
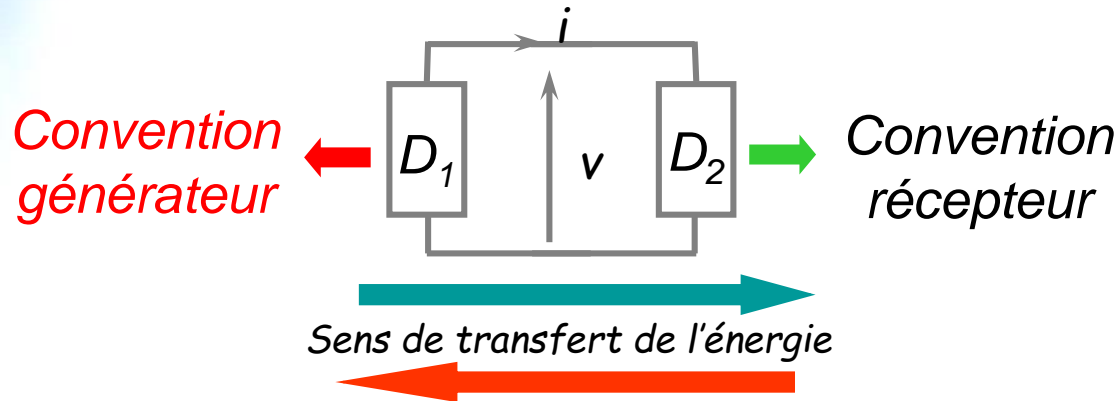
⇒ augmentation du rendement

⇒ minimisation du poids et du coût des dispositifs de refroidissement

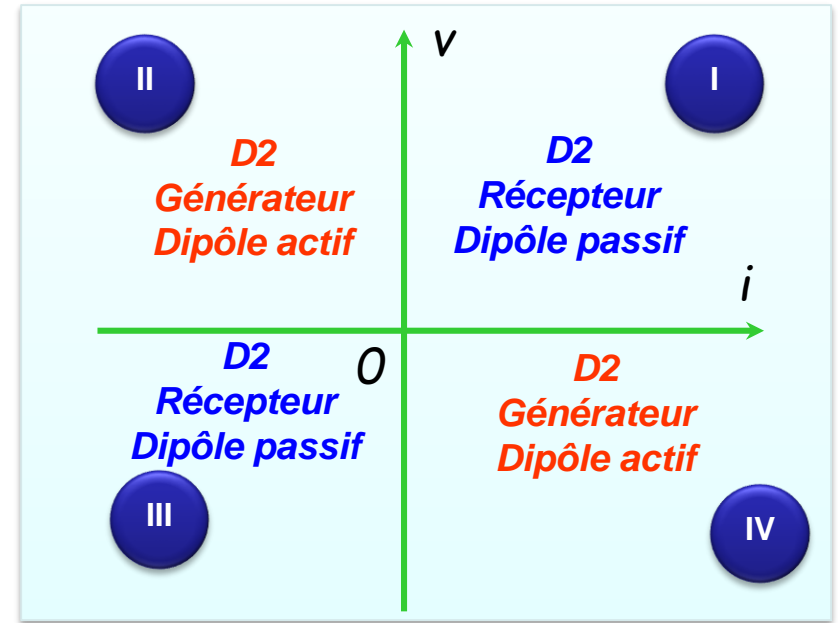




## 2.4. Dipôle actif, dipôle passif

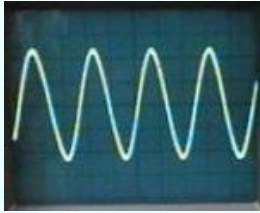


Quadrants I et III si  $v \times i > 0$



Quadrant II et IV si  $v \times i < 0$

Sources d'énergie électrique



Forme Alternative  
AC



Réseau de distribution électrique

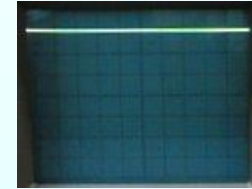


Alternateurs



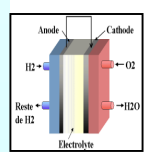
Éoliennes

...



Forme Continue  
DC

Pile à combustible (PAC)



Batterie d'accumulateurs



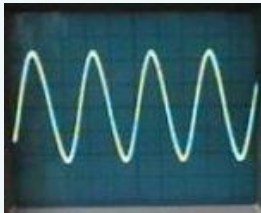
Cellules photovoltaïques (PV),



...

## 2.6. Charge électrique:

Charge électrique nécessite:



Alimentation AC



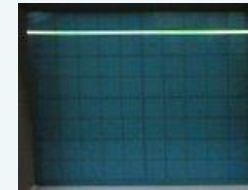
Machines alternatives



Réseau électrique



Appareils domestiques:  
TV, Réfrigérateur,  
...



Alimentation DC

Machine à courant continu  
(MCC)



Microprocesseurs



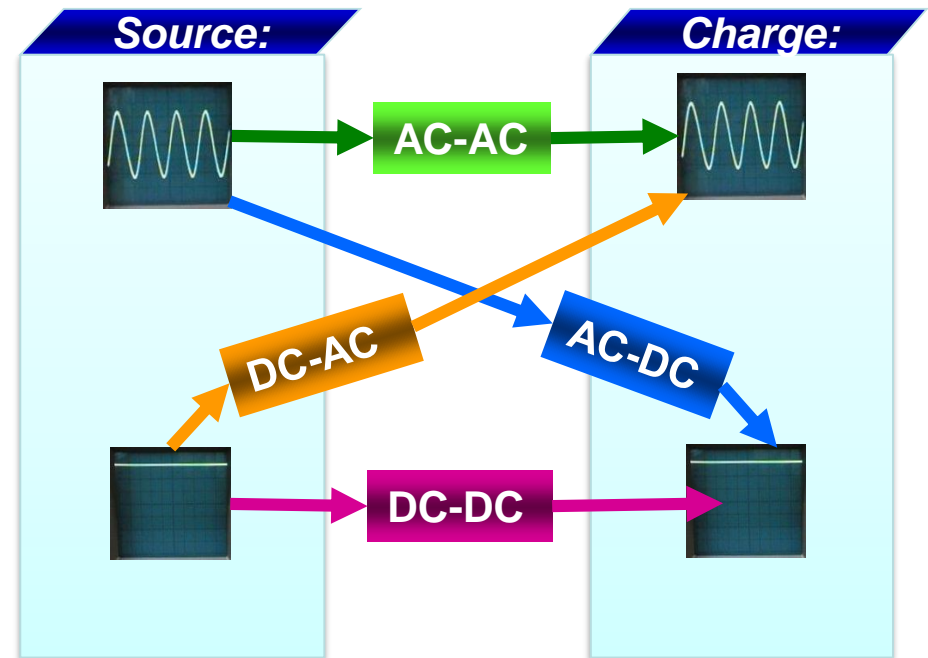
Circuits intégrés  
...



### 3. Les types de convertisseurs statiques

● On définit quatre classes de convertisseurs transformant directement l'énergie électrique:

- Convertisseur AC-DC:  
(**Redresseurs**),
- Convertisseur DC-DC,  
(**Hacheurs**)
- Convertisseur DC-AC,  
(**Onduleurs**)
- Convertisseur AC-AC.  
(**Gradateurs et cycloconvertisseurs**)



## 4. Domaines d'application des convertisseurs de puissance

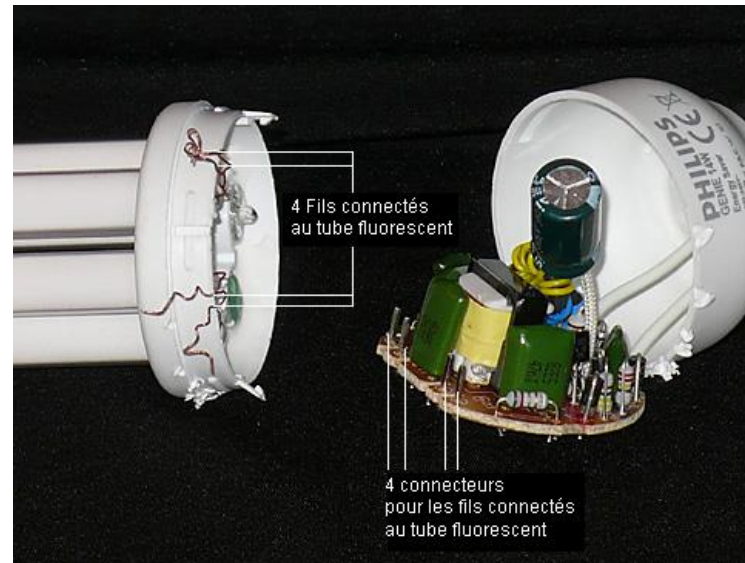


*traction ferroviaire*

*générateurs d'ultrasons  
(domaine médical)*



*L'alimentation des  
lampes fluorescentes*







*Alimentations de secours:  
alimentations sans  
interruption ASI (UPS)*

*La compensation de  
l'énergie réactive et  
filtrage actif dans les  
réseau électriques*



