



**HAL**  
open science

# Composants Actifs pour l'Électronique de puissance Master M1

Cyril Buttay

► **To cite this version:**

Cyril Buttay. Composants Actifs pour l'Électronique de puissance Master M1. Master. France. 2017. cel-01539770

**HAL Id: cel-01539770**

**<https://cel.hal.science/cel-01539770>**

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.

# Composants Actifs pour l'Électronique de puissance

Master M1

Cyril BUTTAY

Laboratoire Ampère, Lyon, France

7 mars 2017



1 / 154

## Première partie I

# Structure des composants de puissance



2 / 154

## Sommaire

Introduction

Généralités

Structure des composants

Rappels

Cas de la diode bipolaire

Quelques composants commandables

Éléments de technologie



3 / 154

## Qui suis-je ?

- ▶ Chercheur CNRS au laboratoire Ampère, à l'INSA
  - ▶ Sujet de recherche : électronique de puissance, particulièrement le *packaging* pour la haute température.
- ▶ Contacts :
  - ▶ Vous êtes bienvenus !
  - ▶ (04 72 43) 79 63
  - ▶ [cyril.buttay@insa-lyon.fr](mailto:cyril.buttay@insa-lyon.fr)
  - ▶ Bureau : 3<sup>ème</sup> étage, bât L de Vinci

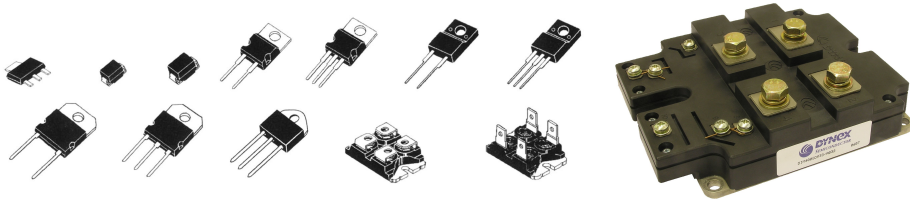


5 / 154

# De quoi va t-on parler ?

## Des composants actifs (diodes, transistors, ...) de puissance

- ▶ leur structure
- ▶ leur fabrication, leur technologie
- ▶ leurs différences



# Objectifs de cette présentation

## Savoir choisir un composant actif de puissance

- ▶ Grandeurs associées aux composants actifs de puissance
- ▶ En connaître les différentes familles

## Vous donner des éléments de technologie

- ▶ Savoir comment est fabriqué un composant
- ▶ Voir l'influence de la fabrication sur les performances

## Discuter un peu des développements futurs

- ▶ Quels sont les axes de recherche ?
- ▶ Quelles sont les évolutions à venir ?



# Tendances de l'électronique de puissance

## Nouvelles applications

### Énergies renouvelables



Source : wikipedia

- ▶ Adaptation de sources au réseau
  - ▶  $\neq$  tensions
  - ▶ DC vers AC ou variation de fréquence
- ▶ Optimisation de la source
  - ▶ Point de fonctionnement optimal

### Automobile

- ▶ Véhicules hybrides/électriques
- ▶ Haut rendement
- ▶ Bas coût



Source : wikipedia

### Aéronautique



- ▶ Augmentation de la puissance



# Tendances de l'électronique de puissance

## Élargissement des domaines d'application

mW-W



Téléphone portable Source : wikipedia

W-kW



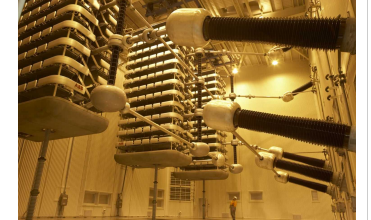
Alim. de portable Source : wikipedia

kW-MW



Variateur de vitesse Source : wikipedia

MW-GW



Station du réseau HVDC néo-zélandais (350 kV) Source : wikipedia

- ▶ Mêmes principes à toutes les échelles
- ▶ Multiplication des convertisseurs
- ▶ Apport de nouvelles fonctionnalités au système
  - ▶ vitesse variable
  - ▶ véhicule hybride



# Tendances de l'électronique de puissance

Amélioration des performances

## Compacité

- ▶ Augmentation des densités de puissance
- ▶ Augmentation de tension/courant/fréquence

## Rendement

- ▶ Réduction des pertes, donc du refroidissement
- ▶ Augmentation d'autonomie...

## Fiabilité

- ▶ Résistance au cyclage thermique
- ▶ Très longue durée de vie (30 ans)



# Électronique de signal et électronique de puissance

## Électronique signal :

- ▶ Notion principale : **le signal**
- ▶ Objectif : traiter l'information sans la dégrader
  - ▶ amplification
  - ▶ numérisation
  - ▶ etc.

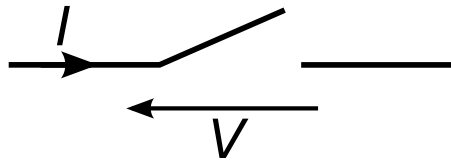


## Électronique de puissance :

- ▶ Notion principale : **le rendement**
- ▶ Objectif : convertir la puissance sans en perdre
  - ▶ abaisser la tension
  - ▶ changer la fréquence
  - ▶ etc.



# Électronique de puissance = commutation



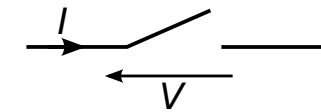
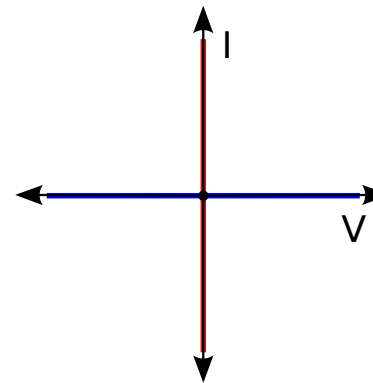
2 états stables :

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

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



# Les 4 quadrants



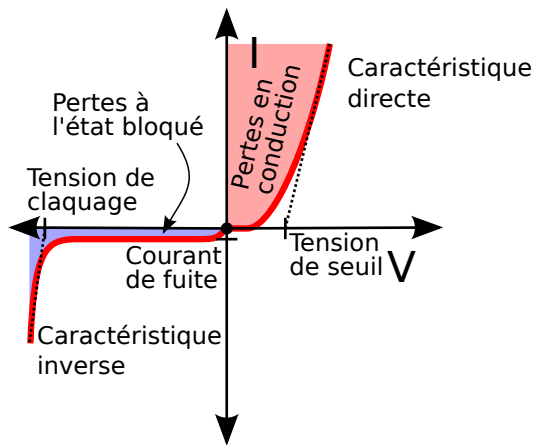
Représentation dans le plan  $(I, V)$

- ▶ état bloqué
- ▶ état passant

Tous les composants ne fonctionnent pas dans les 4 quadrants !



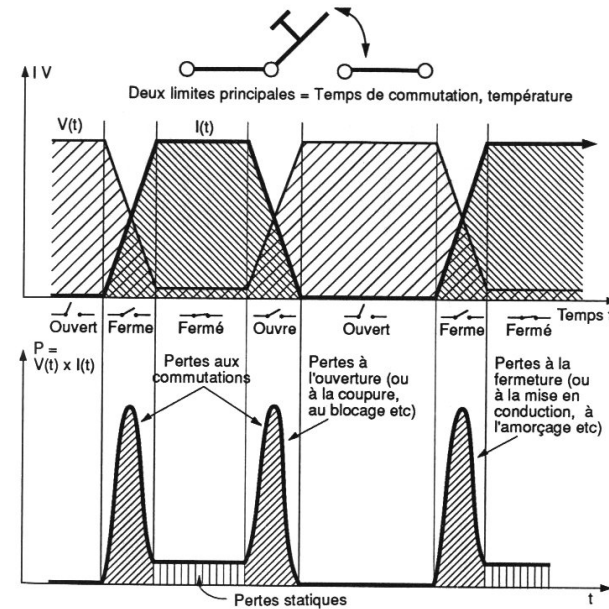
## Les 4 quadrants – exemple de la diode



- ▶ attention aux ordres de grandeur :
  - ▶ tension de seuil  $\approx 1 \text{ V}$
  - ▶ tension de claquage 100-10000 V
  - ▶ courant de fuite nA- $\mu\text{A}$
  - ▶ courant direct : 1-1000 A



## La commutation



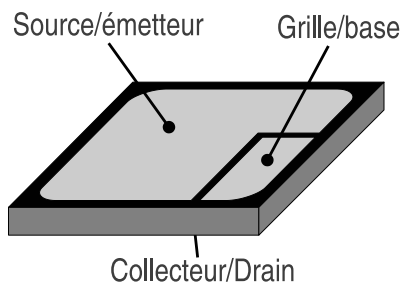
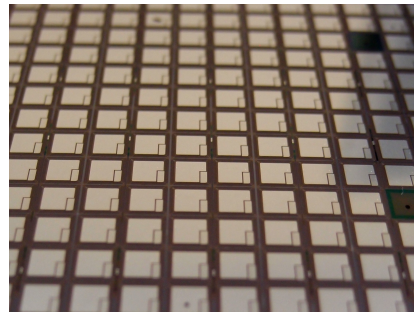
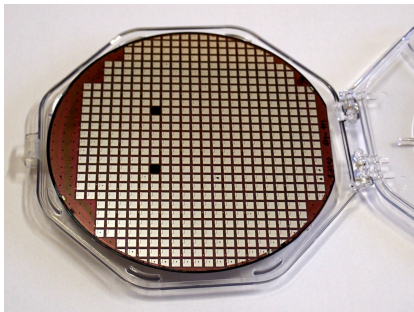
- Les commutations causent :
- ▶ pertes
  - ▶ perturbations EM
- Elles dépendent des composants mais aussi du circuit

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



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

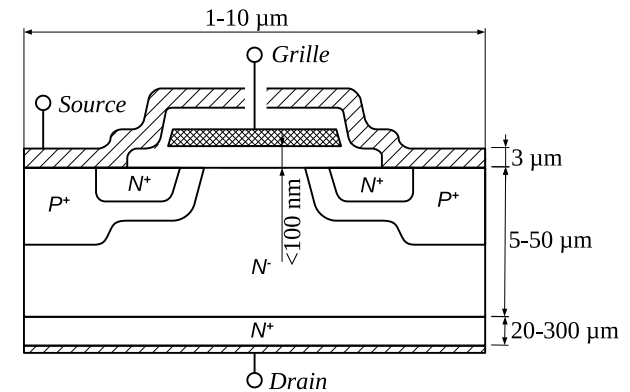
## Géométrie des composants de puissance



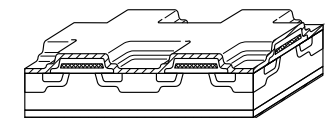
- ▶ 1 ou 2 électrodes au-dessus, une en-dessous
- ▶ 50-400  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, 1-10000  $\text{mm}^2$  de surface
- ▶ surface  $\propto$  courant direct
- ▶ épaisseur dépend de la tension et de la fabrication



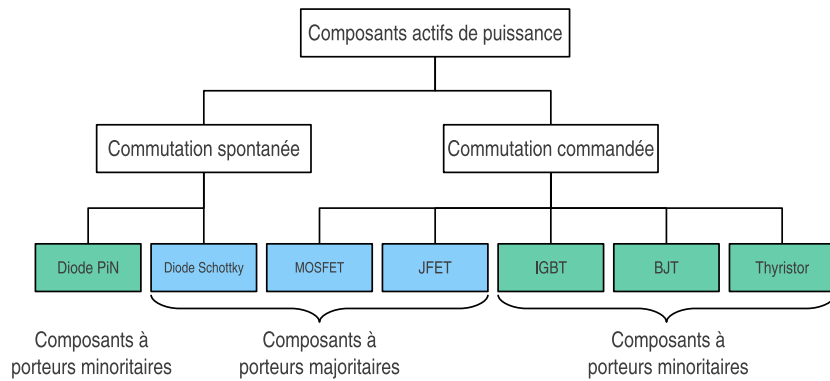
## Dimensions des composants



Les schémas de structure ne sont **jamais** à l'échelle !  
attention aussi aux structures cellulaires (on ne représente qu'une cellule)



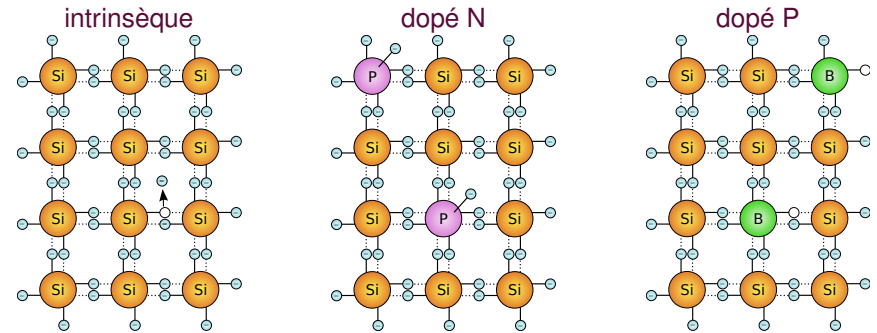
# Familles de composants



Attention : tous les composants existants ne sont pas représentés !



# Rappels de physique du semiconducteur – le dopage

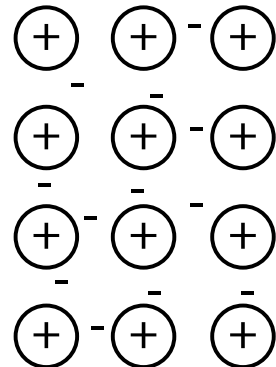
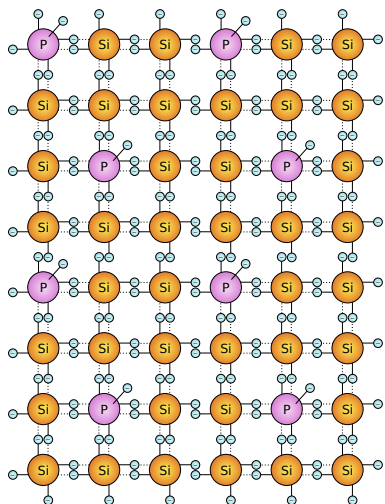


- ▶ l'agitation thermique crée des paires électrons-trous  
 $n_i \propto e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ ,  $k$  constante de Boltzmann,  $T$  température absolue,  $E_g$  largeur de bande interdite. pour Si,  $n_i \approx 10^{10} \text{cm}^{-3}$  à 300K
- ▶ ajout d'atomes pentavalents (donneurs) : excès d'électrons, dopage N
- ▶ ajout d'atomes trivalents (accepteurs) : excès de trous, dopage P
- ▶ Ordres de grandeur : Si :  $10^{23}$  atomes/cm<sup>3</sup>. Densité de dopants :  $10^{16}$  à  $10^{19}$ /cm<sup>3</sup>

images wikipedia modifiées : semiconducteur intrinsèque, type N et type P.



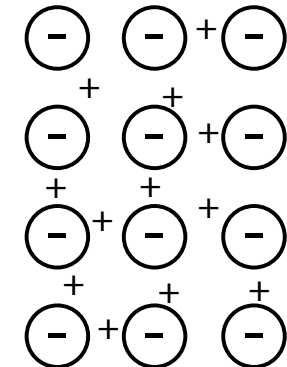
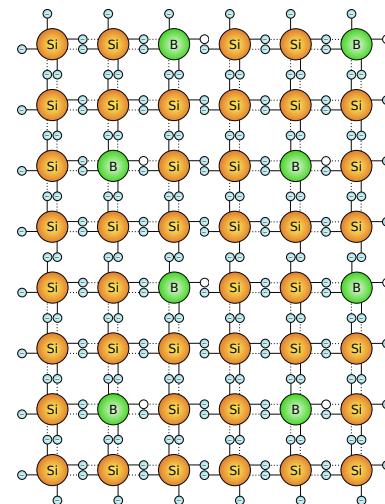
# Rappels de physique du semiconducteur – électrons et trous 1



- ▶ Charges positives fixes
- ▶ Charges négatives mobiles
- ▶ au repos, neutralité électrique
- ▶ électrons évacuées : charge d'espace positive

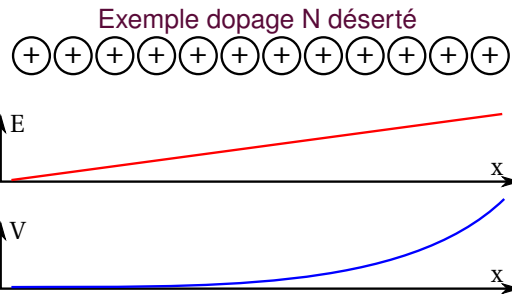


# Rappels de physique du semiconducteur – électrons et trous 2



- ▶ Charges négatives fixes
- ▶ Charges positives mobiles
- ▶ au repos, neutralité électrique
- ▶ trous évacuées : charge d'espace négative





