

Composants Actifs pour l'Électronique de puissance

Master M1

Cyril BUTTAY

Laboratoire Ampère, Lyon, France

7 mars 2017

Première partie I

Structure des composants de puissance

Introduction

Généralités

Structure des composants

Rappels

Cas de la diode bipolaire

Quelques composants commandables

Éléments de technologie

Introduction

Généralités

Structure des composants

Rappels

Cas de la diode bipolaire

Quelques composants commandables

Éléments de technologie

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.bultay@insa-lyon.fr
 - ▶ Bureau : 3^{ème} étage, bât L de Vinci

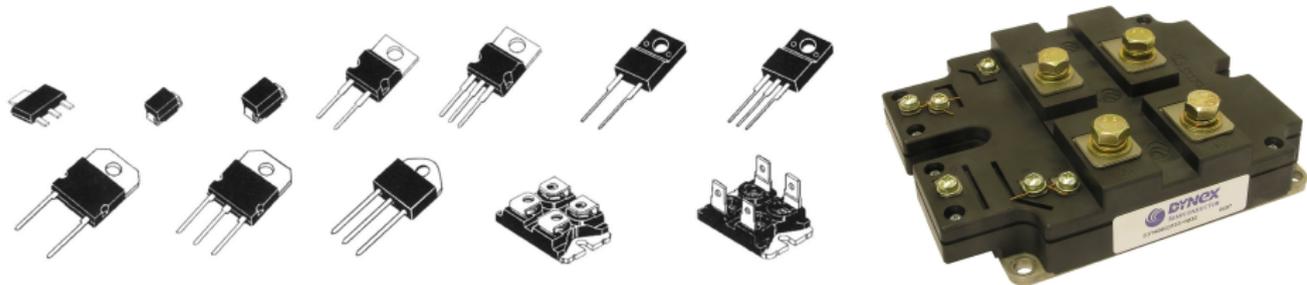
Qui suis-je ?

- ▶ 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
 - ▶ Bureau : 3^{ieme} étage, bât L de Vinci

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 ?

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

Aéronautique

Nouvelles applications

Énergies renouvelables

Automobile

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



Source : wikipedia

Aéronautique

Nouvelles applications

Énergies renouvelables

Automobile

Aéronautique



Source : Airbus

- ▶ Augmentation de la puissance embarquée (1 MW)
- ▶ Haute fiabilité
- ▶ environnement sévère

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

Amélioration des performances

Compacité

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

Amélioration des performances

Compacité

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

Rendement

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

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)

Introduction

Généralités

Structure des composants

Rappels

Cas de la diode bipolaire

Quelques composants commandables

Éléments de technologie

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 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 signal :

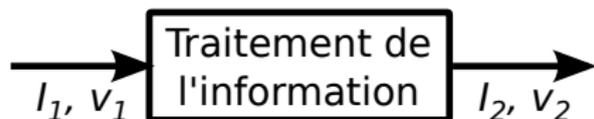
- ▶ Notion principale :
le signal
- ▶ Objectif : traiter l'information sans la dégrader
 - ▶ amplification
 - ▶ numérisation
 - ▶ etc.

Électronique de puissance :

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

Électronique signal :

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

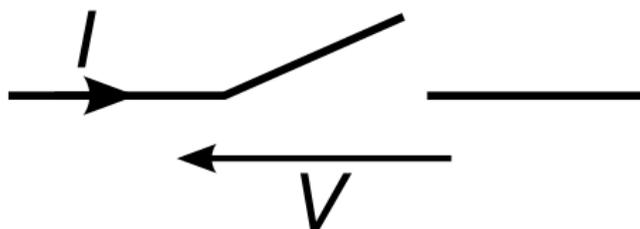


Électronique de puissance :

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



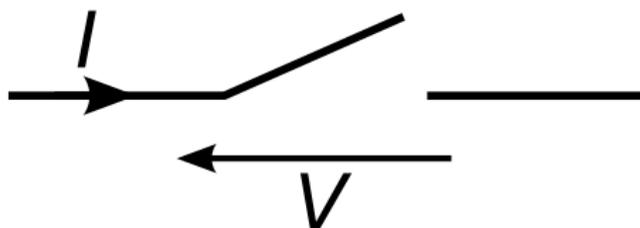
Électronique de puissance = commutation



2 états stables :

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

Électronique de puissance = commutation



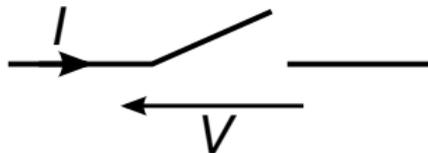
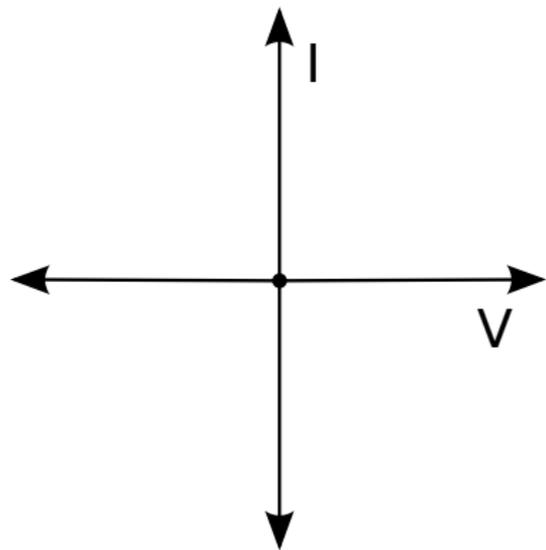
2 états stables :

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

Dans les deux états, pas de
puissance dissipée :

$$P = VI = 0$$

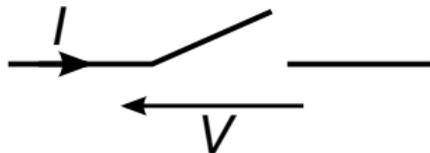
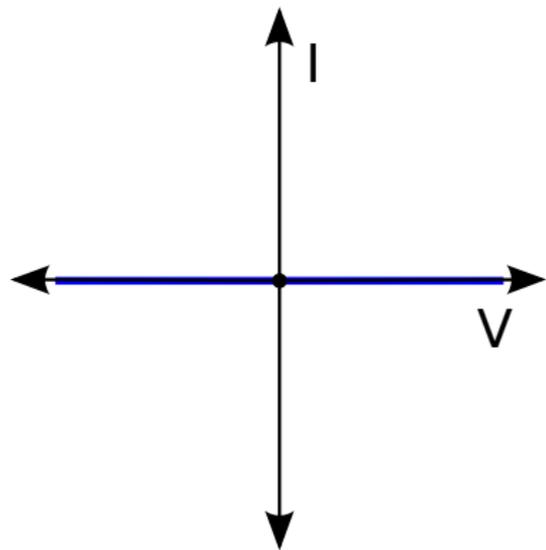
Les 4 quadrants



Représentation dans le plan (I , V)

- ▶ état bloqué
- ▶ état passant

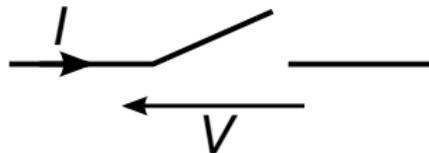
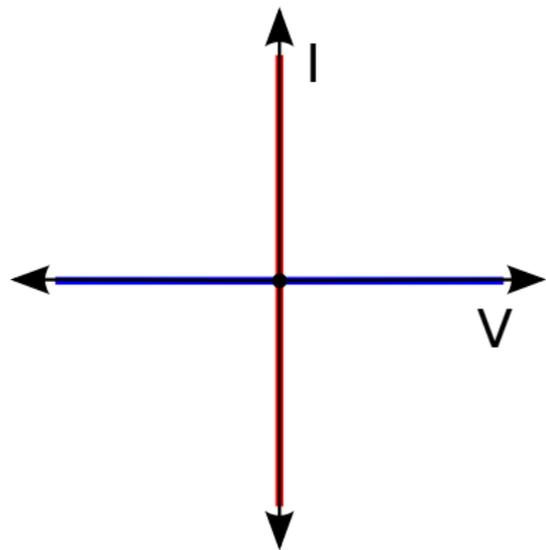
Les 4 quadrants



Représentation dans le plan (I , V)

- ▶ état bloqué
- ▶ état passant

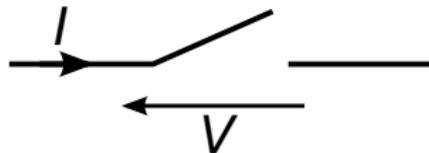
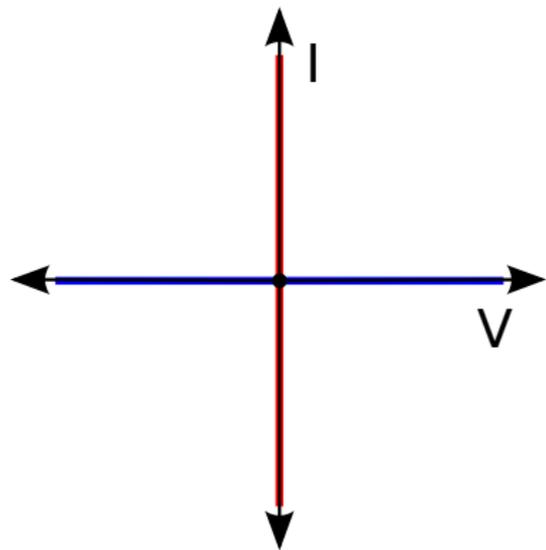
Les 4 quadrants



Représentation dans le plan (I, V)

- ▶ état bloqué
- ▶ état passant

Les 4 quadrants

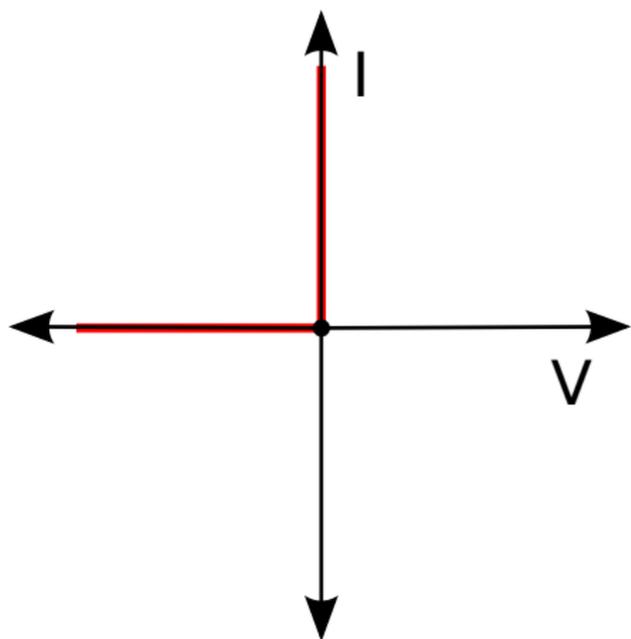


Représentation dans le plan (I , V)

- ▶ état bloqué
- ▶ état passant

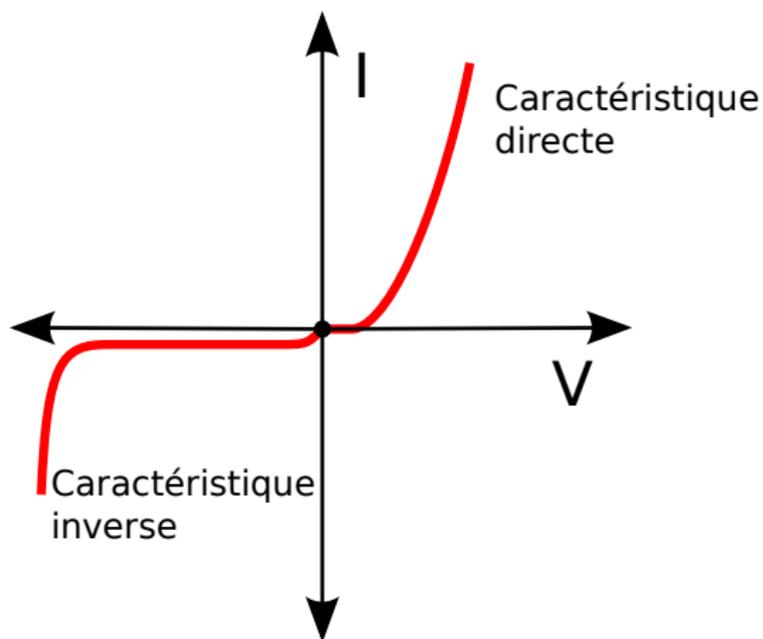
Tous les composants ne fonctionnent pas dans les 4 quadrants !

Les 4 quadrants – exemple de la diode



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

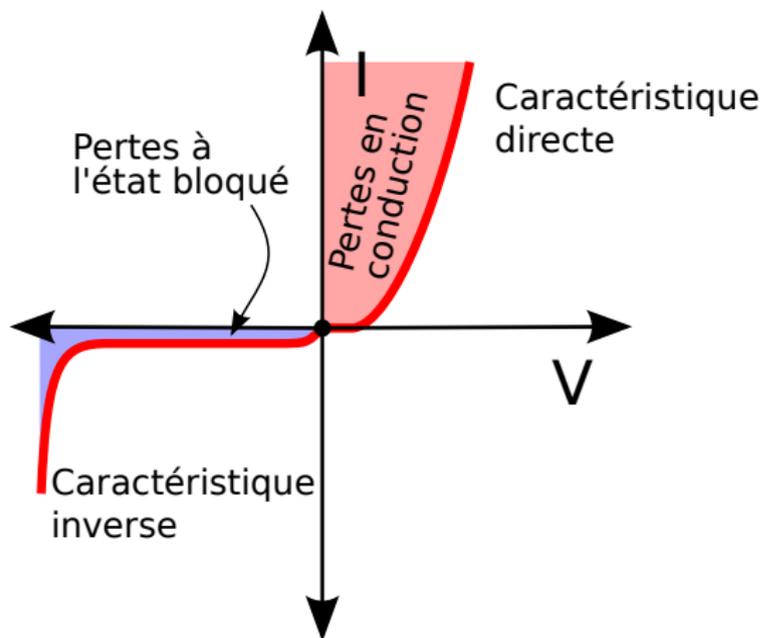
Les 4 quadrants – exemple de la diode



▶ attention aux ordres de grandeur :

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

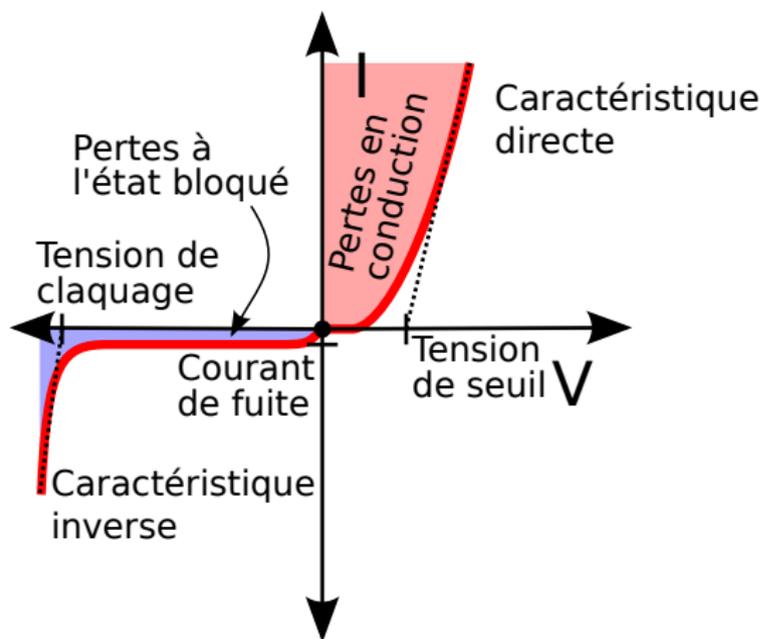
Les 4 quadrants – exemple de la diode



▶ attention aux ordres de grandeur :

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

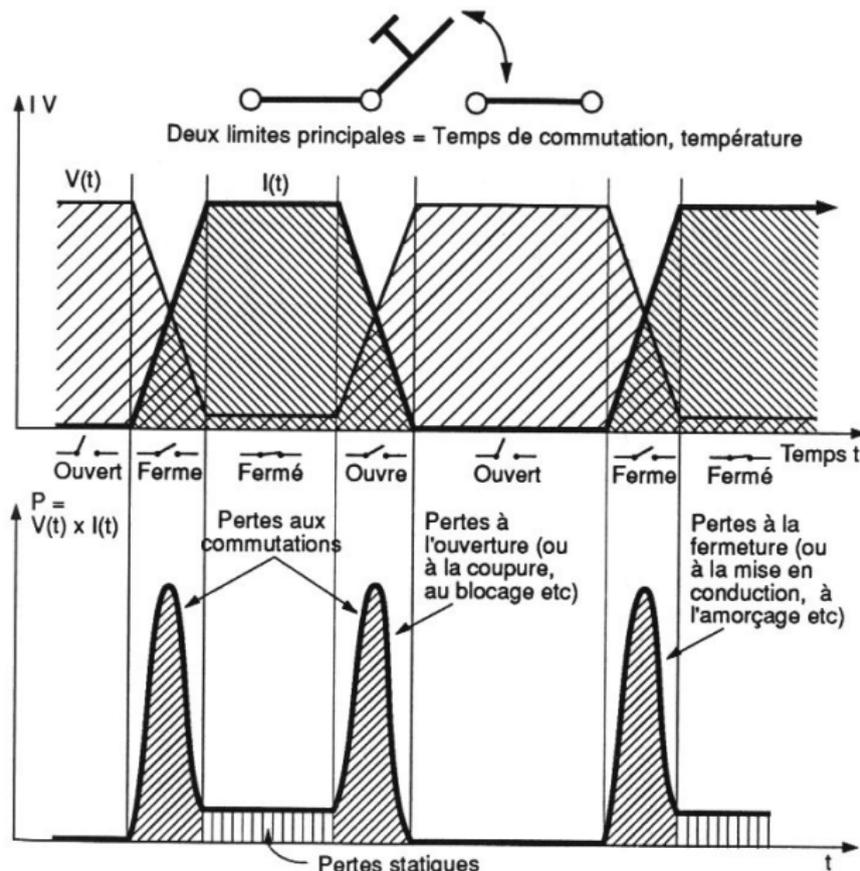
Les 4 quadrants – exemple de la diode



► 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

La commutation



Les commutations causent :

