

# Électronique de puissance embarquée et packaging

Master M2

Cyril BUTTAY

Laboratoire Ampère, Lyon, France

14 novembre 2016



1 / 58

## Première partie I

### La commutation – composants



2 / 58

## Sommaire

Introduction

Généralités

Composants

Diode

MOSFET

IGBT

Commutation des composants

Circuits de commande

Déroulement de la commutation



3 / 58

## De quoi va t-on parler ?

- ▶ Des phénomènes qui se déroulent dans la cellule de commutation
  - ▶ le déroulement d'une commutation
  - ▶ l'effet des éléments parasites
- ▶ De la réalisation physique de cette cellule (le « packaging »)



5 / 58

## Objectifs de cette présentation

### Comprendre les paramètres influant la commutation

- ▶ Au niveau des composants
- ▶ Au niveau du convertisseur

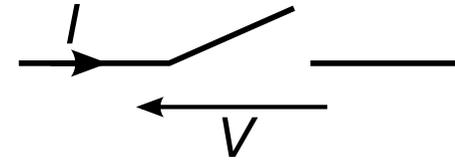
### Savoir mettre en œuvre les composants

- ▶ À quoi faire attention quand on route un circuit ?



6 / 58

## Électronique de puissance = commutation



2 états stables :

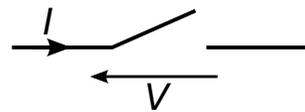
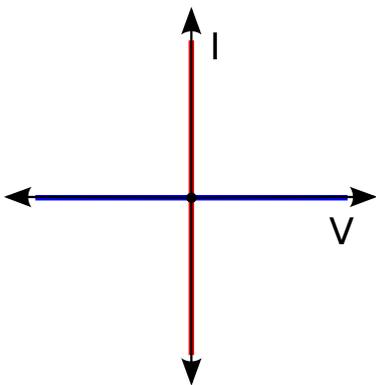
- ▶ Passant (interrupteur fermé)
  - ▶  $V = 0$
  - ▶  $I \neq 0$
- ▶ Bloqué (interrupteur ouvert)
  - ▶  $V \neq 0$
  - ▶  $I = 0$

Dans les deux états, pas de puissance dissipée :  $P = VI = 0$



8 / 58

## Les 4 quadrants



Représentation dans le plan  $(I, V)$

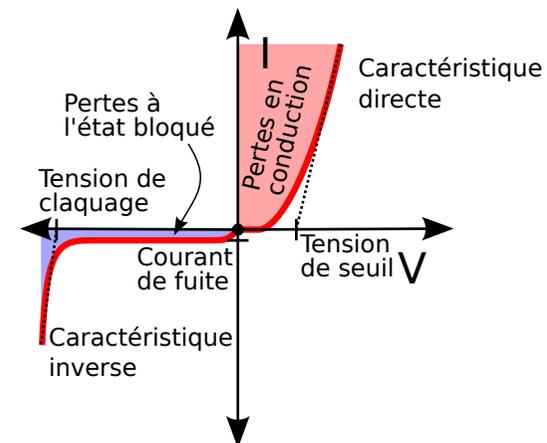
- ▶ état bloqué
- ▶ état passant

Tous les composants ne fonctionnent pas dans les 4 quadrants !



9 / 58

## Les 4 quadrants – exemple de la diode



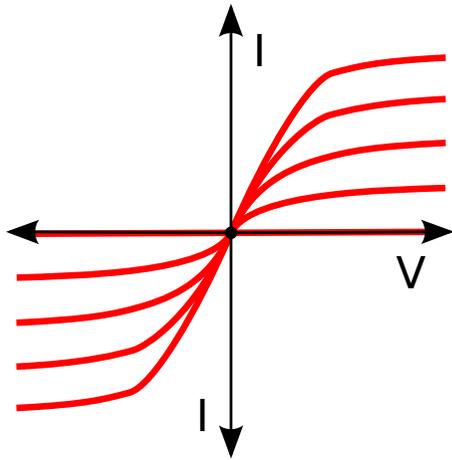
▶ attention aux ordres de grandeur :

- ▶ tension de seuil  $\approx 1$  V
- ▶ tension de claquage 100-10000 V
- ▶ courant de fuite nA- $\mu$ A
- ▶ courant direct : 1-1000 A



10 / 58

## caractéristique d'un composant pilotable

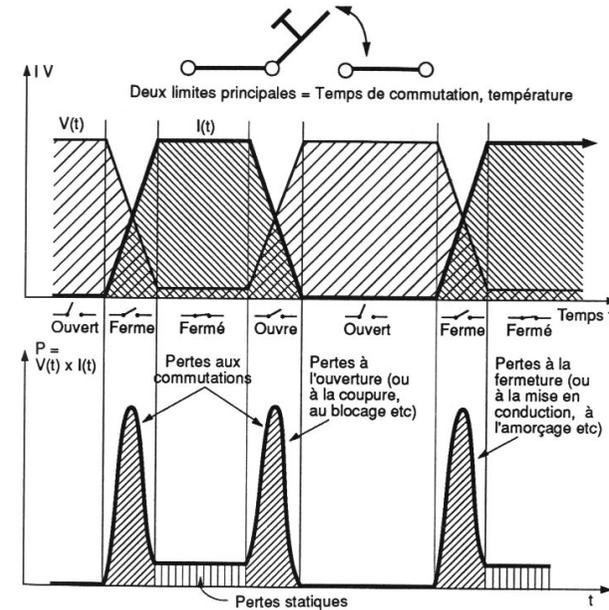


- ▶ 2, 3 ou 4 quadrants suivant le type d'interrupteur
- ▶ pilotables à l'ouverture (GTO), à la fermeture (Thyristor) ou aux deux (transistor)
- ▶ la caractéristique varie suivant le niveau sur l'électrode de commande



