



HAL
open science

Électronique de puissance embarquée et packaging Master M2

Cyril Buttay

► **To cite this version:**

Cyril Buttay. Électronique de puissance embarquée et packaging Master M2. Master. France. 2016. cel-01539759

HAL Id: cel-01539759

<https://cel.hal.science/cel-01539759>

Submitted on 15 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

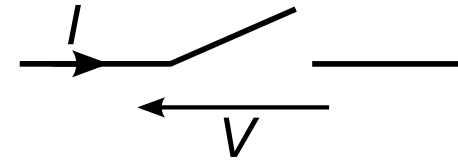
Savoir mettre en œuvre les composants

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



6 / 58

Électronique de puissance = commutation



2 états stables :

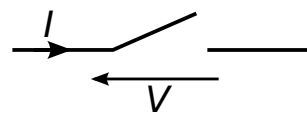
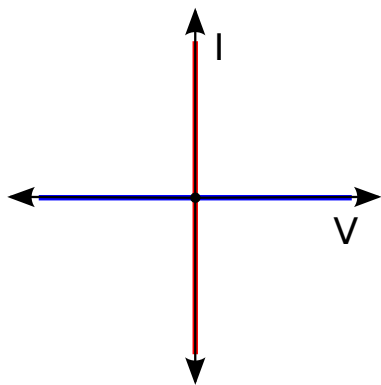
- ▶ Passant (interrupteur fermé)
 - ▶ $V = 0$
 - ▶ $I \neq 0$
- ▶ Bloqué (interrupteur ouvert)
 - ▶ $V \neq 0$
 - ▶ $I = 0$

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



8 / 58

Les 4 quadrants



Représentation dans le plan (I, V)

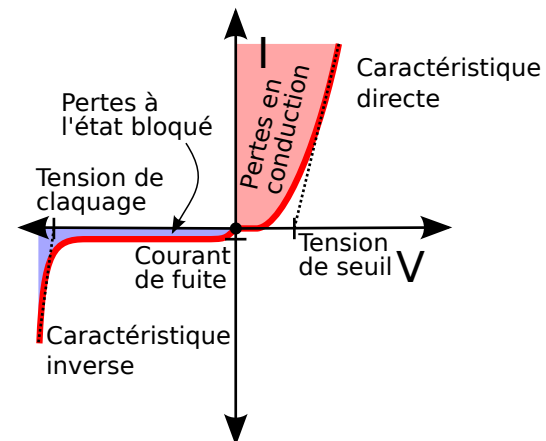
- ▶ état bloqué
- ▶ état passant

Tous les composants ne fonctionnent pas dans les 4 quadrants !



9 / 58

Les 4 quadrants – exemple de la diode



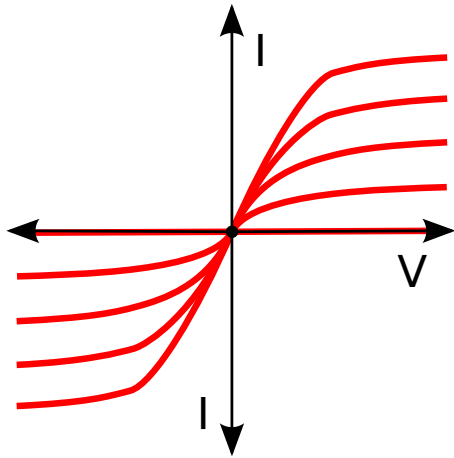
▶ attention aux ordres de grandeur :

- ▶ tension de seuil ≈ 1 V
- ▶ tension de claquage 100-10000 V
- ▶ courant de fuite nA- μ A
- ▶ courant direct : 1-1000 A