*Les variateurs de vitesse des  
machines*





Ordinateurs

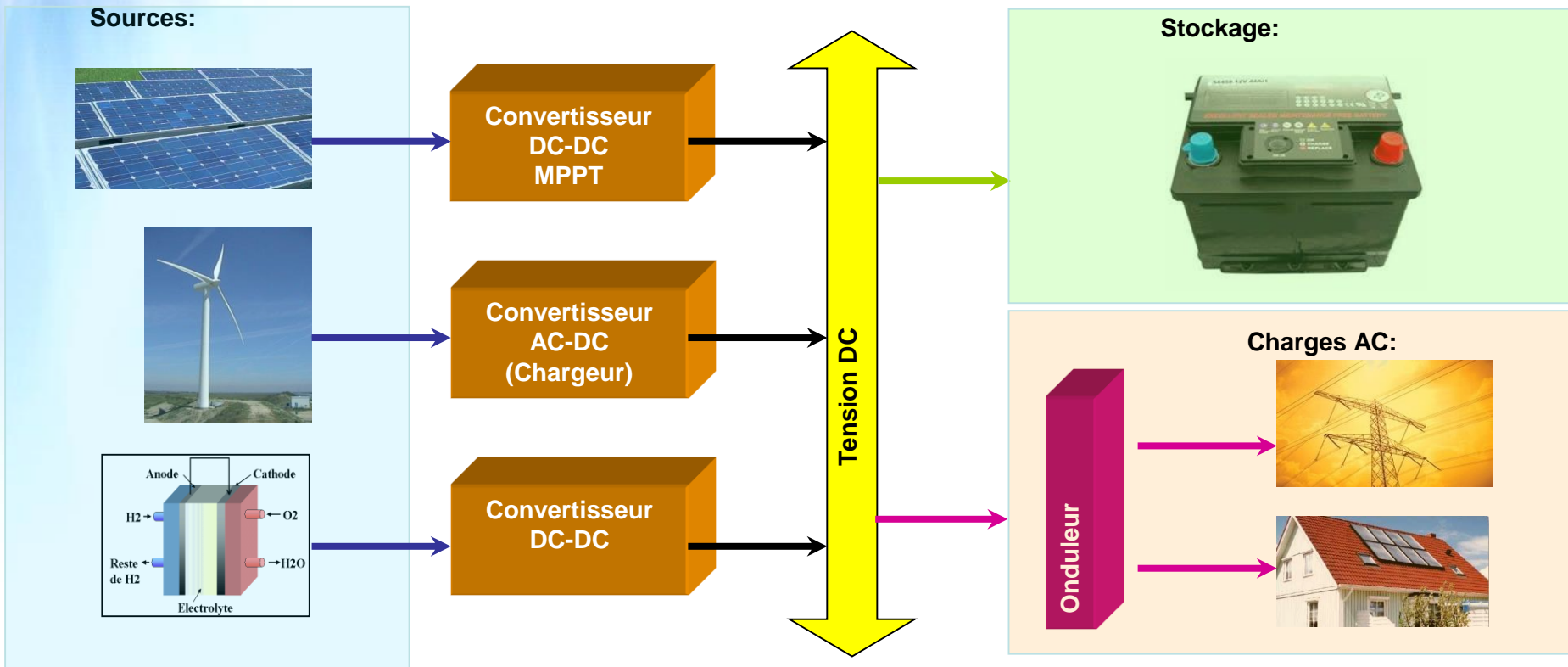
systèmes de  
communication



Moniteurs, téléviseurs (LCD,  
Plasma)

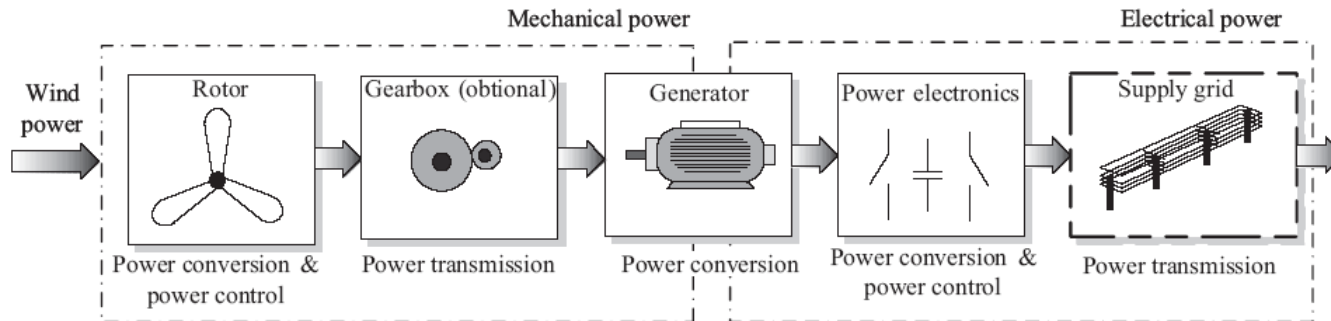


Dans la conversion d'énergie des sources renouvelables:





# application

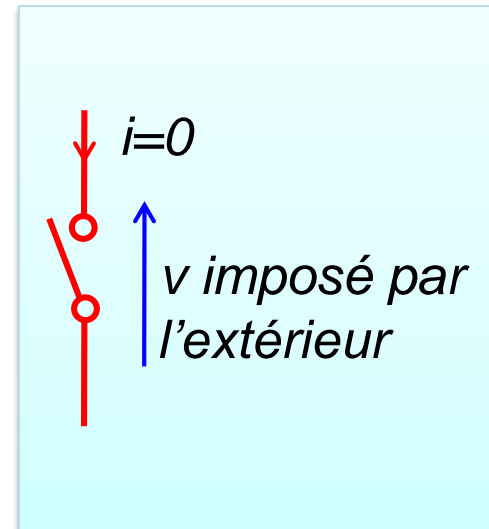


# **Chapitre 1**

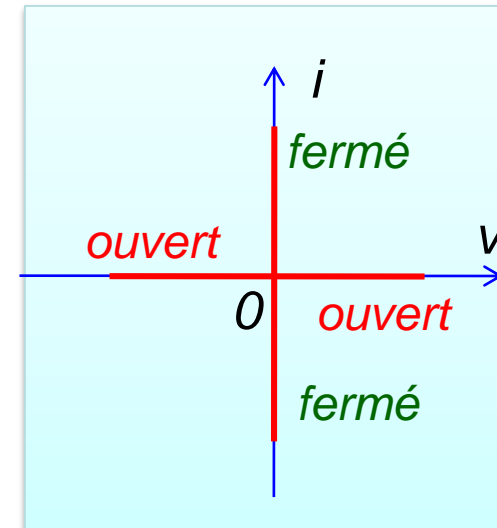
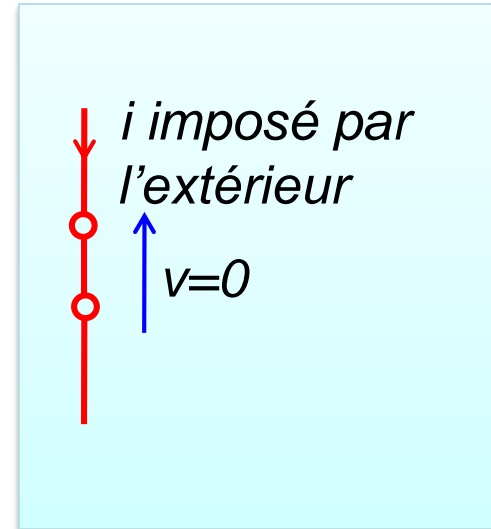
## **Les interrupteurs à semi- conducteurs**

## 1. L'interrupteur parfait

- Un interrupteur possède deux états: ouvert ou fermé.
- **Etat ouvert**: un interrupteur parfait impose un courant qui le traverse nul ( $i=0$ ), alors que la tension à ses bornes est imposée par le circuit extérieur ( $v>0$  ou  $v<0$ ).



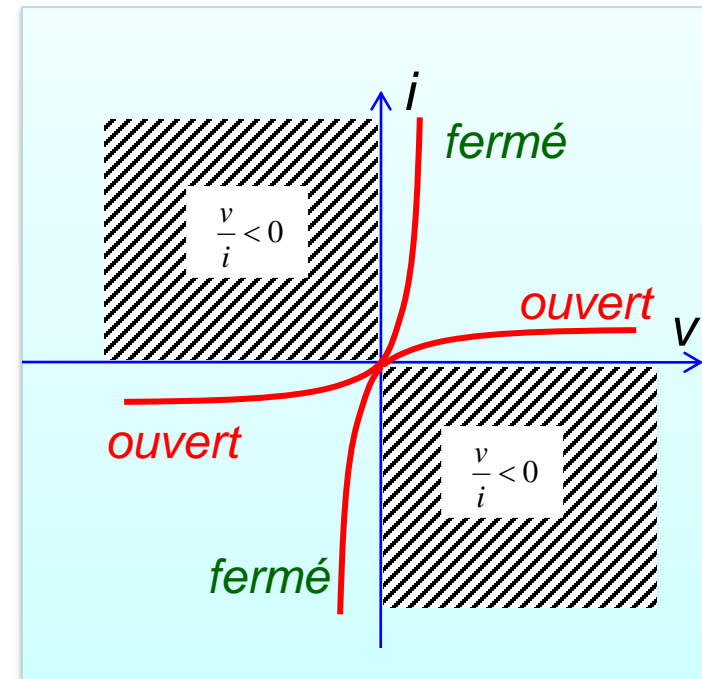
- **Etat fermé**: un interrupteur parfait impose une tension entre ses bornes nulle ( $v=0$ ), alors que le courant qui le traverse est imposée par le circuit extérieur ( $i>0$  ou  $i<0$ ).
- La caractéristique statique d'un interrupteur parfait est donc formée de quatre segments confondus avec les axes  $v$  et  $i$ .



### **2.1. Caractéristique statique**

- Un interrupteur à semi-conducteur est formé par un ou plusieurs composants semi-conducteurs.
- Sa résistance apparente  $v/i$  peut varier entre une valeur très élevée (état ouvert) et une valeur très faible (état passant).
- La résistance apparente  $v/i$  ne peut être que positive ( $v$  et  $i$  de même signe).