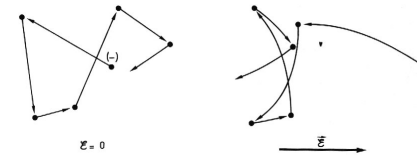
- Densité de dopants :  $N_D$  (resp.  $N_A$ )
- $\epsilon$  permittivité électrique
- $q$  charge électronique
- on considère une structure unidimensionnelle selon  $x$

$$E(x) = \int_0^x \frac{q}{\epsilon} N_D dx = \frac{q}{\epsilon} N_D x$$

$$V(x) = \int_0^x E(x) dx = \frac{q}{2\epsilon} N_D x^2$$



## Courant de dérive



$$J_n = q\mu_n n E$$

$$J_p = q\mu_p p E$$

$$J_{drift} = J_n + J_p$$

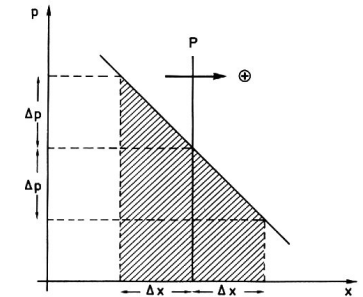
pour Si,  $\mu_n \approx 3\mu_p$

$n$  densité d'électrons libres,  $p$  densité de trous,  $\mu$  mobilité,  $E$  champ électrique,  $J$  densité de courant,  $D$  constante de diffusion

source : "Physique des composants actifs à semiconducteurs", P. Leturq, 1978, Dunod, Paris



## Courant de diffusion



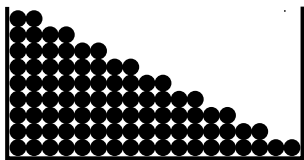
causé par un gradient de densité de charges

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_{diff} = J_n + J_p$$

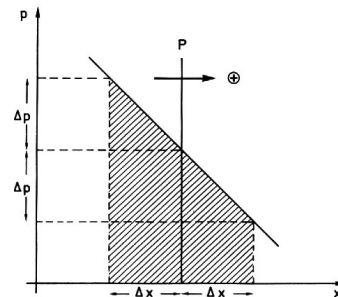
Analogie : tas de sable



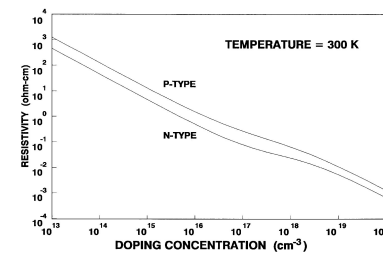
- sous l'effet de vibrations, le tas s'aplatit
- probabilité identique qu'un grain aille à gauche ou à droite
- mouvement net vers la droite

Dans le cas des charges :

- pas d'effet de la pesanteur
- mouvement causé par l'agitation thermique



La conduction est assurée par les charges **mobiles**  
2 mécanismes :



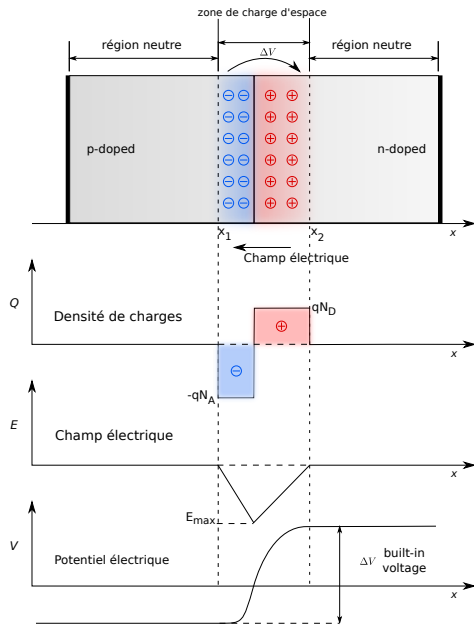
- Définition de résistivité par dopage
- Paramètre permanent
- Seul mécanisme dans les composants unipolaires (= à porteurs majoritaires, ex : MOSFET)

- Variation de résistivité par injection de charges (=modulation)
- Temporaire, réversible
- Présence simultanée des deux types de porteurs libres (électrons et trous)
- Effet très important dans les composants bipolaires (= à porteurs minoritaires, ex : IGBT, diode)

Source : "Power Semiconductor Devices", B. J. Baliga, PWS publishing company, 1995



# Jonction PN au repos



Gradient de dopage → diffusion

► équilibre → neutralité

$$\int_{x_1}^{x_2} qN(x).dx = 0$$

$$N_A x_1 = N_D x_2$$

► champ nul hors ZCE

$$E = -\frac{dV}{dx} = 0 \text{ en } x_1 \text{ et } x_2$$

► champ max en  $x=0$

$$E_{max} = \frac{q}{\epsilon} N_A x_1 = \frac{q}{\epsilon} N_D x_2$$

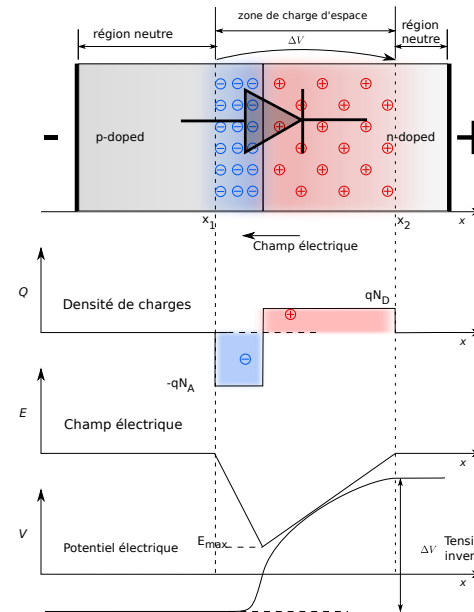
► Un potentiel se développe :

$$\Delta V = \frac{1}{2} E_{max} (x_2 - x_1)$$

source : modifié à partir de wikipedia



# Polarisation inverse



- lorsque V augmente, la zone désertée s'élargit
- si les dopages sont asymétriques, la zone la moins dopée supporte la plus grande tension
- limite : champ de claquage
- un matériau moins dopé supporte une plus forte tension à  $E_{max}$  équivalent

source : modifié à partir de wikipedia



# Exercices

On considère une jonction PN avec des dopages P ( $N_A$ ) très largement supérieurs au dopage N ( $N_D$ )

- dessinez le profil du champ électrique de cette jonction. On nommera  $-E_{max}$  la valeur de  $E$  à l'interface P/N
- donnez l'expression de  $E(x)$  en considérant  $x = 0$  à l'interface P/N
- donnez l'expression de la largeur de la zone de charge d'espace  $w$
- donnez l'expression de la tension supportée par la jonction

En considérant  $\epsilon_r = 11,7$  pour le silicium,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ F.cm}^{-1}$ ,  $q = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , un niveau de dopage de  $10^{14} \cdot \text{cm}^{-3}$  et un champ de claquage  $E_{BD} = 2.10^5 \text{ V.cm}^{-1}$

- Donnez la largeur de la zone de charge d'espace et la tension maximale que cette jonction peut supporter.



# Sommaire

Introduction

Généralités

Structure des composants

Rappels

Cas de la diode bipolaire

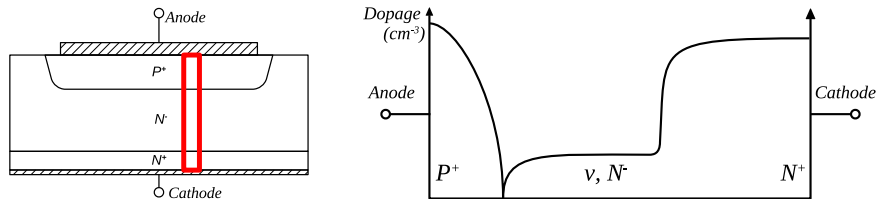
Quelques composants commandables

Éléments de technologie





## La diode bipolaire, base des composants actifs

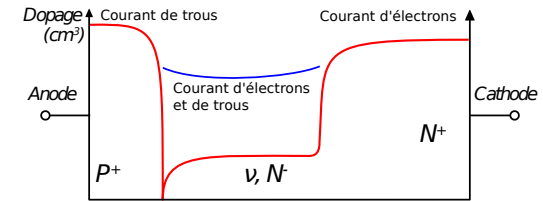


- ▶ présente dans (presque) toutes les structures
- ▶ Jonction PN avec zone faiblement dopée N ( $N^-$ ,  $\nu$  ou  $i$  pour intrinsèque)
- ▶ Responsable de la tenue en tension du composant



32 / 154

## Polarisation directe



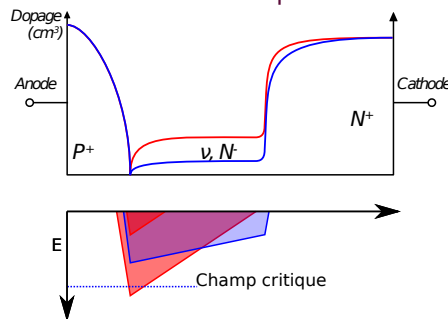
- ▶ à **faible courant, forte résistivité** de la couche  $\nu$  (faible dopage)
- ▶ à **fort courant**, les zones  $P^+$  et  $N^+$  injectent des porteurs dans la zone  $\nu$  (**modulation**)
  - ▶ beaucoup plus de porteurs libres  $\rightarrow$  fort dopage apparent  $\rightarrow$  **faible résistivité**
  - ▶ ces charges devront être évacuées lors de l'ouverture de la diode  $\rightarrow$  **recouvrement**
  - ▶ Il y a un **compromis entre diodes rapides** (faible recouvrement) **et faibles pertes en conduction** (forte modulation)  $\rightarrow$  recombinaison des porteurs, non traitée ici.



33 / 154

## Paramètres de conception

Objectif : créer une diode avec la plus forte tenue en tension inverse, et la plus faible chute de tension en direct



Une diode polarisée en inverse

- ▶ La surface colorée  $\propto V$
- ▶ les pentes de  $E \propto \text{dopage}$
- ▶ lorsque  $V$  augmente, la ZCE s'étend
- ▶ si  $E_{max} > E_{critique}$  : claquage
- ▶ si on réduit le dopage de la zone  $\nu$ ,  $E$  diminue

**Paramètres de conception :**

- ▶ Niveau de dopage  $N_D$  de la zone  $\nu$  (définit le profil de  $E$ )
- ▶ Largeur  $W$  de la zone  $\nu$  (modifie la "résistance" en direct)
- ▶ Tension à supporter en inverse



34 / 154

## Exercices

On considère une jonction  $P\nu N$  avec un dopage  $P$  et  $N^+$  très largement supérieur au dopage  $\nu$  ( $N_D$ )

- ▶ dessinez le profil du champ électrique de cette jonction, en considérant que la zone de charge d'espace remplit largement la couche  $\nu$ . On nommera  $-E_{max}$  la valeur de  $E$  à l'interface  $P/\nu$  et  $-E_2$  la valeur de  $E$  à l'interface  $\nu/N^+$
- ▶ donnez l'expression de  $E(x)$  en fonction de  $E_{max}$  en considérant  $x = 0$  à l'interface  $P/\nu$
- ▶ donnez l'expression de la tension supportée par la jonction

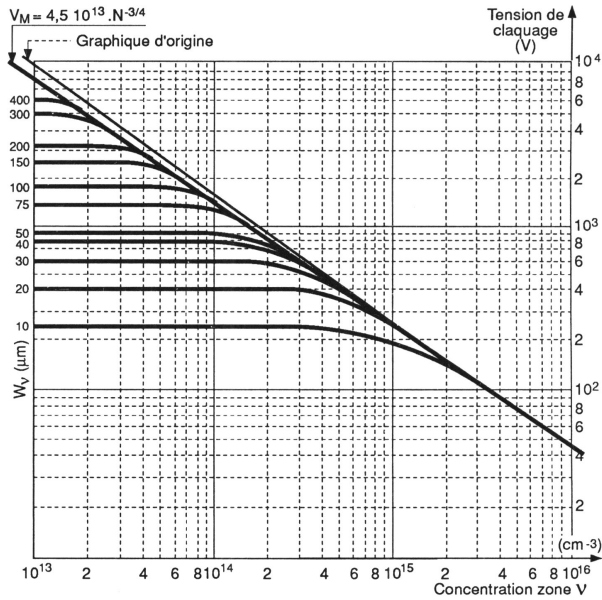
En considérant  $\epsilon_r = 11,7$  pour le silicium,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ F.cm}^{-1}$ ,  $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , un niveau de dopage de  $10^{14} \cdot \text{cm}^{-3}$  et un champ de claquage  $E_{BD} = 2 \cdot 10^5 \text{ V.cm}^{-1}$

- ▶ Donnez la tension maximale que cette jonction peut supporter pour une largeur de zone  $\nu$  de  $100 \mu\text{m}$



35 / 154

## Optimisation de la structure



- ▶ ligne diagonale : limite du champ critique, structure PN
- ▶ Courbes horizontales : structure P<sup>+</sup>N

image source : "Dispositifs de l'électronique de puissance", J. Arnould et P. Merle, 1992, Hermès, Paris, tome 1, p.235



## Optimisation de la structure – 2

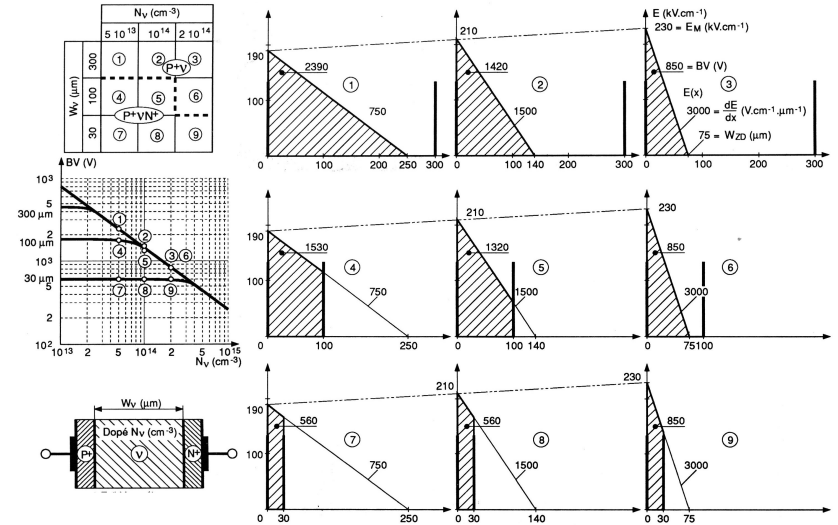
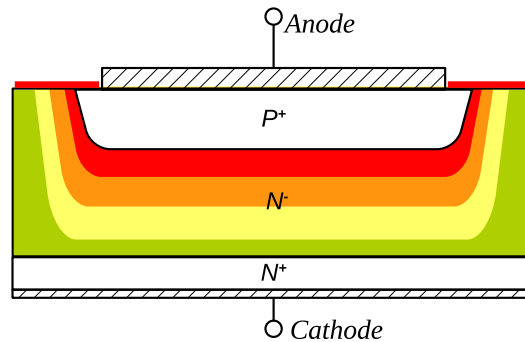


image source : "Dispositifs de l'électronique de puissance", J. Arnould et P. Merle, 1992, Hermès, Paris, tome 1, p.236-237



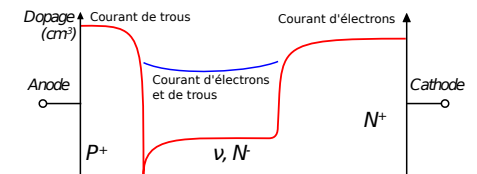
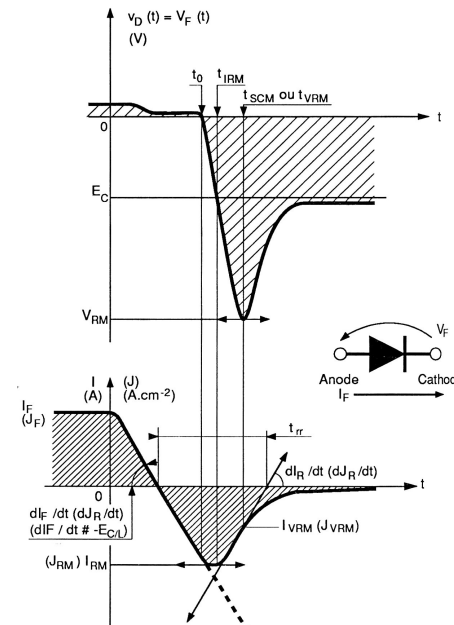
## Protections périphériques



- ▶ Champ électrique supporté par le silicium : 20 V/ $\mu\text{m}$ , dans l'air : 2 à 6 V/ $\mu\text{m}$
- ▶ Création de défauts cristallins lors de la découpe des puces
- ▶ Dispositifs spécifiques en périphérie pour supporter la tension
- ▶ objectif : **assurer l'étalement des lignes de champ électrique dans tout le composant**



## 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



En résumé :

- ▶ Une diode supporte une forte tension si :
  - ▶ Elle possède une zone faiblement dopée et relativement large
- ▶ Elle aura de faibles pertes en conduction si :
  - ▶ on a une forte modulation dans la zone faiblement dopée, et que celle-ci est étroite (durée de vie des porteurs)
- ▶ Elle aura de faibles pertes en commutation si :
  - ▶ il y a peu de modulation de la zone faiblement dopée (recouvrement faible)