10 / 58

caractéristique d'un composant pilotable

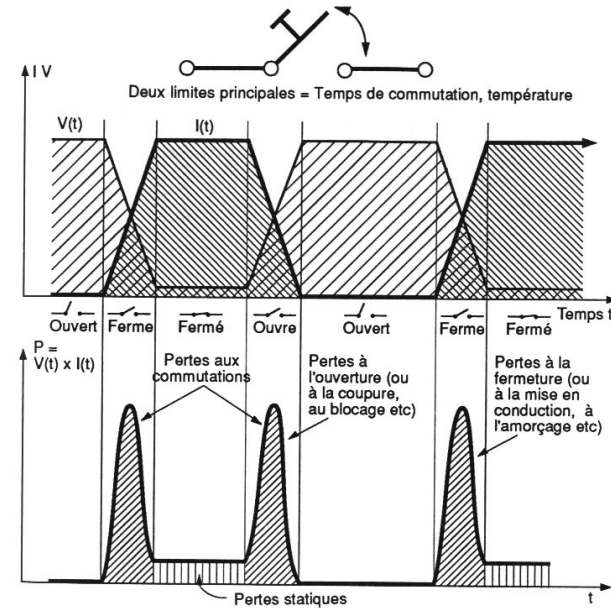


- ▶ 2, 3 ou 4 quadrants suivant le type d'interrupteur
- ▶ pilotables à l'ouverture (GTO), à la fermeture (Thyristor) ou aux deux (transistor)
- ▶ la caractéristique varie suivant le niveau sur l'électrode de commande



11/58

La commutation



Les commutations causent :

- ▶ pertes
- ▶ perturbations EM

Elles dépendent des composants mais aussi du circuit

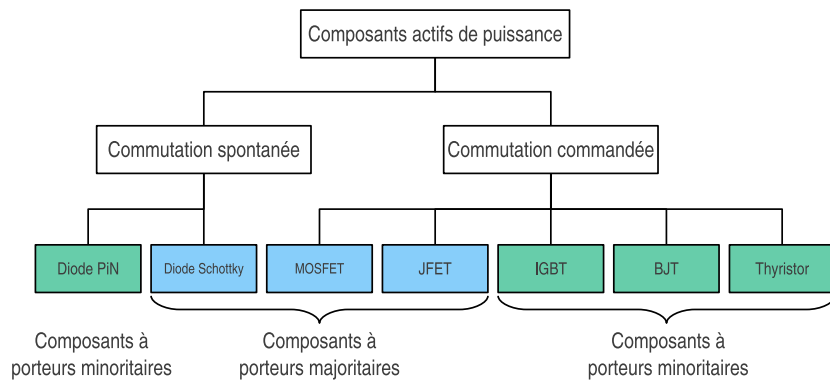
image source : "Dispositifs de l'électronique de puissance", J. Arnould et P. Merle, 1992, Hermès, Paris, tome 1, p.36)



12/58

Figure 1-4 : Possibilités de commutations réelles des DEP.

Familles de composants

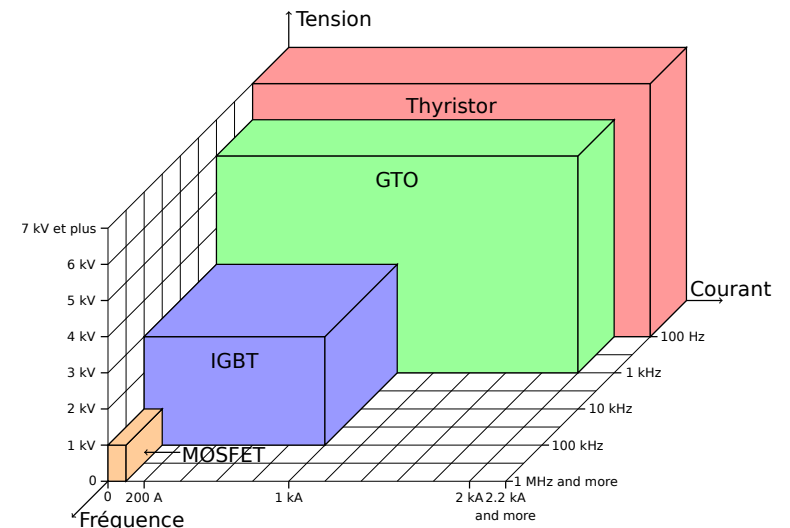


Attention : tous les composants existants ne sont pas représentés !