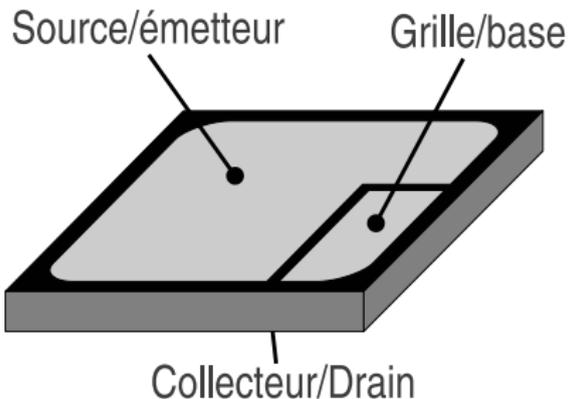
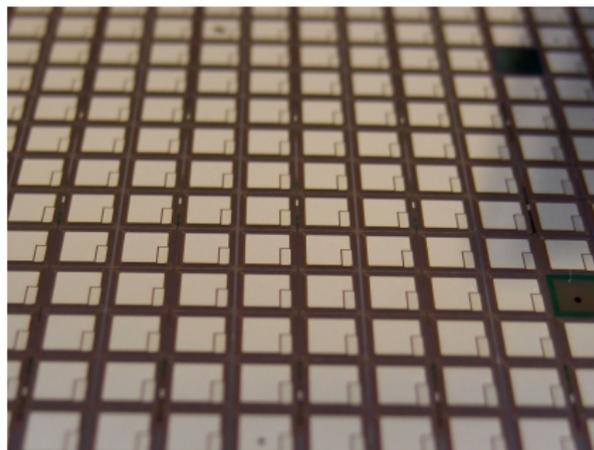
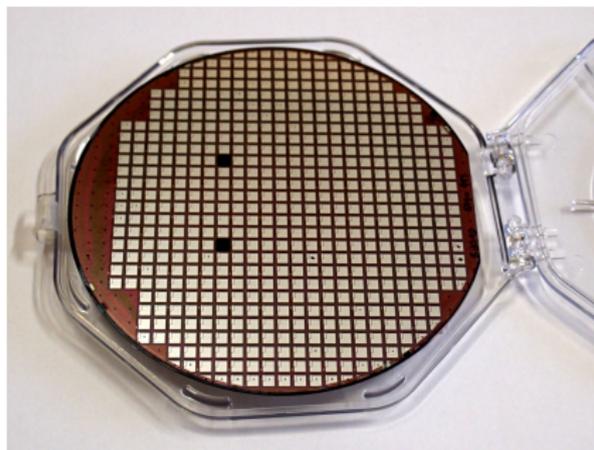
- ▶ pertes
- ▶ perturbations EM

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)

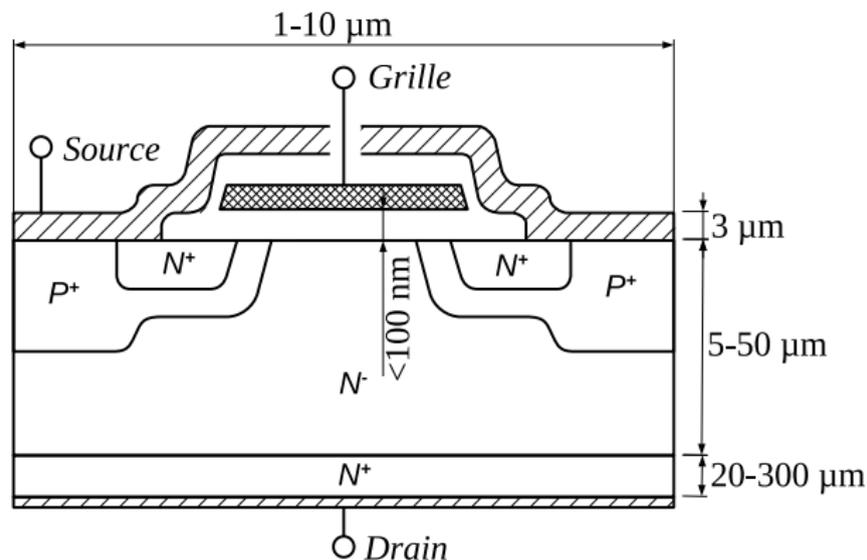
Figure 1-4 : Possibilités de commutations réelles des DEP.

Géométrie des composants de puissance



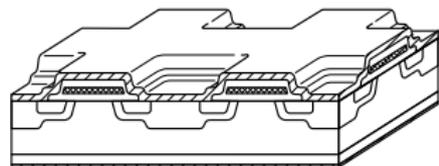
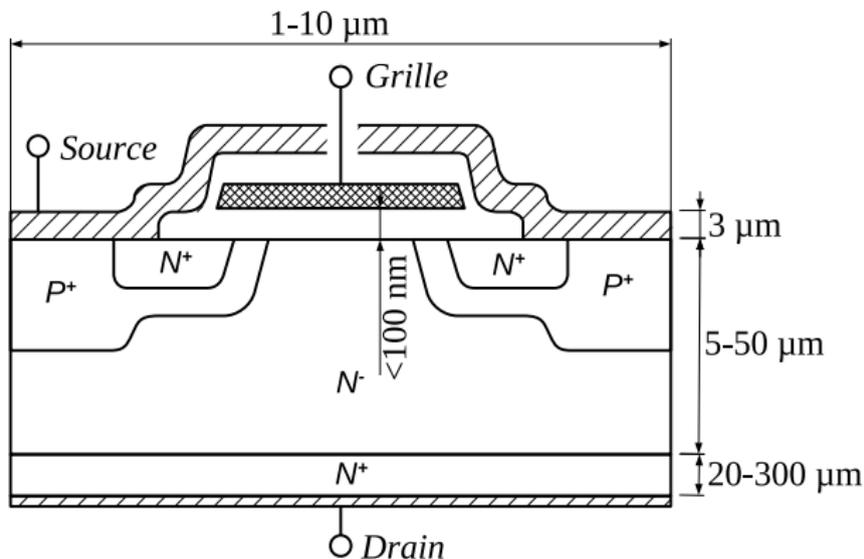
- ▶ 1 ou 2 électrodes au-dessus, une en-dessous
- ▶ 50-400 μm d'épaisseur, 1-10000 mm^2 de de surface
- ▶ surface \propto courant direct
- ▶ épaisseur dépend de la tension et de la fabrication

Dimensions des composants



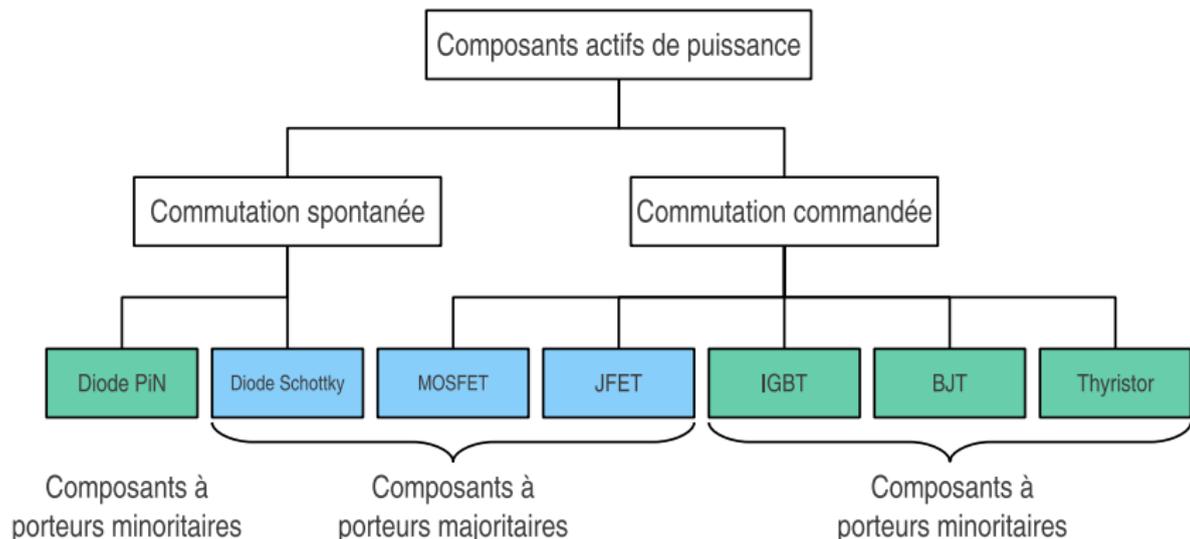
Les schémas de structure ne sont **jamais** à l'échelle !

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 !

Introduction

Généralités

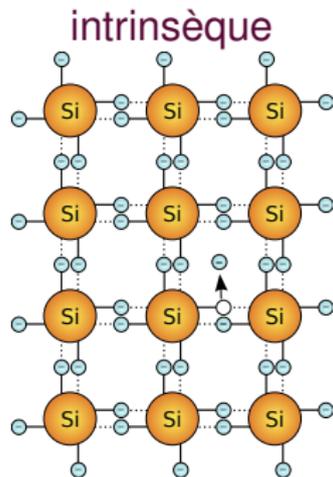
Structure des composants

Rappels

Cas de la diode bipolaire

Quelques composants commandables

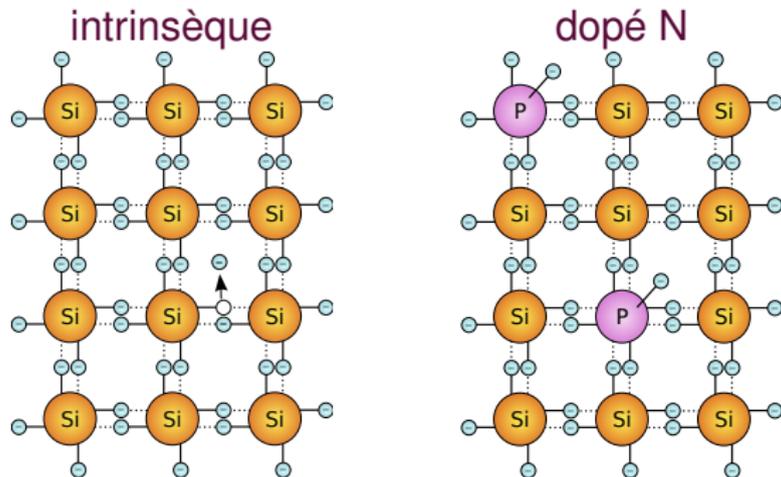
Éléments de technologie



- ▶ 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

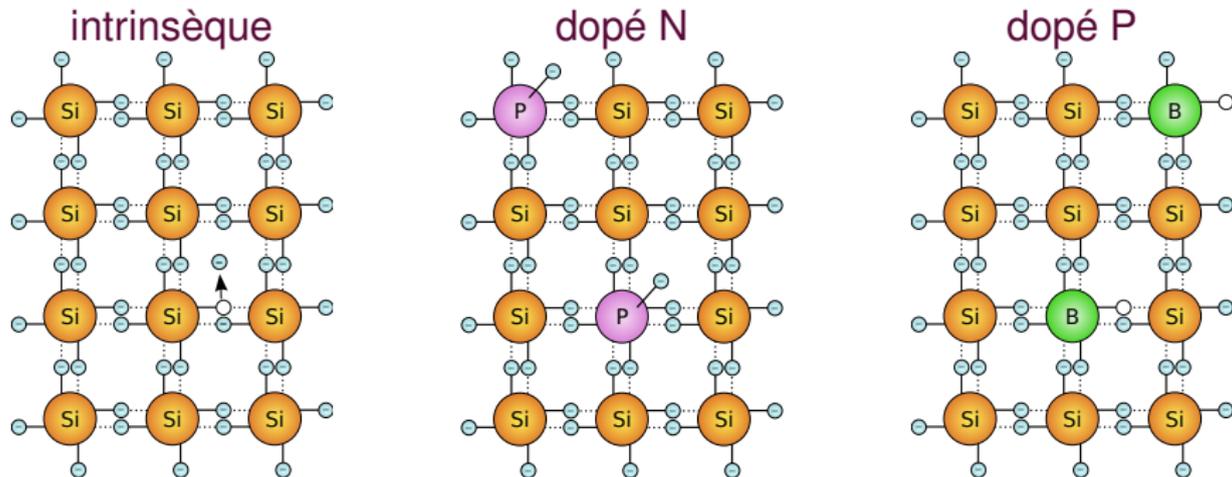
- ▶ ajout d'atomes pentavalents (donneurs) : excès d'électrons, dopage N
- ▶ ajout d'atomes trivalents (accepteurs) : excès de trous, dopage P
- ▶ Ordres de grandeur : Si : 10^{23} atomes/cm³. Densité de dopants : 10^{16} à 10^{19} /cm³



- ▶ 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/cm³. Densité de dopants : 10^{16} à 10^{19} /cm³



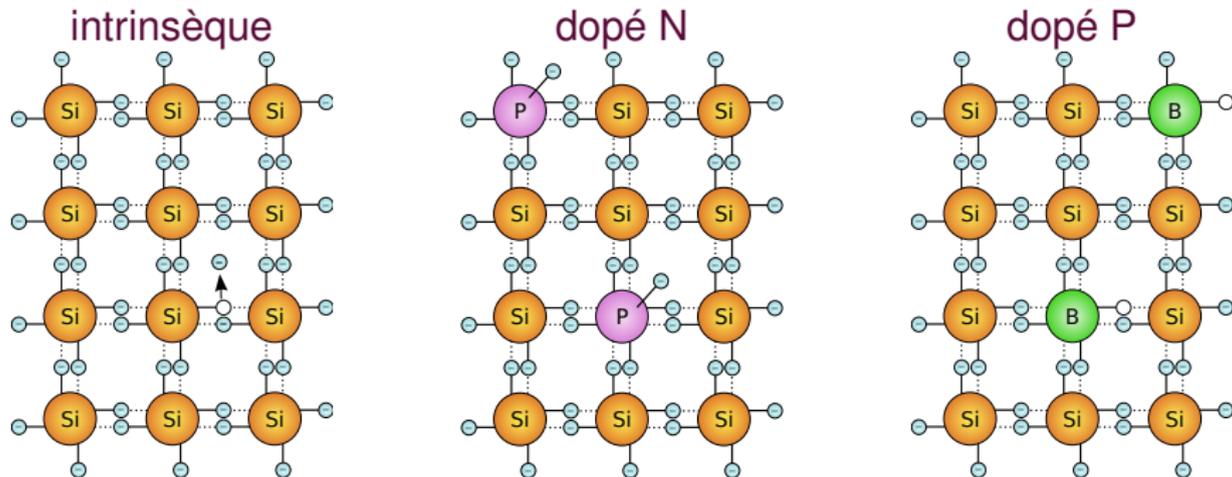
- ▶ l'agitation thermique crée des paires électrons-trous

$n_i \propto e^{-\frac{E_g}{2kT}}$, 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

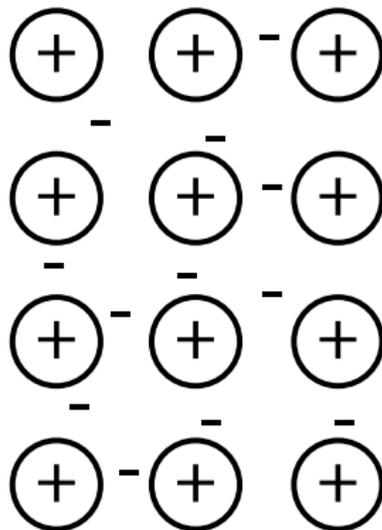
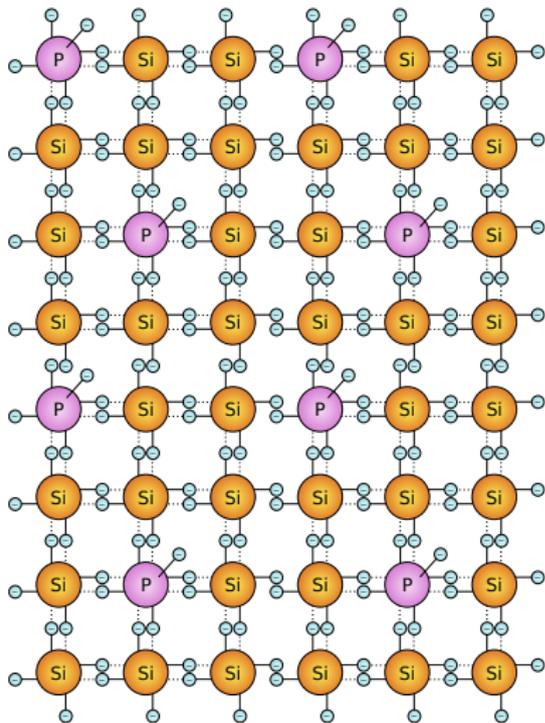
- ▶ Ordres de grandeur : Si : 10^{23} atomes/cm³. Densité de dopants : 10^{16} à 10^{19} /cm³



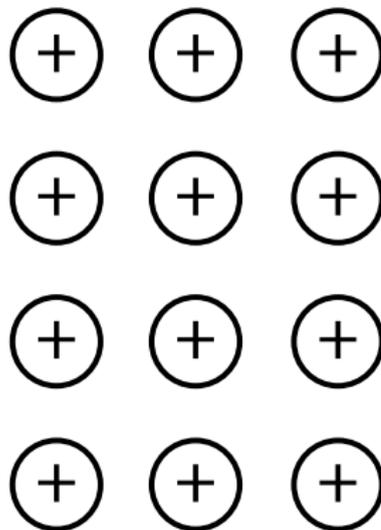
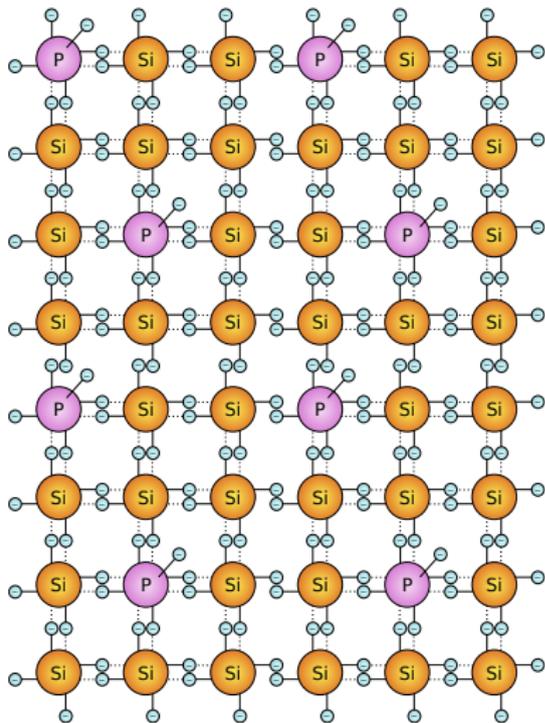
- ▶ l'agitation thermique crée des paires électrons-trous

$n_i \propto e^{-\frac{E_g}{2kT}}$, 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