11/58

## La commutation



Les commutations causent :

- ▶ pertes
- ▶ perturbations EM

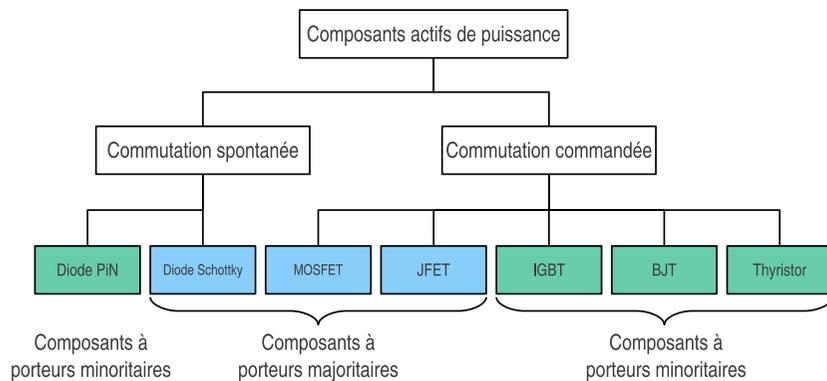
Elles dépendent des composants mais aussi du circuit

image source : "Dispositifs de l'électronique de puissance", J. Arnould et P. Merle, 1992, Hermès, Paris, tome 1, p.36)



12/58

## Familles de composants

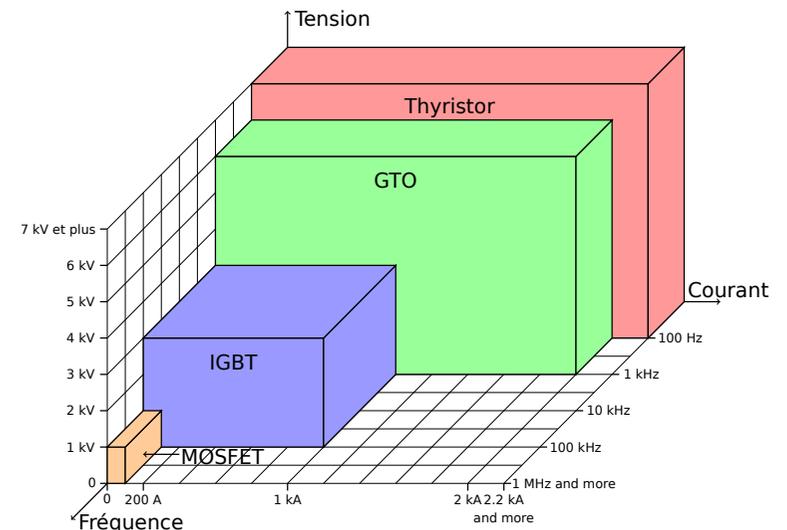


Attention : tous les composants existants ne sont pas représentés !



14/58

## Domaines d'utilisation



Note : tous les composants ne sont pas représentés, et les limites évoluent constamment !



15/58

# Sommaire

Introduction

Généralités

Composants

Diode

MOSFET

IGBT

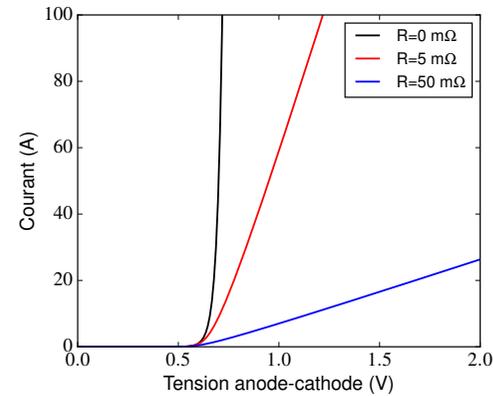
Commutation des composants

Circuits de commande

Déroulement de la commutation



# Comportement statique



$V_R$  : la **tension inverse maximale**  
(ex : 600, 1200 V)

$I_F$  : le **courant direct** (*forward*)