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

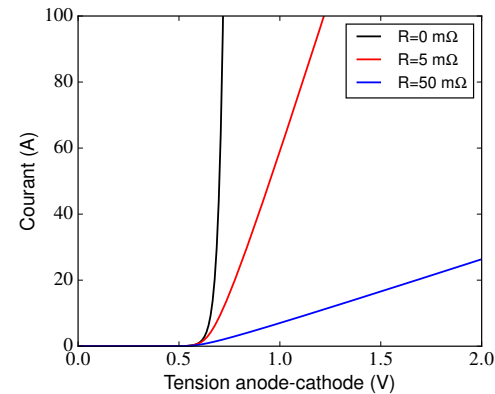
Commutation des composants

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**

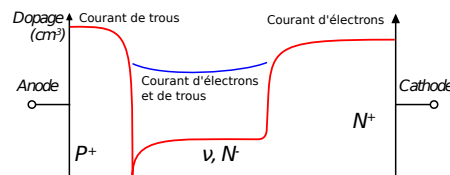
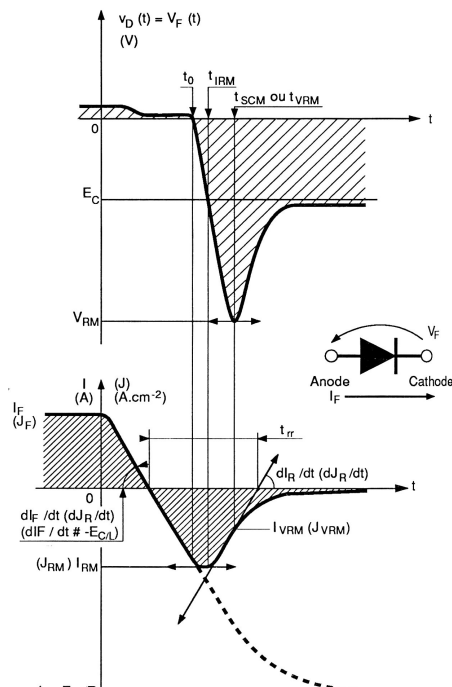
R_D : **Résistance dynamique**

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

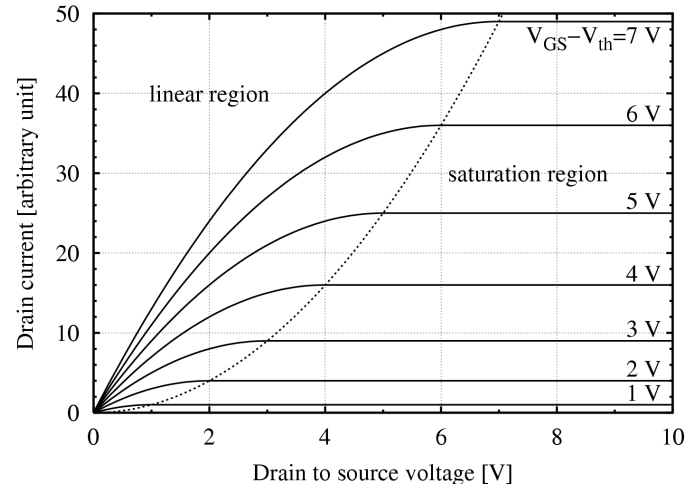
Circuits de commande

Déroulement de la commutation



MOSFET

(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) – caractéristique directe



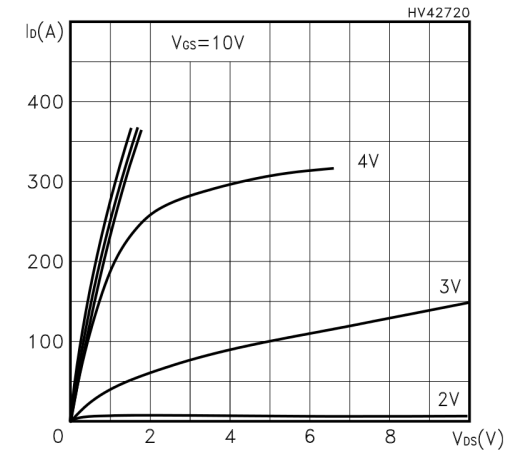
- ▶ V_{th} : tension de seuil, V_{GS} tension grille source (= de commande)
- ▶ fonctionnement nominal : zone linéaire, à V_{GS} élevé
- ▶ Comportement résistif : $V_{DS} = R_{DSon} \times I_D$ dans la zone linéaire