Introduction

Généralités

Structure des composants

Rappels

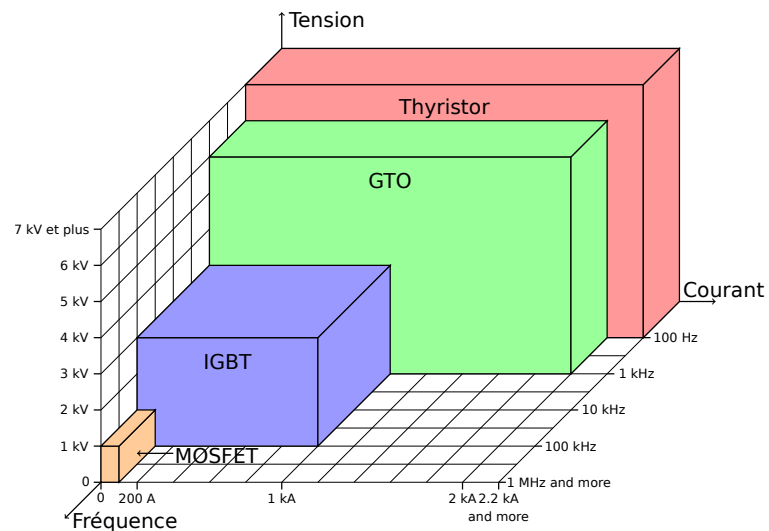
Cas de la diode bipolaire

Quelques composants commandables

Éléments de technologie



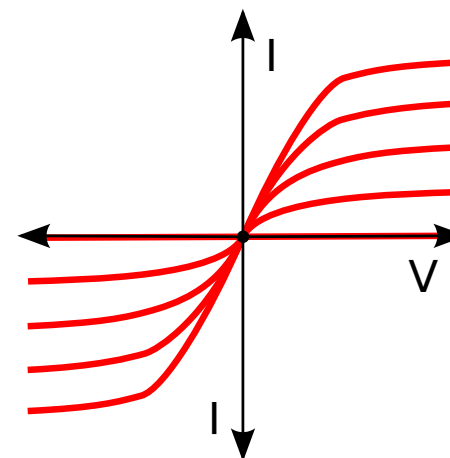
## Domaines d'utilisation



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

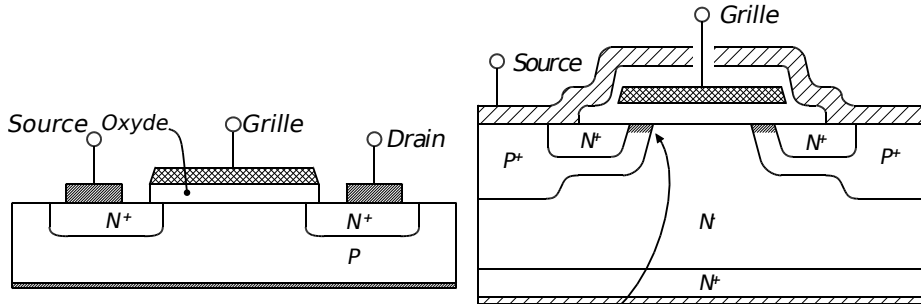


## caractéristique d'un composant pilotable

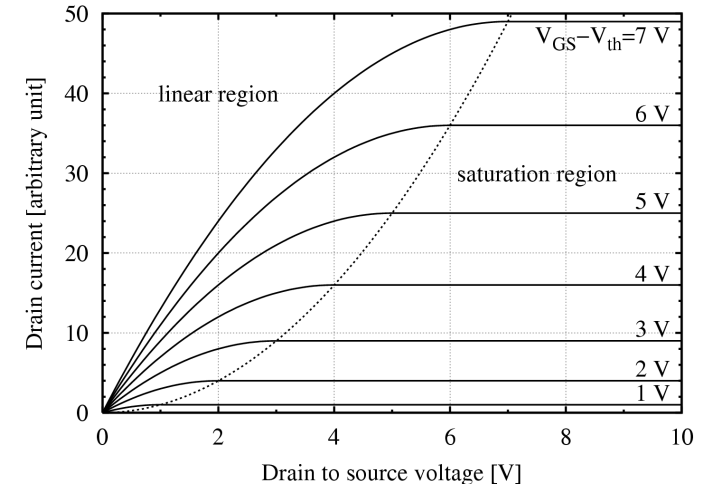


- ▶ 2, 3 ou 4 quadrants suivant le type d'interrupteur
- ▶ pilotables à l'ouverture (GTO), à la fermeture (Thyristor) ou aux deux (transistor)
- ▶ la caractéristique varie suivant le niveau sur l'électrode de commande





- ▶ Interrupteur à grille isolée
- ▶ Création d'un canal par inversion
- ▶ Version planaire très courante en microélectronique
- ▶ Version électronique de puissance
- ▶ Même principe, mais large zone N<sup>-</sup> pour tenir la tension
- ▶ "pliage" de la structure pour la rendre verticale



- ▶  $V_{th}$  : 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



## Exercices

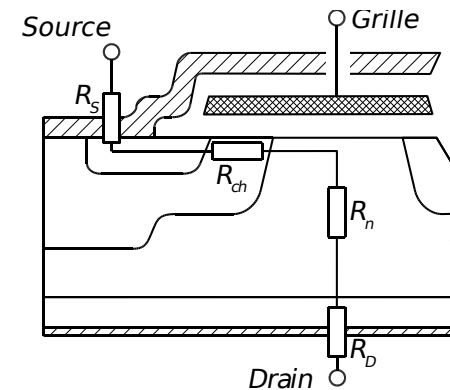
Sur la caractéristique précédente, que l'on considérera graduée en ampères sur l'axe y :

- ▶ Indiquez où se trouve la caractéristique à l'état bloqué
- ▶ Indiquez la caractéristique à l'état passant à préférer
- ▶ Vaut-il mieux travailler en régime linéaire ou saturé ?
- ▶ Donnez les pertes en conduction minimales à 10 A. à quelles condition sont-elles obtenues ?
- ▶ Calculez le  $R_{DS(on)}$  du MOSFET.



## MOSFET

– contributions à la résistance à l'état passant

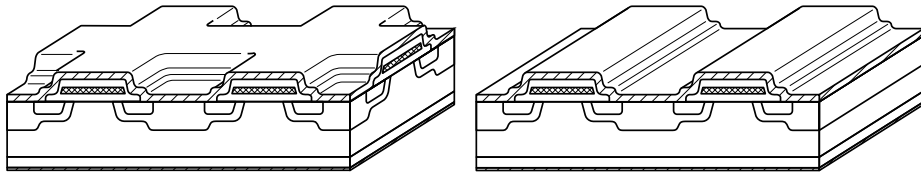


- ▶ Composant unipolaire : pas de modulation  
→ résistivité définie par le dopage
- ▶  $R_s$  : résistance de source (y compris externe)
- ▶  $R_{ch}$  : résistance du canal (modulée par la grille)
- ▶  $R_n$  : résistance de la zone N<sup>-</sup>
- ▶  $R_D$  : résistance de drain (y compris externe)

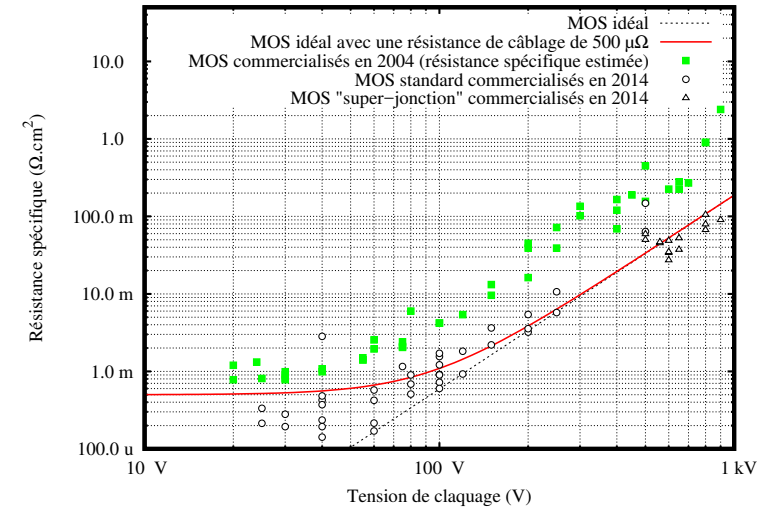


La composante  $R_{ch}$  est proportionnelle à la largeur de canal du MOSFET

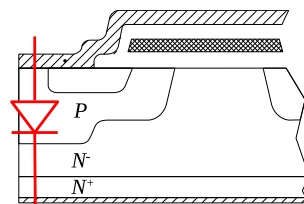
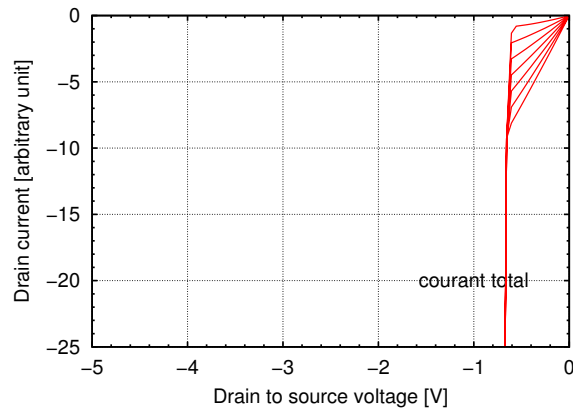
→ structure cellulaire pour augmenter la densité de canal



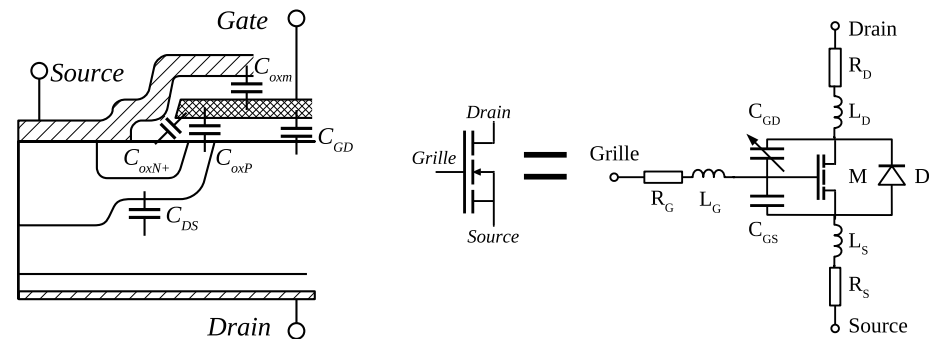
- ▶ Différentes géométries existantes (cellules carrées, hexagonales, en bandes...)
- ▶ Réduction de la taille cellulaire pour augmenter encore la densité (1-2  $\mu\text{m}$  par cellule actuellement)



- ▶ Basse tension : connective, canal prépondérants
- ▶ Haute tension : zone  $N^-$  prépondérante

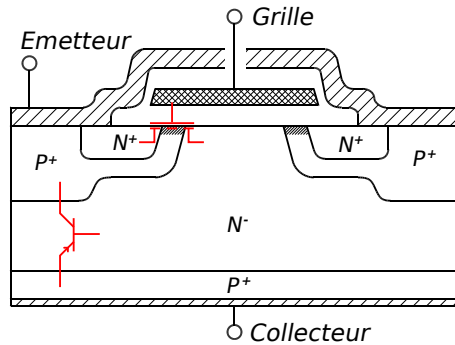


La structure MOSFET devrait être bidirectionnelle en courant (2 quadrants)  
La présence d'une diode la rend asymétrique

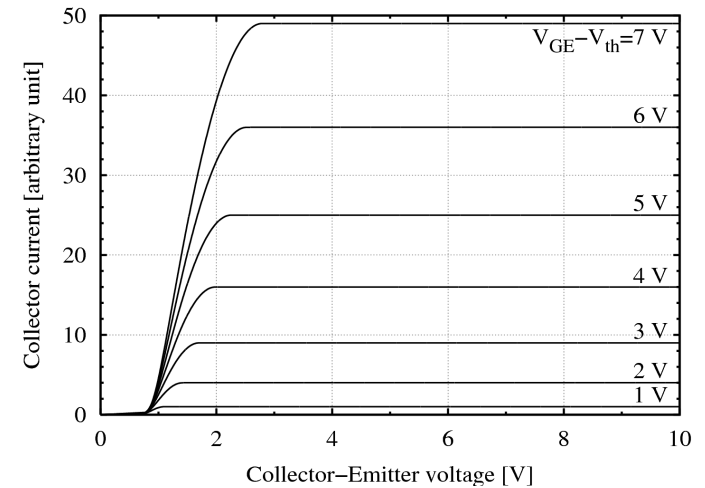


Le comportement dynamique (= en commutation) est fixé par les capacités "parasites" et le câblage du composant (on y reviendra)  
On représente 3 capacités ( $C_{GS}$ ,  $C_{GD}$ , et la capacité de la diode  $C_{DS}$ ).  
Ces capacités sont non-linéaires.





- ▶ Grossièrement équivalent à un MOSFET pilotant un transistor bipolaire
  - ▶ simplicité de commande du MOSFET (grille isolée)
  - ▶ performance à fort courant du transistor bipolaire
  - ▶ 1-3 V de chute de tension à l'état passant
- ▶ Composant bipolaire, donc à résistance à l'état passant plus faible



- ▶  $V_{th}$  : 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 ( $V_{CEsat}$ )



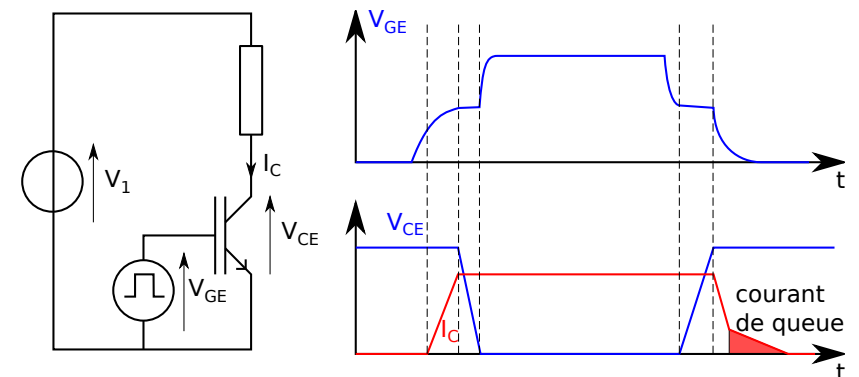
## Exercices

Sur la caractéristique précédente, que l'on considérera graduée en ampères sur l'axe y :

- ▶ Indiquez où se trouve la caractéristique à l'état bloqué
- ▶ Indiquez la caractéristique à l'état passant à préférer
- ▶ Donnez les pertes en conduction minimales à 20 A. à quelles condition sont-elles obtenues ?



## IGBT



- ▶ 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



## Vue d'ensemble

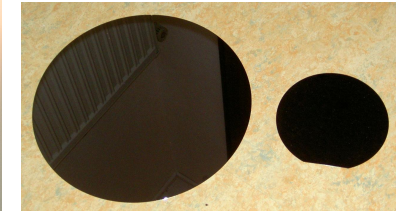
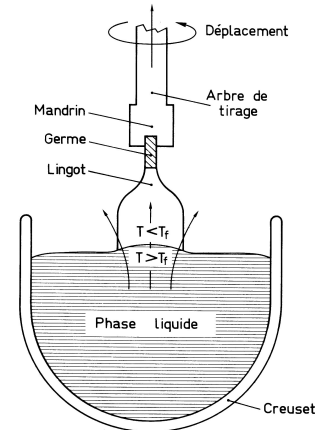
- ▶ Fabrication du matériau semiconducteur monocristallin
- ▶ découpe en tranches (wafers)
- ▶ réalisation des composants sur les wafers (dopage, gravure, dépôt d'oxyde, métallisations ... )
  - ▶ plusieurs dizaines ou centaines d'étapes
  - ▶ traitement collectif (plusieurs centaines ou milliers de composants à la fois)
- ▶ test électrique sous pointes
- ▶ Découpe des wafers en puces
- ▶ Montage dans un boîtier
- ▶ Test final

Un exemple pour un MOSFET de microelectronique :  
[http://www.cleanroom.byu.edu/virtual\\_cleanroom\\_parts/MOSFETProcess.html](http://www.cleanroom.byu.edu/virtual_cleanroom_parts/MOSFETProcess.html)



57 / 154

## Fabrication des tranches de silicium



Procédés identiques en microélectronique et électronique de puissance

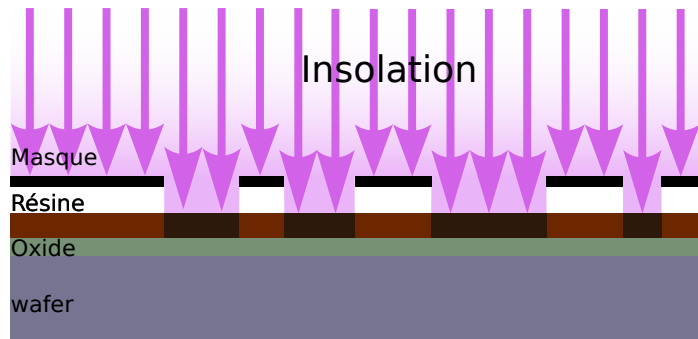
- ▶ Tirage de lingots, ici méthode Czochralski, max  $\phi=30$  cm,  $l = 2$  m
- ▶ découpe en *wafers* par scie diamantée, puis polissage épaisseur dictée par la résistance mécanique

Sources : schéma : "Physique des composants actifs à semiconducteurs", P. Leturq, 1978, Dunod, Paris. Photos : lingot et wikipedia.



58 / 154

## Photolithographie (exemple oxyde)



- ▶ oxydation du wafer
- ▶ dépôt de résine photosensible
- ▶ alignement d'un masque
- ▶ insolation
- ▶ développement
- ▶ gravure de l'oxyde
- ▶ retrait de la résine

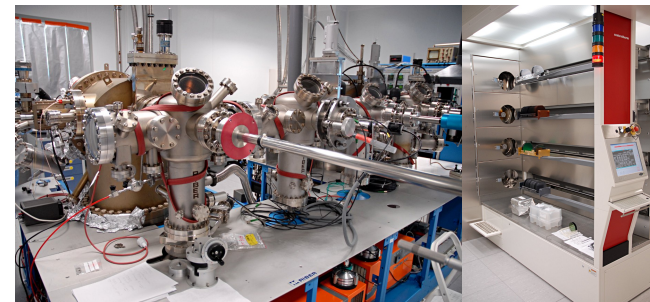
Cette technique est indépendante du nombre de composants !