$V_F$  : **chute de tension à l'état passant**

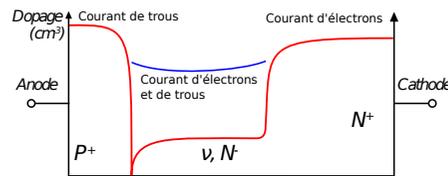
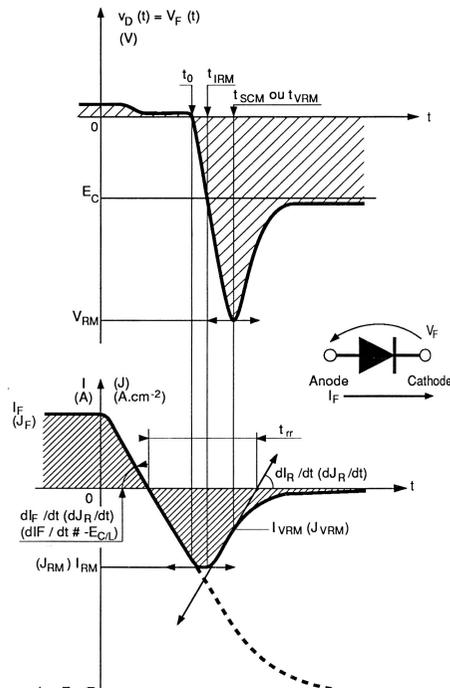
$R_D$  : **Résistance dynamique**

En théorie,  $I_F = I_S \left( e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1 \right)$ , avec  $I_S$  faible (par exemple  $10^{-10}$  A).

En pratique, la chute de tension est surtout liée aux éléments résistifs



# Comportement dynamique



- ▶ Les charges injectées durant la conduction doivent être évacuées
- Phénomène de recouvrement
- ▶ Réduction du recouvrement → dégradation conduction

image source : "Dispositifs de l'électronique de puissance", J. Arnould et P. Merle, 1992, Hermès, Paris, tome 1



# Sommaire

Introduction

Généralités

Composants

Diode

MOSFET

IGBT

Commutation des composants

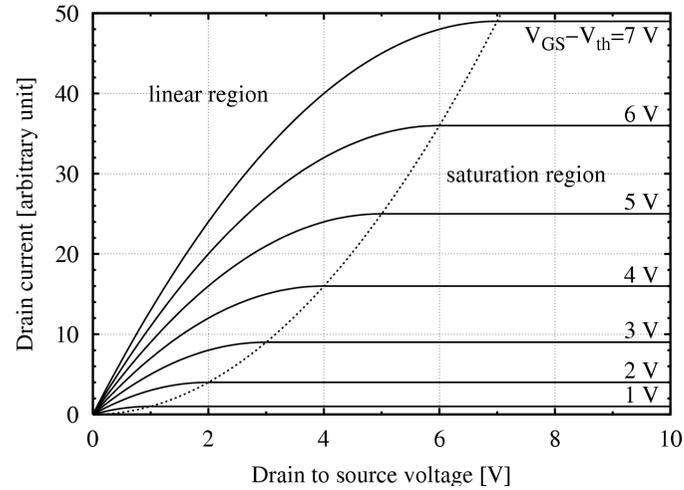
Circuits de commande

Déroulement de la commutation



# MOSFET

(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) – caractéristique directe



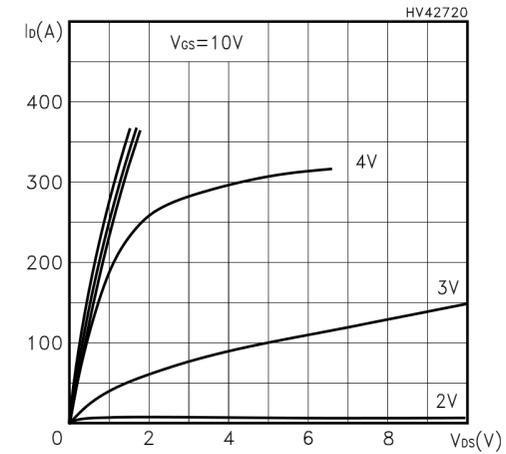
- ▶  $V_{th}$  : tension de seuil,  $V_{GS}$  tension grille source (= de commande)
- ▶ fonctionnement nominal : zone linéaire, à  $V_{GS}$  élevé
- ▶ Comportement résistif :  $V_{DS} = R_{DS_{on}} \times I_D$  dans la zone linéaire



20/58

# MOSFET

– caractéristique statique directe



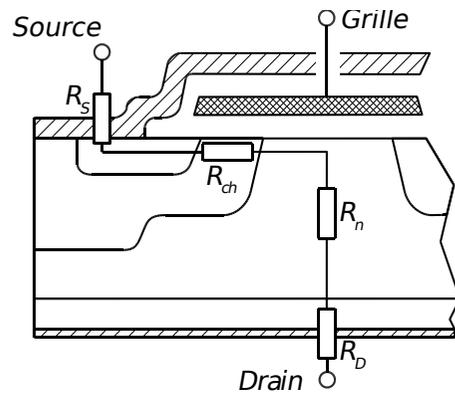
- ▶ Fonctionnement nominal en zone linéaire
- ▶  $R_{DS_{on}}$  modulée par la tension grille-source