20/58

MOSFET

– caractéristique statique directe



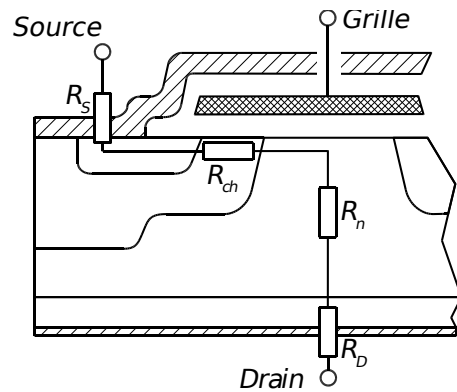
- ▶ Fonctionnement nominal en zone linéaire
- ▶ R_{DSon} modulée par la tension grille-source



21/58

MOSFET

– contributions à la résistance à l'état passant



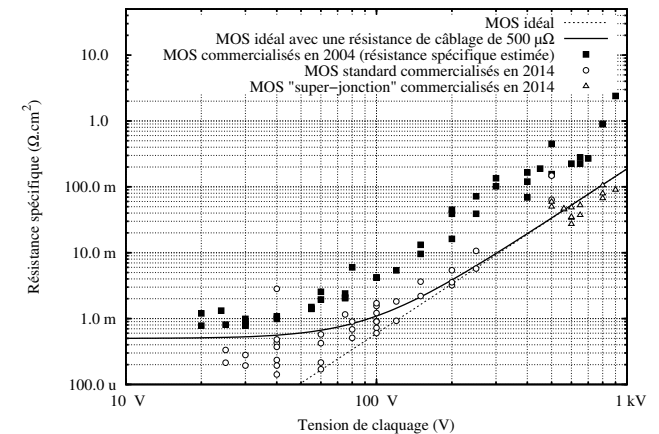
- ▶ Composant unipolaire : pas de modulation
→ résistivité définie par le dopage
- ▶ R_S : résistance de source (y compris externe)
- ▶ R_{ch} : résistance du canal (modulée par la grille)
- ▶ R_n : résistance de la zone N^-
- ▶ R_D résistance de drain (y compris externe)



22/58

MOSFET

– lien entre résistance et tenue en tension



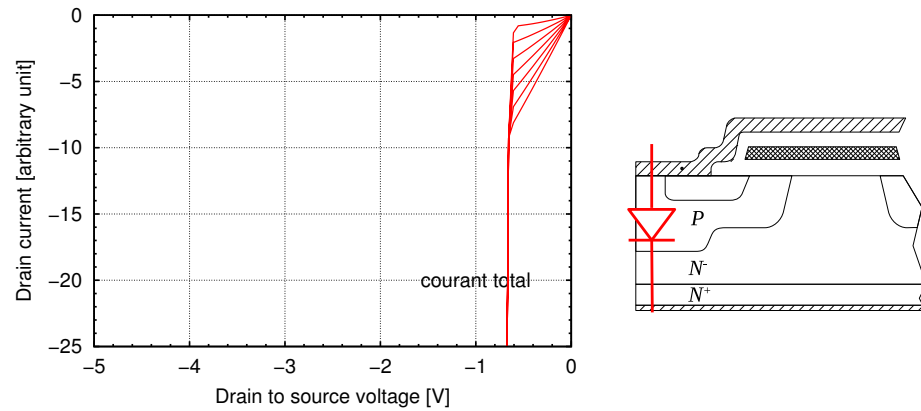
Source : données 204 C. Buttay, données 2014 : Jérémie Brunello et Julien Bourdon