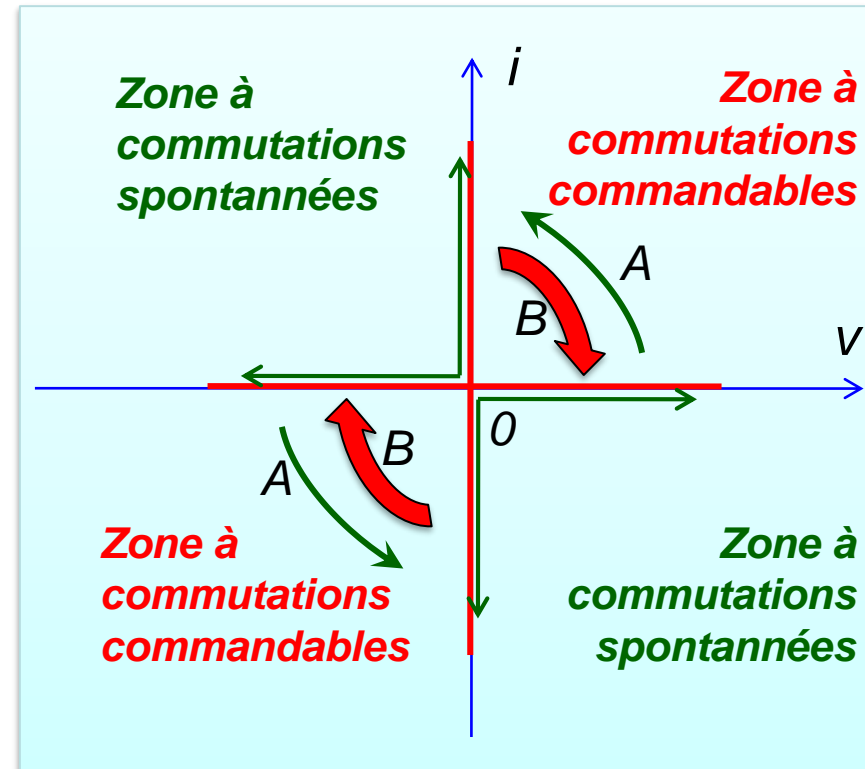
- L'imperfection de ce type d'interrupteur apparaît sous la forme:
  - D'une chute de tension à l'état fermé ou passant,
  - D'un courant de fuite à l'état ouvert ou bloqué.
- La caractéristique statique d'un interrupteur à semi-conducteur (bidirectionnel en courant et en tension) est représentée ci contre.



## 2.2. Caractéristique dynamique

Le passage d'un état à l'autre de l'interrupteur peut être obtenu de deux façons:

- Action sur la commande de l'interrupteur: **commutation commandée**.
- Évolution des grandeurs électrique dans le circuit, indépendamment de l'interrupteur et qui induisent le changement d'état (**annulation de  $i$  ou de  $v$** ): **c'est la commutation spontanée**.

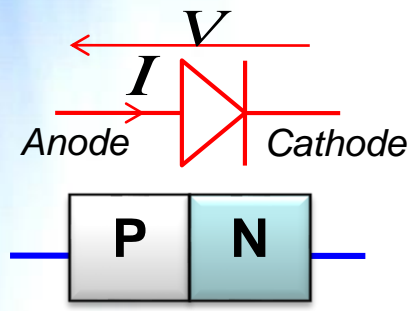


A: Amorçage (fermeture)  
B: Blocage (ouverture)

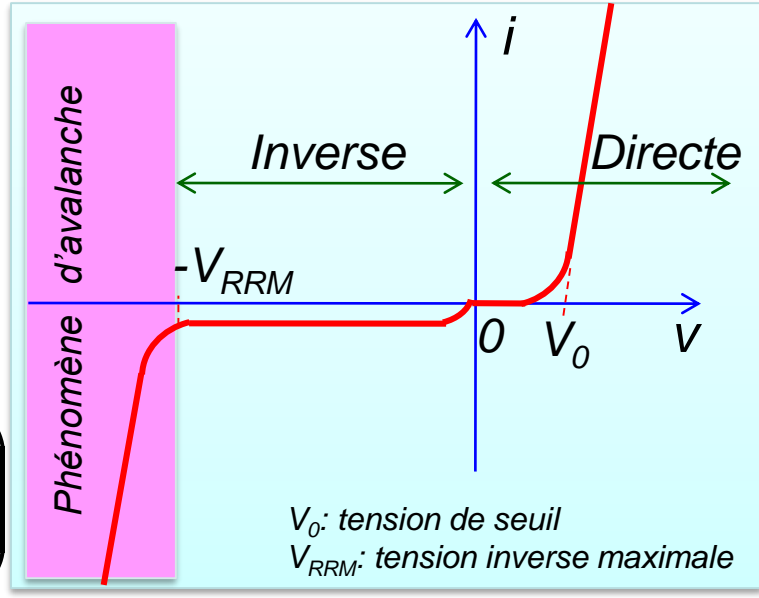
# 3. Les différents types d'interrupteurs à semi-conducteurs

## 3.1. La diode

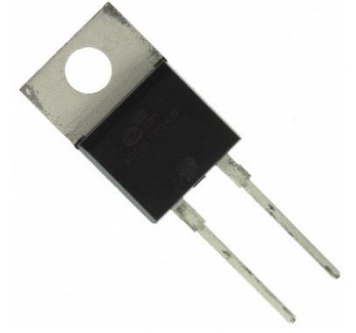
### Caractéristique statique:



$$I = I_s \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

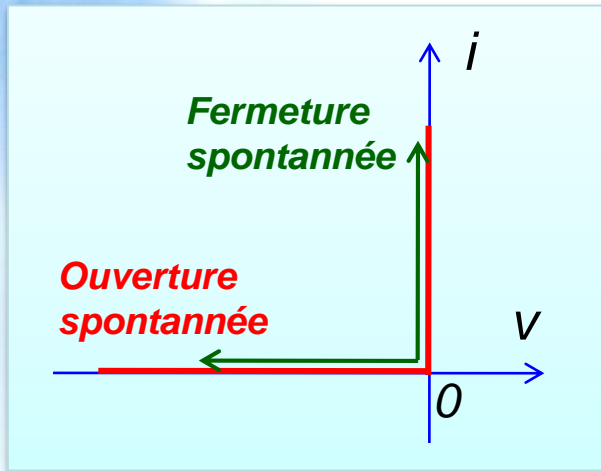


- $V$  : tension aux bornes de la diode
- $I$  : courant dans la diode
- $I_s$  : courant de saturation (qqs pA)
- $V_T$  : tension thermodynamique ( $\approx 26mV$  à  $300K$ )





Caractéristique statique idéalisée:

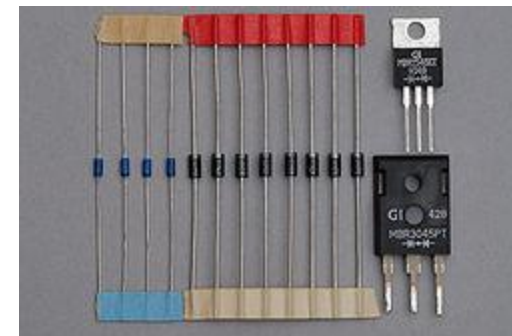


Interrupteur à deux segments  
(unidirectionnel en courant et  
en tension)

- Fermeture spontanée,
- Ouverture spontanée.

Diode Schottky:

Une **diode Schottky** est une diode qui a un seuil de tension directe très bas (0.2 à 0.3V) et un temps de commutation très court (diode rapide). Elle a la capacité à laisser transiter de fortes intensités, mais ne permet pas de supporter des tensions inverses assez grandes.



**Caractéristique électriques (Exemples):**

Types	Référence	$I_{FAV}$ (A)	$V_{RRM}$ (V)	$I_{FSM}$ (A)
Redresseurs	BYX38	6	1200	50
	BYX32	150	1600	1600
	BYW25	40	1000	550
Diodes rapides	BYV29	7.5	500	80
	BYV93	60	500	800
Diodes Schottky	BYV19	10	45	150
	BYV23	80	45	1500

$I_{FAV}$  : courant direct moyen maximal (Forward AVerage)

$V_{RRM}$  : Tension inverse répétitive maximale (Reverse Repetitif Maximum)

$I_{FSM}$  : Courant direct de claquage maximal (Forward Surge Maximum)

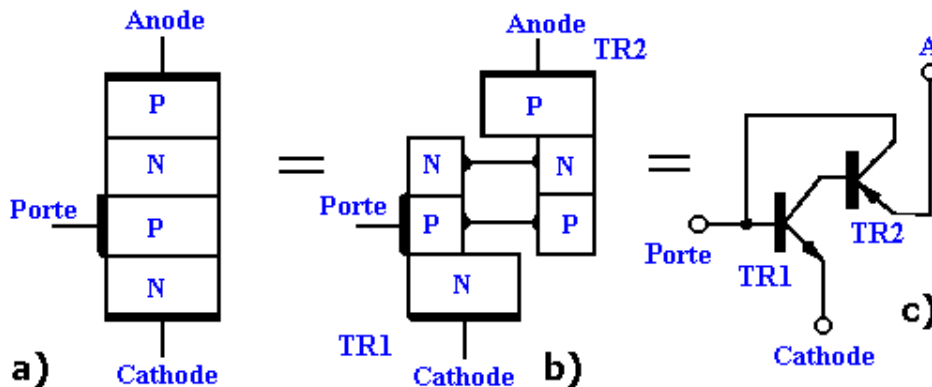
## 3.2. Le Thyristor

### Définition:

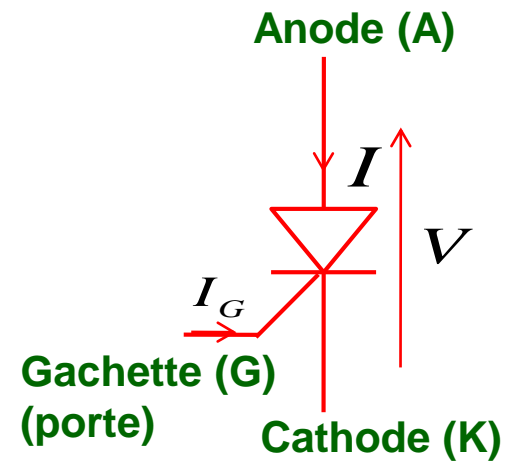
Le **thyristor**, aussi appelé SCR (silicon controlled rectifier), est un interrupteur à semi-conducteur qui peut être commandé à l'allumage mais pas à l'extinction. C'est donc une diode particulière possédant un circuit de commande.