59 / 154

## Dopage

- ▶ au niveau global (wafer complet)
  - ▶ Durant la croissance cristalline du lingot
  - ▶ Epitaxie : croissance d'une couche de silicium en surface d'un wafer
    - permet d'obtenir un niveau de dopage plus faible que celui du wafer
- ▶ Au niveau local
  - ▶ Nécessite un masquage (photolithographie)
  - ▶ diffusion, implantation ionique

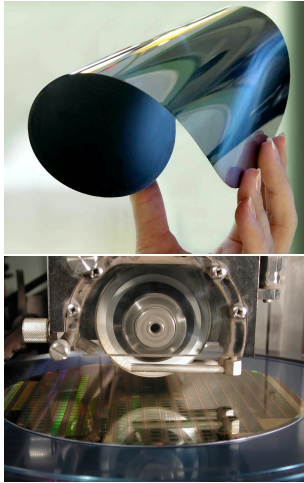


Source : Guillaume Paumier / Wikimedia Commons, CC-BY-3.0, bâti d'épitaxie et four de diffusion



60 / 154

## Finition des composants



- Pour réduire la résistance électrique des composants, on peut les amincir et ne garder que la partie électriquement active ( $<100 \mu\text{m}$ )
- La découpe permet de séparer les composants du wafer
- À partir de là, les traitements sont individuels
  - coût/durée proportionnels au nombre de composants

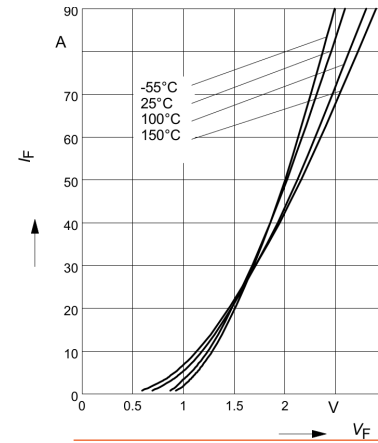
Les étapes qui suivent sont le *packaging* (mise en boîtier), on y reviendra plus tard

Source wafer souple Tepia, découpe Aspen Technologies



61 / 154

## Exercices



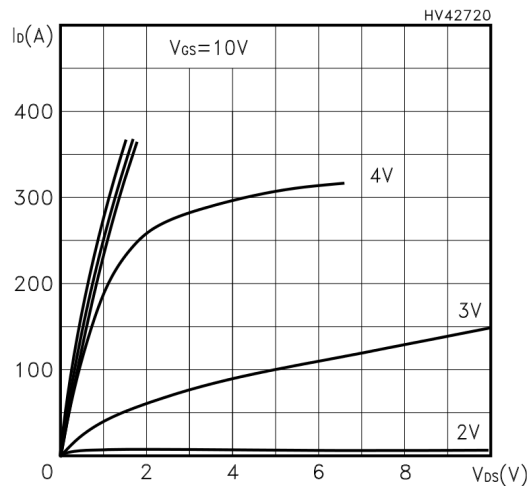
source : datasheet de la diode IDP30E120 de ST microelectronics

- Quelle est la chute de tension dans cette diode sous un courant direct de 50 A à 25°C ? à 150°C ?
- Même question sous un courant direct de 10 A à 25°C ? à 150°C ?
- Quelles sont les pertes en conduction correspondantes ?
- le courant de fuite à 25°C et une tension de 1200 V est inférieur à  $100 \mu\text{A}$ . Quelle est la puissance maximale dissipée à l'état bloqué ?
- à 150°C, ce courant passe à  $2500 \mu\text{A}$ . Même question.
- Estimez les paramètres technologiques de la zone  $v$  de cette diode 1200 V.



62 / 154

## Exercices



Source : datasheet du Mos STL150N3LLH5

- Estimer le  $R_{DS(on)}$  de ce transistor à  $V_{GS}=10\text{V}$
- Quelles sont les pertes à l'état passant à  $I_D = 100 \text{ A}$  ?



63 / 154

## Deuxième partie II

### Thermique et Packaging



64 / 154



## De quoi va t-on parler ?

### Le packaging

(Environnement immédiat des composants)

Il assure :

- ▶ Connexions électriques
- ▶ Isolation électrique
- ▶ Évacuation de la chaleur
- ▶ Protection contre l'extérieur

Mais on va se limiter :

- ▶ À l'électronique de puissance
- ▶ Aux composants actifs (puces)
- ▶ À une initiation au sujet...



65 / 154

## Objectifs de cette présentation

### Voir les domaines physiques concernés par le packaging

- ▶ électricité
- ▶ thermique
- ▶ mécanique...

### Vous donner des éléments de technologie

- ▶ Comprendre l'existant, pour pouvoir faire des choix

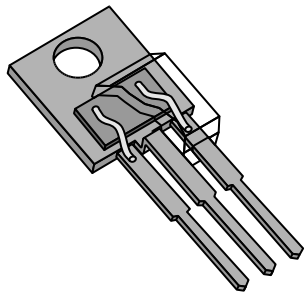
### Discuter un peu des développements futurs

- ▶ Évolutions de l'industrie
- ▶ Axes de recherche

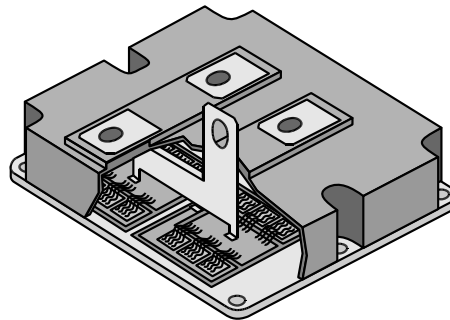


66 / 154

## Deux classes : discrets et modules



- ▶ Un composant élémentaire (transistor, diode) par boîtier
- ▶ (souvent) Pas d'isolation
- ▶ puissances faibles ou très fortes



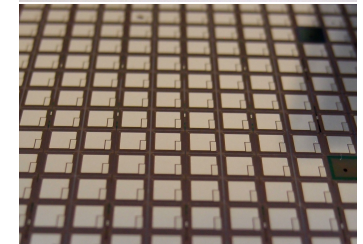
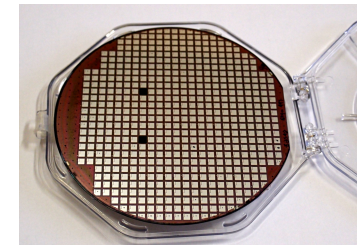
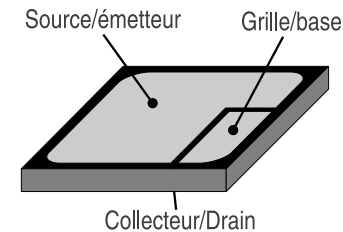
- ▶ Plusieurs puces par boîtier
- ▶ Forme un circuit ou un seul composant élémentaire
- ▶ Assure l'isolation électrique
- ▶ Puissances moyennes à fortes



68 / 154

## Puces de puissance

- ▶ Structure verticale, avec un (ou deux) contacts dessus et un dessous
- ▶ épaisseur de 50 à 500  $\mu\text{m}$
- ▶ côté de 1 à 13 mm

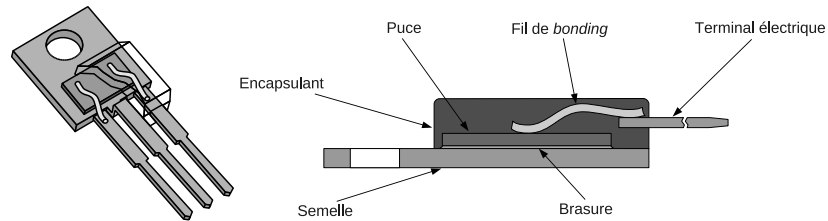


water IGBT International Rectifier, puces de 5x5 mm, wafer diamètre 6 pouces

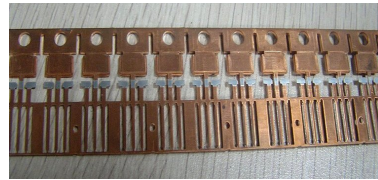


69 / 154

## Structure d'un boîtier discret



- ▶ technologie bas coût ;
- ▶ grande cadence de production ;
- ▶ matériaux : cuivre, brasure, aluminium, epoxy
- ▶ courant max. < 100 A
- ▶ tension max. < 1200 V

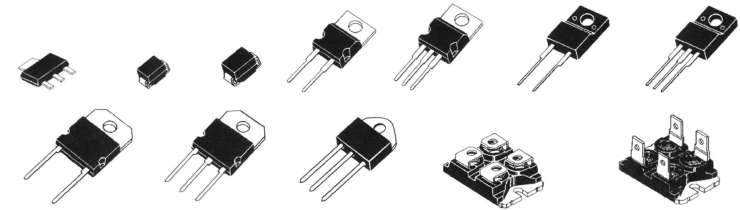


Source : <http://www.seekpart.com>



70 / 154

## Quelques boîtiers de composants discrets



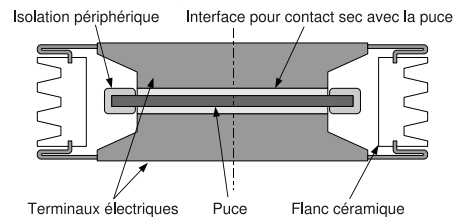
Source : techniques de l'ingénieur, volume E3 960

- ▶ quelques boîtiers de diodes normalisés : DO-001, DO-002, DO-003, DO-004, DO-005, DO-006, DO-007, DO-008, DO-009, DO-010, DO-011, DO-012, DO-013, DO-014, DO-015, DO-016, DO-017, DO-018, DO-019, DO-020, DO-021, DO-022, DO-023, DO-024, DO-025, DO-026, DO-027, DO-028, DO-029, DO-030, DO-031, DO-032, DO-033, DO-034, DO-035, DO-036, DO-037, DO-038, DO-039, DO-040, DO-041, DO-042, DO-043, DO-044, DO-045, DO-202...
- ▶ et des transistors : TO-1, TO-2, TO-3, TO-4, TO-5, TO-6, TO-7, TO-8, TO-9, TO-10, TO-11, TO-12, TO-13, TO-14, TO-15, TO-16, TO-17, TO-18, TO-19, TO-20, TO-21, TO-22, TO-23, TO-24, TO-25, TO-26, TO-27, TO-28, TO-29, TO-30, TO-31, TO-32, TO-33, TO-34, TO-35, TO-36, TO-37, TO-38, TO-39, TO-40, TO-41, TO-42, TO-43, TO-44, TO-45, TO-46, TO-47, TO-48, TO-49, TO-50, TO-51, TO-52, TO-53, TO-54, TO-55, TO-56, TO-57, TO-58, TO-60, TO-61, TO-62, TO-63, TO-64, TO-65, TO-66, TO-67, TO-68, TO-69, TO-70, TO-71, TO-72, TO-73, TO-74, TO-75, TO-76, TO-77, TO-78, TO-79, TO-80, TO-81, TO-82, TO-83, TO-84, TO-85, TO-86, TO-87, T88, TO-89, TO-90, TO-91, TO-92, TO-93, TO-94, TO-95, TO-96, TO-97, TO-98, TO-99, TO-100, TO-101, TO-102, TO-103, TO-104, TO-105, TO-106, TO-107, TO-108, TO-109, TO-110, TO-111, TO-112, TO-113, TO-114, TO-115, TO-116, TO-117, TO-118, TO-119, TO-120, TO-121, TO-122, TO-123, TO-124, TO-125, TO-126, TO-127, TO-128, TO-129, TO-130, TO-131, TO-132, TO-220I, TO-201, TO-203, TO-207, TO-208A, TO-210, TO-211, TO-212, TO-214, TO-217, TO-220J, TO-221, TO-222, TO-223, TO-224, TO-225, TO-227, TO-228, TO-229, TO-230, TO-231, TO-232, TO-233, TO-234, TO-235, TO-239, TO-241, TO-242, TO-248, TO-249...



71 / 154

## Les discrets pour la forte puissance



- ▶ Tensions jusqu'à 6.5 kV
- ▶ Courants de plusieurs kA
- ▶ Puces jusqu'à 10 cm diam.
- ▶ conçus pour la mise en série.



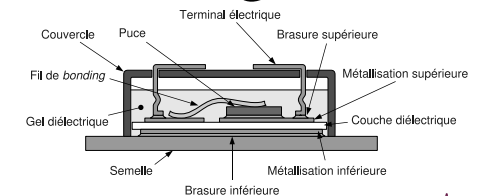
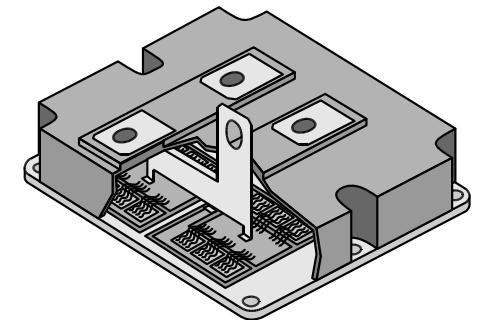
Source : <http://www.sensorexprod.com>



72 / 154

## Modules

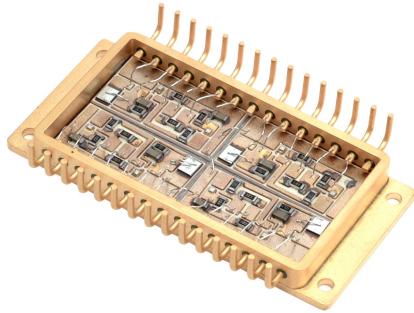
- ▶ Plusieurs puces
  - ▶ un composant équivalent (transistor, diode)
  - ▶ un circuit complet (onduleur, redresseur...)
- ▶ Besoin d'isolation électrique
- ▶ Peu standardisé
- ▶ Courant max < 3600 A
- ▶ Tension max < 6500 V
- ▶ Dimensions de qqes cm de côté à 20x15x5 cm
- ▶ Plusieurs constructeurs européens (ABB, Infineon, Microsemi, Dynex, Semikron...)



73 / 154



- ▶ Plusieurs types de boîtiers
  - ▶ Plastique
  - ▶ Hermétique
- ▶ Ajout de fonctions
  - ▶ capteurs (courant, température)
  - ▶ circuits de commande
  - ▶ ...

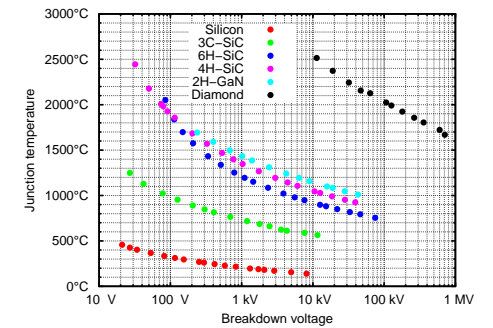


Sources images : Dynex (en haut) et Semelab (en bas)



Quelques limites :

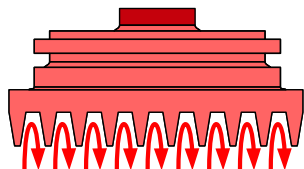
- 1414 °C fusion du silicium
- 660 °C fusion de l'aluminium
- ≈ 300 °C fusion de la brasure de puce
- 183 °C fusion de 63Sn37Pb
- >200 °C limite de tenue en tension (1 kV)



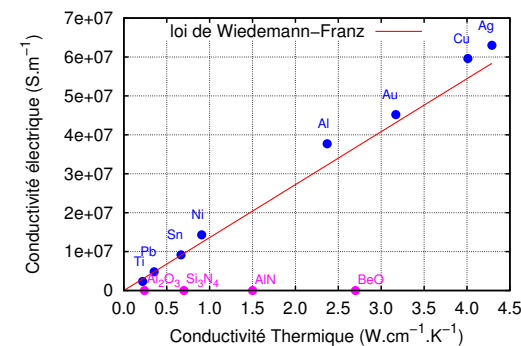
- ▶ De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- ▶ Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.



- ▶ Rayonnement
  - ▶ Loi de Stefan-Boltzmann :  $P = \epsilon S \sigma T^4$  avec  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  et  $\epsilon < 1$
  - ▶ à 400 K,  $P=0,15 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$
  - ▶ **Négligeable pour les dimensions et températures classiques des puces**
- ▶ Conduction
  - ▶ transfert de chaleur dans la matière
  - ▶  $P = -\frac{\lambda S}{e} \Delta T$ ,  $\lambda = 20 \dots 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
  - ▶ Pour une piste en cuivre avec  $e=100 \mu\text{m}$ ,  $S=1 \text{ cm}^2$  et  $\Delta T=1 \text{ °C}$ ,  $P=400 \text{ W}$
- ▶ Convection
  - ▶ Déplacement de matière
  - ▶ Pas d'expression simple (convection forcée, naturelle, type d'écoulements...)