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



23/58

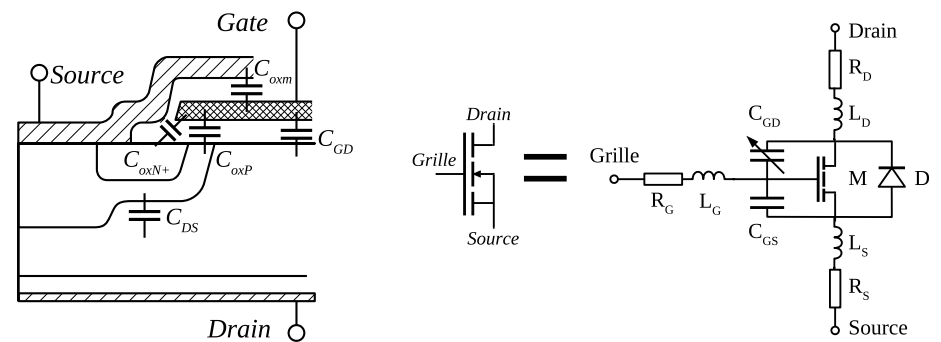
MOSFET – comportement inverse



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



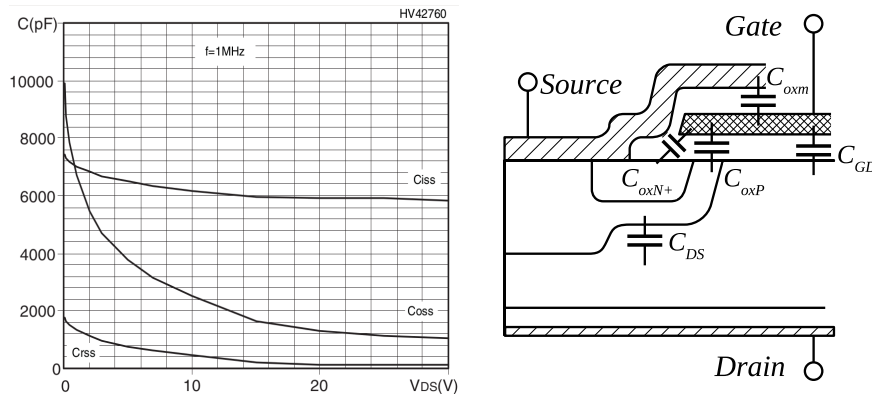
MOSFET – capacités



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

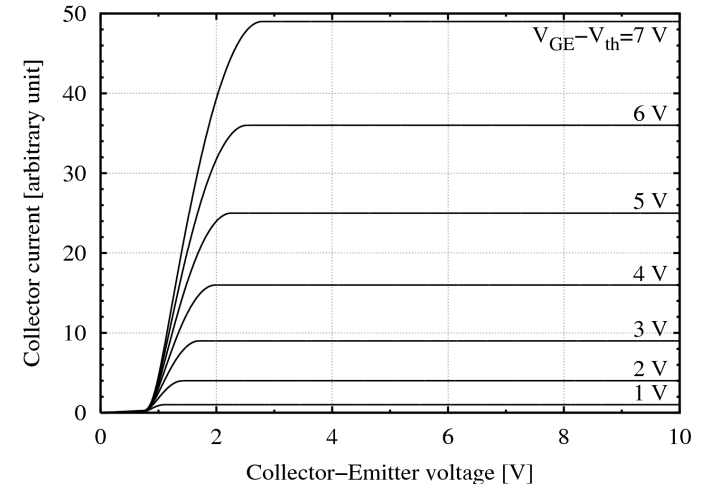
Circuits de commande

Déroulement de la commutation



28 / 58

IGBT – caractéristique directe

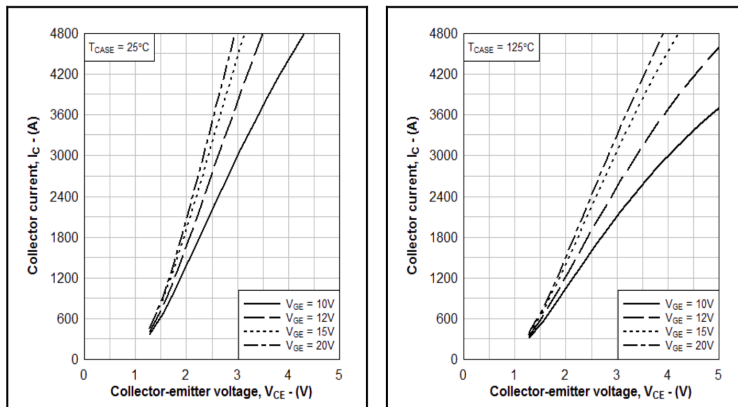


- ▶ V_{th} : tension de seuil, V_{GS} tension grille source (= de commande)
- ▶ fonctionnement nominal : zone linéaire, à V_{GS} élevé