### Constitution et symbole:



Décomposition d'un thyristor



Symbole d'un thyristor

Caractéristique statique:

➡ Mise en conduction:

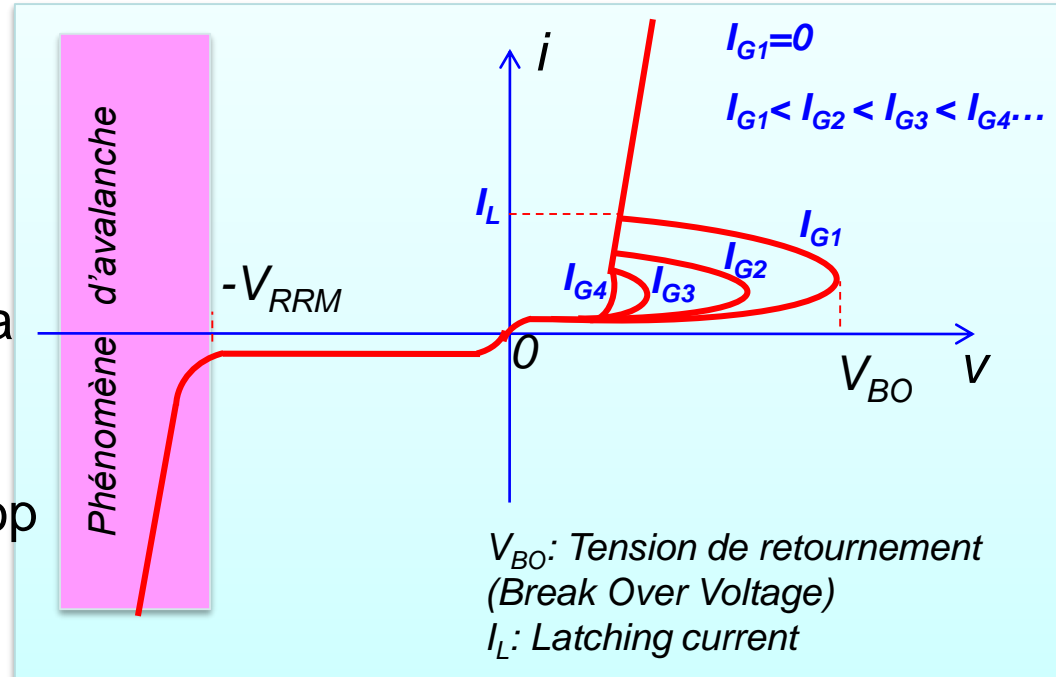
1<sup>er</sup> cas (à éviter) : si  $V > V_{BO}$ ,  
même sans commande sur la  
gâchette ( $I_G=0$ ).

2<sup>e</sup> cas (à éviter) : si  $dV/dt$  est trop  
grande même si  $V < V_{BO}$ .

3<sup>e</sup> cas (commande classique) :

- a) la tension  $V >$  tension de seuil (quelques V),
- b) injection d'un courant  $I_G$  **positif** sur la gâchette.

⇒ Le thyristor est passant et se comporte donc comme une diode  
( $V=V_0 \approx 1V$ ) pourvu que  $I > I_L$ .



➡ **Condition de maintien de conduction:**

- Le courant (anode-cathode)  $I$  doit être supérieur au courant de maintien  $I_L$  (Latching current Current) quel que soit le courant de gâchette  $I_G$ .
- On n'est alors plus tenu de maintenir un courant de gâchette pour permettre la conduction du thyristor. Cette remarque est d'autant plus vraie lorsque le courant  $I$  est élevé.

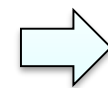
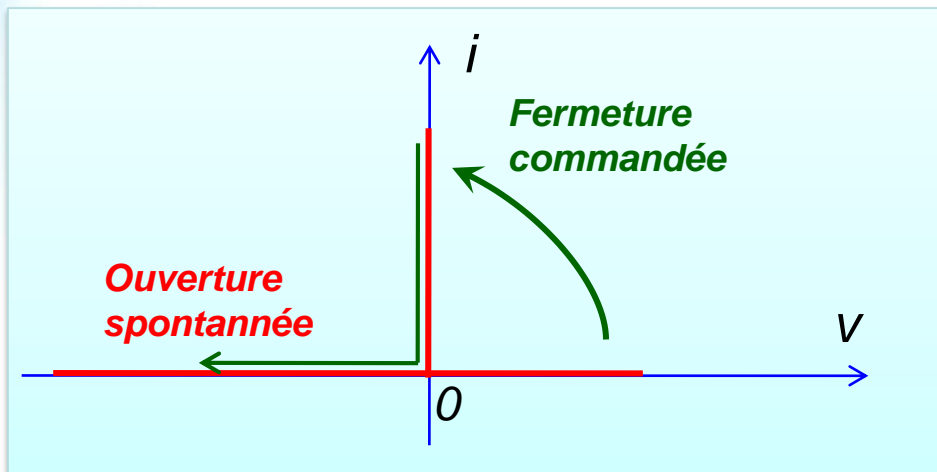
➡ **Condition de blocage:**

- Le blocage peut survenir :
  - a) Si la tension anode-cathode  $V$  est négative ( $V < 0$ ),
  - b) Ou si le courant  $I$  est inférieur au courant de maintien ( $I_H$ : Holding Current).

**Remarque:**

Une fois le **thyristor** est bloqué, et pour maintenir son blocage, un temps minimum  $T_Q$  (temps de blocage: Turn-off-time) doit s'écouler avant de polariser positivement l'anode.

**Caractéristique statique idéalisée:**



*Interrupteur à trois segments:  
(bidirectionnel en tension,  
unidirectionnel en courant)*

- Fermeture commandée,
- Ouverture spontanée.

**Caractéristique électriques (Exemples):**

Types	Référence	$I_F$ ou $I_T$ (A)	$V_{RRM}=V_{DRM}$ (V)	$I_{TSM}$ (A)	dv/dt (V/ $\mu$ s)	di/dt (A/ $\mu$ s)
Thyristors sensibles	TLS 106-2	2.5	200	35	10	100
	TYS 806-8	5	800	80	5	50
Thyristors rapides	TLF 4006	2	400	50	100	100
	2N 3658	22.5	400	200	200	400
Thyristors usage général	TYN 1012	7.6	1000	120	50	100
	BTW 67-1200	25	1200	500	50	100

$I_F$  ( $I_T$ ): courant moyen à l'état passant,

$V_{RRM}$  : Tension inverse répétitive maximale (Reverse Repetitif Maximum),

$V_{DRM}$  : Tension de pointe répétitive à l'état bloqué,

$I_{TSM}$  : Courant de surcharge de pointe accidentelle à l'état passant,

dv/dt : vitesse critique de croissance de la tension à l'état bloqué,

di/dt : vitesse critique de croissance du courant à l'état passant.



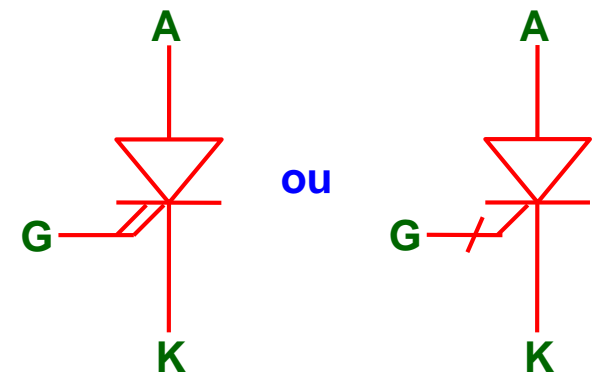
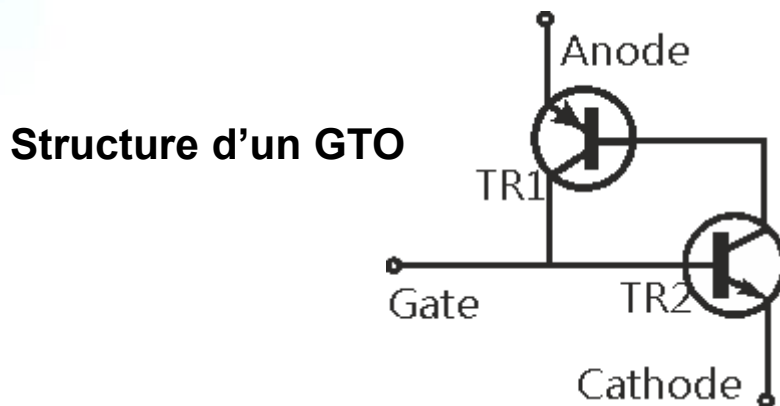
### 3.3. Le GTO:

#### Définition:

- **GTO** : Gate Turn-Off Thyristor,
- C'est un thyristor à extinction par la gâchette.
- Le **HDGTO** (*Hard Driven GTO* : GTO à commande dure), plus connu sous le nom de **GCT** (*Gate-Commutated Thyristor*) ou **IGCT** (*Integrated GCT*), est une évolution « moderne » du GTO, permettant un fonctionnement sans circuit d'aide à la commutation.