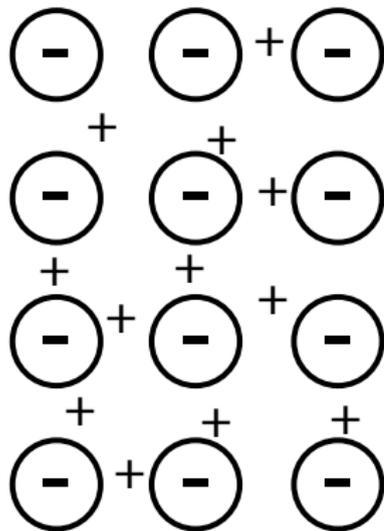
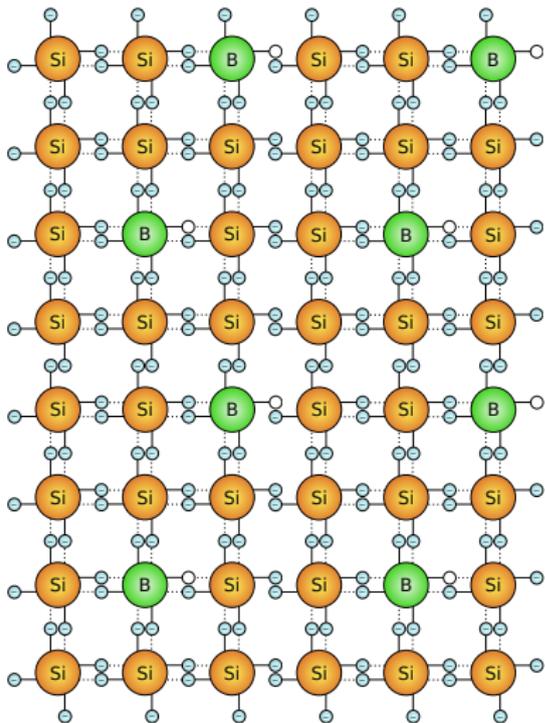
- ▶ ajout d'atomes pentavalents (donneurs) : excès d'électrons, dopage N
- ▶ ajout d'atomes trivalents (accepteurs) : excès de trous, dopage P
- ▶ Ordres de grandeur : Si : 10^{23} atomes/cm³. Densité de dopants : 10^{16} à 10^{19} /cm³



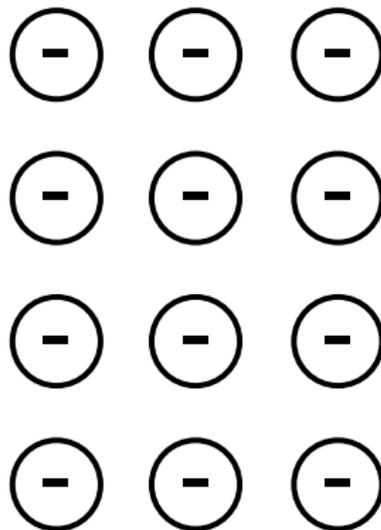
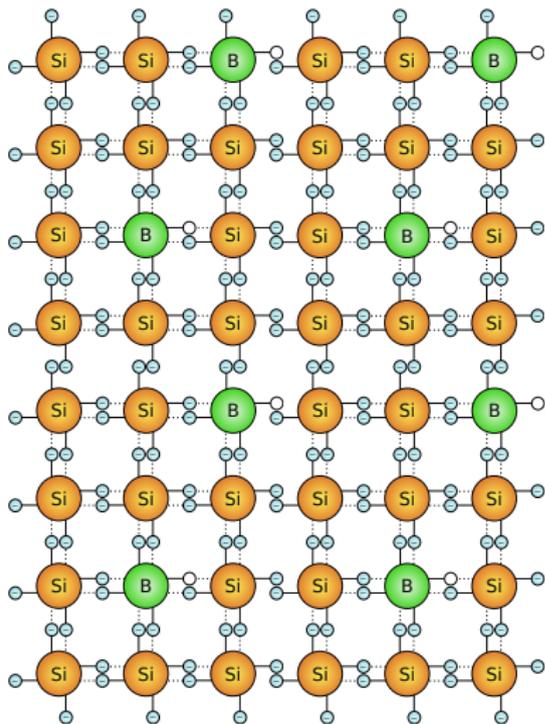
- ▶ Charges positives fixes
- ▶ Charges négatives mobiles
- ▶ au repos, neutralité électrique
- ▶ électrons évacuées : charge d'espace positive



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

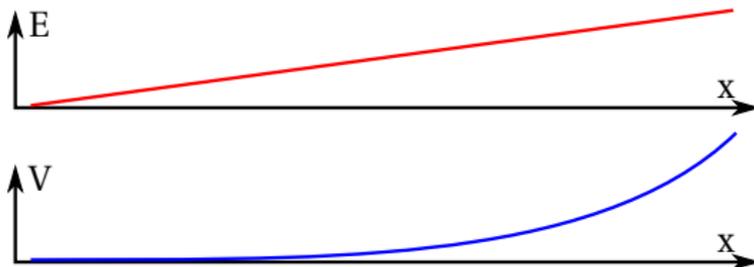


- ▶ Charges négatives fixes
- ▶ Charges positives mobiles
- ▶ au repos, neutralité électrique
- ▶ trous évacuées : charge d'espace négative



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

Exemple dopage N déserté

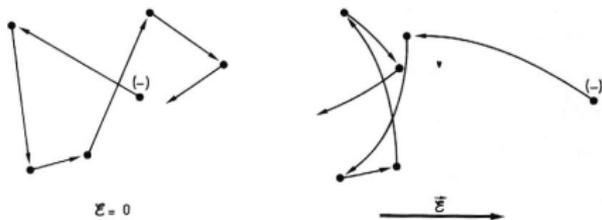


- ▶ Densité de dopants : N_D (resp. N_A)
- ▶ ϵ permittivité électrique
- ▶ q charge électronique
- ▶ on considère une structure unidimensionnelle selon x

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

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

Courant de dérive

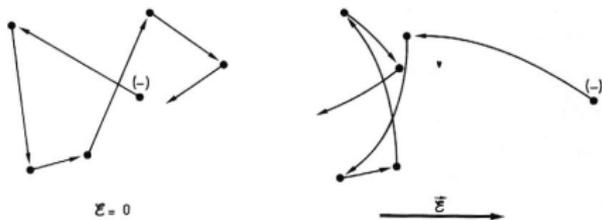


$$\begin{aligned}J_n &= q\mu_n n E \\J_p &= q\mu_p p E \\J_{drift} &= J_n + J_p \\ \text{pour Si, } \mu_n &\approx 3\mu_p\end{aligned}$$

n densité d'électrons libres, **p** densité de trous, μ 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 dérive



$$J_n = q\mu_n n E$$

$$J_p = q\mu_p p E$$

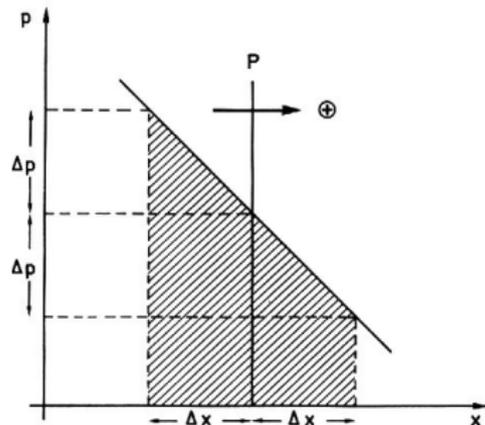
$$J_{drift} = J_n + J_p$$

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

n densité d'électrons libres, **p** densité de trous, μ 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



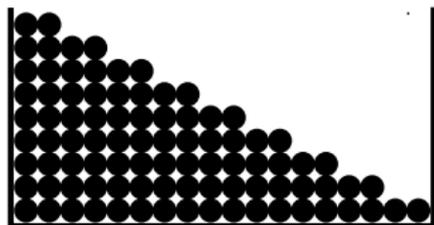
causé par un gradient de densité de charges

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

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

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

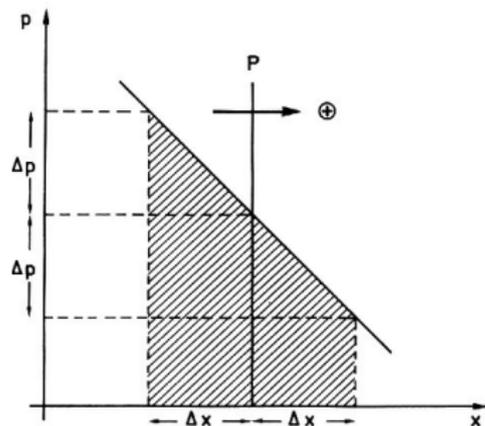
Analogie : tas de sable



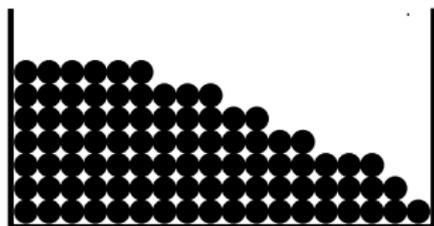
- ▶ sous l'effet de vibrations, le tas s'aplatit
- ▶ probabilité identique qu'un grain aille à gauche ou à droite
- ▶ mouvement net vers la droite

Dans le cas des charges :

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



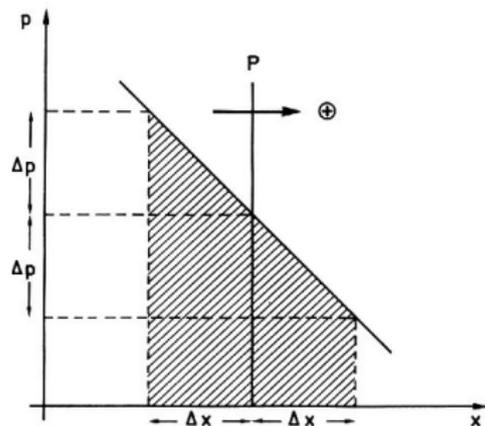
Analogie : tas de sable



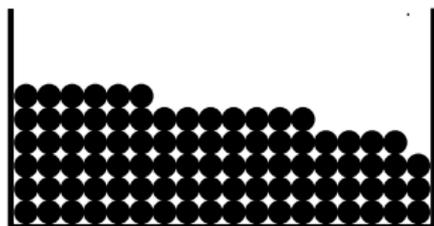
- ▶ sous l'effet de vibrations, le tas s'aplatit
- ▶ probabilité identique qu'un grain aille à gauche ou à droite
- ▶ mouvement net vers la droite

Dans le cas des charges :

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



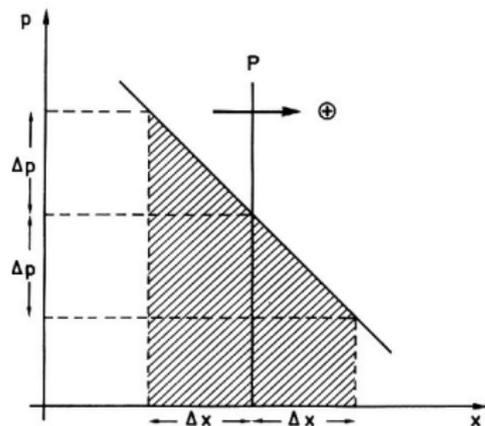
Analogie : tas de sable



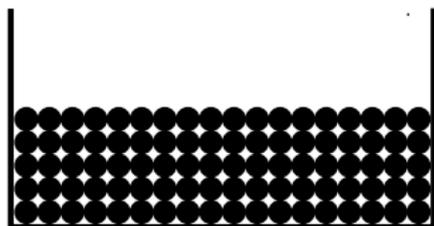
- ▶ sous l'effet de vibrations, le tas s'aplatit
- ▶ probabilité identique qu'un grain aille à gauche ou à droite
- ▶ mouvement net vers la droite

Dans le cas des charges :

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



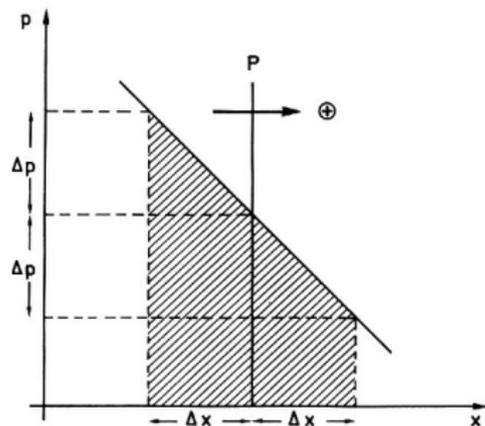
Analogie : tas de sable



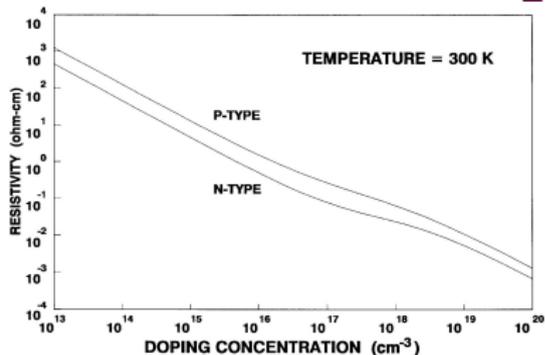
- ▶ sous l'effet de vibrations, le tas s'aplatit
- ▶ probabilité identique qu'un grain aille à gauche ou à droite
- ▶ mouvement net vers la droite

Dans le cas des charges :

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



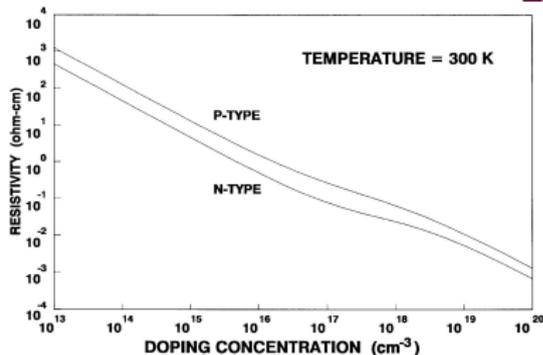
La conduction est assurée par les charges **mobiles**
2 mécanismes :



- ▶ 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)

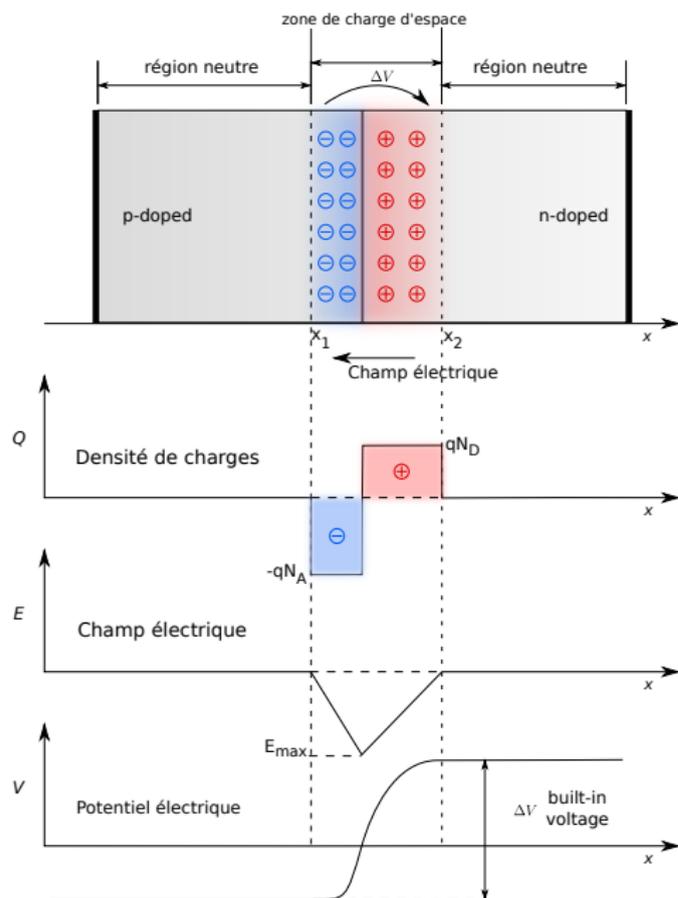
La conduction est assurée par les charges **mobiles**
2 mécanismes :



- ▶ 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)

Jonction PN au repos



Gradient de dopage \rightarrow diffusion

► équilibre \rightarrow 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 $x=0$

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

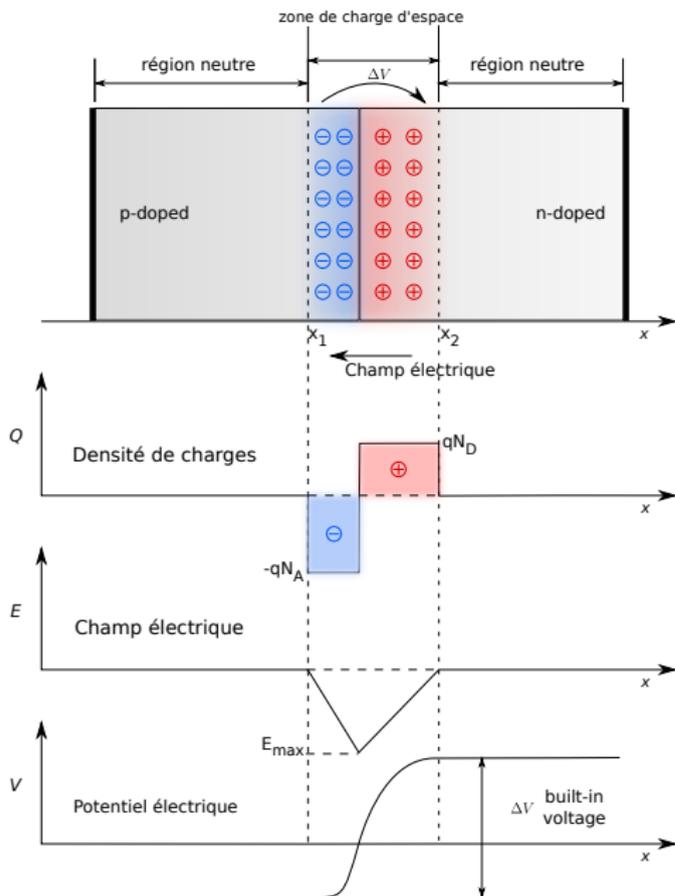
► Un potentiel se développe :