La gestion thermique en électronique repose sur deux mécanismes : conduction et convection



- cond. thermique  $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$
- ▶  $\lambda_e$  : porteurs de charges (électrons)  
 $\lambda_e = L T \sigma$   
 ( $L$  constante de Lorentz =  $2,44 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$ ).
  - ▶  $\lambda_p$  : phonons (vibrations réseau atomique)

→ Les matériaux bons conducteurs thermiques/isolants électriques sont rares (diamant, AlN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



## Isolants/conducteurs électrique/thermique

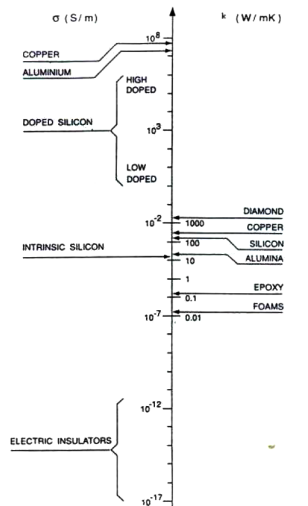


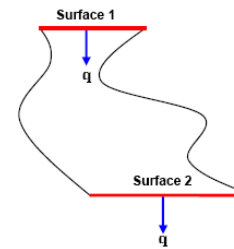
Figure 1: Comparison between electrical and thermal conductivities  
Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20-21 November, Delft.

- ▶ la conductivité électrique peut varier de plus de 20 décades
  - ▶ le courant passe dans les conducteurs et pas à côté !
  - ▶ La représentation circuit est bien adaptée
- ▶ Pour la conductivité thermique, c'est 4 à 5 décades
  - ▶ Approximation circuit utilisable avec précautions



79 / 154

## Représentation circuit thermique



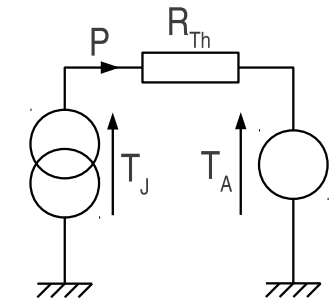
Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20-21 November, Delft.

On peut définir une  $R_{Th}$  entre 1 et 2 si :

- ▶ Les surfaces 1 et 2 sont isothermes
- ▶ Le flux thermique traversant les deux surfaces est constant

On peut alors définir une représentation circuit

- ▶ Les températures sont des efforts (tensions)
- ▶ Les puissances dissipées des flux (courants)
- ▶  $T_J = T_A + R_{Th} \times P$



80 / 154

## Exercices

Un composant dissipe 15 W. Il est refroidi à travers une résistance thermique de 10 °C/W vers l'air ambiant, à une température de 25 °C

- ▶ faire un schéma thermique équivalent
- ▶ calculer la température atteinte par le composant.

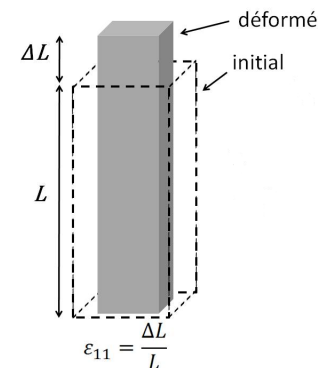
On considère un barreau d'aluminium (237 W/K.m) de 10 cm de long et de section carrée de 1 cm<sup>2</sup>

- ▶ calculez sa résistance thermique dans le sens de la longueur.

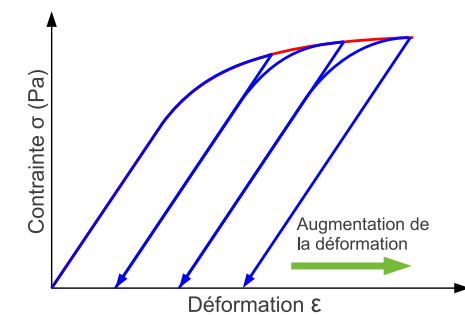


81 / 154

## Un peu de mécanique...



Source : thèse L. Pietranico, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/tr/>

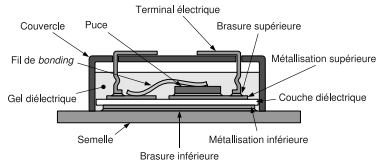


- ▶ Déformation élastique (réversible)
- ▶ Déformation plastique (irréversible)
- ▶ Apparition d'une déformation résiduelle
- ▶ accumulation de la déformation menant à la rupture

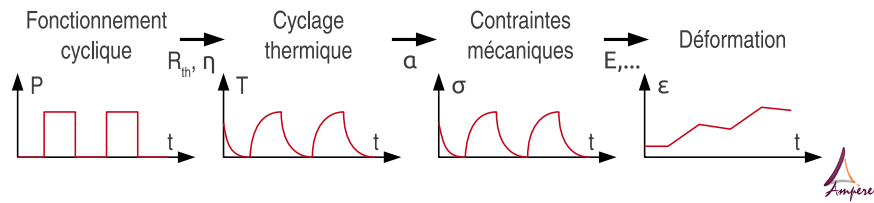
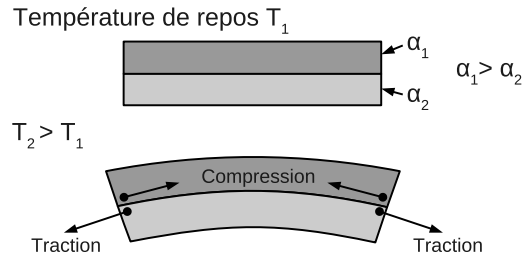


82 / 154

## Effet des coefficients de dilatation

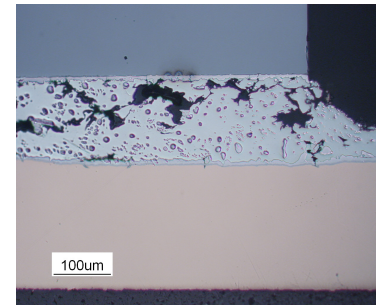


- ▶  $\alpha$  en ppm/K
- ▶  $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- ▶ la température génère des contraintes mécaniques



83 / 154

## Effet des contraintes thermo-mécaniques



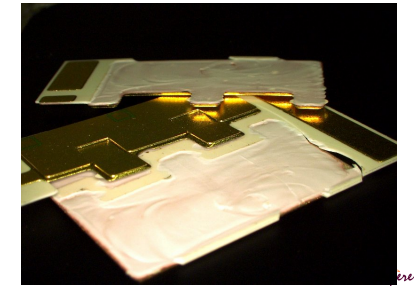
Source : Université de Nottingham

### Brasure puce-substrat

- ▶ Puce en silicium (3 ppm/K)
- ▶ Conducteur en cuivre (17 ppm/K)
- ▶ Brasure tendre concentrant la fatigue

### Substrat céramique métallisé

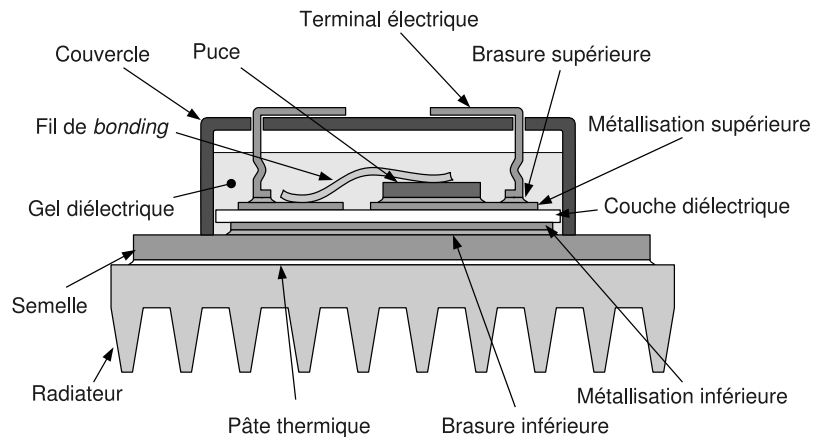
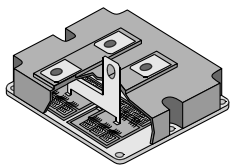
- ▶ Conducteur en cuivre (17 ppm/K)
- ▶ Substrat céramique (6 ppm/K)
- ▶ Fissuration « conchoïdale » de la céramique



Source : Université de Nottingham

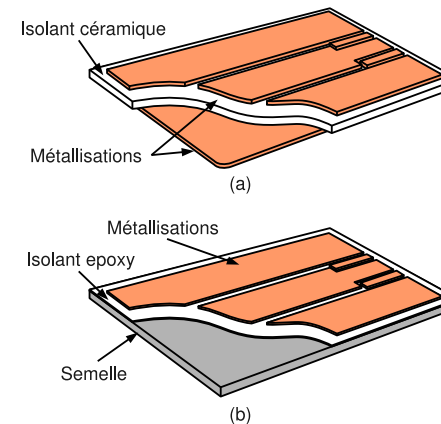
84 / 154

## Coupe d'un module de puissance



85 / 154

## Substrats isolés



### Plusieurs technologies :

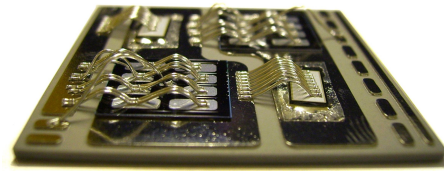
- ▶ Les substrats céramiques (DBC, DBA, ...)
- ▶ céramique (0,3 à 1 mm)
- ▶ cuivre (0,1 à 0,3 mm)
- ▶ Bonnes performances thermiques et électriques
- ▶ Cher
- ▶ Les Substrats Métalliques Isolés (SMI)
- ▶ aluminium (1 à 3 mm)
- ▶ isolant (0,1 mm)
- ▶ cuivre (0,035 à 0,2 mm)
- ▶ Performances moyennes
- ▶ Coef. de dilatation plus fort
- ▶ Moins cher



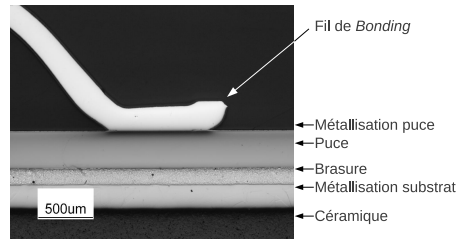
86 / 154

## Fils de bonding

- ▶ Fils épais (100 à 400  $\mu m$ ), en aluminium
- ▶ Mise en parallèle pour réduire la résistance
- ▶ Soudure ultrasonique (faible échauffement)
- ▶ Évolutions vers les fils de cuivre, les rubans...



Source : Université Nottingham



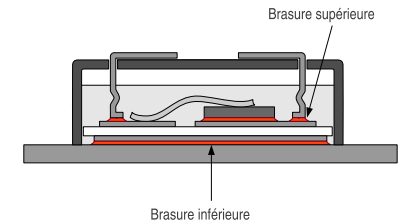
Source : Université Nottingham



87 / 154

## Les brasures

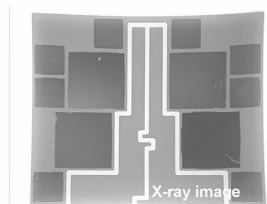
- ▶ Brasures réalisées au four
- ▶ Utilisation de pâte à braser, de preforms
- ▶ Nombreux alliages disponibles
- ▶ Tendance au "sans plomb" (RoHS)
- ▶ Habituellement deux étapes de brasure :
  - ▶ puces et connecteurs sur substrat
  - ▶ substrat sur semelle



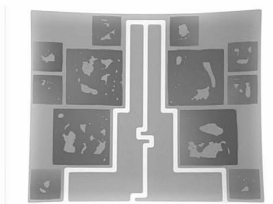
88 / 154

## Les brasures – problème des vides

### Formic Acid atmosphere prior reflow versus non



Formic Acid atmosphere prior reflow



non Formic Acid atmosphere

void free solder joints even without vacuum prior and during reflow

Source : Reflow Soldering Technology for large die area Power Electronics, Matthias Hutter, Microcar, Leipzig, 21 juin 2005

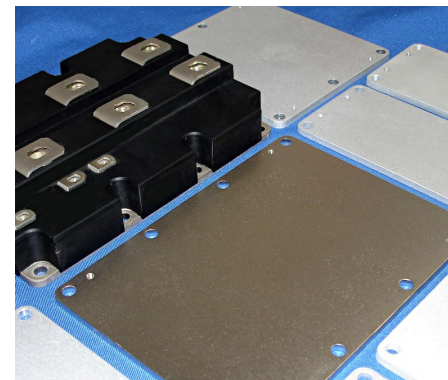
risque de vides sur les brasures de grande surface :

- ▶ augmentation de la résistance thermique
- ▶ apparition de points chauds
- ▶ peut être réduit par utilisation d'atmosphères spécifiques durant le process (vide, gaz actifs...)



89 / 154

## Semelle



Source : <http://www.alsic.com>

Rôles :

- ▶ Support mécanique
  - ▶ Boulonnage sur radiateur
  - ▶ Brasure des substrats
- ▶ Gestion thermique
  - ▶ faible résistance substrat-radiateur
  - ▶ étalement de la chaleur

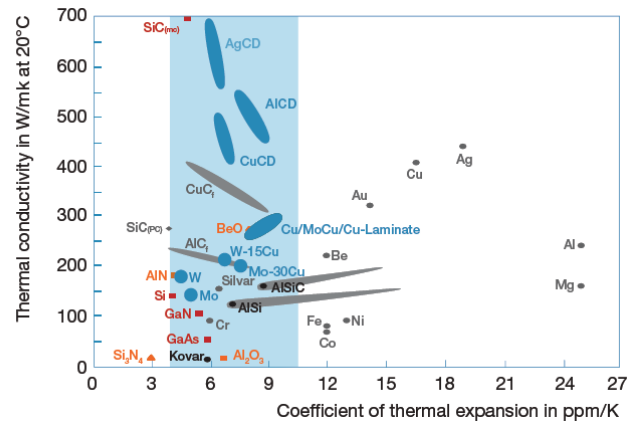
Critères :

- ▶ Poids
- ▶ Conductivité thermique
- ▶ Coût
- ▶ Coefficient de dilatation



90 / 154

## Semelle – Choix des matériaux



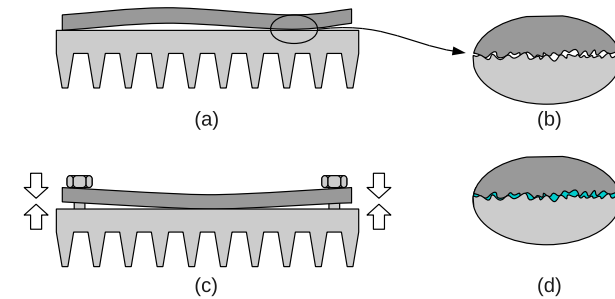
Source : Packaging Materials, J. Popović-Gerber, ECPE tutorial on power electronics packaging, Lyon, 31/05/2011

- ▶ Les matériaux composites permettent de fixer le coefficient de dilatation
- ▶ L'AISIc est couramment utilisé dans les transports



91 / 154

## Matériaux d'interface thermique



### La "pâte thermique"

- ▶ Interface semelle/radiateur
- ▶ Comble les vides
- ▶ Mauvais conducteur thermique ! (1 W/m.K contre 400 pour le cuivre !)

D'autres technologies existent pour les Thermal Interface Materials (TIM)



92 / 154

## Matériaux d'interface thermique



Fig. 3: Cleaning of the screen print template



Fig. 4: Alignment of the module

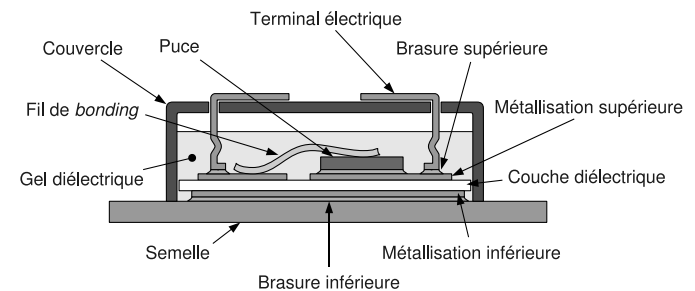


Fig. 5: Blade squeezing



Fig. 6: Print image after blade squeezing

## Et le reste ?

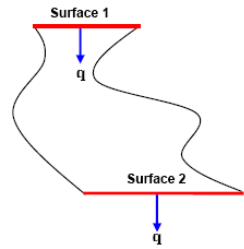


### Nombreux autres éléments

- ▶ Les matériaux d'encapsulation (gels, résines)
- ▶ Les boîtiers (plastiques, hermétiques, ...)
- ▶ Les terminaux (brasés, pressés, intégrés, ...)
- ▶ L'environnement plus éloigné (second level packaging)



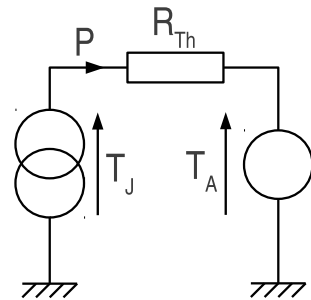
# Résistance thermique



- On peut définir une  $R_{Th}$  entre 1 et 2 si :
- ▶ Les surfaces 1 et 2 sont isothermes
  - ▶ Le flux thermique traversant les deux surfaces est constant

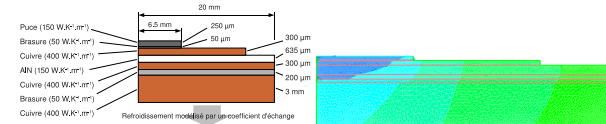
On peut alors définir une représentation circuit

- ▶ Les températures sont des efforts (tensions)
- ▶ Les puissances dissipées des flux (courants)
- ▶  $T_J = T_A + R_{Th} \times P$



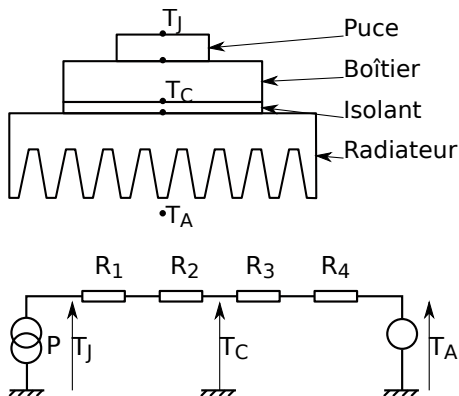
# Calcul de la résistance thermique

- ▶ À partir des données "matériau" :
  - ▶ si hypothèse 1-D acceptable :  $R_{Th} = \frac{l}{\lambda S}$   
 $\lambda$  conductivité thermique,  $l$  longueur et  $S$  section
  - ▶ Si géométrie complexe, plusieurs matériaux : calcul numérique



- ▶ À partir des données constructeur :
  - ▶ Prendre les différentes valeurs de  $R_{Th}$  et les additionner
    - ▶  $R_{Th_{JC}}$  : résistance thermique "junction-to-case" (composant)
    - ▶  $R_{Th_{CA}}$  : résistance thermique "case-to-ambient" (radiateur)
    - ▶  $R_{Th_{JA}}$  : résistance thermique "junction-to-ambient" (totale)
  - ▶ Attention au domaine d'application de la modélisation circuit (cf diapo précédente) !