21/58

# MOSFET

– contributions à la résistance à l'état passant



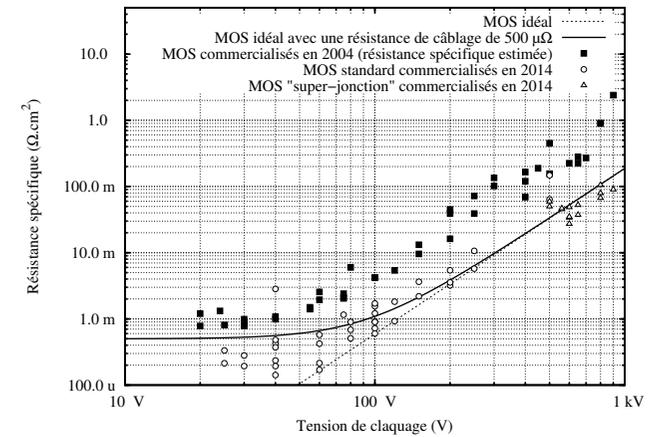
- ▶ Composant unipolaire : pas de modulation  
→ résistivité définie par le dopage
- ▶  $R_S$  : résistance de source (y compris externe)
- ▶  $R_{ch}$  : résistance du canal (modulée par la grille)
- ▶  $R_n$  : résistance de la zone  $N^-$
- ▶  $R_D$  : résistance de drain (y compris externe)



22/58

# MOSFET

– lien entre résistance et tenue en tension



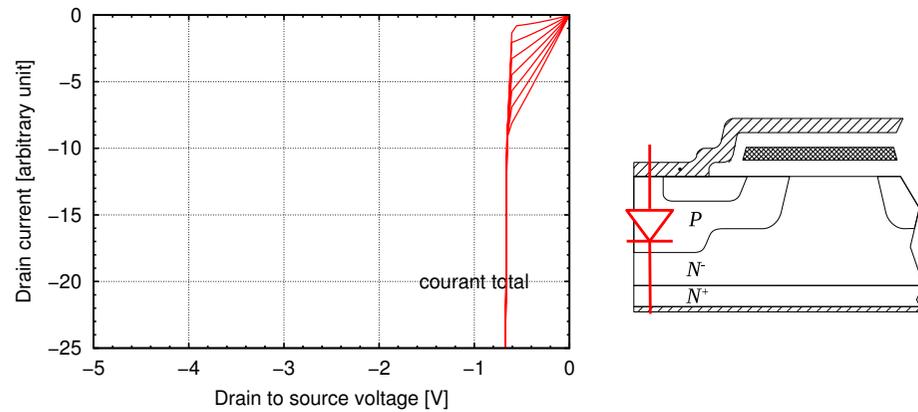
Source : données 204 C. Buttay, données 2014 : Jérémie Brunello et Julien Bourdon

- ▶ L'épaisseur de la zone  $N^-$  est liée au calibre en tension
- ▶ Augmentation de  $R_{DS_{on}}$  avec le calibre en tension
- ▶  $R_{DS_{on}} = 5.93 \cdot 10^{-9} V_{BR}^{2.5}$  (Source : Baliga)



23/58

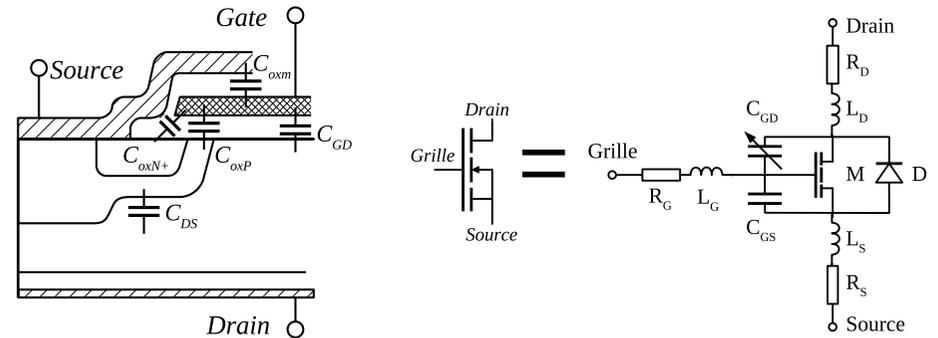
# MOSFET – comportement inverse



Le MOSFET devrait être bidirectionnel en courant (2 quadrants)  
La présence d'une diode le rend asymétrique



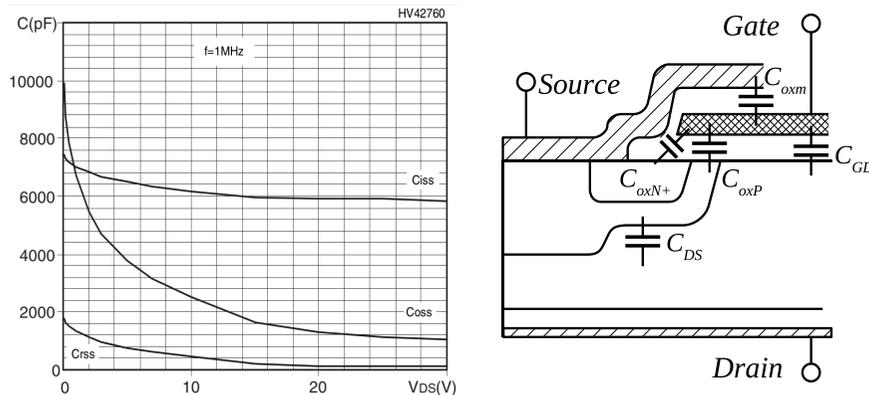
# MOSFET – capacités



Le comportement dynamique (= en commutation) est fixé par les capacités "parasites" et le câblage du composant (on y reviendra)  
On représente 3 capacités ( $C_{GS}$ ,  $C_{GD}$ , et la capacité de la diode  $C_{DS}$ ).  
Ces capacités sont non-linéaires.