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

source : modifié à partir de wikipedia



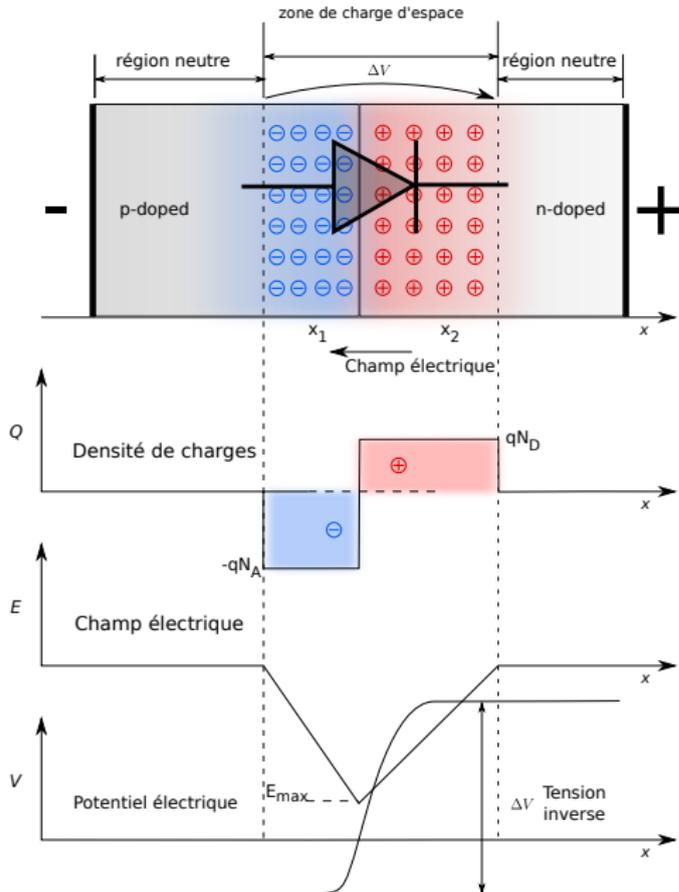
Polarisation inverse



- ▶ 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

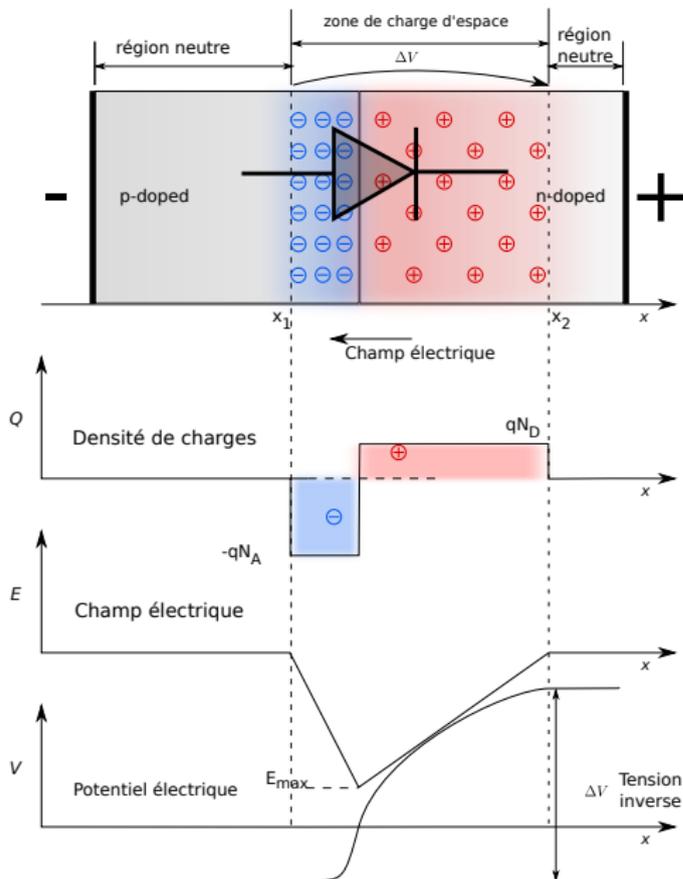
Polarisation inverse



- ▶ 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

Polarisation inverse

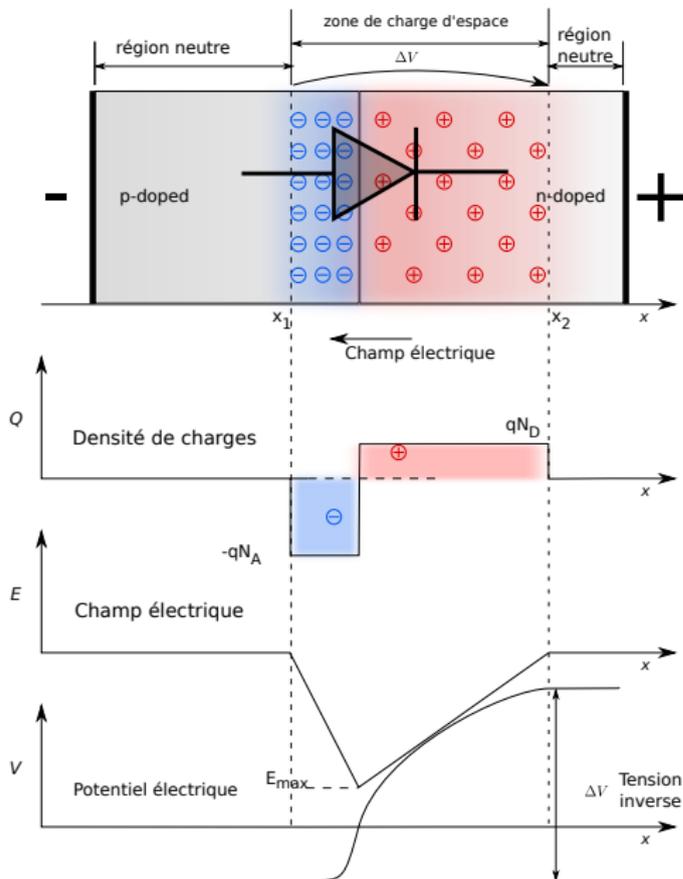


- ▶ lorsque V augmente, la zone désertée s'élargit
- ▶ si les dopages sont asymétriques, la zone la moins dopée supporte la plus grande tension

- ▶ limite : champ de claquage
- ▶ un matériau moins dopé supporte une plus forte tension à E_{max} équivalent

source : modifié à partir de wikipedia

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

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 $E_{BD} = 2 \cdot 10^5 \text{ V.cm}^{-1}$

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

Introduction

Généralités

Structure des composants

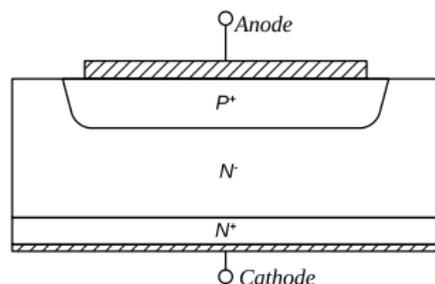
Rappels

Cas de la diode bipolaire

Quelques composants commandables

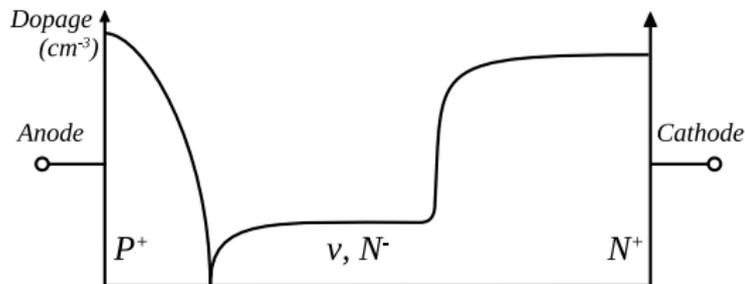
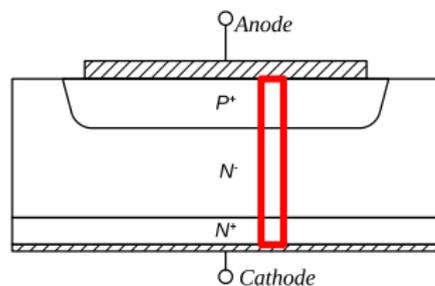
Éléments de technologie

La diode bipolaire, base des composants actifs



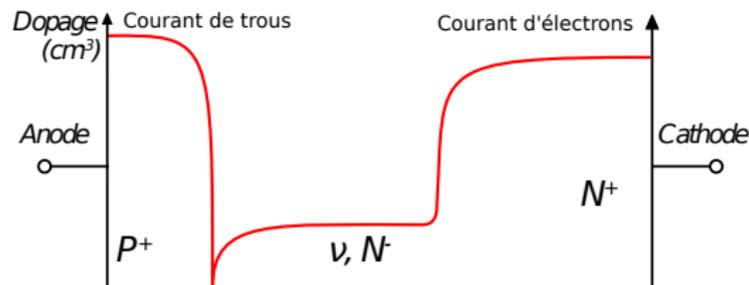
- ▶ présente dans (presque) toutes les structures
- ▶ Jonction PN avec zone faiblement dopée N (N^- , ν ou i pour intrinsèque)
- ▶ Responsable de la tenue en tension du composant

La diode bipolaire, base des composants actifs



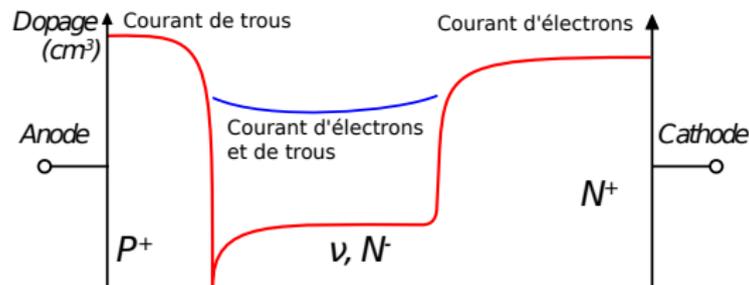
- ▶ présente dans (presque) toutes les structures
- ▶ Jonction PN avec zone faiblement dopée N (N^- , ν ou i pour intrinsèque)
- ▶ Responsable de la tenue en tension du composant

Polarisation directe



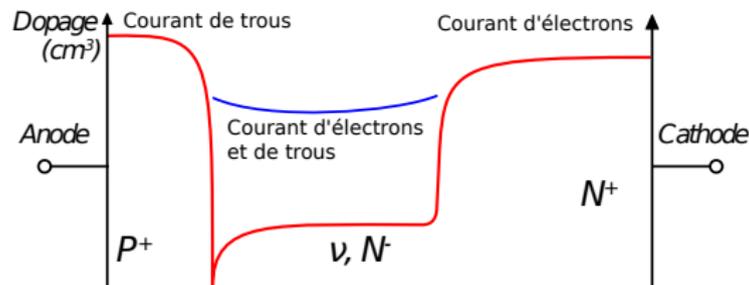
- ▶ à **faible courant, forte résistivité** de la couche ν (faible dopage)
- ▶ à **fort courant**, les zones P^+ et N^+ injectent des porteurs dans la zone ν (**modulation**)
 - ▶ beaucoup plus de porteurs libres \rightarrow fort dopage apparent \rightarrow faible résistivité
 - ▶ ces charges devront 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.

Polarisation directe



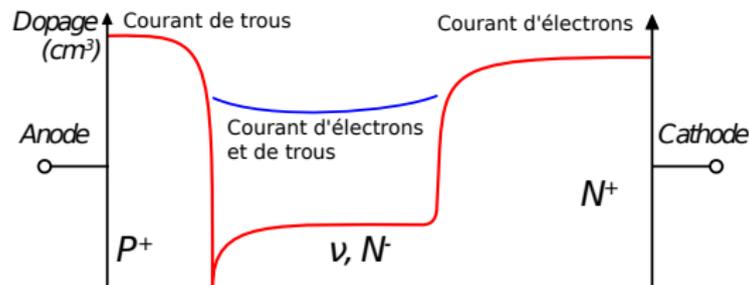
- ▶ à **faible courant, forte résistivité** de la couche ν (faible dopage)
- ▶ à **fort courant**, les zones P^+ et N^+ injectent des porteurs dans la zone ν (**modulation**)
 - ▶ beaucoup plus de porteurs libres \rightarrow fort dopage apparent \rightarrow **faible résistivité**
 - ▶ ces charges devront 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.

Polarisation directe



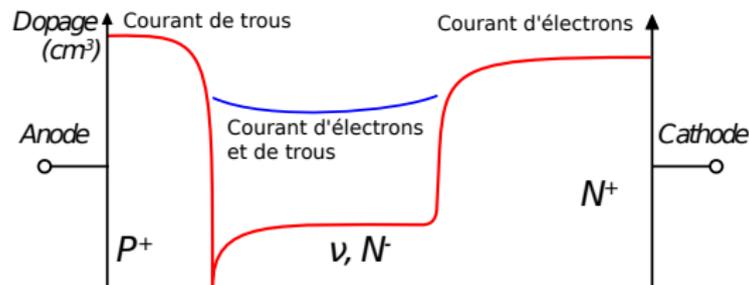
- ▶ à **faible courant, forte résistivité** de la couche ν (faible dopage)
- ▶ à **fort courant**, les zones P^+ et N^+ injectent des porteurs dans la zone ν (**modulation**)
 - ▶ beaucoup plus de porteurs libres \rightarrow fort dopage apparent \rightarrow **faible résistivité**
 - ▶ ces charges devront 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.

Polarisation directe



- ▶ à **faible courant, forte résistivité** de la couche ν (faible dopage)
- ▶ à **fort courant**, les zones P^+ et N^+ injectent des porteurs dans la zone ν (**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.

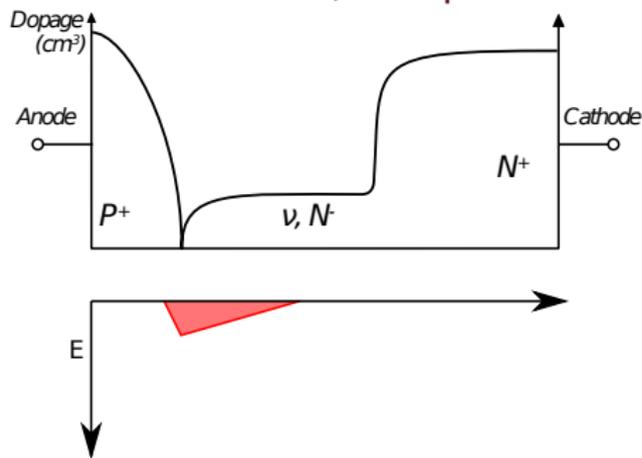
Polarisation directe



- ▶ à **faible courant, forte résistivité** de la couche ν (faible dopage)
- ▶ à **fort courant**, les zones P^+ et N^+ injectent des porteurs dans la zone ν (**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.

Paramètres de conception

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

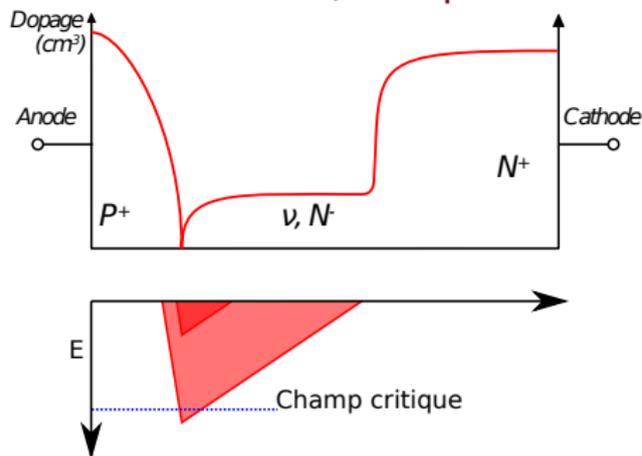


Une diode polarisée en inverse

- ▶ 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 ν , E diminue

Paramètres de conception

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

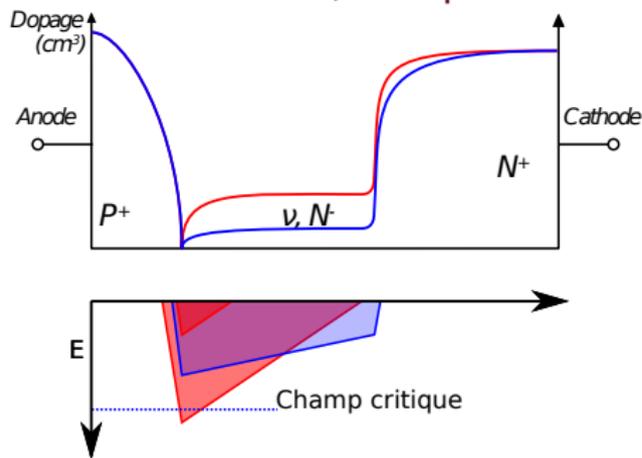


Une diode polarisée en inverse

- ▶ 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 ν , E diminue

Paramètres de conception

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

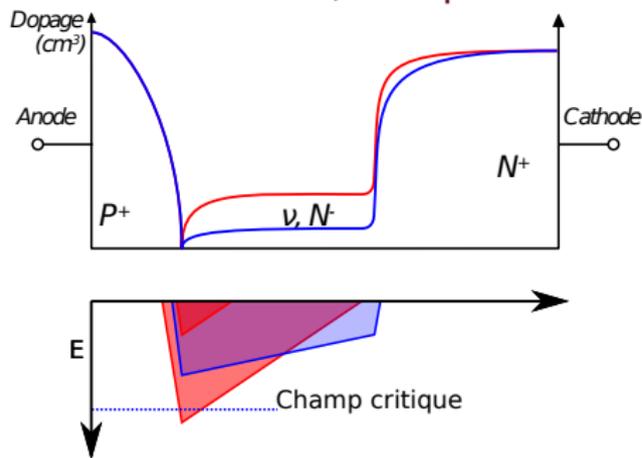


Une diode polarisée en inverse

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

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 $E \propto$ dopage
- ▶ lorsque V augmente, la ZCE s'étend
- ▶ si $E_{max} > E_{critique}$: claquage
- ▶ si on réduit le dopage de la zone ν , E diminue

Paramètres de conception :

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

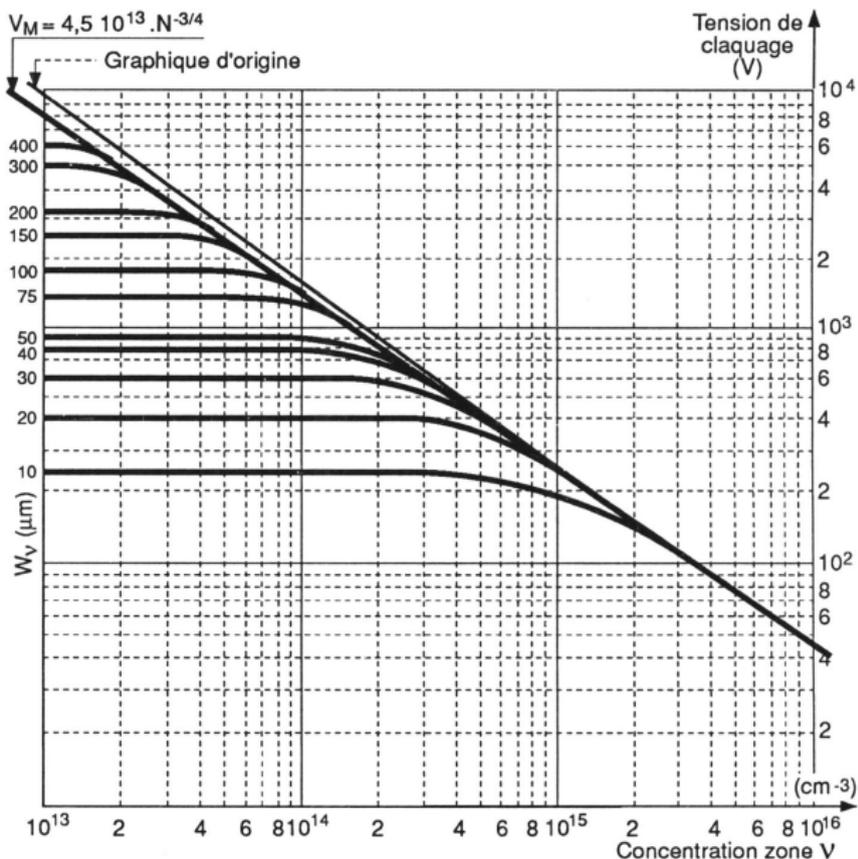
On considère une jonction P ν N avec un dopage P et N⁺ très largement supérieur au dopage ν (N_D)

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

En considérant $\epsilon_r = 11,7$ pour le silicium,
 $\epsilon_0 = 8.85.10^{-14} \text{ F.cm}^{-1}$, $q = 1.6.10^{-19} \text{ C}$, un niveau de dopage de 10^{14} .cm^{-3} et un champ de claquage
 $E_{BD} = 2.10^5 \text{ V.cm}^{-1}$