- ▶ la caractéristique à l'état passant présente un seuil (V_{CEsat})



29 / 58

IGBT – caractéristique statique



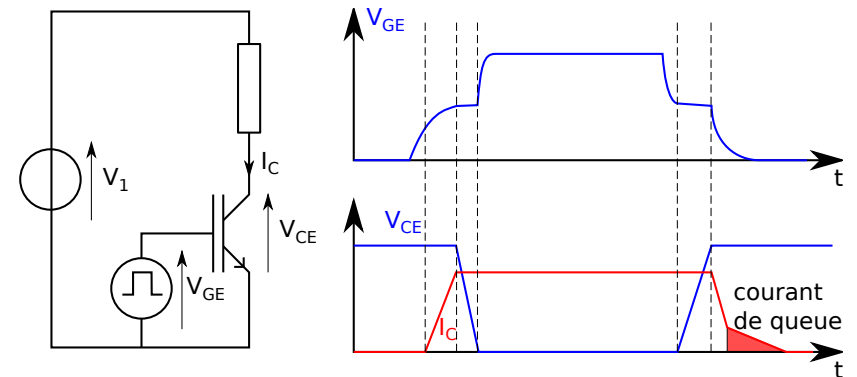
- ▶ Présence d'un seuil (V_{CEsat}) dans la caractéristique $I(V)$
- ▶ Modulation de la résistance dynamique en fonction de la tension grille-émetteur

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)

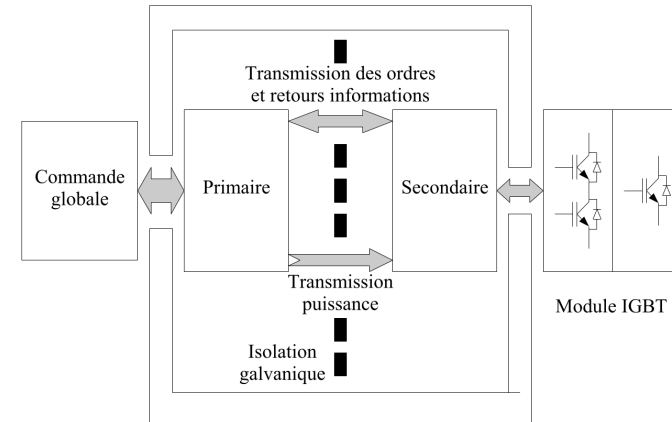
$V_{CE_{Sat}}$: la **chute de tension à l'état passant**

- ▶ 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)

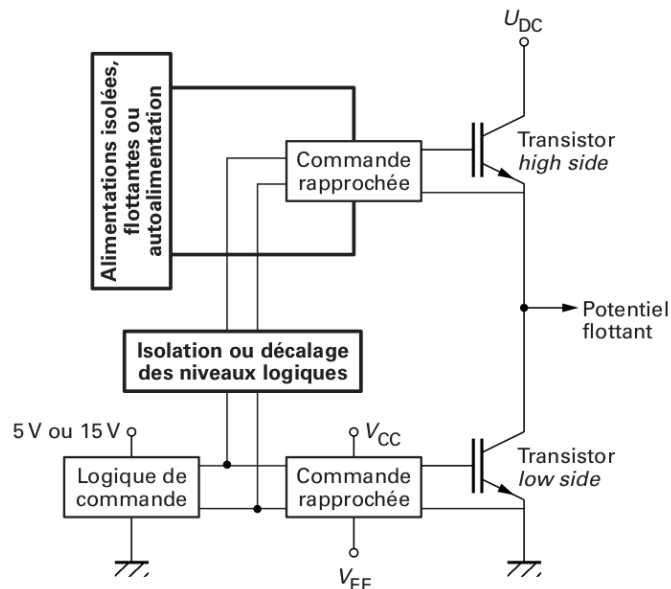
Type *punch-through/non punch-through* (PT/NPT) définit la structure du composant