# MOSFET – capacités parasites



$$C_{GS} = C_{oxN+} + C_{oxP} + C_{oxm}$$

Pour des raisons pratiques, on définit

- ▶  $C_{iss}$  (capacité vue de la grille) =  $C_{GD} + C_{GS}$
- ▶  $C_{rss}$  (capacité "reverse") =  $C_{GD}$
- ▶  $C_{oss}$  (capacité de sortie) =  $C_{GD} + C_{DS}$

Les capacités sont non-linéaires : elles varient avec la tension Source : datasheet du Mos STL150N3LLH5



# MOSFET – les caractéristiques principales

- $V_{BR}$  : la **tension maximale à l'état bloqué** (ex : 30, 200 V)
- $I_D$  : le **courant de drain maximal** supporté par le transistor :
  - ▶ donné le plus souvent à plusieurs températures, dont 25 °C
  - ▶ dépend du refroidissement (taille du radiateur, température ambiante)
- $R_{DSon}$  : **Résistance drain-source** → pertes en conduction
  - ▶ Dépend de la température, de la tension  $V_{GS}$
- $V_{th}$  (Threshold) : **tension de seuil** (tension de commutation)
- $Q_G$  : Charge nécessaire pour faire commuter le transistor
  - ▶ dépend de la tension  $V_{GS}$ , ainsi que de  $V_{DS}$  et  $I_D$
  - ▶ important pour les transistors utilisés à haute fréquence (plusieurs centaines de kHz)



# Sommaire

Introduction

Généralités

Composants

Diode

MOSFET

IGBT

Commutation des composants

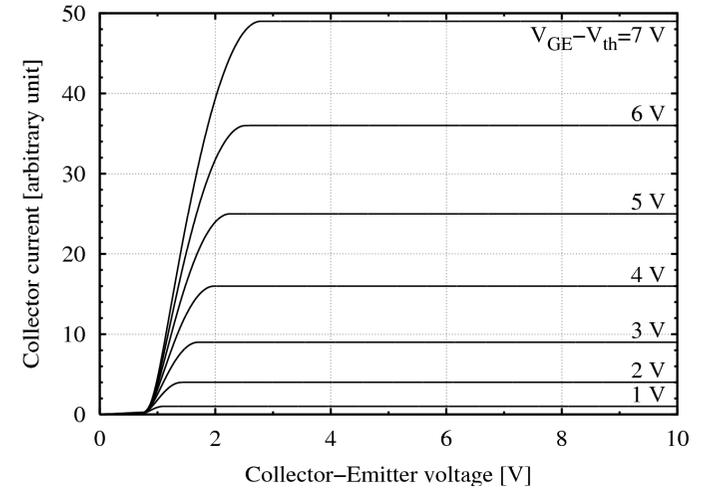
Circuits de commande

Déroulement de la commutation



28 / 58

# IGBT – caractéristique directe

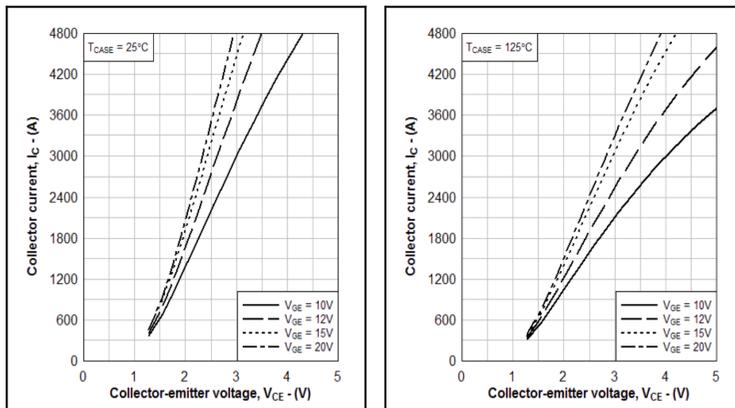


- ▶  $V_{th}$  : tension de seuil,  $V_{GS}$  tension grille source (= de commande)
- ▶ fonctionnement nominal : zone linéaire, à  $V_{GS}$  élevé
- ▶ la caractéristique à l'état passant présente un seuil ( $V_{CEsat}$ )