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

Optimisation de la structure



- ▶ ligne diagonale : limite du champ critique, structure PN
- ▶ Courbes horizontales : structure P ν 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

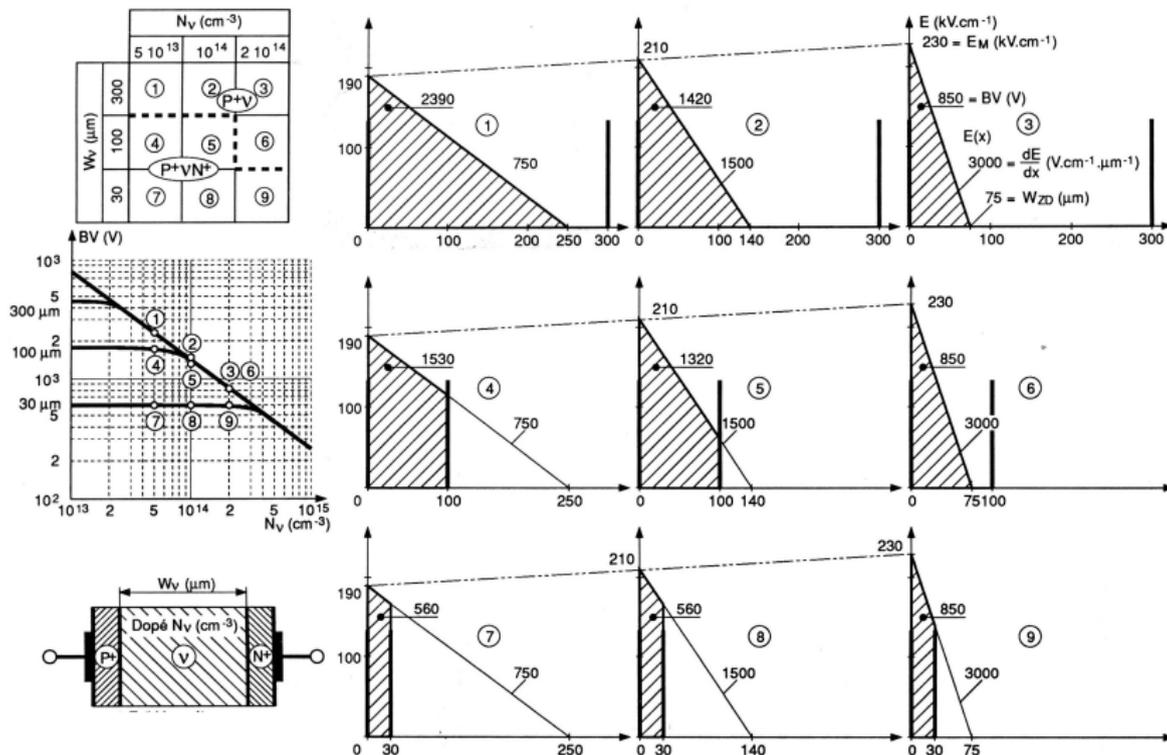
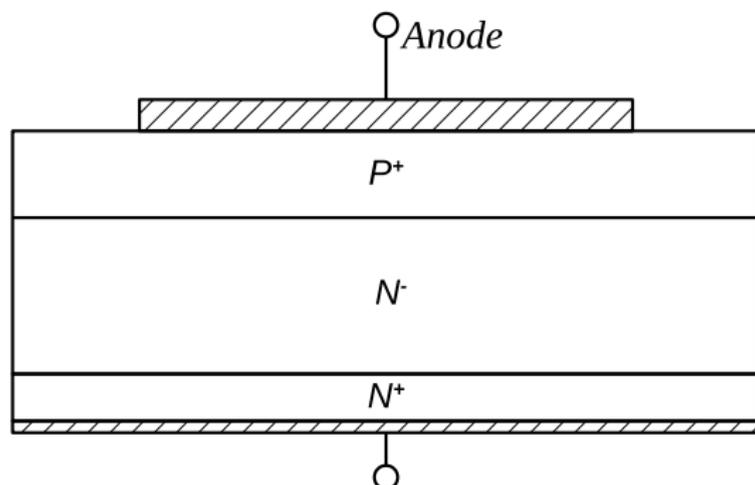


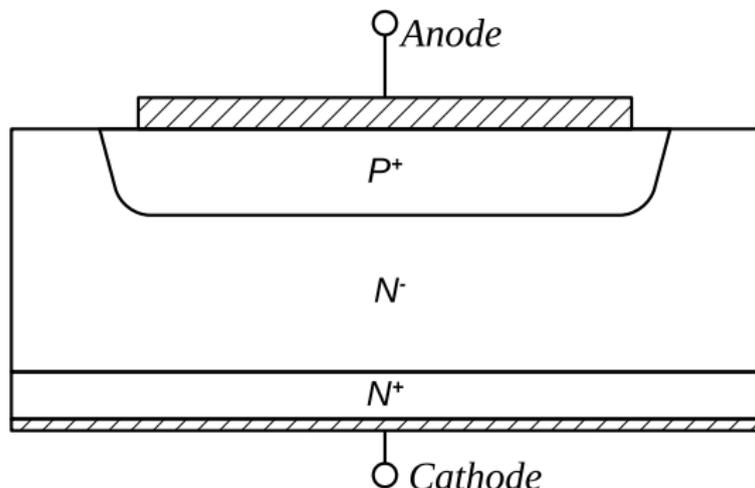
image source : "Dispositifs de l'électronique de puissance", J. Arrould et P. Merle, 1992, Hermès, Paris, tome 1, p 236-237)

Protections périphériques



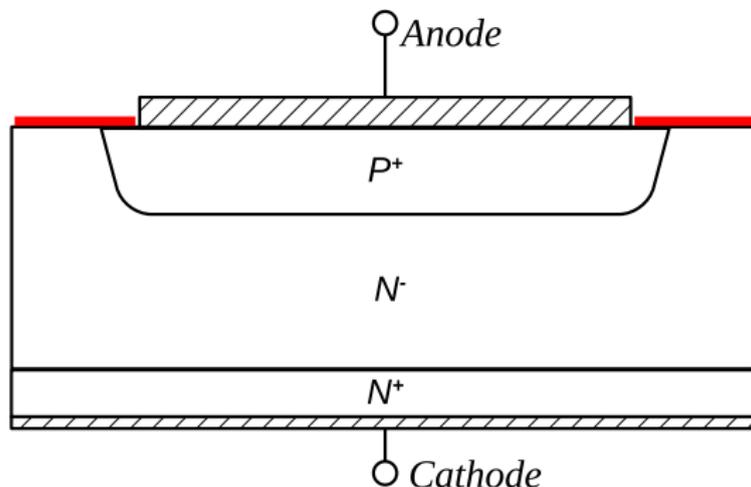
- ▶ Champ électrique supporté par le silicium : $20 \text{ V}/\mu\text{m}$, dans l'air : 2 à $6 \text{ V}/\mu\text{m}$
- ▶ Création de défauts cristallins lors de la découpe des puces
- ▶ Dispositifs spécifiques en périphérie pour supporter la tension
- ▶ objectif : **assurer l'étalement des lignes de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

Protections périphériques



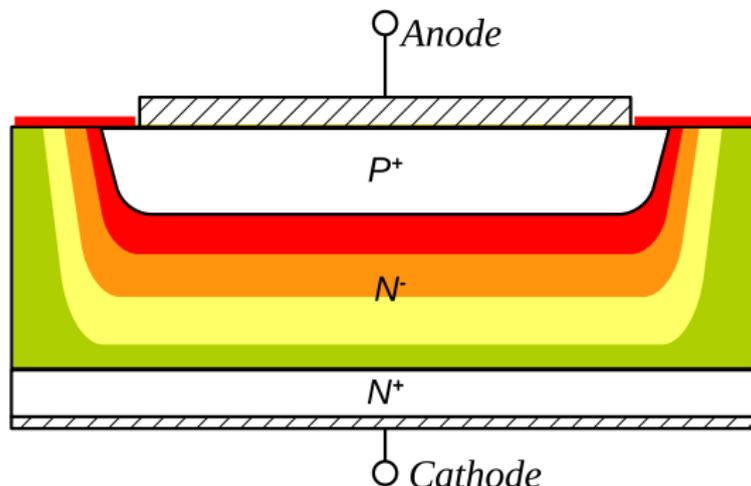
- ▶ Champ électrique supporté par le silicium : $20 \text{ V}/\mu\text{m}$, dans l'air : 2 à $6 \text{ V}/\mu\text{m}$
- ▶ Création de défauts cristallins lors de la découpe des puces
- ▶ Dispositifs spécifiques en périphérie pour supporter la tension
- ▶ objectif : **assurer l'étalement des lignes de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

Protections périphériques



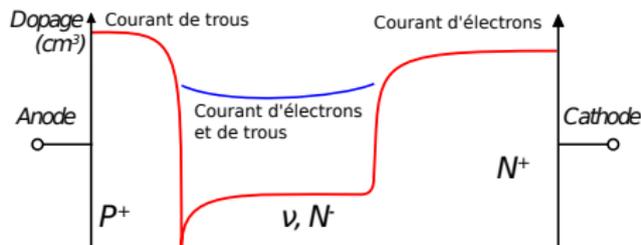
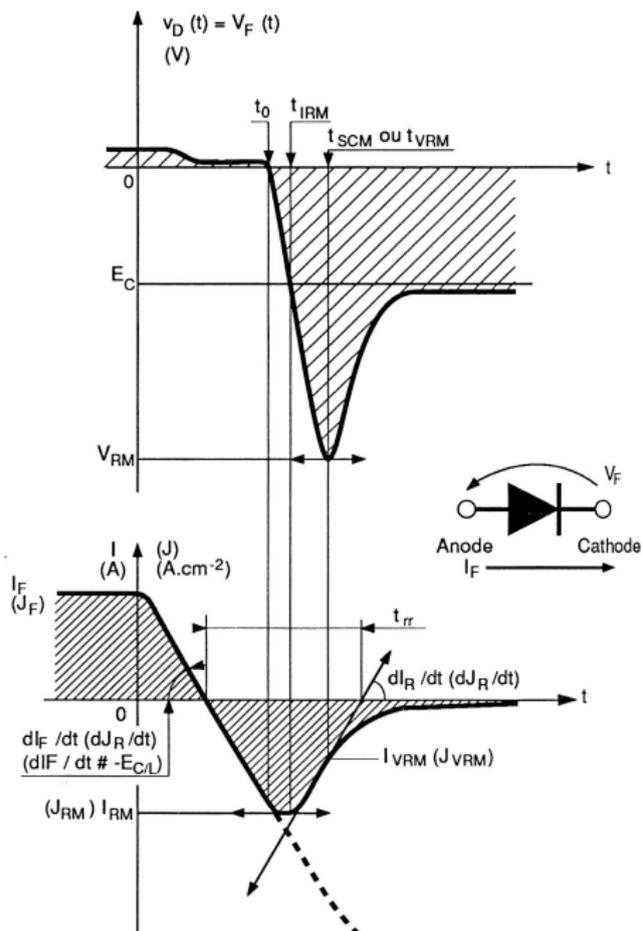
- ▶ Champ électrique supporté par le silicium : $20 \text{ V}/\mu\text{m}$, dans l'air : 2 à $6 \text{ V}/\mu\text{m}$
- ▶ Création de défauts cristallins lors de la découpe des puces
- ▶ Dispositifs spécifiques en périphérie pour supporter la tension
- ▶ objectif : assurer l'étalement des lignes de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

Protections périphériques



- ▶ Champ électrique supporté par le silicium : $20 \text{ V}/\mu\text{m}$, dans l'air : 2 à $6 \text{ V}/\mu\text{m}$
- ▶ 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

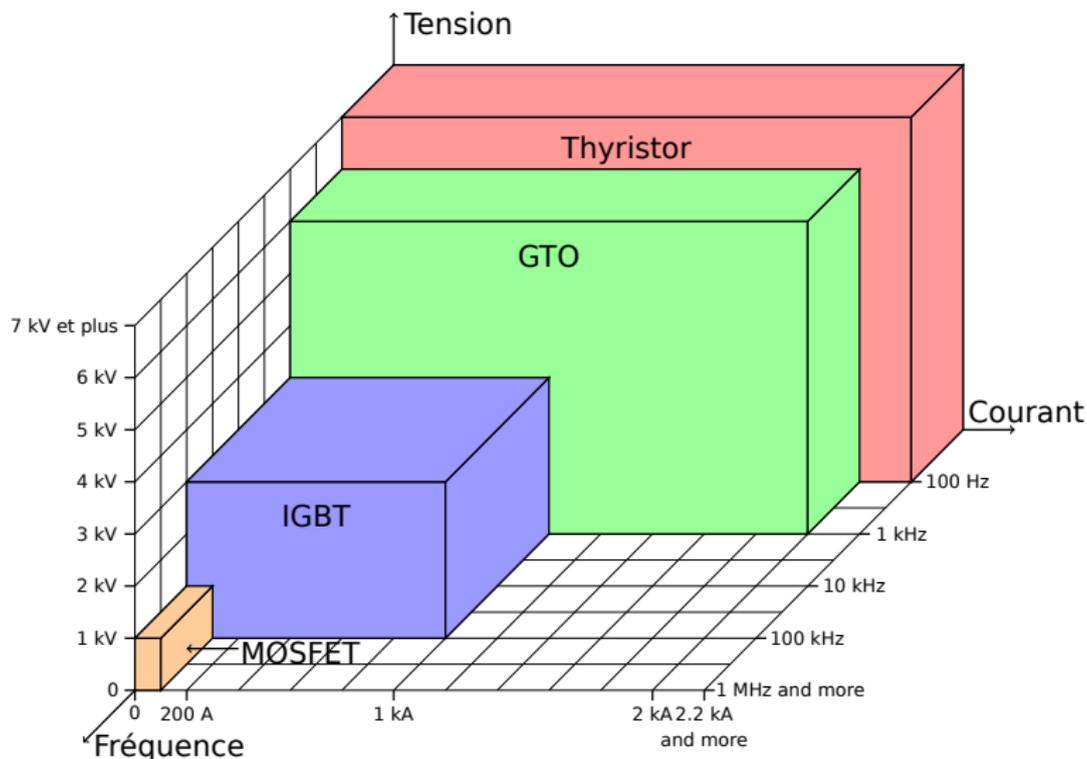
Rappels

Cas de la diode bipolaire

Quelques composants commandables

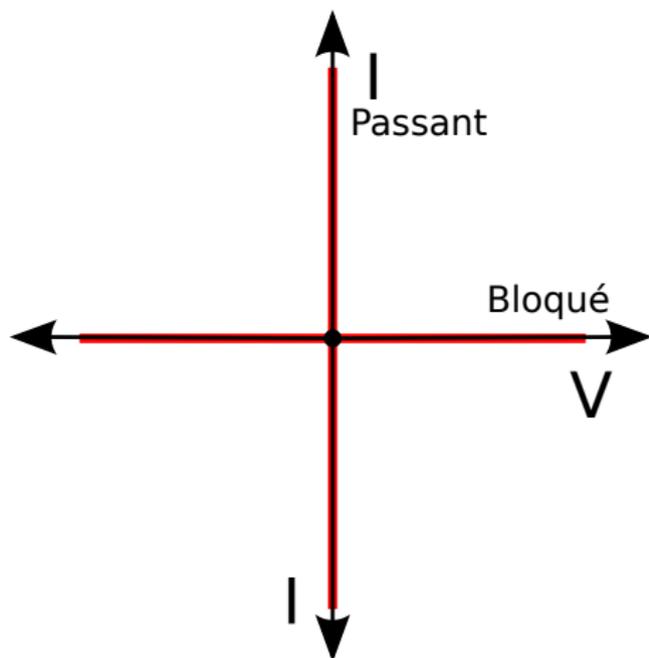
Éléments de technologie

Domaines d'utilisation



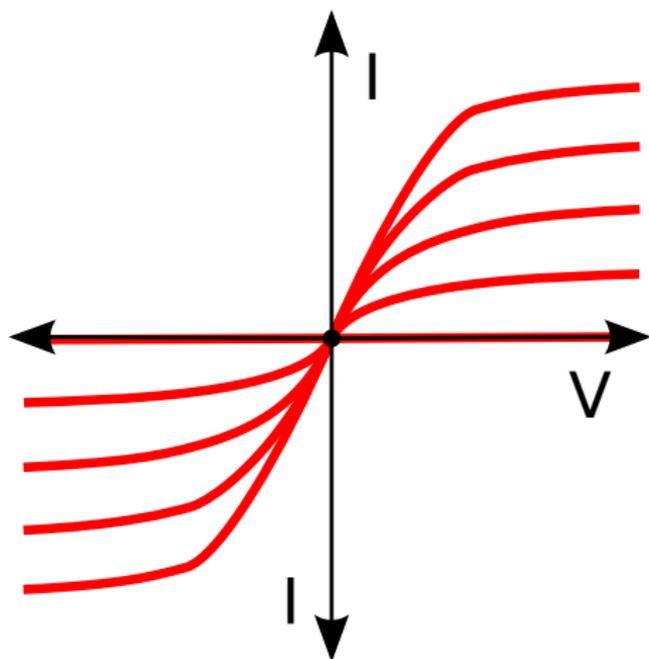
Note : tous les composants ne sont pas représentés, et les limites évoluent constamment !

caractéristique d'un composant pilotable

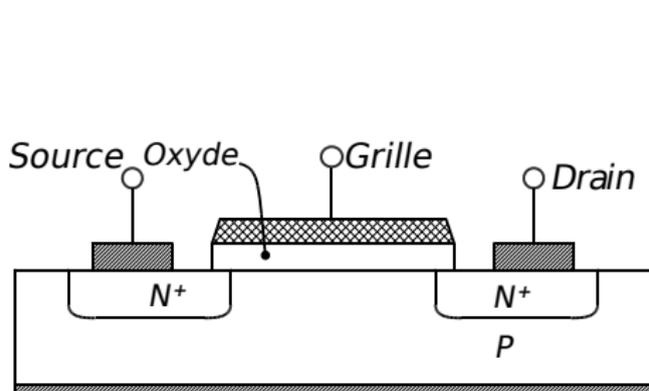


- ▶ 2, 3 ou 4 quadrants suivant le type d'interrupteur
- ▶ pilotables à l'ouverture (GTO), à la fermeture (Thyristor) ou aux deux (transistor)
- ▶ la caractéristique varie suivant le niveau sur l'électrode de commande

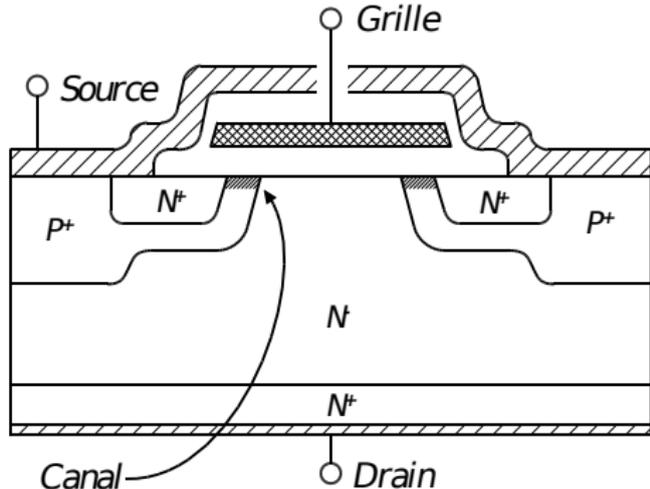
caractéristique d'un composant pilotable