#### Constitution et Symbole:



Symboles d'un GTO

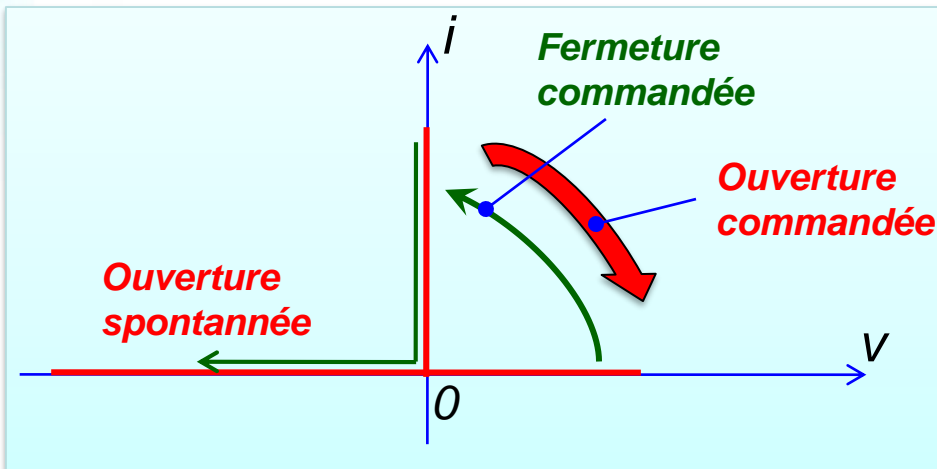


## Fonctionnement:

Le fonctionnement d'un GTO est similaire à celui d'un Thyristor.

Le GTO peut, par ailleurs, être bloqué en polarisant négativement la gâchette afin d'extraire un courant  $i_G$  de l'ordre du courant de l'anode  $i$  (quelques centaines à quelques milliers d'ampères selon le calibre du GTO.) → **Il faut donc prévoir une électronique de commande très puissante.**

## Caractéristique statique idéalisée:



Interrupteur à trois segments:  
(bidirectionnel en tension,  
unidirectionnel en courant)

- Fermeture commandée,
- Ouverture spontanée ou commandée.

**Caractéristique électriques (Exemples):**

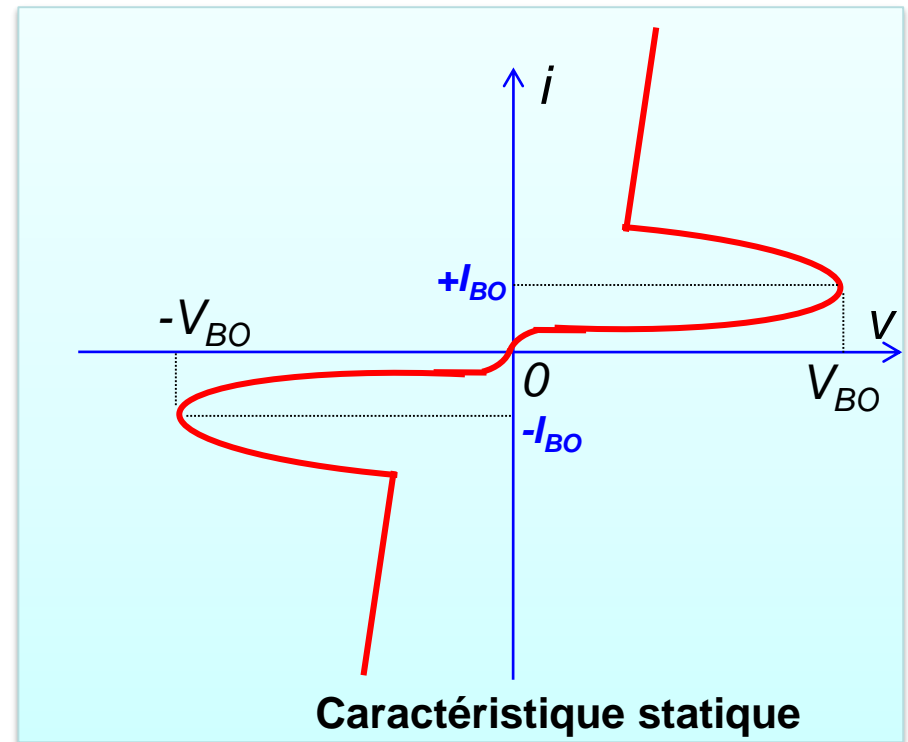
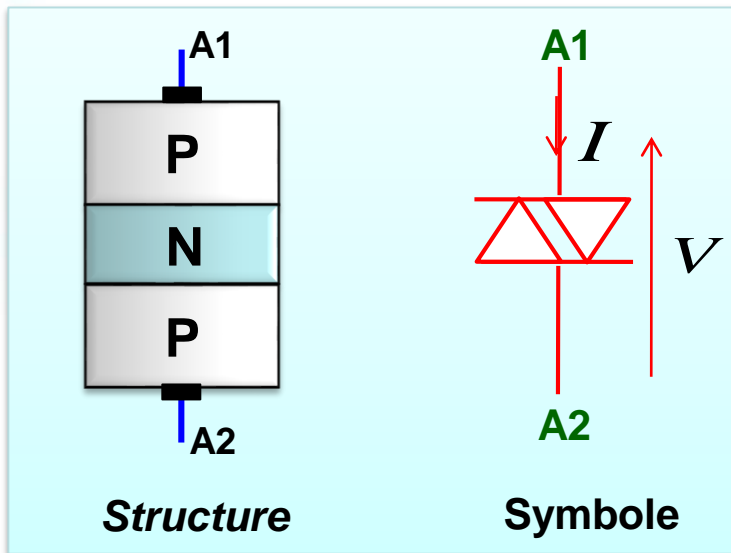
Référence	$V_{DRM}$ (V)	$V_{RRM}$ (V)	$I_{T(AV)}$ (A)	$I_{TCM}$ (A)	$di_T/dt$ (A/ $\mu$ s)	$dv/dt$ (V/ $\mu$ s)
GDM21230	1200	-	60	-	300	1000
FG4000GX-90DA	4500	17	1200	4000	500	1000
5SGT 30J6004	6000	17	1030	-	400	-
DG858DW45	4500	16	1100	3000	300	750
DGT409BCA	6500	6500	-	1500	300	1000

$I_{TCM}$ : Repetitive peak controllable on-state current

### 3.4. Le Diac:

#### Structure et symbole:

- Le DIAC est un dispositif bidirectionnel comprenant 3 couches PNP et deux électrodes de sortie.



$V_{BO}$ : Tension de retournement (Break Over Voltage)

**Fonctionnement:**

- Le DIAC se comporte comme un interrupteur dont l'état (bloqué ou saturé) dépend de la tension appliquée à ses bornes:

$$|V| < V_{BO} \quad \text{état bloqué}$$

$$|V| > V_{BO} \quad \text{état saturé}$$

- Le fonctionnement du Diac est similaire à celui de deux diodes Zeners montées tête bêche.
- Quand la tension aux bornes du Diac atteint la valeur de retournement, le Diac devient conducteur ou amorcé. La tension à ses bornes est alors de 1 à 2V.

## Exemple Diac : DB3

# TAITRON

components incorporated

## Bidirectional DIAC Trigger Diode



DB3

### Maximum Ratings and Electrical Characteristics ( $T_A=25^\circ\text{C}$ unless noted otherwise)

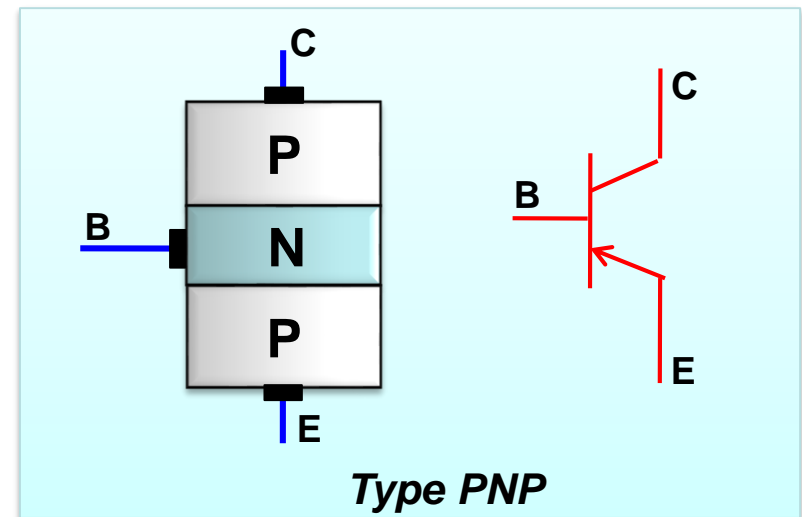
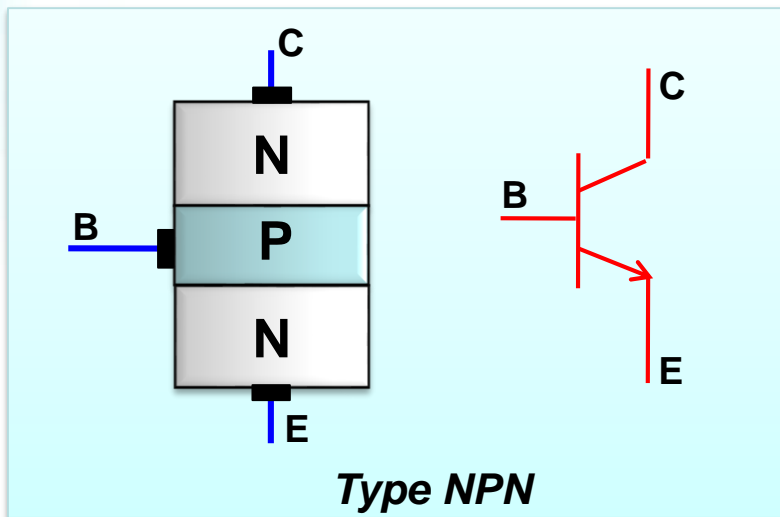
Symbol	Description	Value			Unit	Conditions
		Min.	Typ.	Max.		
$V_{BO}$	Breakover Voltage*	28	32	36	V	$I_{BO}, C=22\text{nF}^{**}$
$ +V_{BO}   -   -V_{BO}  $	Breakover Voltage Symmetry	-3	-	3	V	$I_{BO}, C=22\text{nF}^{**}$
$ \pm\Delta V $	Dynamic Breakover Voltage**	5	-	-	V	$V_{BO}$ and $V_F$ at 10mA
$V_O$	Output Voltage*	5	-	-	V	See Fig.6 (R=20 $\Omega$ )
$I_{BO}$	Breakover Current*	-	-	100	$\mu\text{A}$	C=22nF**
$T_r$	Rise Time*	-	-	2	$\mu\text{s}$	See Fig.5
$I_B$	Leakage Current*	-	-	10	$\mu\text{A}$	$V_B=0.5V_{BO}$ Max.
$I_P$	Peak Current*	0.3	-	-	A	See Fig.6 (Gate)
$P_d$	Power Dissipation on Printed Circuit	-	-	150	mW	$T_a=50^\circ\text{C}$
$I_{TRM}$	Repetitive Peak on-state Current	-	-	2	A	$t_p=20\mu\text{s}, f=100\text{Hz}$
$R_{thJA}$	Typical Thermal Resistance	-	-	400	$^\circ\text{C} / \text{W}$	
$R_{thJL}$		-	-	150	$^\circ\text{C} / \text{W}$	