29 / 58

# IGBT – caractéristique statique



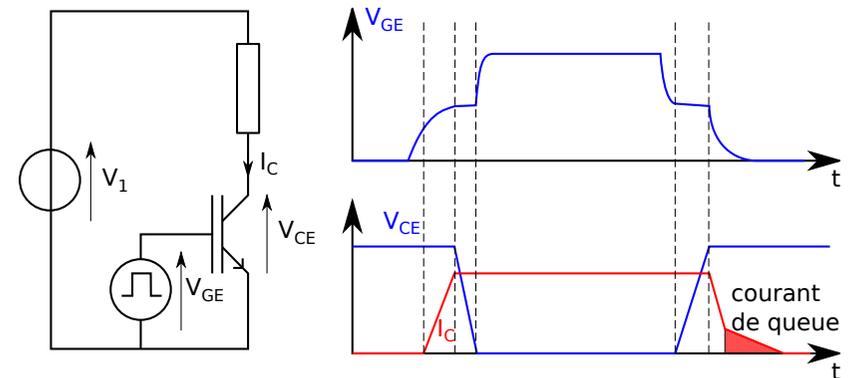
- ▶ Présence d'un seuil ( $V_{CEsat}$ ) dans la caractéristique  $I(V)$
- ▶ Modulation de la résistance dynamique en fonction de la tension grille-émetteur

Source : datasheet de l'IGBT DIM2400ESS12-A000



30 / 58

# IGBT – comportement dynamique



- ▶ Pilotage en tension (grille isolée)
- ▶ trainée de courant à l'ouverture (*tail current*) : évacuation des charges stockées
- ▶ compromis vitesse/conduction, semblable à la diode PiN



31 / 58

$V_{CE_{max}}$  la **tension maximale** supportée par l'IGBT à l'état bloqué

$I_D$  : le **courant de drain maximal** supporté par le transistor :

- ▶ donné à une température ou plus
- ▶ dépend du refroidissement (taille du radiateur, température ambiante)

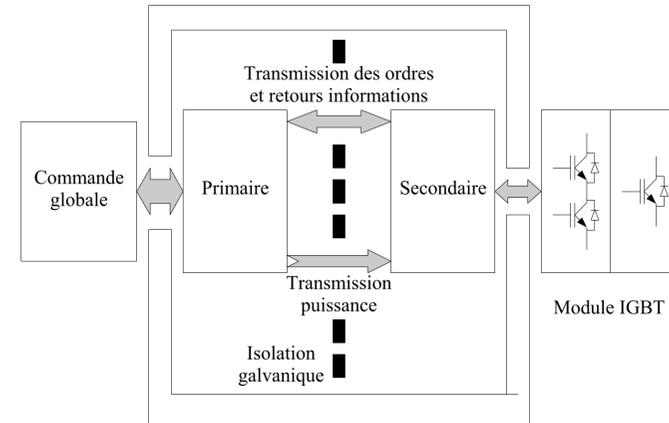
$V_{CE_{Sat}}$  : la **chute de tension à l'état passant**

- ▶ pendant de  $V_F$  pour une diode, avec le même compromis pertes en commutation/pertes en conduction

$V_{th}$  (Threshold) : **tension de seuil** (tension de commutation)

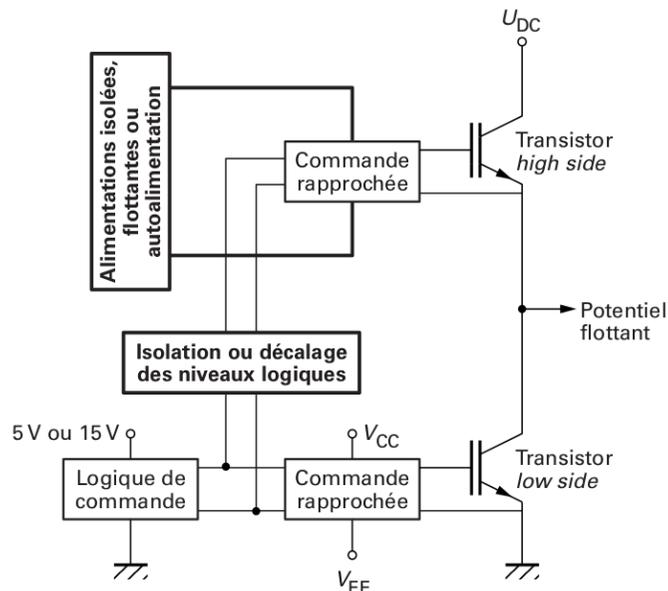
Type *punch-through/non punch-through* (PT/NPT) définit la structure du composant

- ▶ PT : faibles pertes en conduction
- ▶ NPT : meilleure tenue en court-circuit

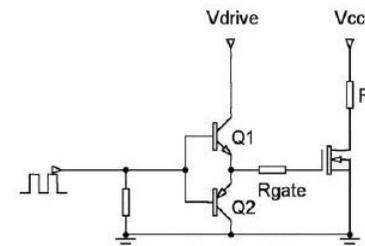


Source : Thèse Pierre Lefranc, « Étude, conception et réalisation de circuits de commande d'IGBT de forte puissance » INSA de Lyon, 2005