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

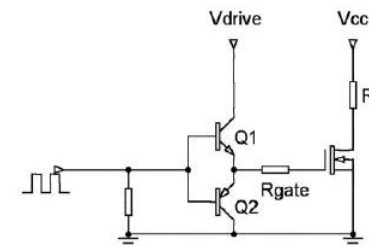


Source : Thèse Pierre Lefranc, « Étude, conception et réalisation de circuits de commande d'IGBT de forte puissance » INSA de Lyon, 2005

- ▶ 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

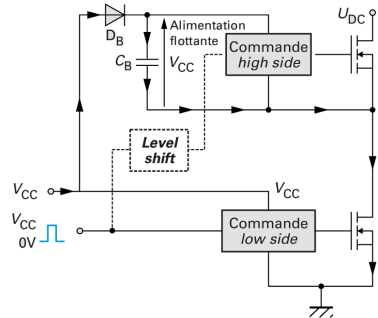
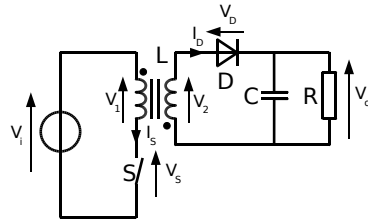
Le circuit *driver* génère la tension V_{GS} :

- ▶ 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

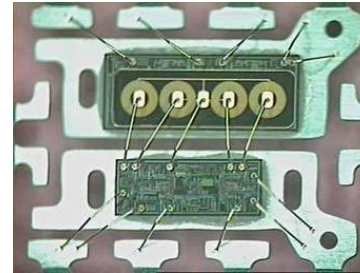
- ▶ Basée sur un convertisseur DC/DC isolé
- ▶ Adapté à toute structure
- ▶ Pas de limites sur la commande
- ▶ Complexe



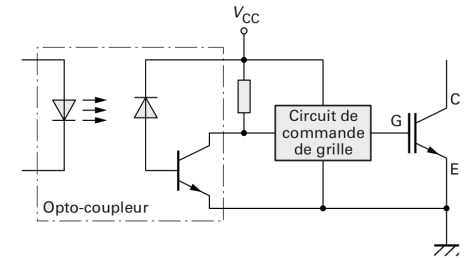
Source : « MOSFET et IGBT : circuits de commande », B. Multon et S. Lefebvre, Techniques de l'ingénieur

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



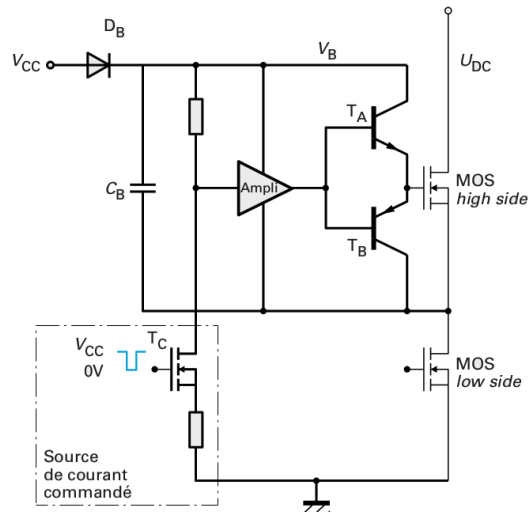
Source : « MOSFET et IGBT : circuits de commande », B. Multon et S. Lefebvre, Techniques de l'ingénieur