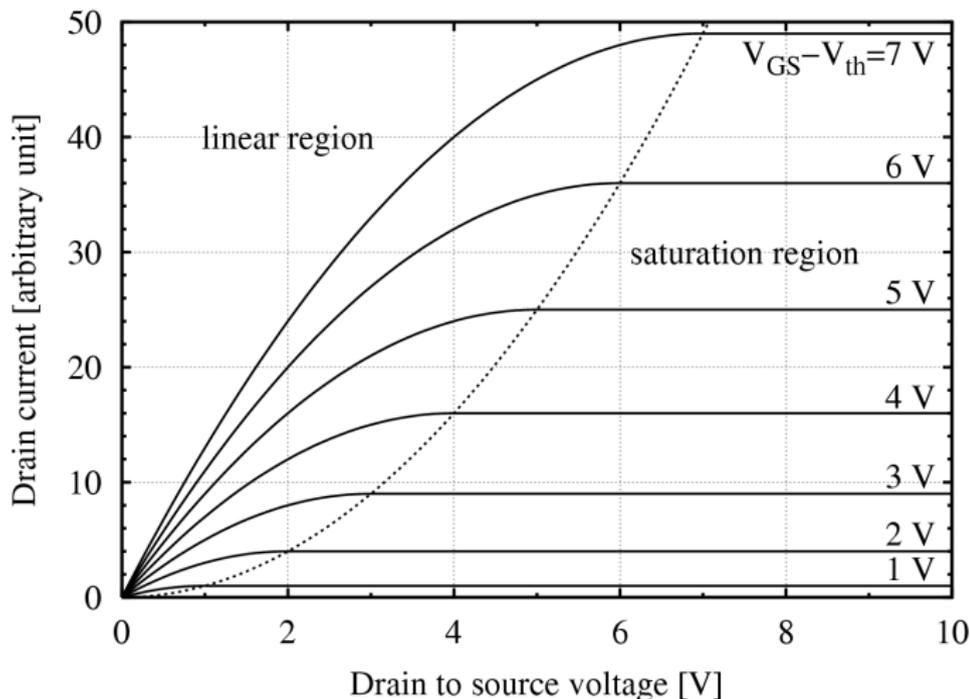
- ▶ 2, 3 ou 4 quadrants suivant le type d'interrupteur
- ▶ pilotables à l'ouverture (GTO), à la fermeture (Thyristor) ou aux deux (transistor)
- ▶ la caractéristique varie suivant le niveau sur l'électrode de commande



- ▶ Interrupteur à grille isolée
- ▶ Création d'un canal par inversion
- ▶ Version planaire très courante en microélectronique



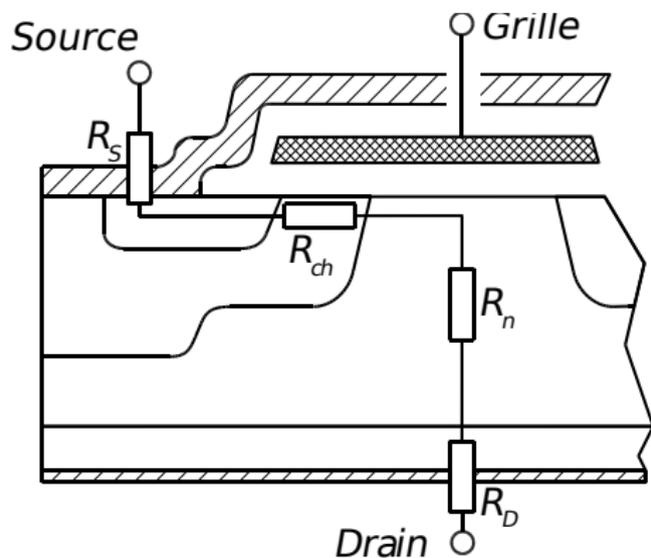
- ▶ Version électronique de puissance
- ▶ Même principe, mais large zone N⁻ pour tenir la tension
- ▶ “pliage” de la structure pour la rendre verticale



- ▶ 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

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

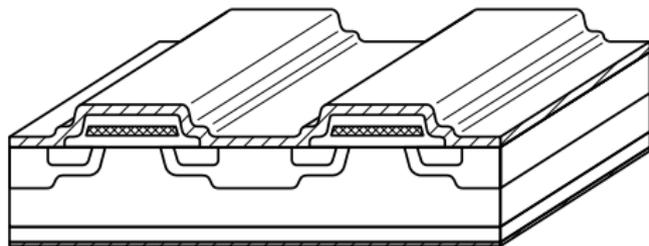
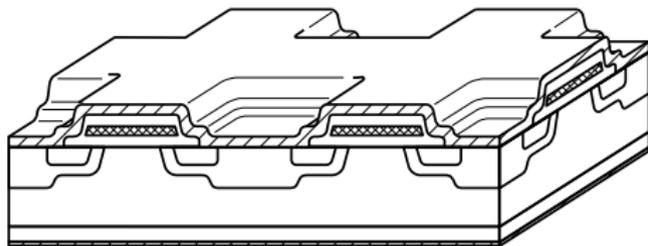
- ▶ Indiquez où se trouve la caractéristique à l'état bloqué
- ▶ Indiquez la caractéristique à l'état passant à préférer
- ▶ Vaut-il mieux travailler en régime linéaire ou saturé ?
- ▶ Donnez les pertes en conduction minimales à 10 A. à quelles condition sont-elles obtenues ?
- ▶ Calculez le $R_{DS(on)}$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



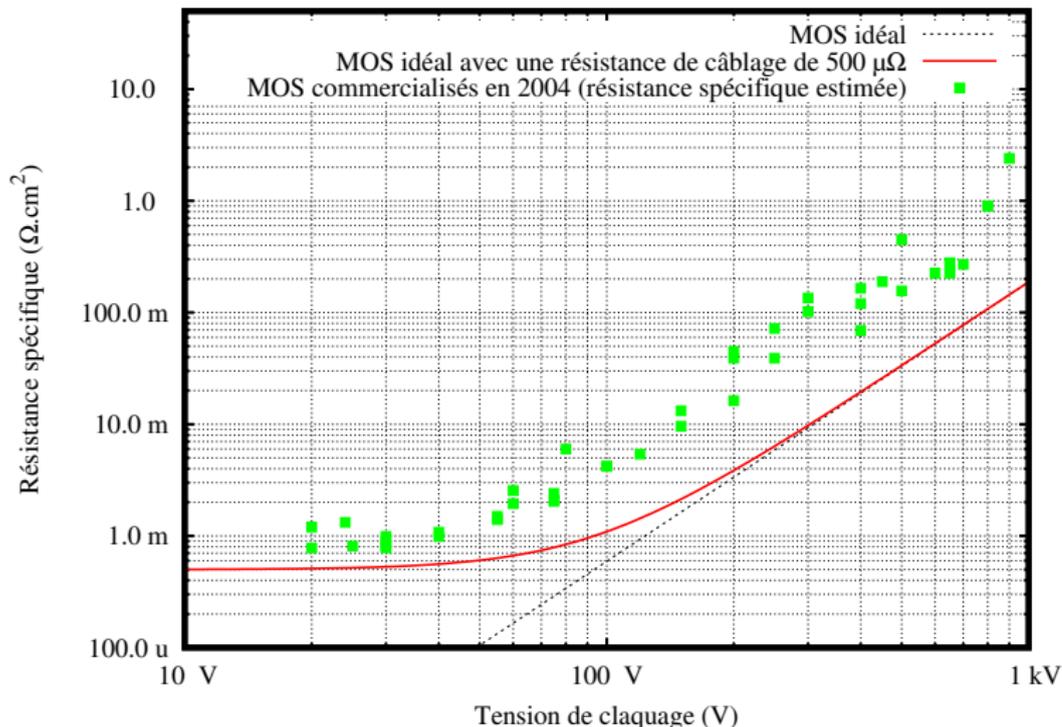
- ▶ Composant unipolaire : pas de modulation
→ résistivité définie par le dopage
- ▶ R_S : résistance de source (y compris externe)
- ▶ R_{ch} : résistance du canal (modulée par la grille)
- ▶ R_n : résistance de la zone N^-
- ▶ R_D : résistance de drain (y compris externe)

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

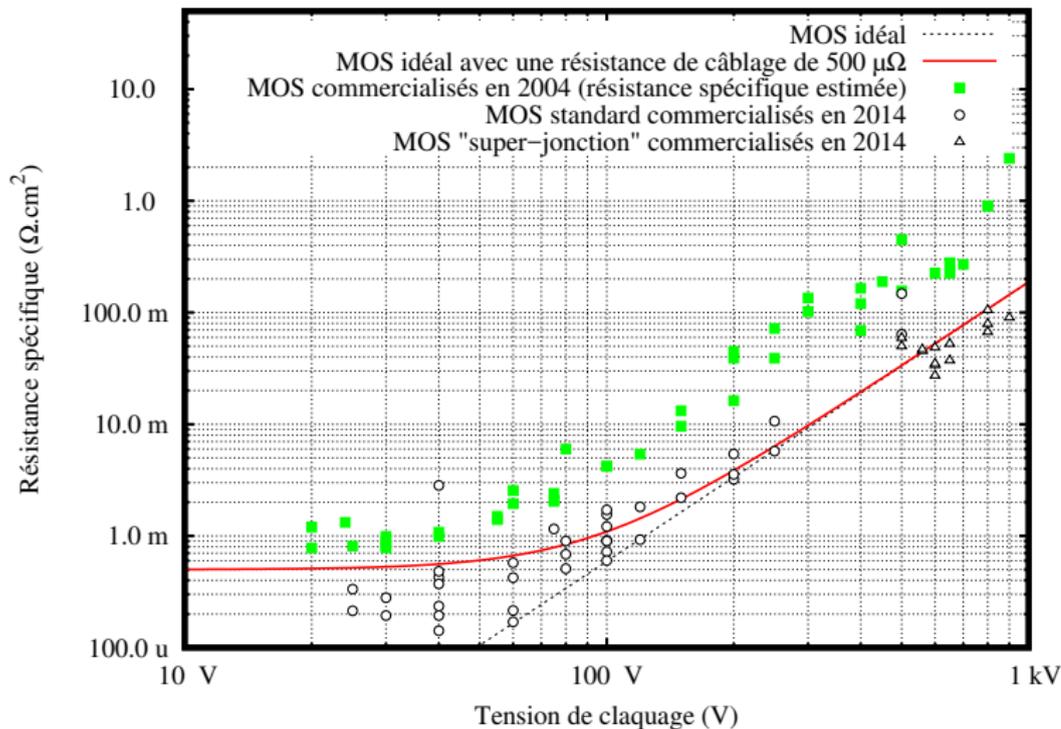
→ structure cellulaire pour augmenter la densité de canal



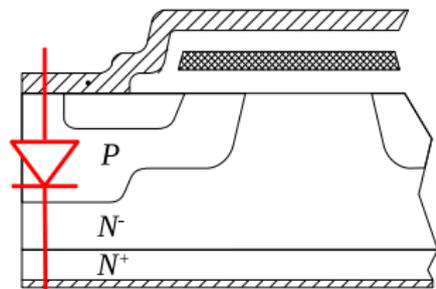
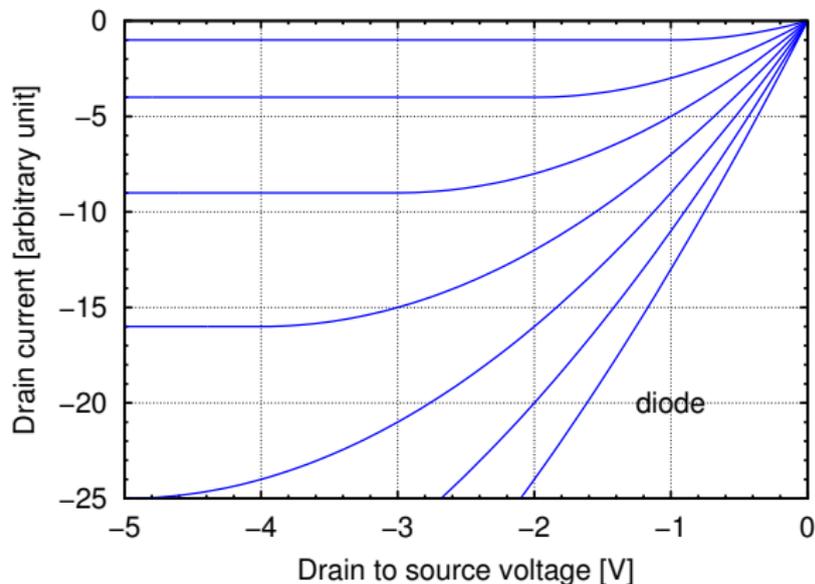
- ▶ Différentes géométries existantes (cellules carrées, hexagonales, en bandes. . .)
- ▶ Réduction de la taille cellulaire pour augmenter encore la densité (1-2 μm par cellule actuellement)



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

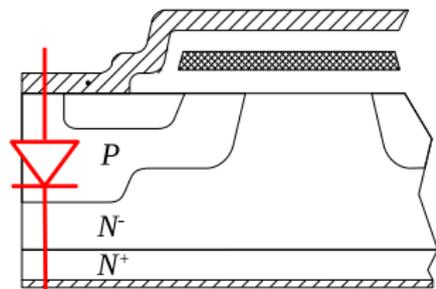
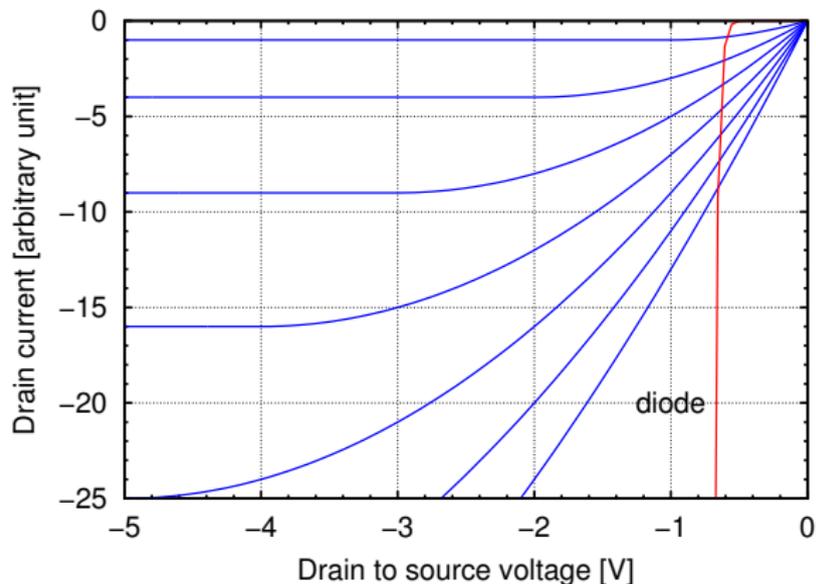


- ▶ Basse tension : connectique, canal prépondérants
- ▶ Haute tension : zone N^- prépondérante



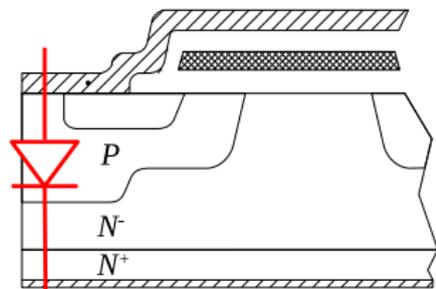
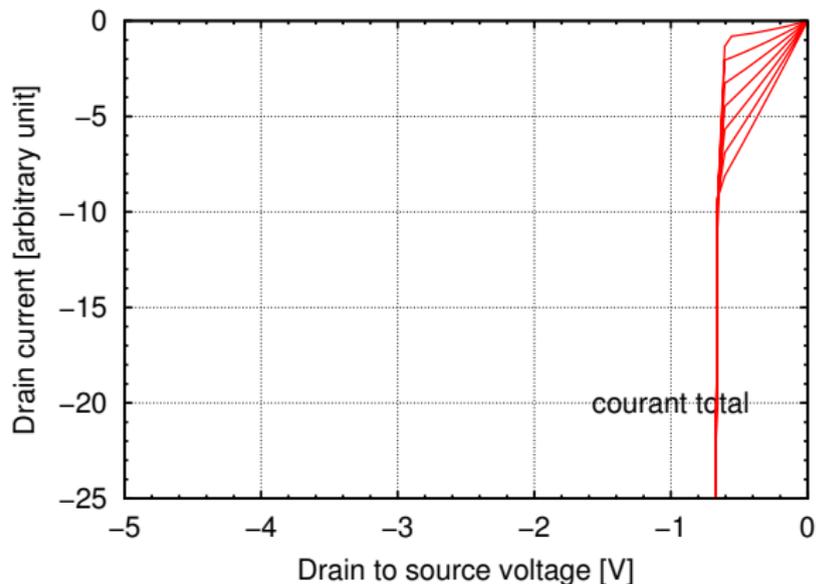
La structure MOSFET devrait être bidirectionnelle en courant (2 quadrants)

La présence d'une diode la rend asymétrique



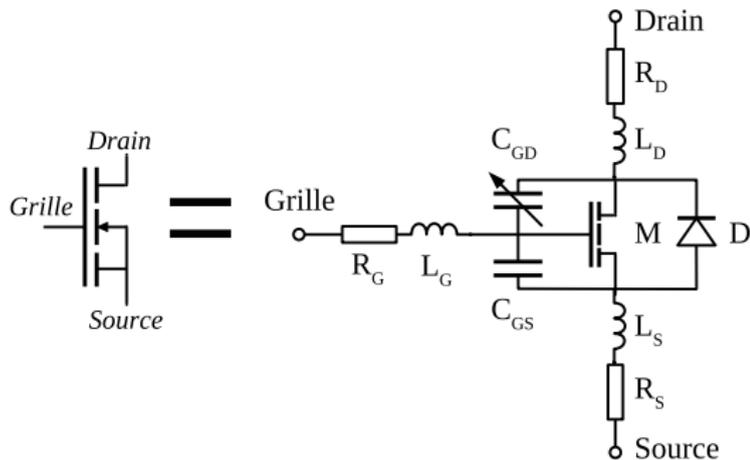
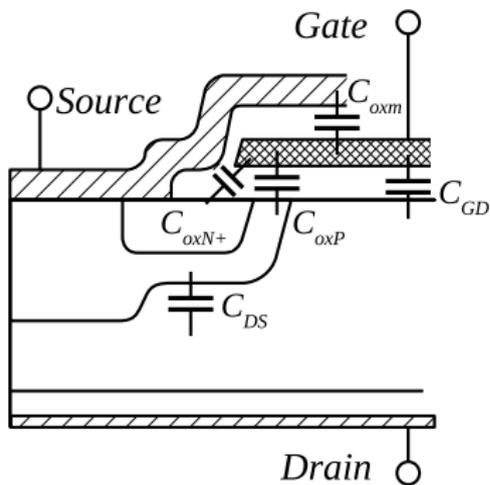
La structure MOSFET devrait être bidirectionnelle en courant (2 quadrants)