# Résistance thermique des empilements



- Si on peut considérer que les interfaces sont **isothermes** :
- ▶  $R_{Th_{total}} = \sum R_i$
  - ▶ Attention,  $R_4$  inclut la  $R_{Th}$  du radiateur et la convection d'air
  - ▶  $R_{Th_{JC}} = R_1 + R_2$
  - ▶  $R_{Th_{JA}} = R_{Th_{JC}} + R_3 + R_4$

- Application numérique
- ▶ diode IDP30E120 :  $R_{Th_{JC}} = 0,9 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ , 10W dissipés
  - ▶ radiateur  $5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ ,  $T_A = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$
  - ▶ isolant  $1 \text{ } ^\circ\text{C/W}$
  - ▶  $T_J = T_A + R_{Th_{JA}} P = 119 \text{ } ^\circ\text{C}$

# Équation de la chaleur

Équation de la chaleur 1-D :

$$\rho C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}$$

Conditions aux limites :

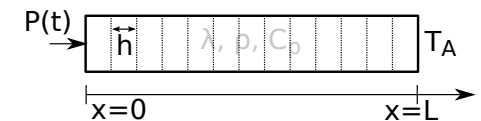
$$S \cdot \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -P(t)$$

$$T(t, x = L) = T_a$$

Discrétisation de l'équation :

$$\rho C_p \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \lambda \frac{T_{i+1}(t) + T_{i-1}(t) - 2T_i(t)}{h^2}$$

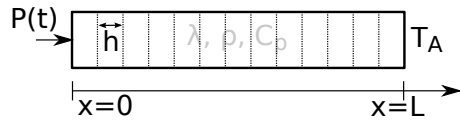
$$h S \rho C_p \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \lambda S \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{h} - \lambda S \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{h}$$



- ▶  $S$  section du barreau ( $\text{m}^2$ )
- ▶  $C_p$  chaleur spécifique ( $\text{J/K/kg}$ )
- ▶  $\rho$  densité ( $\text{kg/m}^3$ )



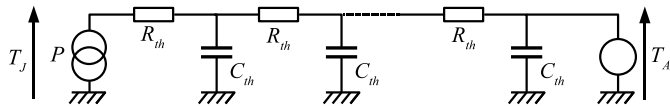
## Équation de la chaleur – suite



$$hS\rho C_p \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \lambda S \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{h} - \lambda S \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{h}$$

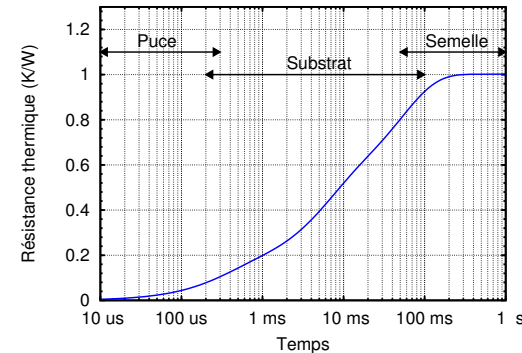
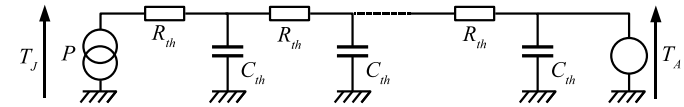
On pose  $hS\rho C_p = C_{Th}$  et  $\frac{h}{\lambda S} = R_{Th}$  d'où :

$$C_{Th} \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{R_{Th}} - \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{R_{Th}}$$



100 / 154

## Impédance thermique



Extension au régime dynamique :

- ▶ mêmes conditions (conservation du flux, surfaces isothermes)
- ▶ aux courtes échelles de temps, fonctionnement propagatif



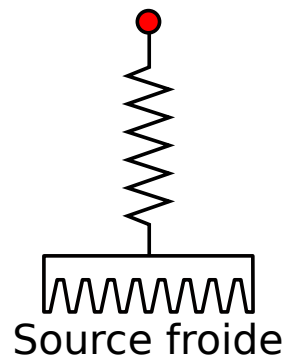
101 / 154

## Circuit de refroidissement

Transfert de chaleur d'une ou plusieurs **sources chaudes vers l'extérieur du système**

- ▶ extérieur = air ambiant (sauf rares cas)
- ▶ circuit plus ou moins compliqué :
  - ▶ composant attaché à un radiateur
  - ▶ composant/circuit d'eau/radiateur
  - ▶ composant/caloduc/radiateur
  - ▶ composant immergé/radiateur
  - ▶ ...
- ▶ Intérêt des circuits plus complexes :
  - ▶ éloignement source chaude/source froide
  - ▶ diminution des densités de puissance

Source chaude

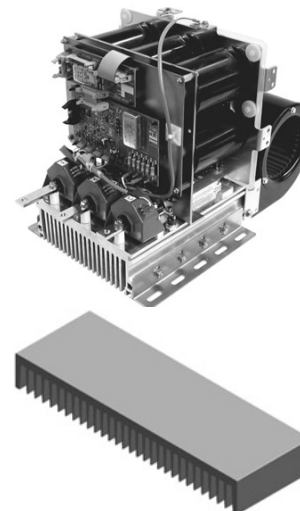


Source froide



102 / 154

## Radiateur



Objectif : augmenter la **surface d'échange** avec le milieu ambiant

- ▶ bon conducteur thermique : cuivre ou aluminium (plus courant)
- ▶ souvent anodisé noir pour améliorer l'émissivité (transfert radiatif)
- ▶ tôle emboutie (très faibles puissances), ou profilé extrudé
- ▶ peut-être associé à un ventilateur pour améliorer le **coefficient d'échange**

Source : "Définition d'un dissipateur thermique en milieu industriel", J.-F. Roche, Techniques de l'ingénieur, D3 117



103 / 154

# Efficacité des méthodes de refroidissement

Tableau 5 – Valeurs de  $h$  selon le mode de refroidissement

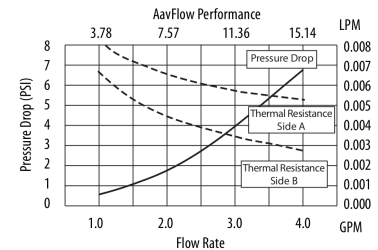
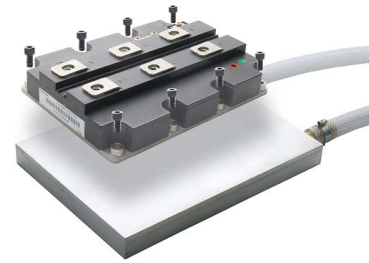
Mode de refroidissement	Fluide	$h$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
Convection naturelle	Gaz	5 à 30
	Eau	100 à 1 000
Convection forcée	Gaz	10 à 300
	Eau	300 à 12 000
Changement de phase	Ébullition	3 000 à 60 000
	Condensation	5 000 à 110 000

- ▶ Résistance thermique de transfert convectif :  $R_{Th} = \frac{1}{h \times S}$ , avec  $h$  coefficient d'échange et  $S$  surface d'échange
- ▶ Systèmes liquides beaucoup plus efficaces
- ▶ Convection forcée : utilisation de pompes, de ventilateurs...
- ▶ pour réduire  $R_{Th}$ , on peut augmenter  $S$  (ailettes, doigts, etc)

Source : "Dissipation thermique dans les systèmes électriques", Jean-Pierre Petit, techniques de l'ingénieur, E3 952



# Refroidissement liquide

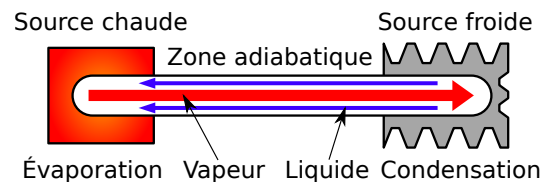


Source : Aavid Thermalloy, AavFlow Liquid Cold Plates

- ▶ Circuit comprenant :
  - ▶ Plaque(s) à eau
  - ▶ Tuyauterie, pompe
  - ▶ Échangeur eau-air
- ▶  $R_{Th}$  de la plaque très faible
- ▶ Avantages :
  - ▶ fort effet d'étalement thermique
  - ▶ faibles dimensions au niveau du module
- ▶ inconvénients :
  - ▶ Système actif (fiabilité, rendement)
  - ▶ Pas plus compact globalement



# Caloducs

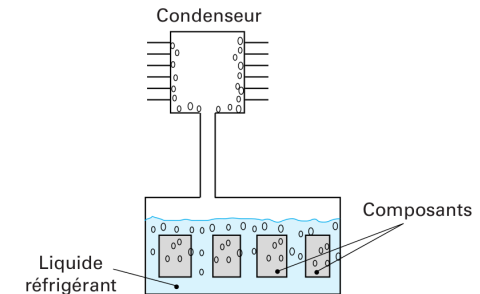


- ▶ Transport convectif + changement de phase
- ▶ Système passif et étanche
- ▶ Déplacement du liquide : capillarité
- ▶ relativement indépendant de la longueur
- ▶ Attention aux non-linéarités (assèchement, température max...)



Source : photographies Dlemunsch, séminaire ECPE "Cooling and PCB", Delft, 2008

# Refroidissement par immersion

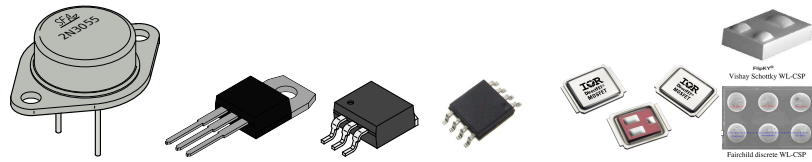


- ▶ Courant pour les transformateurs (réseaux d'énergie électrique)
- ▶ Plus rare en électronique de puissance :
  - ▶ Problèmes d'utilisation de fluides fluorés à fort effet de serre/destruction de la couche d'ozone
  - ▶ Soucis de maintenance des cartes
  - ▶ Avantage : système passif, environnement clos

Source : "Dissipation thermique dans les systèmes électriques", Jean-Pierre Petit, techniques de l'ingénieur, E3 952



# Évolution des composants discrets

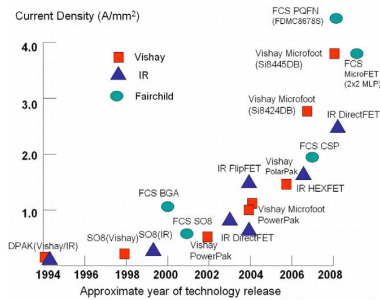


source : wikimedia commons pour tous les boîtiers sauf le Directfet, International Rectifier, et le WL-CSP, voir ci-dessous

Package type	Volume (mm <sup>3</sup> )	molding compound%	silicon %	leadframe %	interconnect %
DPAK	90	75	4	20	1
SO8 (wire)	28	83	6	10	1
SO8 (clip)	28	70	6	20	2
MOSFET BGA	20	0	40	50	10
WL-CSP	20	0	82	0	18

power semiconductor wafer level packaging", Yong LIU, Microelectronics Reliability 50 (2010) 514–521

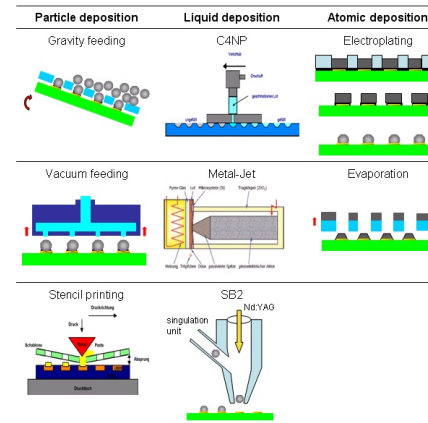
source : "Trends of



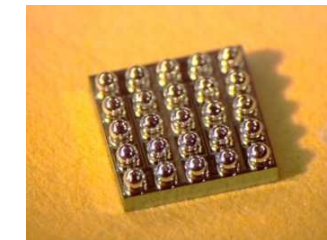
109 / 154

- Disparition graduelle du packaging de premier niveau (FLP)
- Les étapes de fabrication se font directement sur le wafer, avant découpe.

# Le Wafer-Level Packaging



Source : Wafer Level Technologies : Solderable Metallizations, Power Bumping and Balling, Wolfgang Reinert, ECPE Workshop Adv. Power Electr. Pack., Paris, 30/09/09



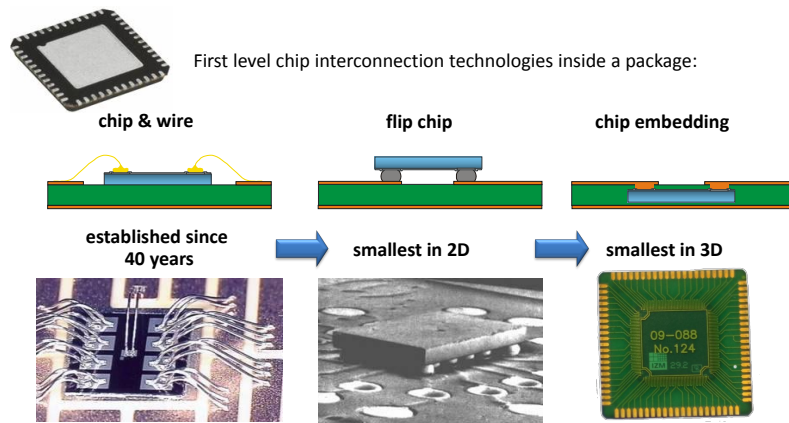
- Procédé collectif
- Orienté faible tension/puissance
- Nombreux procédés de réalisation



110 / 154

# Après le flip-chip, l'enterré

## Interconnect Evolution



First level chip interconnection technologies inside a package:

chip & wire

flip chip

chip embedding

established since 40 years

smallest in 2D

smallest in 3D

Advanced Power Electronics Packaging Workshop, Paris, France, September 30, 2009  
Lars Böttcher, System Integration & Interconnection Technologies  
lars.boettcher@izm.fraunhofer.de



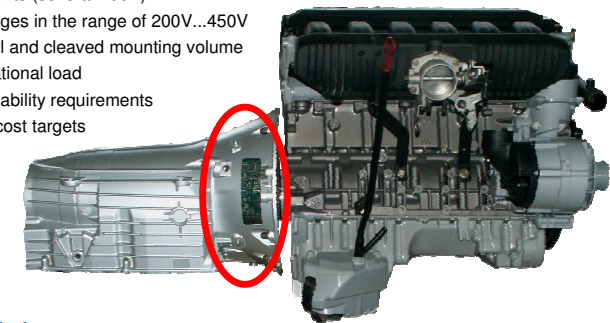
111 / 154

# L'intégration mécatronique – exemple automobile



## Requirements for power electronics used in the automotive power train:

- Coolant temperature up to 115°C
- Ambient temperature in the engine compartment up to 140°C
- High currents (several 100A)
- High voltages in the range of 200V...450V
- Very small and cleaved mounting volume
- High vibrational load
- Tough reliability requirements
- Very low cost targets



ECPE, 9/2009, Page 6

Source : Mechatronic System Integration of the Hybrid Powertrain, Thomas Harder ECPE Workshop Adv. Power Electr. Pack., Paris, 30/09/09

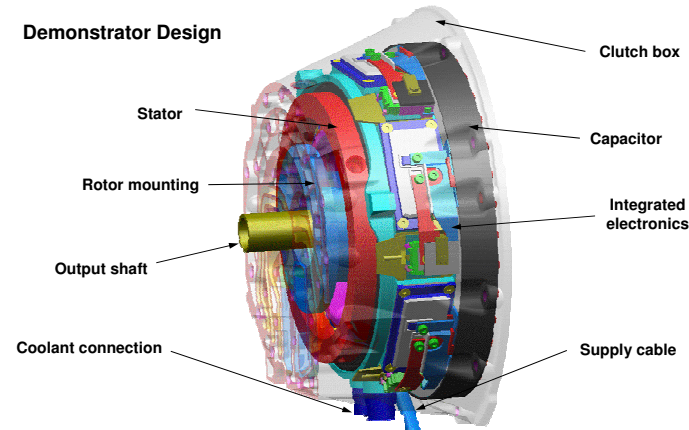


112 / 154

Source : Power Electronic Packages with Embedded Chips, Lars Böttcher, ECPE Workshop Adv. Power Electr. Pack., Paris, 30/09/09