## 3.5. Le transistor bipolaire

### Définition:

- Appelé en anglais **BJT**: **B**ipolar **J**unction **T**ransistor.
- Un transistor bipolaire est constitué par la concaténation de 2 jonctions PN.
- Il existe 2 types: NPN et PNP.

### Constitution et symbole:



Relations électriques:

● Loi des nœuds:

$$I_E = I_C + I_B$$

● Loi des mailles:

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

● Effet transistor:

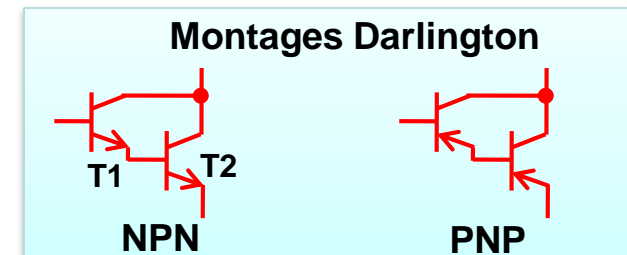
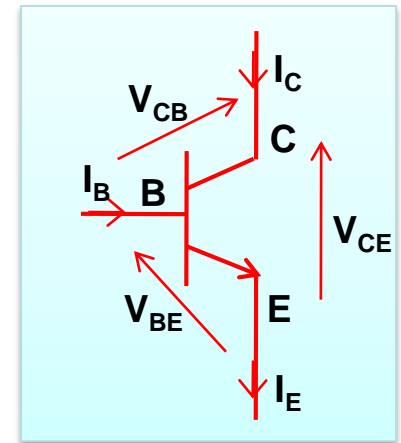
$$I_C = \beta I_B$$

● Jonction base-émetteur:

$$V_{BE} \approx 0.7V$$

●  $\beta$  est appelé coefficient d'amplification en courant (également noté  $h_{21E}$  ou  $h_{FE}$ ). Il est généralement très grand ( $\beta \gg 1$ ).

● Pour les montages « Darlington » on a:



## Montages Darlington:

- combinaison de deux transistors bipolaires de même type (tous deux NPN ou tous deux PNP)

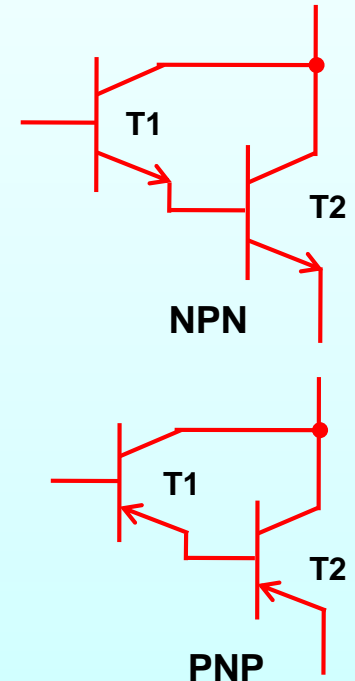
### Intérêts:

- Gain en courant plus élevé:

$$\beta = \beta_1 \beta_2$$

- réduit fortement le courant base et simplifie les circuits de commande,

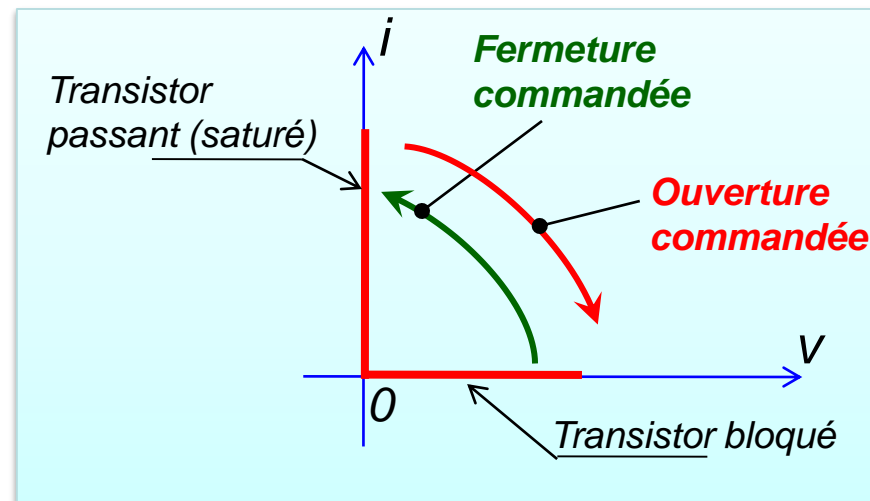
Montages Darlington





**Fonctionnement en commutation:**

- Le transistor bipolaire de puissance est utilisé en commutation:
  - **Etat bloqué:**  $V_{CE}$  élevée,  $I_C$  très faible ( $\approx 0$ ),  $V_{BE} \leq 0$ ;
  - **Etat saturé** (ou quasi-saturation):  $I_C$  élevé,  $V_{CE}$  faible ( $=V_{CEsat}$ ),  $I_B > 0$ ,
- La caractéristique statique est donc celle d'un interrupteur à 2 segments:

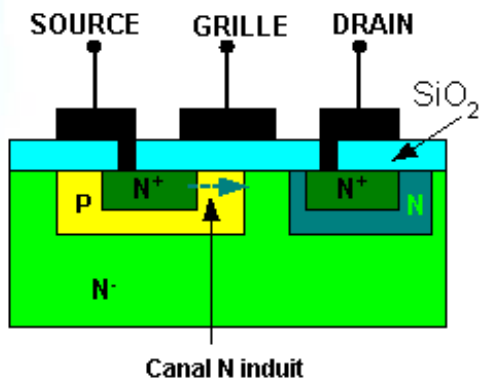


### 3.6. Le transistor MOSFET:

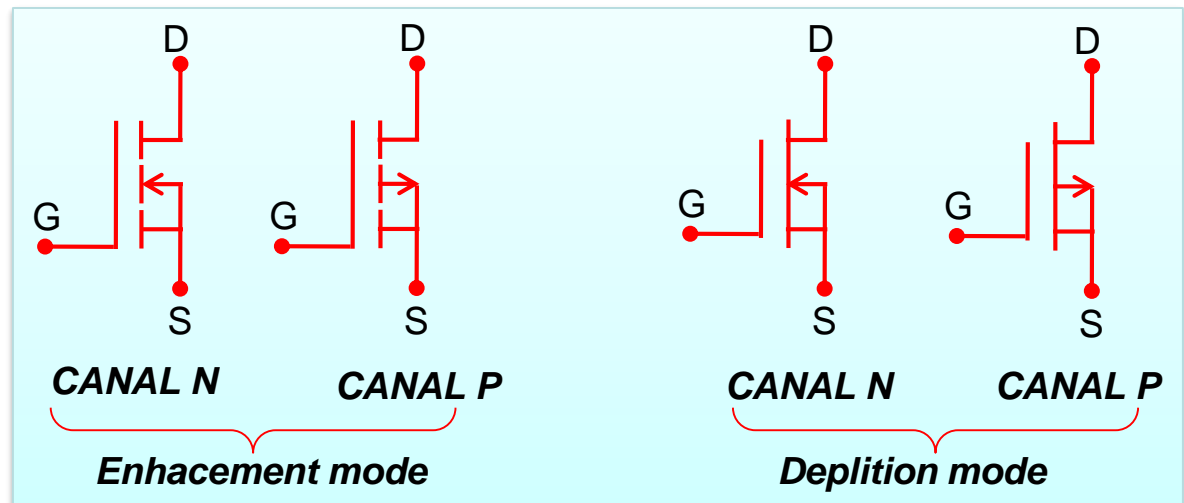
#### Définition:

- **MOSFET** (**M**etal **O**xide **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor): est transistor à effet de champ (à grille) métal-oxyde.
- Existe deux catégories, les MOSFET à canal induit (*enhancement mode*), les MOSFET à déplétion (*depletion mode*) selon leur mode d'opération.