La présence d'une diode la rend asymétrique



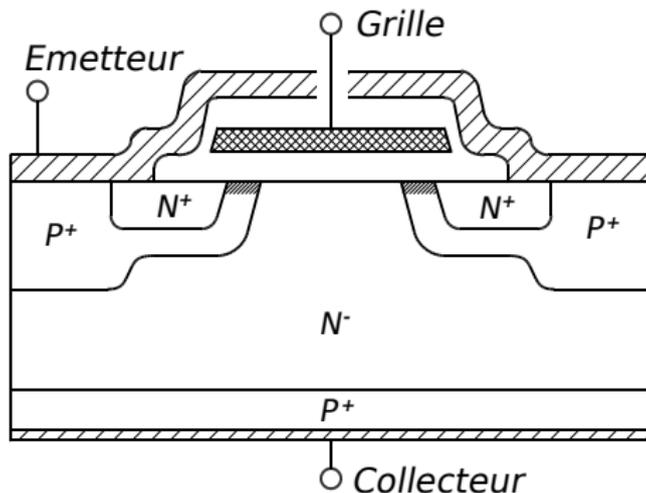
La structure MOSFET devrait être bidirectionnelle en courant (2 quadrants)

La présence d'une diode la rend asymétrique

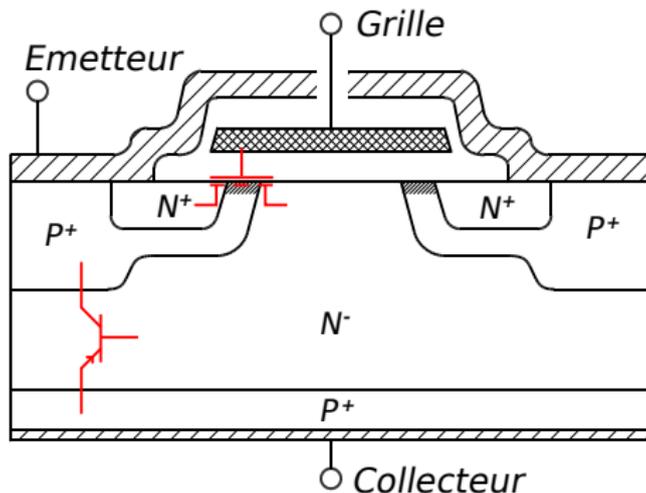


Le comportement dynamique (= en commutation) est fixé par les capacités “parasites” et le câblage du composant (on y reviendra)

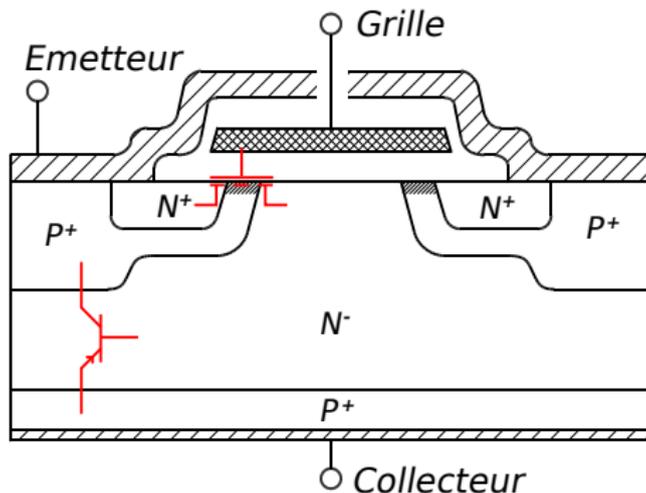
On représente 3 capacités (C_{GS} , C_{GD} , et la capacité de la diode C_{DS}). Ces capacités sont non-linéaires.



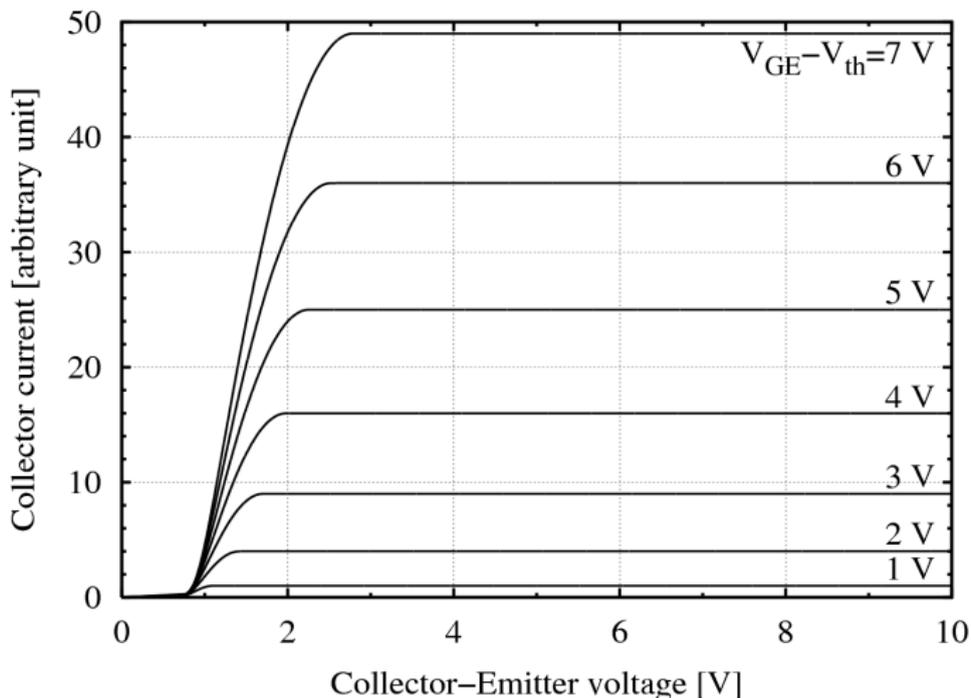
- ▶ Grossièrement équivalent à un MOSFET pilotant un transistor bipolaire
 - ▶ simplicité de commande du MOSFET (grille isolée)
 - ▶ performance à fort courant du transistor bipolaire
 - ▶ 1-3 V de chute de tension à l'état passant
- ▶ Composant bipolaire, donc à résistance à l'état passant plus faible



- ▶ 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



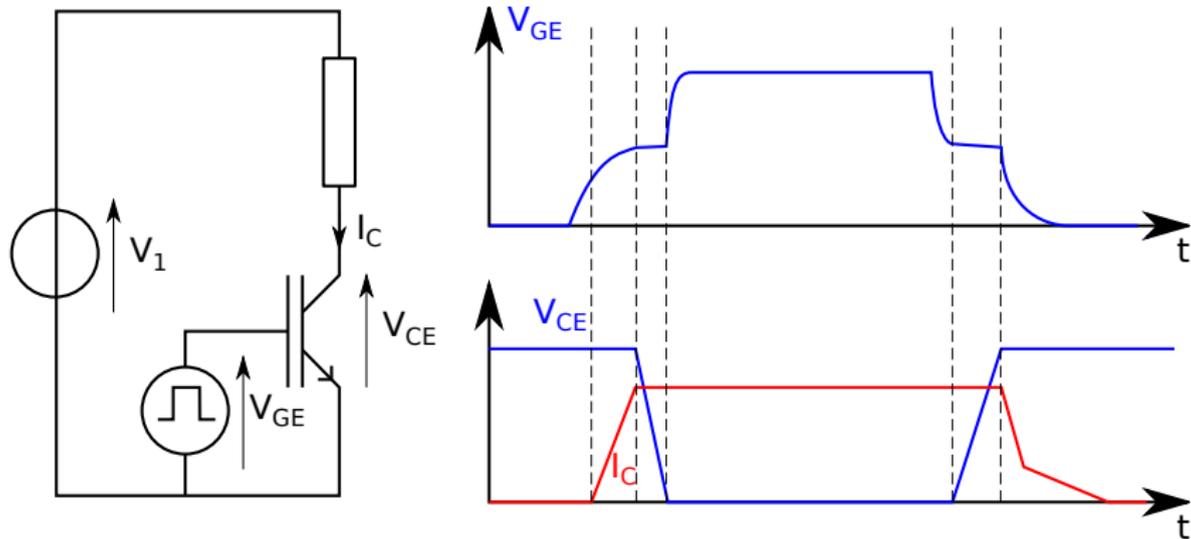
- ▶ Grossièrement équivalent à un MOSFET pilotant un transistor bipolaire
 - ▶ simplicité de commande du MOSFET (grille isolée)
 - ▶ performance à fort courant du transistor bipolaire
 - ▶ 1-3 V de chute de tension à l'état passant
- ▶ Composant bipolaire, donc à résistance à l'état passant plus faible



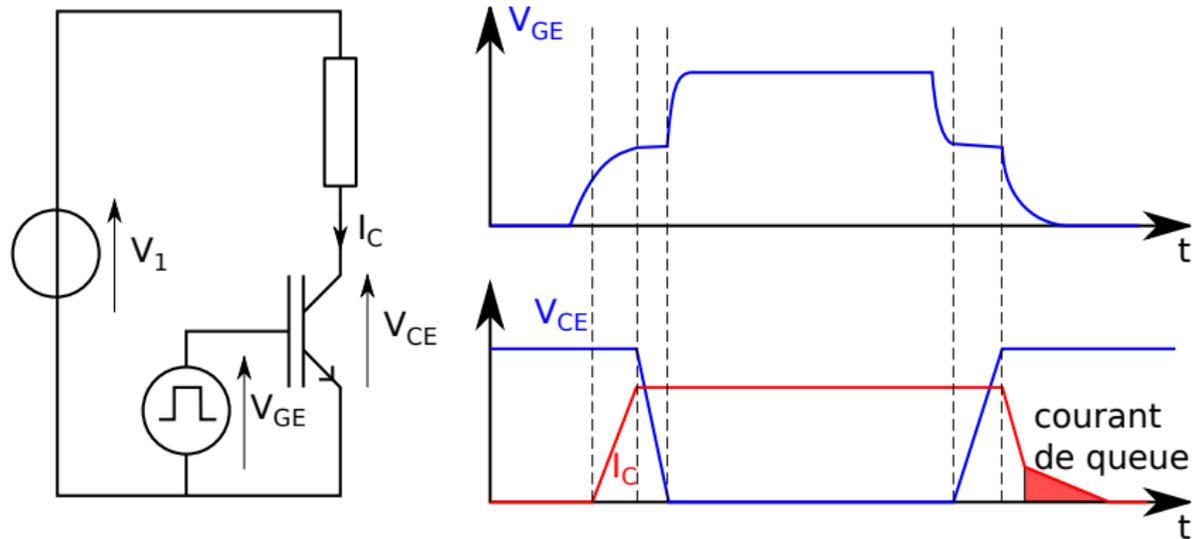
- ▶ V_{th} : tension de seuil, V_{GS} tension grille source (= de commande)
- ▶ fonctionnement nominal : zone linéaire, à V_{GS} élevé
- ▶ la caractéristique à l'état passant présente un seuil ($V_{CE_{sat}}$)

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 ?



- ▶ 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



- ▶ 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

Introduction

Généralités

Structure des composants

Rappels

Cas de la diode bipolaire

Quelques composants commandables

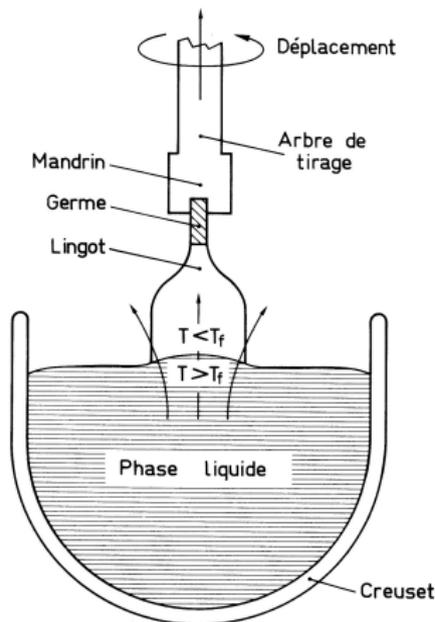
Éléments de technologie

- ▶ 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

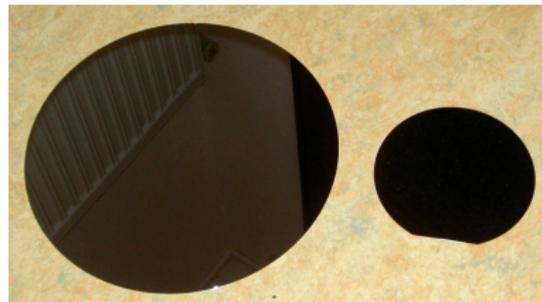
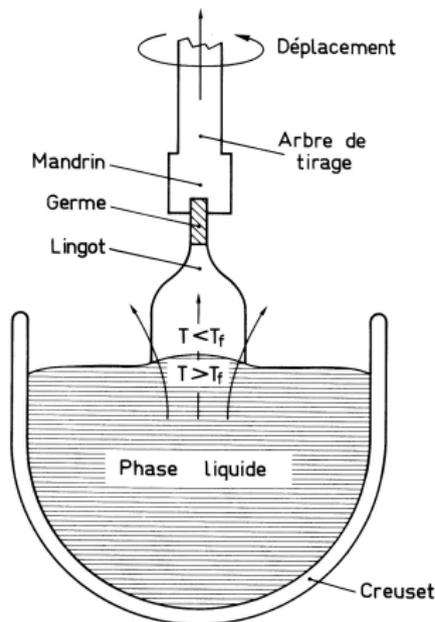
Fabrication des tranches de silicium



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

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

wafer

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

Photolithographie (exemple oxyde)



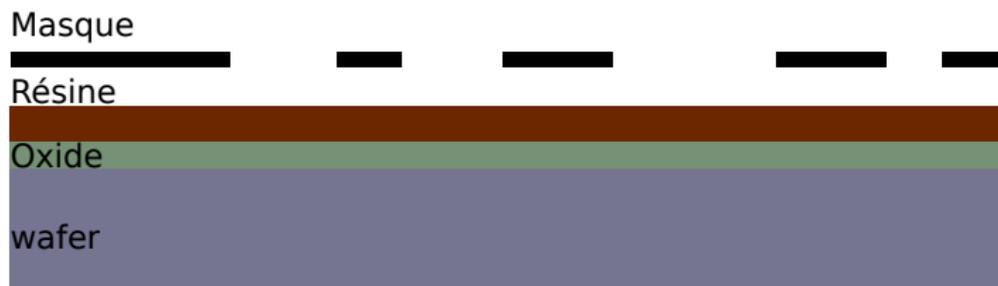
- ▶ oxydation du wafer
- ▶ dépôt de résine photosensible
- ▶ alignement d'un masque
- ▶ insolation
- ▶ développement
- ▶ gravure de l'oxyde
- ▶ retrait de la résine

Photolithographie (exemple oxyde)



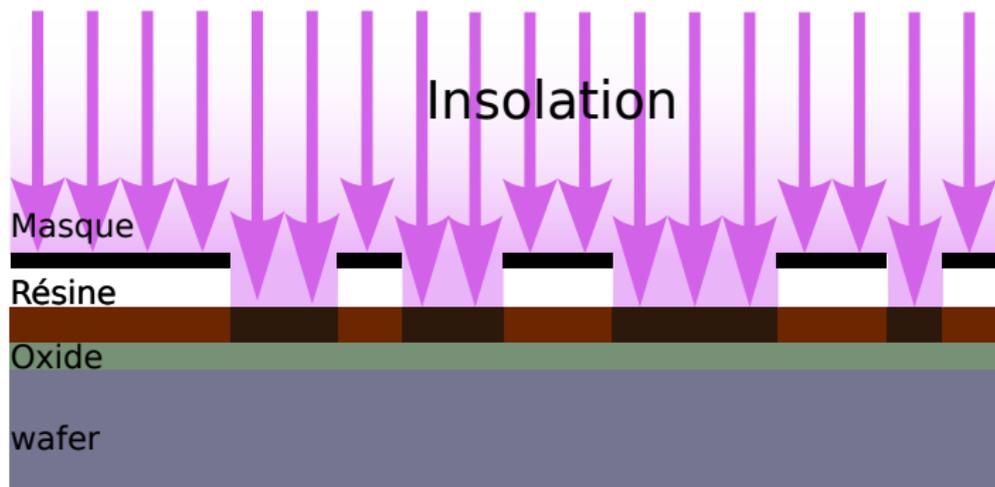
- ▶ oxydation du wafer
- ▶ dépôt de résine photosensible
- ▶ alignement d'un masque
- ▶ insolation
- ▶ développement
- ▶ gravure de l'oxyde
- ▶ retrait de la résine

Photolithographie (exemple oxyde)



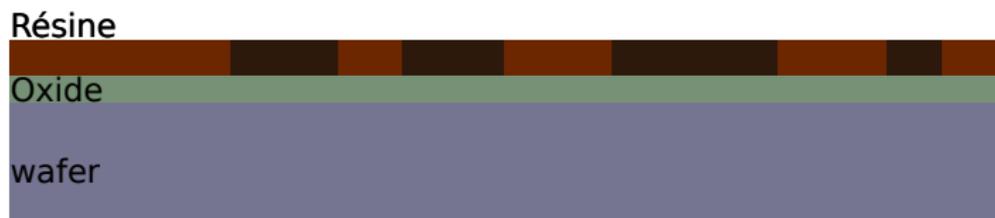
- ▶ oxydation du wafer
- ▶ dépôt de résine photosensible
- ▶ alignement d'un masque
- ▶ insolation
- ▶ développement
- ▶ gravure de l'oxyde
- ▶ retrait de la résine

Photolithographie (exemple oxyde)



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

Photolithographie (exemple oxyde)



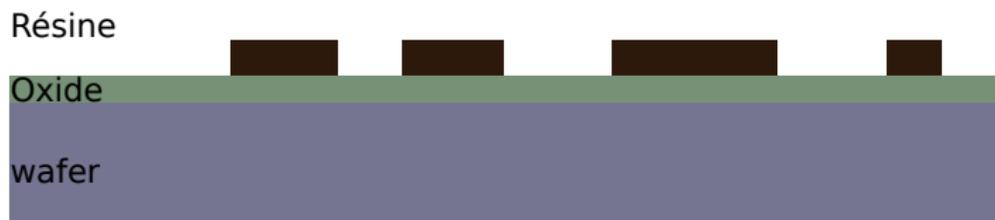
- ▶ oxydation du wafer
- ▶ dépôt de résine photosensible
- ▶ alignement d'un masque
- ▶ insolation
- ▶ développement
- ▶ gravure de l'oxyde
- ▶ retrait de la résine

Photolithographie (exemple oxyde)