- ▶ Le circuit de commande (*driver*) pilote un transistor de puissance
- ▶ Des fonctions d'isolation électrique sont parfois nécessaires



Source : « MOSFET et IGBT : circuits de commande », B. Multon et S. Lefebvre, Techniques de l'ingénieur



source : Eetimes Asia

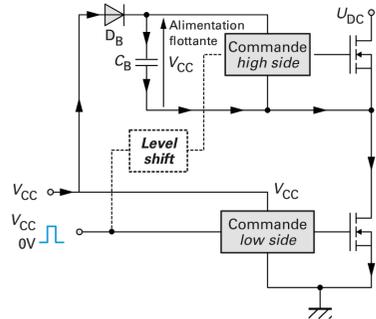
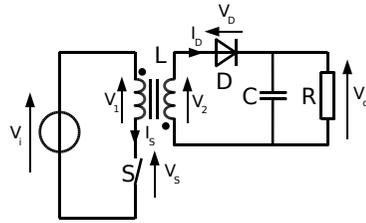
Le circuit *driver* génère la tension  $V_{GS}$  :

- ▶ Charge capacitive (MOSFET, IGBT)
  - ▶ Courant impulsionnel
  - ▶ impulsions de plusieurs ampères
- ▶ Vitesse de commutation définie par  $R_G$
- ▶ Tension  $V_{GS}$  à l'état passant définie par  $V_{Drive}$
- ▶ Tension  $V_{GS}$  à l'état bloqué 0 ou négative.
- ▶ Entrée sur niveaux logiques
- ▶ Disponible sous forme de circuits intégrés.



## Alimentation isolée

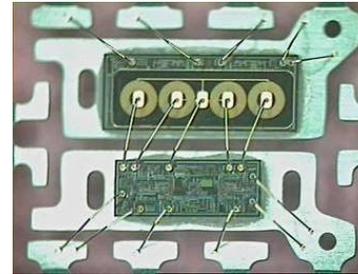
- ▶ Basée sur un convertisseur DC/DC isolé
- ▶ Adapté à toute structure
- ▶ Pas de limites sur la commande
- ▶ Complexe



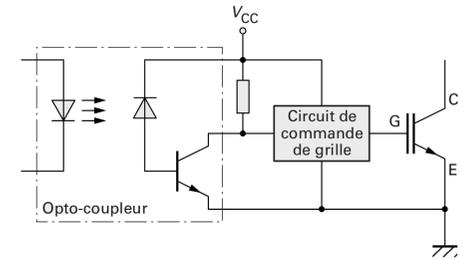
Source : « MOSFET et IGBT : circuits de commande », B. Multon et S. Lefebvre, Techniques de l'ingénieur

## Bootstrap

- ▶ adapté au bras d'onduleur
- ▶ Stockage d'énergie dans une capacité
- ▶ Recharge lorsque l'interrupteur du bas est passant



Source : « On-Chip Transformers Facilitate Integration For Isolated Power Supplies », Baoxing Chen, Analog Devices



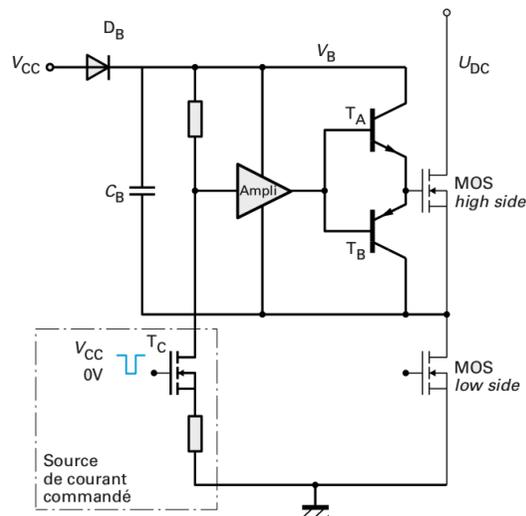
Source : « MOSFET et IGBT : circuits de commande », B. Multon et S. Lefebvre, Techniques de l'ingénieur

## Transformateur

- ▶ Nécessite une mise en forme des signaux
- ▶ Peut être intégré
- ▶ Pour les systèmes les plus simples, peut être passif

## Transmission optique

- ▶ Optocoupleurs (simples, sensible aux perturbations)
- ▶ Fibre optique (plus complexe, robuste)
- ▶ mise en forme des signaux intégrée



Source : « MOSFET et IGBT : circuits de commande », B. Multon et S. Lefebvre, Techniques de l'ingénieur

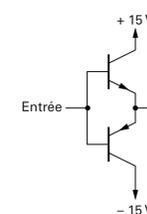
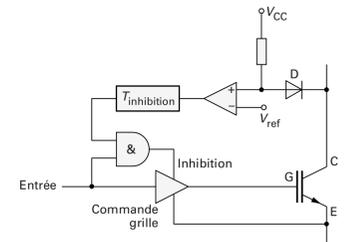
## Level-Shifter

- ▶ Transmission non isolée
- ▶ Forte impédance
- ▶ Transistor MOSFET haute tension utilisé en source de courant