## L'intégration mécatronique – exemple automobile 2

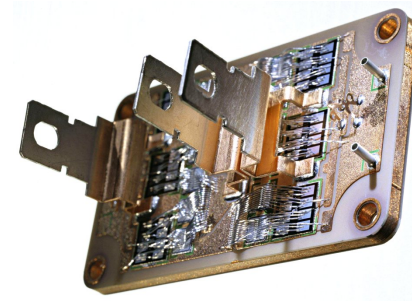
### Demonstrator Design



ECPE, 9/2009, Page 8

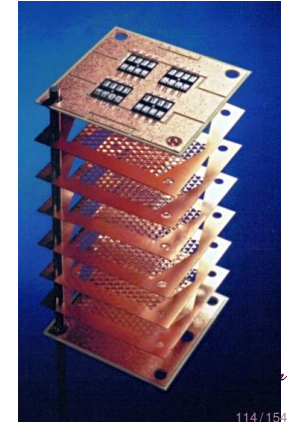
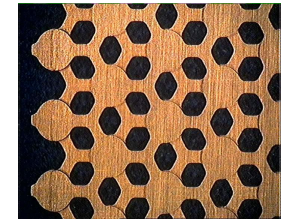
Source : Mechatronic System Integration of the Hybrid Powertrain, Thomas Harder, ECPE Workshop Adv. Power Electr. Pack., Paris, 30/09/09

## Le refroidissement intégré – 1

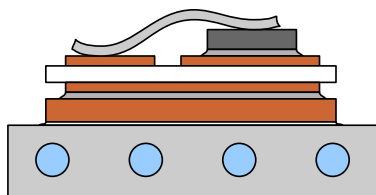


Source : Schulz-Harder, J. Ceramic Substrates and Micro Channel Cooler Curamik Electronics GmbH, 2006

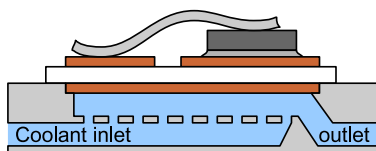
- ▶ fusionner le substrat, la semelle et la plaque à eau
- ▶ Moins d'interfaces thermiques à traverser
- ▶ Avec des puces Si, on peut évacuer jusqu'à 3 kW sur une surface de  $5 \times 5 \text{ cm}^2$



## Le refroidissement intégré – 2



Classical liquid-cooling



Direct cooling

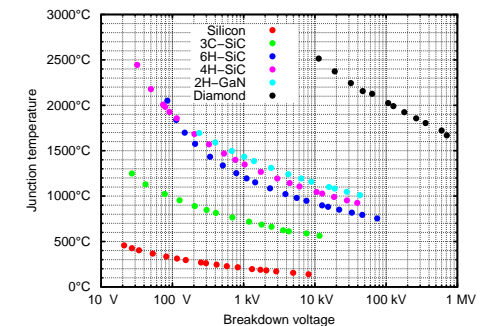
Mettre le fluide de refroidissement en contact direct avec le substrat

- ▶ Suppression de couches :
  - ▶ plaque à eau
  - ▶ pâte thermique
  - ▶ semelle
  - ▶ brasure
- ▶ Pas de contraintes mécaniques (interface liquide-solide)
- ▶ La plaque à eau peut être en plastique

## Vers les hautes températures

Les semiconducteurs "grand gap" fonctionnent à plus haute temp.

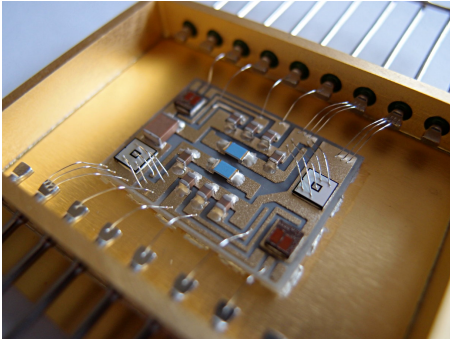
- ▶ Les limites actuelles sont *packaging*
- ▶ Souvent fort cyclage thermique
- ▶ Applications
  - ▶ Aéronautique
  - ▶ Automobile
  - ▶ Forage
  - ▶ ...



Problèmes liés au packaging :

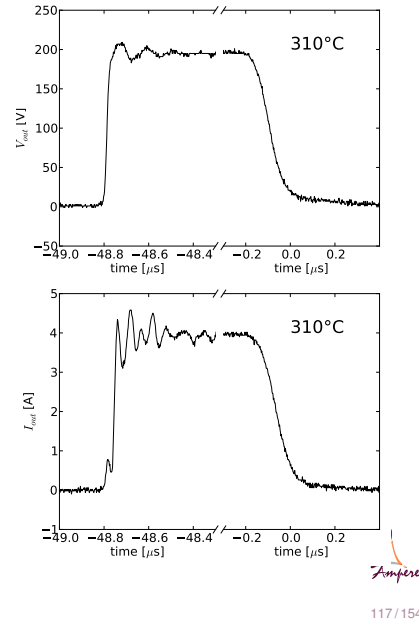
- ▶ Fusion des brasures
- ▶ Limite des matériaux polymères (gels, passivants, boîtier plastique)
- ▶ Amplification des problèmes mécaniques dûs au cyclage

## Vers les hautes températures – 2



Module réalisé au lab. Ampère :

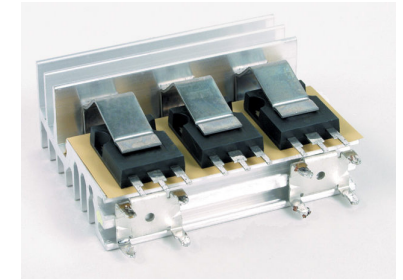
- ▶ puces *driver* intégrées
- ▶ 2 JFETs en carbure de silicium
- ▶ composants passifs haute température
- ▶ report par frittage d'argent



117 / 154

## Exercice 1

- ▶ Diode,  $R_{Th,JA} = 62 \text{ K/W}$ ,  
 $R_{Th,JC} = 0.9 \text{ K/W}$ ,  $T_{J,Max} = 150^\circ\text{C}$ ,  
 $P_{dis.} = 15 \text{ W}$
- ▶ Pad thermique souple,  
 $2,35 \text{ K/W} > R_{Th} > 1,76 \text{ K/W}$  suivant  
pression d'appui
- ▶ Radiateur  $R_{Th} = 4,4 \text{ K/W}$



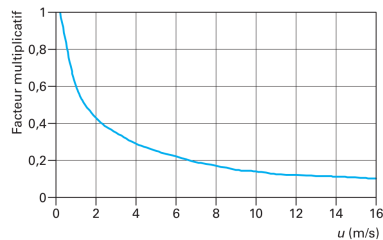
Source : the Bergquist Company

- ▶ Calculer la température de jonction de la diode sans refroidisseur, pour une température ambiante de  $25^\circ\text{C}$
- ▶ Quelle est la plage de température de jonction avec pad et radiateur ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ ) ?
- ▶ Même question lorsque la température ambiante atteint  $50^\circ\text{C}$
- ▶ Conclusions ?

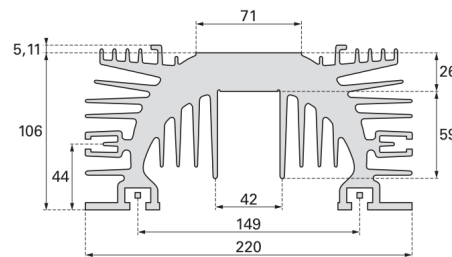


119 / 154

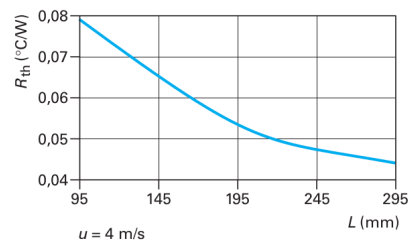
## Exercice 2



- ▶ Calculez la  $R_{Th}$  de 200 mm de radiateur sous un flux d'air de 2,4 et 6 m/s.
- ▶ on fixe un module de  $R_{Th,JC} = 0,03 \text{ K/W}$ . Calculez la puissance maximale dissipable à  $T_{J,Max} = 125^\circ\text{C}$  et  $T_A = 50^\circ\text{C}$ .
- ▶ Quelle température atteint alors le module si les ventilateurs s'arrêtent ? (cas 4 m/s uniquement)



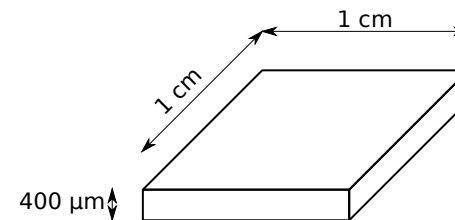
Les cotes sont indiquées en millimètres.



Source : "Définition d'un dissipateur thermique en milieu industriel", J.-F. Roche, Technicien Supérieur Ingénieur, D3 117

120 / 154

## Exercice 3



- ▶  $\rho_{Si} = 2330 \text{ kg/m}^3$
- ▶  $C_{P,Si} = 700 \text{ J/kg/K}$
- ▶  $\lambda_{Si} = 149 \text{ W/m/K}$

On considérera que la puissance est dissipée uniformément en surface de la puce et que les deux faces sont isothermes.

- ▶ Calculer la  $R_{Th}$  de cette puce. Calculez la différence de température pour une densité de puissance de  $200 \text{ W/cm}^2$ .
- ▶ Calculer sa  $C_{Th}$ . Quelle est l'élévation de température (conditions adiabatiques) associée à une dissipation de puissance de 100 kW durant 0,1  $\mu\text{s}$  ? 1  $\mu\text{s}$  ? 1 ms ?



121 / 154

# Troisième partie III

## Aspects pratiques



# Objectifs

- ▶ Comprendre une *datasheet* constructeur
- ▶ L'exploiter vis à vis d'une application donnée
- ▶ Étudier différents types de composants de puissance



# Lire une *Datasheet* – première page

**Fast Switching Diode Features**

- 1200 V diode technology
- Fast recovery
- Soft switching
- Low reverse recovery charge
- Low forward voltage
- Easy paralleling
- Pb-free lead plating, RoHS compliant
- Halogen-free according to IEC61249-2-21
- Qualified according to JEDEC for target applications

Parameter	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage	$V_{RRM}$	1200	V
Continuous forward current	$I_F$	30	A
$T_C=25^\circ\text{C}$		50	
$T_C=90^\circ\text{C}$		30	
Surge non repetitive forward current	$I_{FSM}$	102	
$T_C=25^\circ\text{C}$ , $t_s \leq 10$ ms, sine halfwave			
Maximum repetitive forward current	$I_{FRM}$	76.5	
$T_C=25^\circ\text{C}$ , $I_F$ limited by $T_{jmax}$ , $D=0.5$			
Power dissipation	$P_{tot}$	139	W
$T_C=25^\circ\text{C}$		66	
$T_C=90^\circ\text{C}$			
Operating and storage temperature	$T_j, T_{stg}$	-55...+150	$^\circ\text{C}$
Soldering temperature	$T_{sol}$	260	$^\circ\text{C}$
wave soldering, 1.6mm (0.063 in.) from case for 10s			

Description rapide du composant

Référence du composant

Performances principales

Brochage/vue d'un des boîtiers

Grandeurs extrêmes (destruction du composant au-delà)



# Lire une *Datasheet* – performances

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
Thermal resistance, junction - case	$R_{thJC}$	-	-	0.9	K/W
Thermal resistance, junction - ambient, leaded	$R_{thJA}$	-	-	62	
SMD version, device on PCB, @ min. footprint	$R_{thJA}$	-	-	62	
@ 6 cm <sup>2</sup> cooling area <sup>1)</sup>		-	35	-	

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
Reverse leakage current	$I_{FR}$	-	-	100	$\mu\text{A}$
$V_R=1200\text{V}$ , $T_j=25^\circ\text{C}$					
$V_R=1200\text{V}$ , $T_j=150^\circ\text{C}$				2500	
Forward voltage drop	$V_F$	-	1.65	2.15	V
$I_F=30\text{A}$ , $T_j=25^\circ\text{C}$			1.7		
$I_F=30\text{A}$ , $T_j=150^\circ\text{C}$					

Performance thermiques

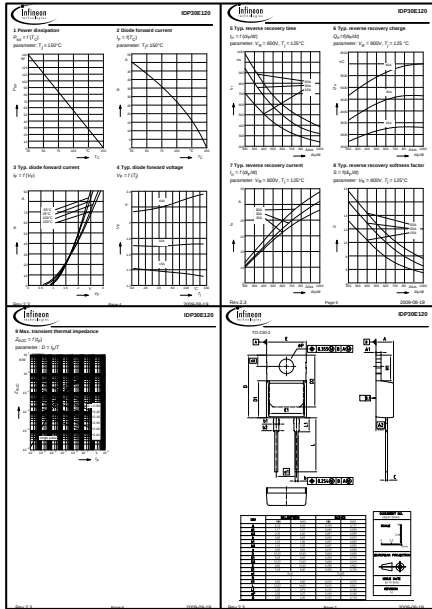
Performances électriques

Valeur minimale

Valeur nominale

Valeur maximale





Caractérisations électrique (attention aux conditions)

Abaque thermique

Information de *packaging*



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

$I_F$  : le **courant direct** (*forward*) supporté par la diode.

- ▶ donné le plus souvent à 25°C
- ▶ dépend du refroidissement (taille du radiateur, température ambiante)

$V_F$  : **chute de tension à l'état passant** → pertes en conduction

Type de diode : décrit le compromis vitesse/ $V_F$

- ▶ redressement (lente mais faibles pertes en conduction), "ultra rapide" . . .
- ▶ la dénomination dépend du fabricant (toutes les diodes sont au moins "rapides" . . .)



## Sommaire

Caractéristiques électriques

Diode

MOSFET

IGBT

Commutation des composants

Exercices

Conclusion



## 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  $V_{GS}$

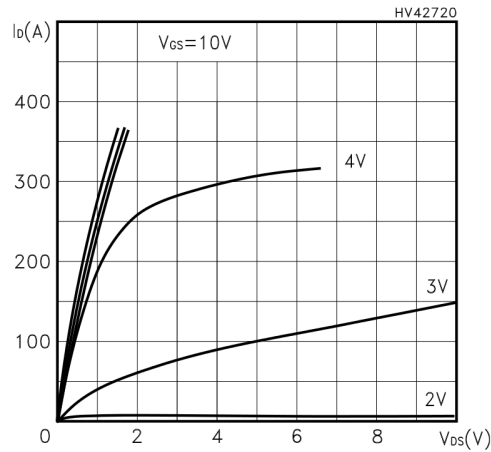
$V_{th}$  (Threshold) : **tension de seuil** (tension de commutation)

$Q_G$  : 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)



# MOSFET – caractéristique statique

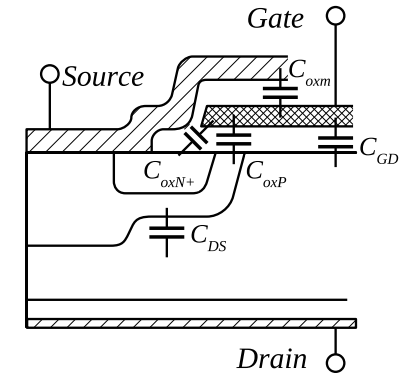
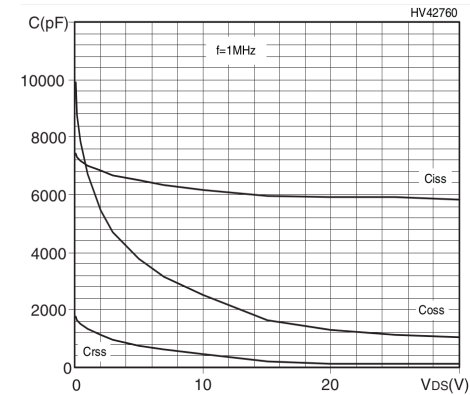


- ▶ Fonctionnement nominal en zone linéaire
- ▶  $R_{DSon}$  modulée par la tension grille-source



131 / 154

# MOSFET – capacités parasites



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

Pour des raisons pratiques, on définit

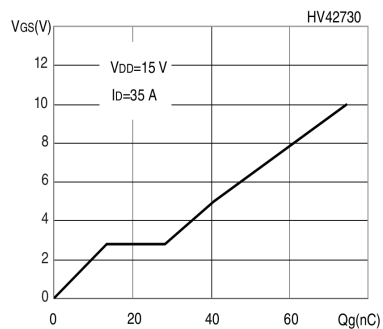
- ▶  $C_{ISS}$  (capacité vue de la grille) =  $C_{GD} + C_{GS}$
- ▶  $C_{RSS}$  (capacité "reverse") =  $C_{GD}$
- ▶  $C_{OSS}$  (capacité de sortie) =  $C_{GD} + C_{DS}$

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



132 / 154

# MOSFET – capacités parasites



- ▶ charge électrique à fournir pour faire commuter le composant
- ▶ le plateau correspond à la commutation
- ▶ dépend de la tension  $V_{DS}$