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

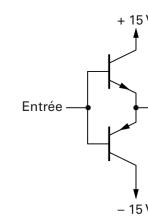
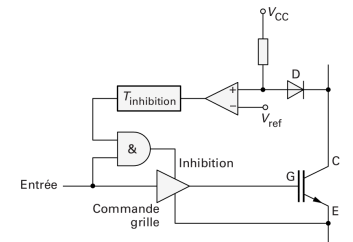
Level-Shifter

- ▶ 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

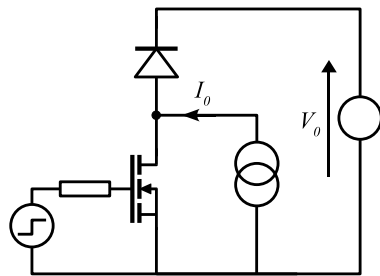
Détection de sous-tension

- ▶ 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

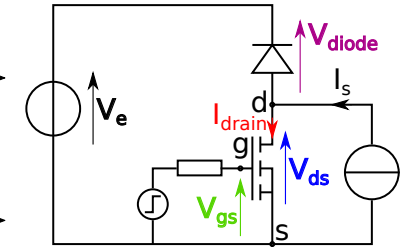
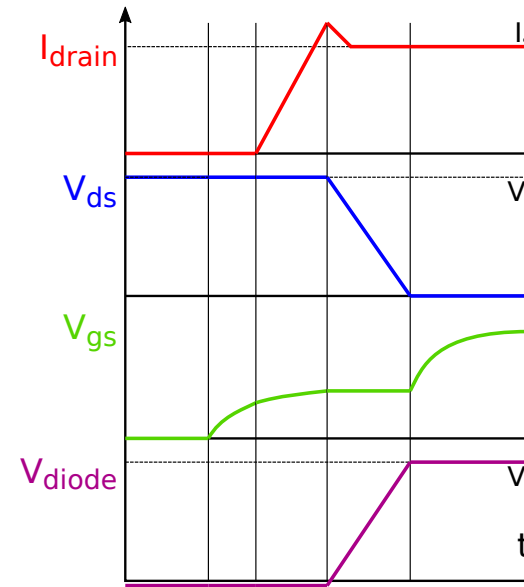


- ▶ La cellule de commutation est la “brique de base” des convertisseurs
- ▶ Connexion entre une source de courant et une source de tension



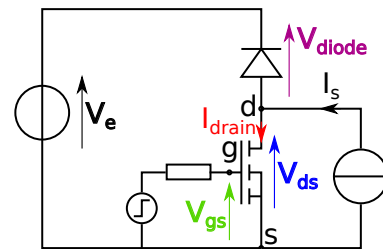
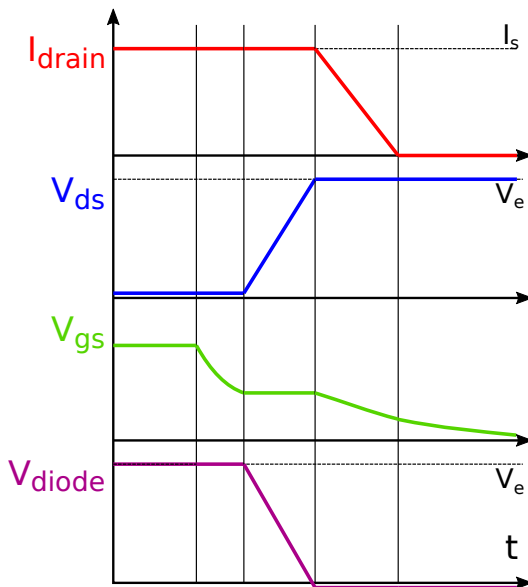
41 / 58

Cellule de commutation – fermeture



42 / 58

Cellule de commutation – ouverture



43 / 58

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

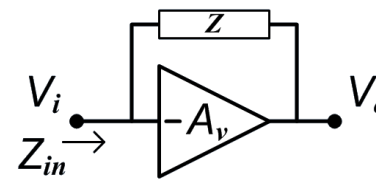


image source : wikipedia

- ▶ 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 $Z = \frac{1}{j\omega C}$
- ▶ 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