#### Constitution :

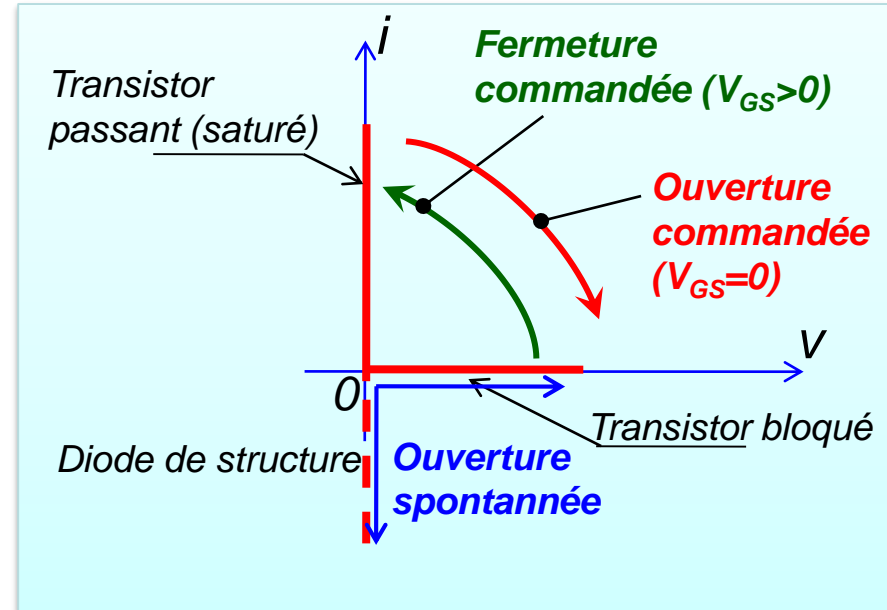


#### Symboles:



**Caractéristique statique:**

- Amorçage et blocage par  $V_{GS}$ ,
- A cause de la diode de structure, la caractéristique statique est donc celle d'un interrupteur à 3 segments.



**Caractéristique électriques:**

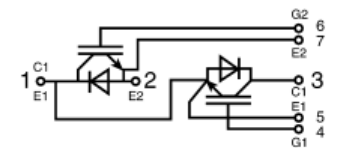
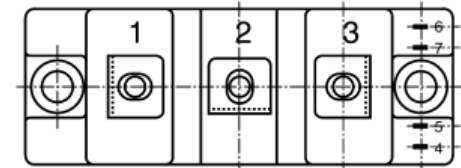
Référence	$V_{(BR)DSS}$ (V)	$I_{Dmax}$ (A)	$P_{TOT}$ (W)	$R_{DS(ON)}$ ( $\Omega$ )
TSD4M250	200	110	500	0.021
TSD4M350	400	50	500	0.075
IRF451	450	13	150	0.4
STK2N50	500	2	50	6
STP5N80	800	5	125	2
TSD5MG40	1000	17	500	0.7
APT1201R2BLL	1200	12	400	1.2

### 3.7. Le transistor IGBT:



#### Définition:

- Le transistor bipolaire à grille isolée (**IGBT**, de l'anglais *Insulated Gate Bipolar Transistor*) est un interrupteur électronique, qui combine les avantages des bipolaires et MOS:
  - grande simplicité de commande du transistor à effet de champ par rapport au transistor bipolaire,
  - faibles pertes par conduction du transistor bipolaire.



Pinout T

**Performances des IGBT:**

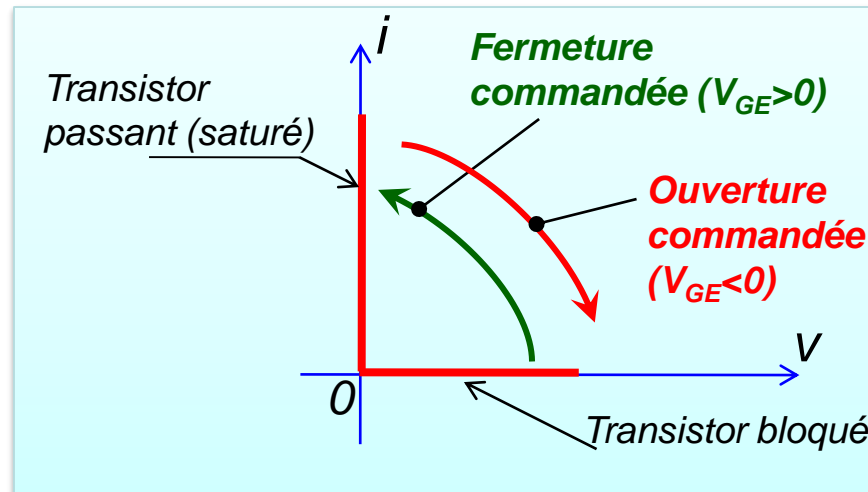
- Le tableau suivant montre les performances typiques de quelques produits du marché des transistors.

	MOSFET 600V	IGBT 600V	IGBT 1700V	IGBT 3300V	IGBT 6500V	GTO 6000V
$V_{CEsat}$ à 125 °C	2,2 V	1,8 V	2,5 V	3,5 V	5,3 V	3 V
fréquence typique	15-100 kHz	6-40 kHz	3-10 kHz	1-5 kHz	0,8-2 kHz	0,3-1 kHz

- Il dégage la tendance générale :
  - le  $V_{CEsat}$  augmente et la fréquence d'utilisation diminue quand la tenue en tension augmente ;
  - les MOSFET et les GTO deviennent concurrentiels aux extrémités de la gamme.

**Caractéristique statique:**

- Amorçage et blocage par  $V_{GE}$ ,
- La caractéristique statique est celle d'un interrupteur à 2 segments.





**Caractéristique électriques:**

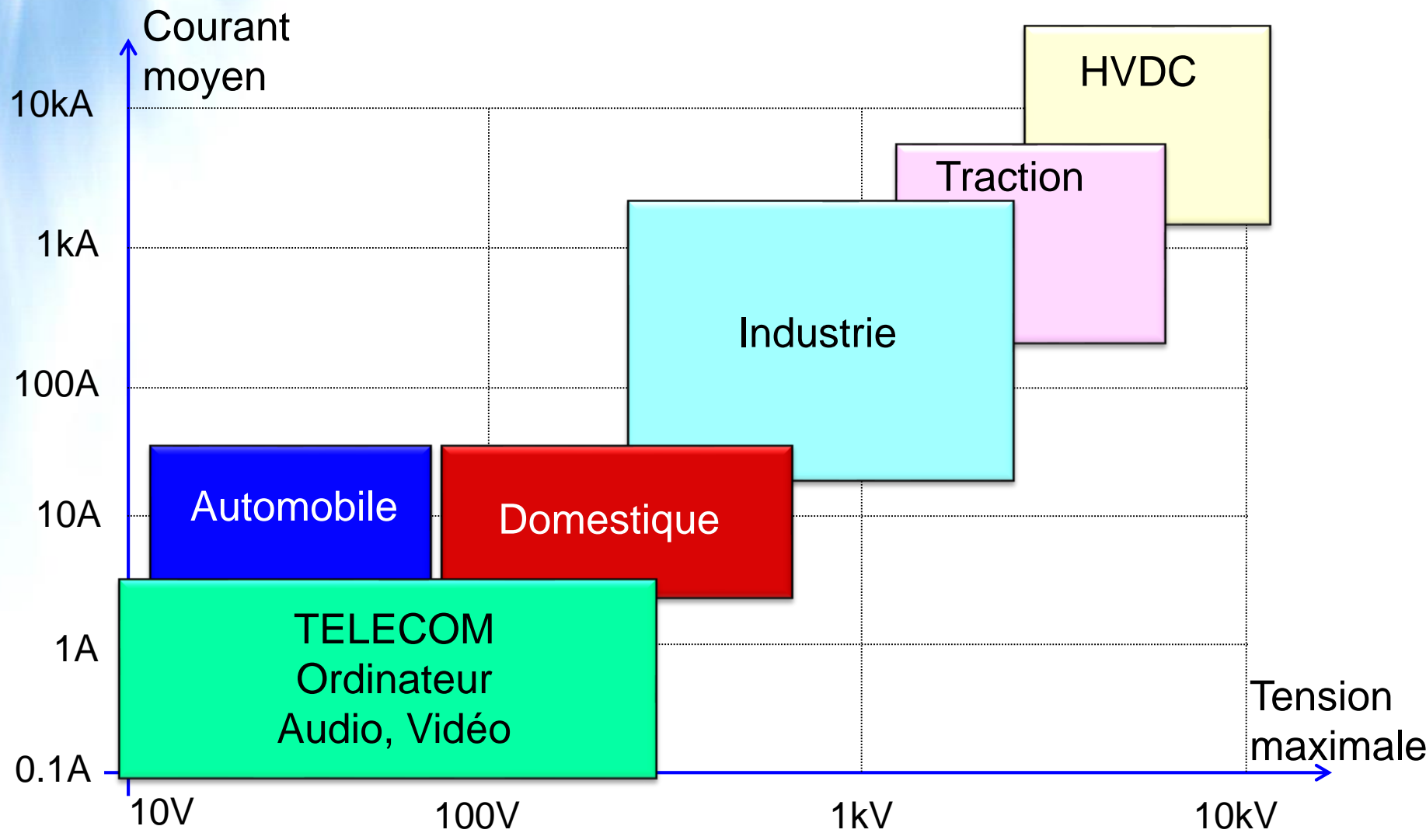
Référence	Type	$V_{CES}$ (V)	$I_C$ (A)	$V_{CEsat}$ (V)	$P_M$ (W)
1MBC10D-060	single	600	10	3	75
20MT120UF	single	1200	40	5.32	240
APT50GF120B2R	single	1200	80	2.9	390
APTGF30X60E2	3~	600	30	2	138
APTGF50H60T3	Full-Bridge	600	50	2	250
APTGF660U60D4	single	600	660	2	2770
APTGF90DH60T	Asymetrical-Bridge	600	90	2	312
BSM 100 GD 120 DN2	3~	1200	150	2.5	680