## Protection contre les courts-circuits

- ▶ Mesure la tension drain source durant la commutation
- ▶ Si elle est trop forte : ouverture du transistor



## Écrêteur actif

- ▶ La diode zener fixe la tension max. à l'ouverture
- ▶ Si cette tension est dépassée, le transistor est remis en conduction

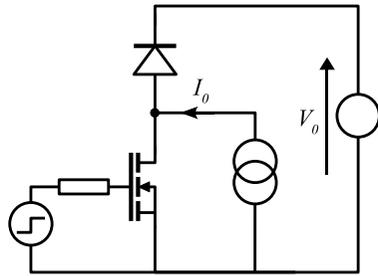
## Détection de sous-tension

- ▶ UVLO (Under-Voltage Lock-Out)
- ▶ arrêt du driver en cas d'alimentation insuffisante
- ▶ une résistance assure la connexion grille-source

Source des figures : « MOSFET et IGBT : circuits de commande », B. Multon et S. Lefebvre, Techniques de l'ingénieur



## Commutation d'un MOSFET de puissance – cellule de commutation

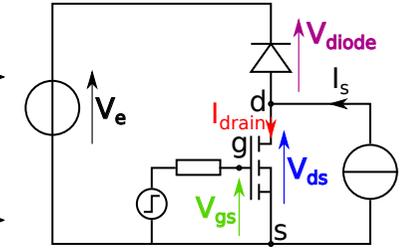
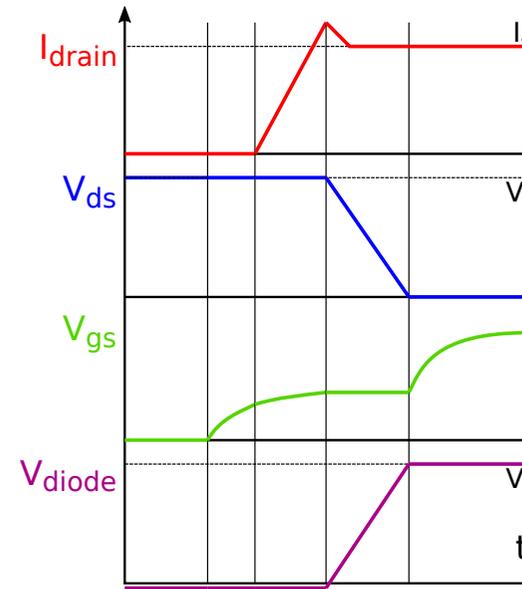


- ▶ La cellule de commutation est la “brique de base” des convertisseurs
- ▶ Connexion entre une source de courant et une source de tension



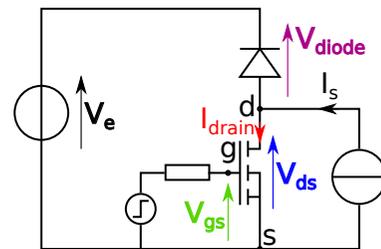
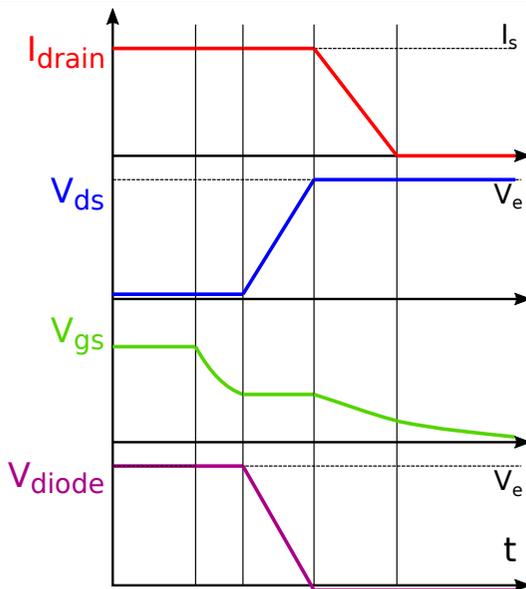
41 / 58

## Cellule de commutation – fermeture



42 / 58

## Cellule de commutation – ouverture



43 / 58

## Commutation d'un MOSFET/IGBT de puissance – effet Miller

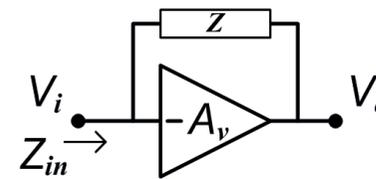


image source : wikipedia

- ▶ courant d'entrée :  $I_i = \frac{V_i - V_o}{Z} = \frac{V_i(1 + A_v)}{Z}$
- ▶ Impédance d'entrée :  $Z_{in} = \frac{V_i}{I_i} = \frac{Z}{1 + A_v}$
- ▶ si on considère que  $Z = \frac{1}{jC\omega}$
- ▶ on obtient  $C_i = C(1 + A_v)$

- ▶ Durant la commutation, on peut considérer que  $V_{DS} = k(V_{GS} - V_{TH})$
- ▶ la capacité  $C_{GD}$  apparente est multipliée par effet miller.



44 / 58