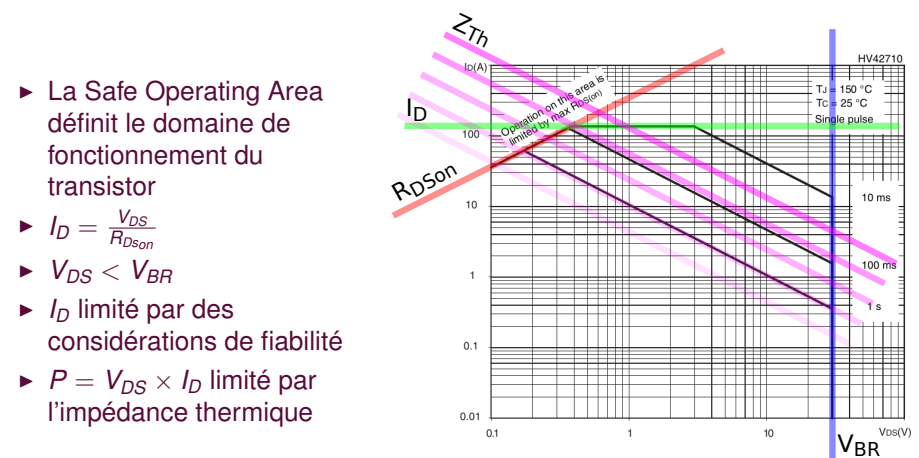
- ▶  $Q = CV_{GS} = I_G \times t_{charge}$
- ▶ ex : à 8 V  $Q_g = 60$  nC  $\rightarrow$  sous  $I_g = 1$  A commutation 60 ns
- ▶ énergie stockée =  $\frac{1}{2} CV_{GS}^2 = \frac{1}{2} Q_g V_{GS} = \frac{1}{2} 60 \cdot 10^{-9} \times 8 = 240 \cdot 10^{-9} J$

Source : datasheet du Mos STL150N3LLH5



133 / 154

# MOSFET – Safe Operating Area



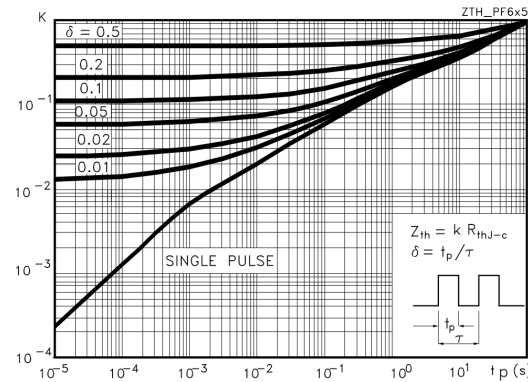
- ▶ La Safe Operating Area définit le domaine de fonctionnement du transistor
- ▶  $I_D = \frac{V_{DS}}{R_{DSon}}$
- ▶  $V_{DS} < V_{BR}$
- ▶  $I_D$  limité par des considérations de fiabilité
- ▶  $P = V_{DS} \times I_D$  limité par l'impédance thermique

Source : datasheet du Mos STL150N3LLH5



134 / 154





Source : datasheet du Mos STL150N3LLHS

Abaque donnant la  $R_{Th}$  apparente en mode impulsif :

- ▶ *duty cycle* (rapport cyclique)  $\delta$
- ▶ durée d'impulsion  $t_d$

Attention, c'est un **facteur correctif**

- ▶ En mono-impulsion : effet prépondérant des capacités thermiques
- ▶ En mode répétitif : on a un effet de filtrage passe-bas ( $R_{Th\text{apparent}} = \delta R_{Th}$ )



Caractéristiques électriques

- Diode
- MOSFET
- IGBT

Commutation des composants

Exercices

Conclusion



$V_{CE\text{max}}$  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)

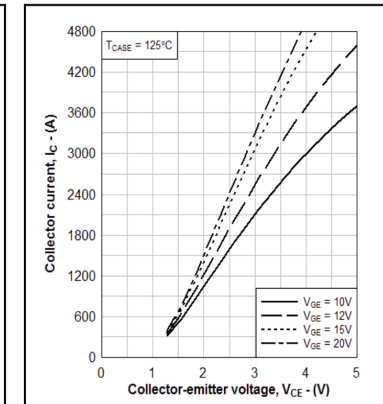
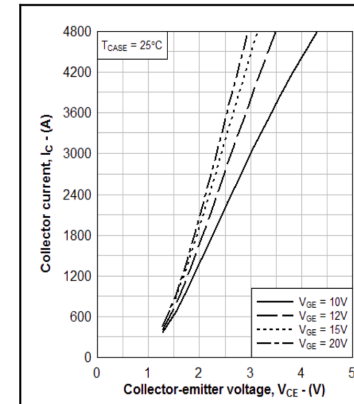
$V_{CE\text{Sat}}$  : la **chute de tension à l'état passant**

- ▶ 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

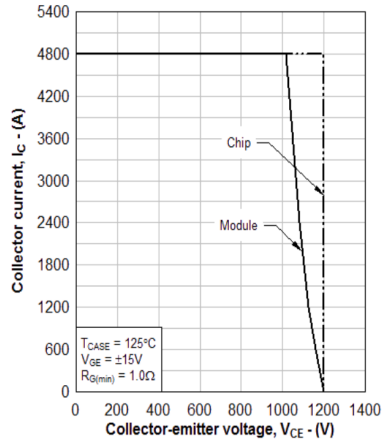
- ▶ PT : faibles pertes en conduction
- ▶ NPT : meilleure tenue en court-circuit



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

Source : datasheet de l'IGBT DIM2400ESS12-A000

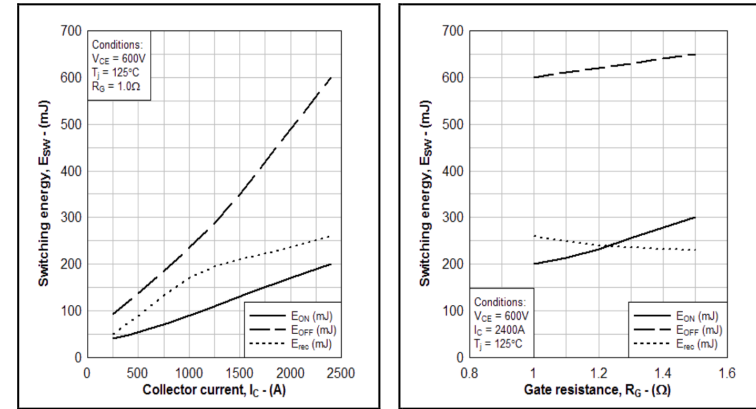




- ▶ zone délimitée par
  - ▶ courant max.
  - ▶ tension max.
  - ▶ puissance max.
  - ▶ tension min (pas visible)
- ▶ la thermique transitoire n'est pas tracée ici.

Toutes les caractéristiques thermiques vues pour le MOSFET (impédance, etc.) se retrouvent ici

Source : datasheet de l'IGBT DIM2400ESS12-A000

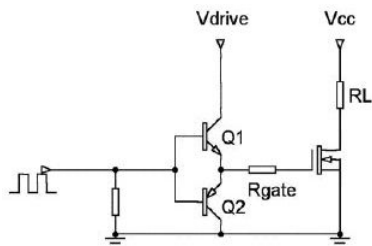


$E_{ON}$  pertes à la fermeture du transistor

$E_{OFF}$  pertes à l'ouverture

$E_{rec}$  pertes dues au recouvrement de la diode (ce module contient 1 IGBT et 1 diode)

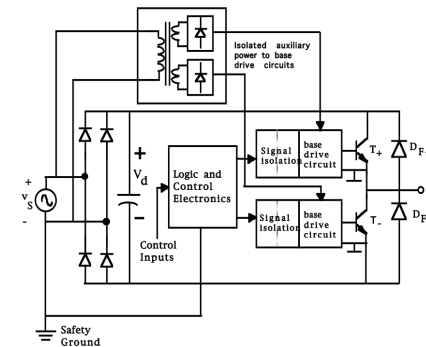
Source : datasheet de l'IGBT DIM2400ESS12-A000



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.

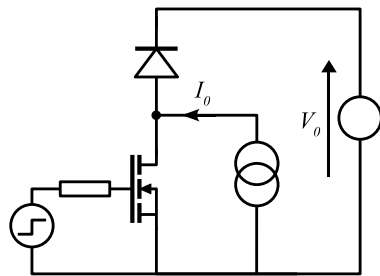


- ▶ Alimentation isolée des drivers
  - ▶ transformateurs
  - ▶ "pompe de charge" (bootstrap)
- ▶ Isolement des signaux de commande
  - ▶ transformateurs
  - ▶ fibre optique, optocoupleurs
  - ▶ level shifter

source : "Power Electronics Converters, Applications and Design", N. Mohan, T. Underland et W. Robbins, John Wiley and Sons, USA.



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

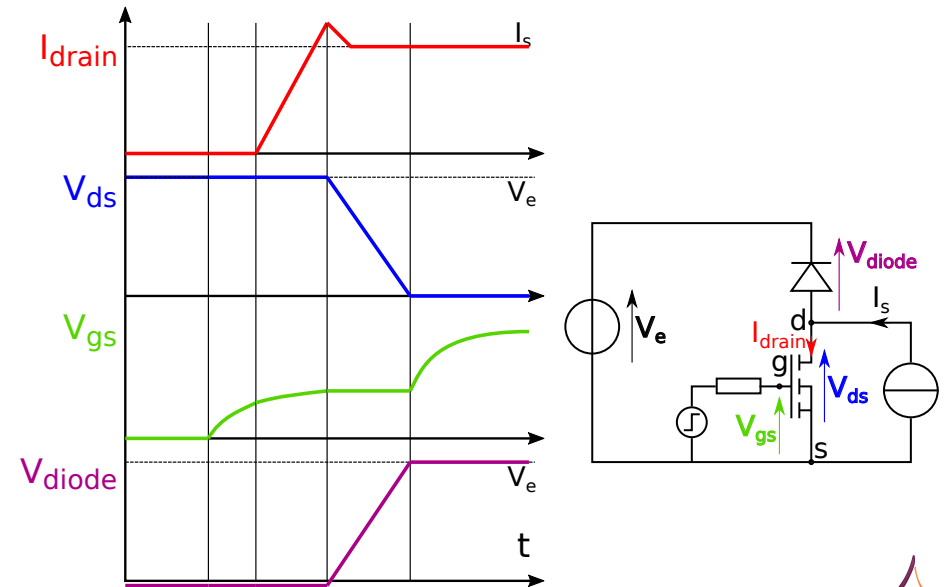


- ▶ La cellule de commutation est la “brique de base” des convertisseurs
- ▶ Connexion entre une source de courant et une source de tension



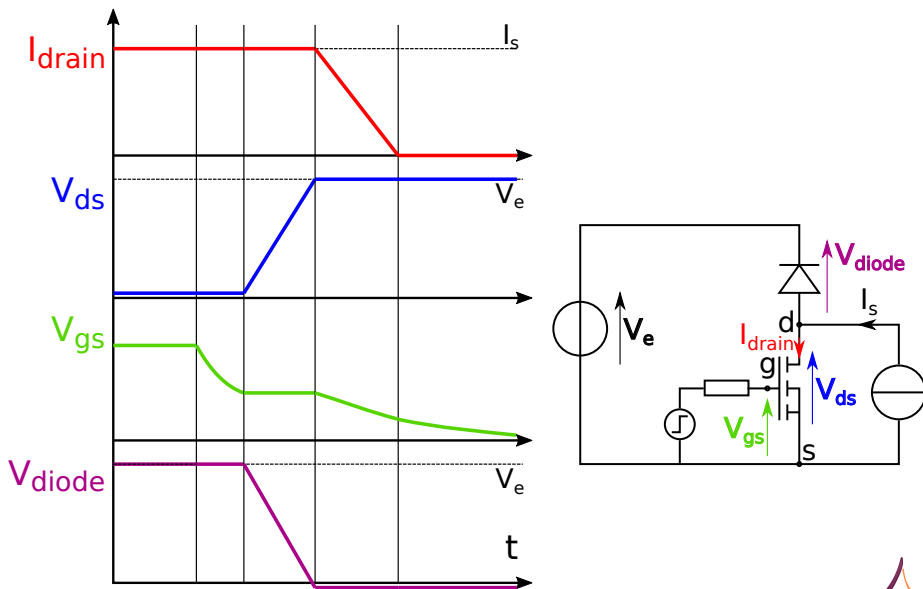
144 / 154

## Cellule de commutation – fermeture



145 / 154

## Cellule de commutation – ouverture



146 / 154

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

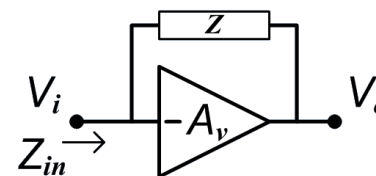
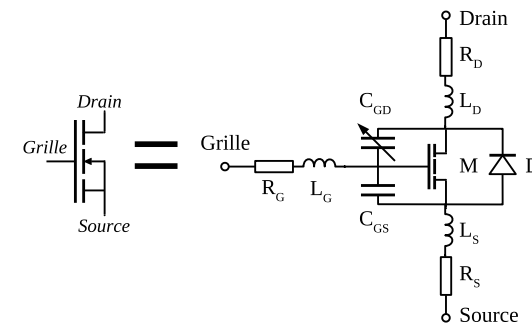


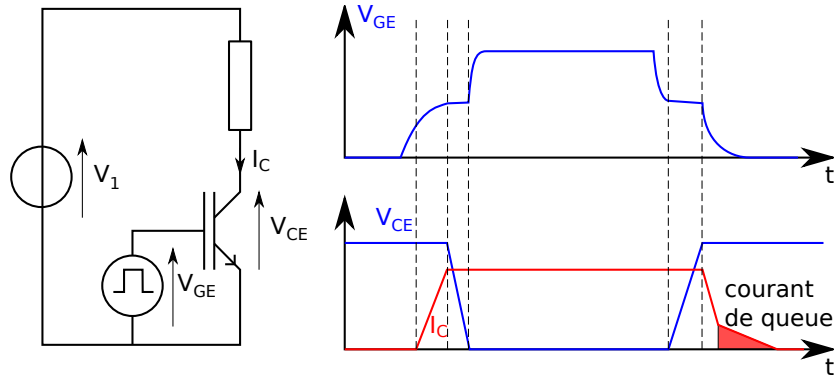
image source : wikipedia

- ▶ 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  $Z = \frac{1}{j\omega C_{GD}}$
- ▶ 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.



147 / 154



- ▶ Vitesse de commutation (hors queue) pilotée par la résistance de grille
- ▶ trainée de courant à l'ouverture (*tail current*) : évacuation des charges stockées
- ▶ compromis vitesse/conduction, dépendant du type d'IGBT



À partir de la *datasheet* de la diode IDP30E120 :

- ▶ Donnez la chute de tension et les pertes en conduction pour  $I_F=15\text{ A}$ ,  $30\text{ A}$ ,  $60\text{ A}$  à  $T_J=-40^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$  et  $140^\circ\text{C}$ .
- ▶ tracez ces résultats dans un graphe  $P=f(T_J)$  (échelle verticale 1 cm :10 W, échelle horizontale 1 cm :20°C).
- ▶ tracez sur le même graphe la caractéristique d'un système de refroidissement de  $R_{TH}=2\text{ K/W}$  à température ambiante de  $20^\circ\text{C}$
- ▶ Quelles sont les températures d'équilibre à 15, 30 et 60 A ?
- ▶ Dans ces conditions de refroidissement, la diode fonctionne à 15 A continu, mais subit une impulsion de courant de 60 A d'une durée de  $200\ \mu\text{s}$ . Quelle est la température de jonction atteinte ?



Sur la *datasheet* du MOSFET STL150N3

- ▶ Quelles sont les grandeurs principales ? (tension, courant, tension à l'état passant)
- ▶ Quelle tension de grille appliquer pour piloter le composant ?
- ▶ On fait fonctionner le module avec un courant de drain de 35 A, à  $T_J=125^\circ\text{C}$ .
  - ▶ Quelles sont la chute de tension à l'état passant et les pertes en conduction dans le MOSFET ?
- ▶ La fréquence de commutation est de 100 kHz, le rapport cyclique de 0,5, le courant de grille de 1 A (schema)
  - ▶ quelles sont les pertes en commutation dans le MOSFET ?
- ▶ Quelles sont les pertes totales ? quelle est la résistance thermique du radiateur à utiliser si  $T_A=25^\circ\text{C}$  ?
- ▶ Comment calculez-vous les pertes en avalanche durant le test de la figure 17 ?



Sur la *datasheet* de l'IGBT DIM2400ESS12

- ▶ Quelle est la fonction réalisée par ce module ?
- ▶ Quelles sont les grandeurs principales ? (tension, courant, tension à l'état passant)
- ▶ Quelle tension de grille appliquer pour piloter le composant ?
- ▶ On fait fonctionner le module avec un courant de collecteur de 2000 A, à  $T_J=125^\circ\text{C}$ .
  - ▶ Quelles sont la chute de tension à l'état passant et les pertes en conduction dans l'IGBT ? dans la diode ?
- ▶ La fréquence de commutation est de 1 kHz
  - ▶ quelles sont les pertes en commutation dans l'IGBT ? dans la diode ?
- ▶ Quelles sont les pertes totales (IGBT et diode fonctionnent 50% du temps chacun) ? quelle est la résistance thermique du radiateur à utiliser si  $T_A=25^\circ\text{C}$  ?



- ▶ "Dispositifs de l'électronique de puissance", J. Arnould et P. Merle, 1992, Hermès, Paris (2 tomes). Clair et bien écrit, mais plus tout à fait à jour (en français).
- ▶ "Power Electronics Converters, Applications and Design", N. Mohan, T. Underland et W. Robbins, John Willey and Sons, USA. Probablement le livre d'électronique de puissance le plus utilisé en cours dans le monde anglo-saxon (en anglais).
- ▶ "Power Semiconductor Devices", B. J. Baliga, PWS publishing company, 1995. Livre très complet (et un peu ardu) sur les composants actifs de puissance.