## **4. Comparaison entre les différents interrupteurs de puissance:**

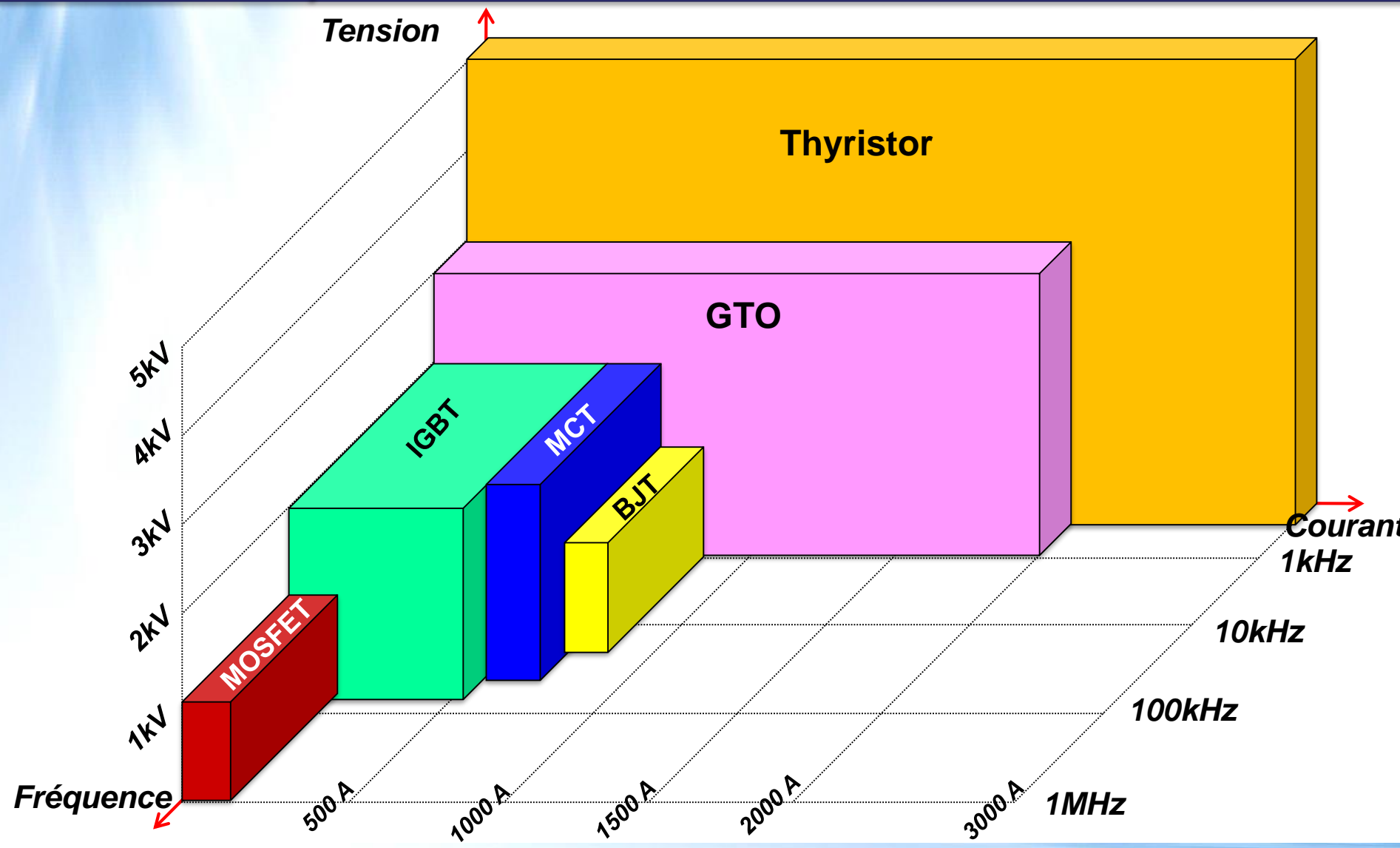
- Dans les applications industrielles, les interrupteurs de puissance électrique varie de **quelques centaines** de **mW** jusqu'à quelques **centaines de MW**.
- Le courant à commuter varie de **quelques ampères** à quelques **kilo- Ampères**.
- La tension au blocage varie de **quelques volts** à **quelques kilovolts**.
- La fréquence de commutation varie de **quelques centaines de hertz** à **quelques mégahertz**.

Interrupteur	Date d'apparition	Tension nominale	Courant nominal	Fréquence nominale	Puissance nominale	Tension directe
Thyristor (SCR)	1957	6kV	3.5kA	500Hz	100's MW	1.5-2.5V
Triac	1958	1kV	100A	500Hz	100's MW	1.5-2V
GTO	1962	4.5kV	3kA	2kHz	10's MW	3-4V
BJT (Darlington)	1960s	1.2kV	800A	10kHz	1 MW	1.5-3V
MOSFET	1976	500V	50A	1MHz	100 kW	3-4V
IGBT	1983	1.2kV	400A	20kHz	100's kW	3-4V

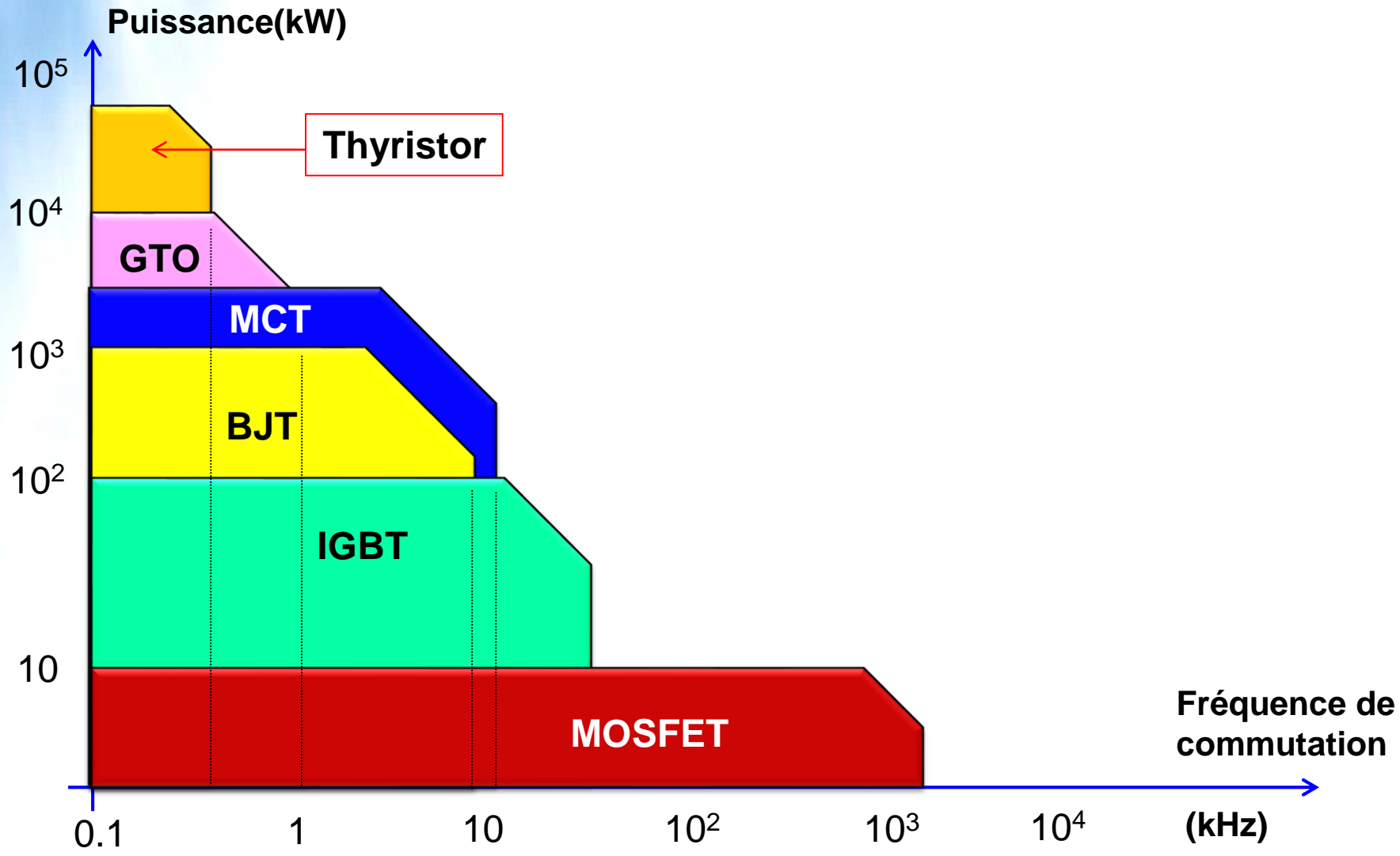
**Diagramme  $I=f(V)$  en fonction de type d'application**



**Diagramme du courant en fonction de la tension par  
type d'interrupteur ( $V=f(I)$ )**



**Diagramme de Puissance en fonction de la**  
**Fréquence par type d'interrupteur ( $P=f(F)$ )**





**FIN**

**Questions**

**?**