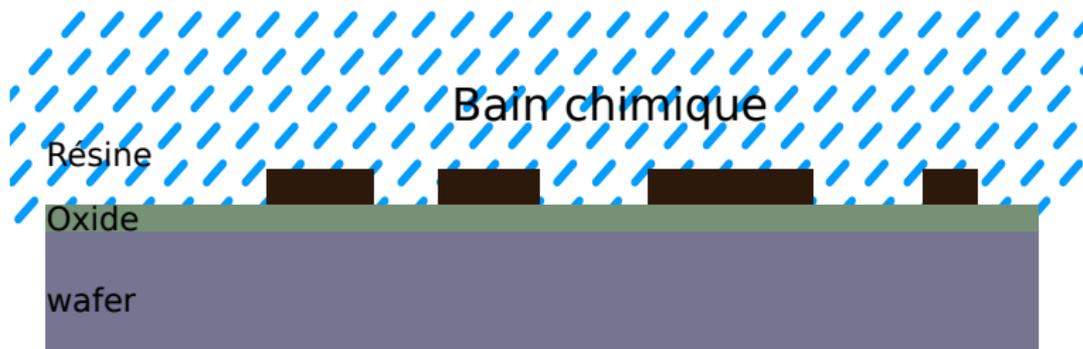
- ▶ oxydation du wafer
- ▶ dépôt de résine photosensible
- ▶ alignement d'un masque
- ▶ insolation
- ▶ développement
- ▶ gravure de l'oxyde
- ▶ retrait de la résine

Photolithographie (exemple oxyde)



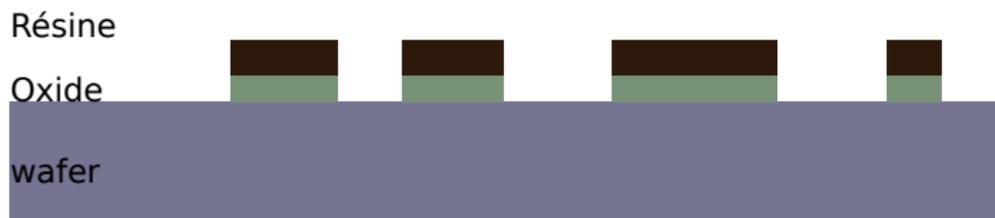
- ▶ oxydation du wafer
- ▶ dépôt de résine photosensible
- ▶ alignement d'un masque
- ▶ insolation
- ▶ développement
- ▶ gravure de l'oxyde
- ▶ retrait de la résine

Photolithographie (exemple oxyde)



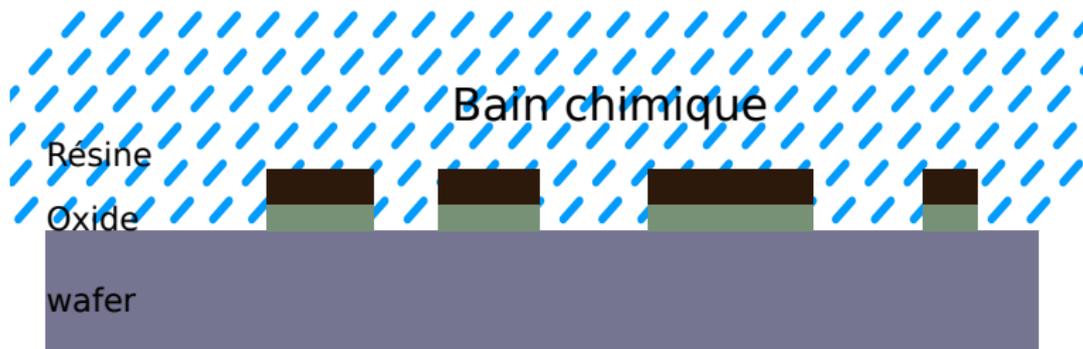
- ▶ oxydation du wafer
- ▶ dépôt de résine photosensible
- ▶ alignement d'un masque
- ▶ insolation
- ▶ développement
- ▶ gravure de l'oxyde
- ▶ retrait de la résine

Photolithographie (exemple oxyde)



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

Photolithographie (exemple oxyde)



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

Photolithographie (exemple oxyde)

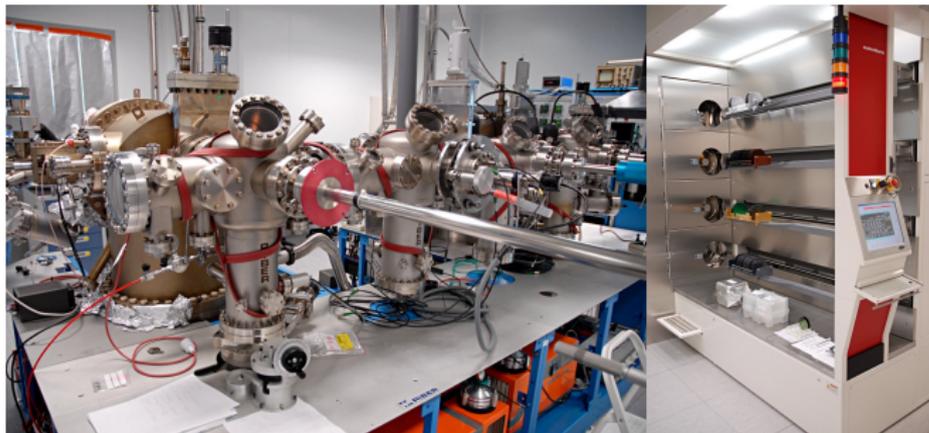


- ▶ oxydation du wafer
- ▶ dépôt de résine photosensible
- ▶ alignement d'un masque
- ▶ insolation
- ▶ développement
- ▶ gravure de l'oxyde
- ▶ retrait de la résine

Cette technique est indépendante du nombre de composants !

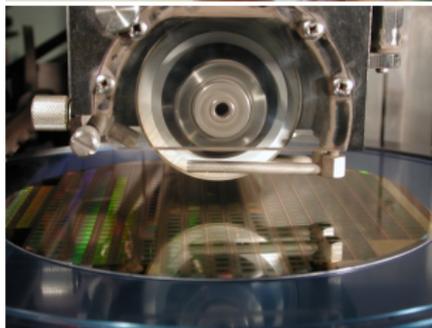
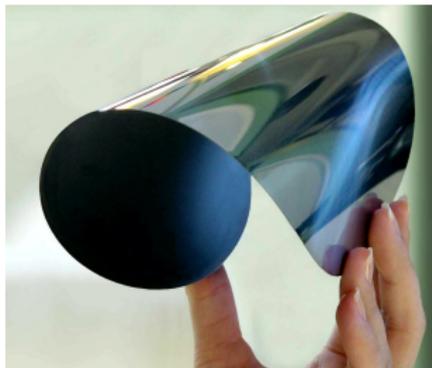
Dopage

- ▶ 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'epitaxie et
four de diffusion

Finition des composants

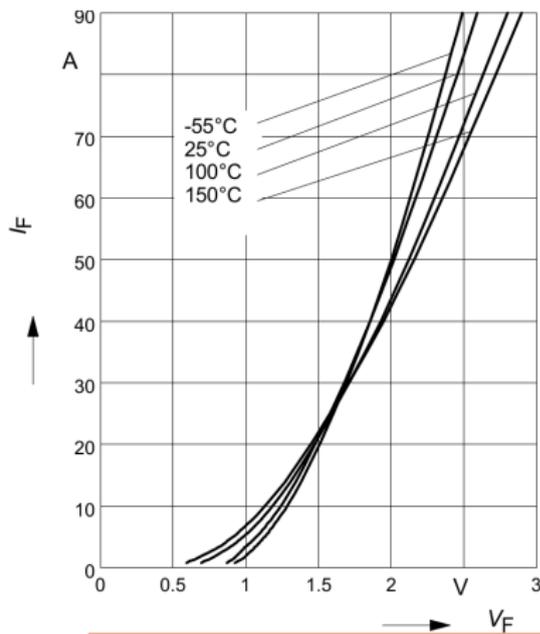


- ▶ Pour réduire la résistance électrique des composants, on peut les amincir et ne garder que la partie électriquement active ($<100 \mu\text{m}$)
- ▶ La découpe permet de séparer les composants du wafer
- ▶ À partir de là, les traitements sont individuels
 - ▶ coût/durée proportionnels au nombre de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

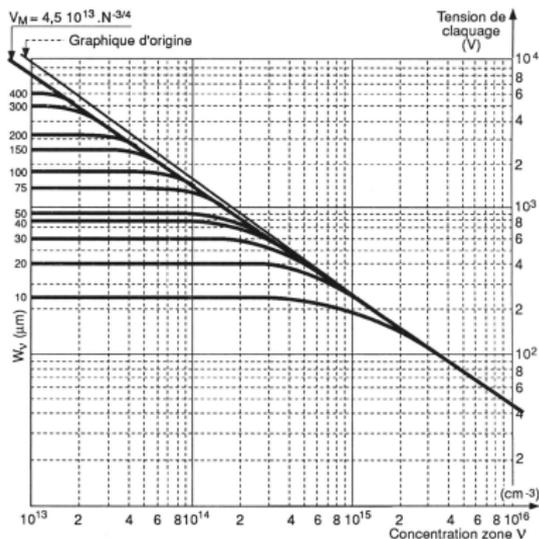
Les étapes qui suivent sont le *packaging* (mise en boîtier), on y reviendra plus tard

Source wafer souple Tepla, découpe Aspen Technologies

Exercices

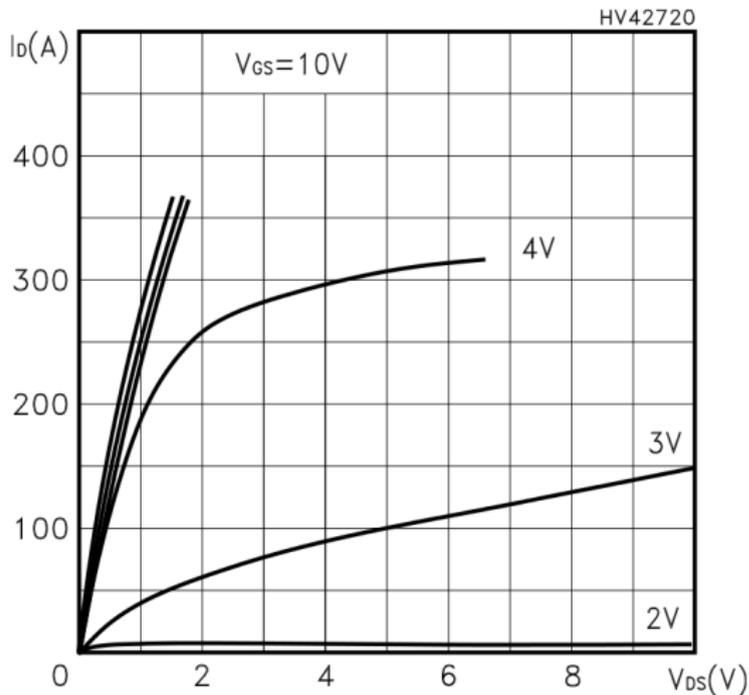


- ▶ Quelle est la chute de tension dans cette diode sous un courant direct de 50 A à 25°C ? à 150°C ?
- ▶ Même question sous un courant direct de 10 A à 25°C ? à 150°C ?
- ▶ Quelles sont les pertes en conduction correspondantes ?
- ▶ le courant de fuite à 25°C et une tension de 1200 V est inférieur à $100\mu\text{A}$. 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 ν de cette diode 1200 V.



- ▶ 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 ν de cette diode 1200 V.

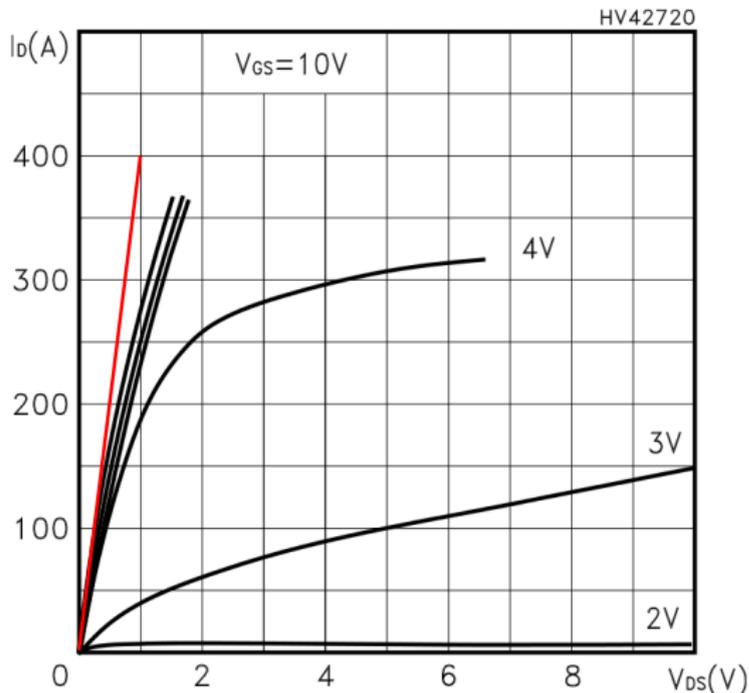
Exercices



Source : datasheet du Mos STL150N3LLH5

- ▶ Estimer le R_{DSon} de ce transistor à $V_{GS}=10V$
- ▶ Quelles sont les pertes à l'état passant à $I_D = 100 A$?

Exercices



Source : datasheet du Mos STL150N3LLH5

- ▶ Estimer le R_{DSon} de ce transistor à $V_{GS} = 10V$
- ▶ Quelles sont les pertes à l'état passant à $I_D = 100 A$?

Deuxième partie II

Thermique et Packaging

Le packaging (Environnement immédiat des composants)

Le packaging

(Environnement immédiat des composants)

Il assure :

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

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. . .

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

Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques

- Aspects thermiques

- Aspects thermo-mécaniques

- Substrats

- Interconnexions

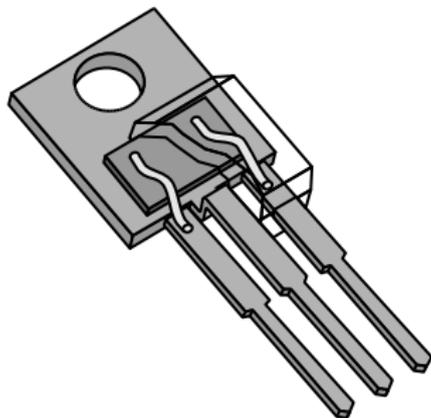
- Gestion thermique

Gestion thermique des composants

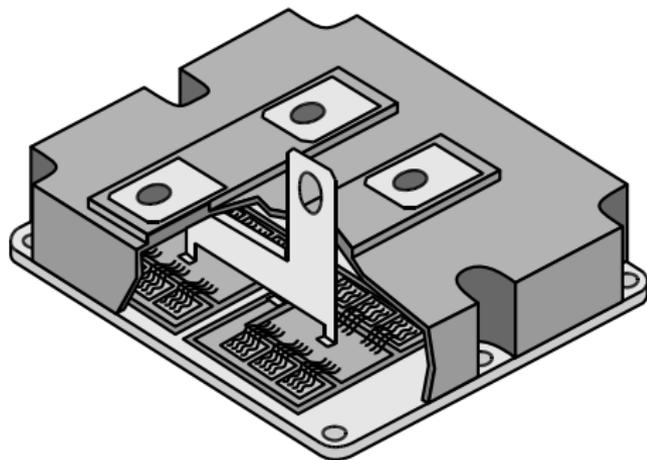
Évolutions, Recherche et Développement

Exercices

Deux classes : discrets et modules



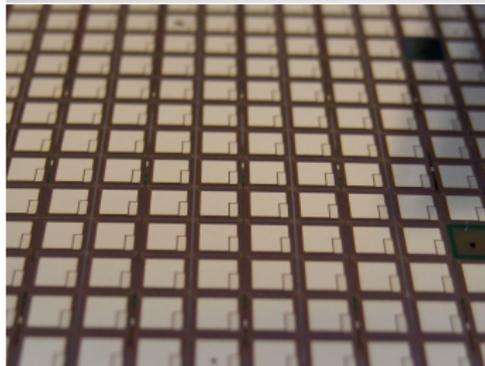
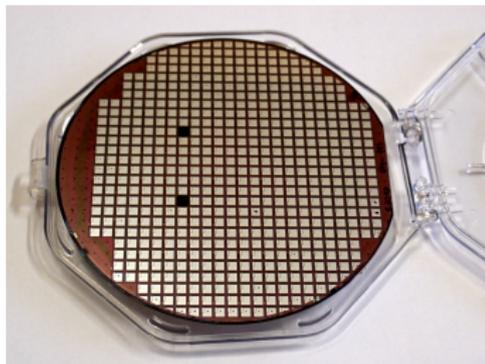
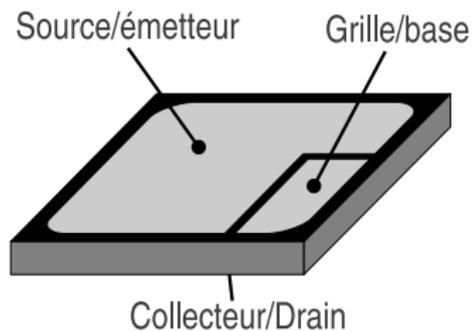
- ▶ Un composant élémentaire (transistor, diode) par boîtier
- ▶ (souvent) Pas d'isolation
- ▶ puissances faibles ou très fortes



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

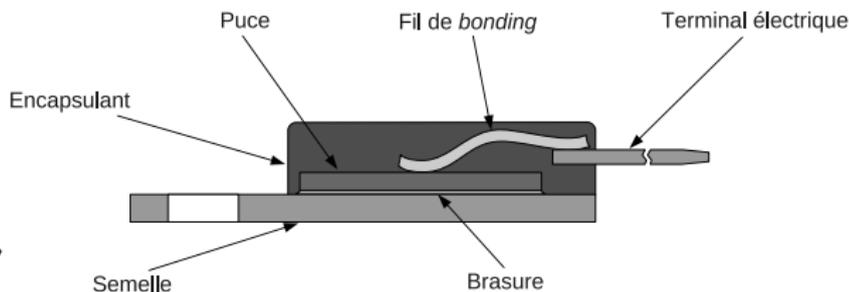
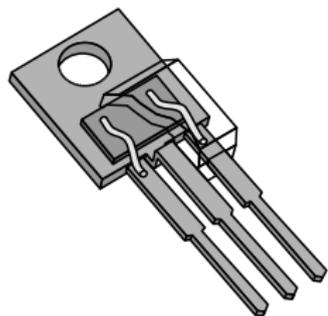
Puces de puissance

- ▶ Structure verticale, avec un (ou deux) contacts dessus et un dessous
- ▶ épaisseur de 50 à 500 μm
- ▶ côté de 1 à 13 mm

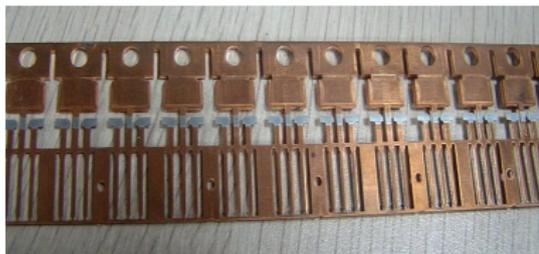


wafer IGBT International Rectifier, puces de 5x5 mm, wafer diamètre 6 pouces

Structure d'un boîtier discret



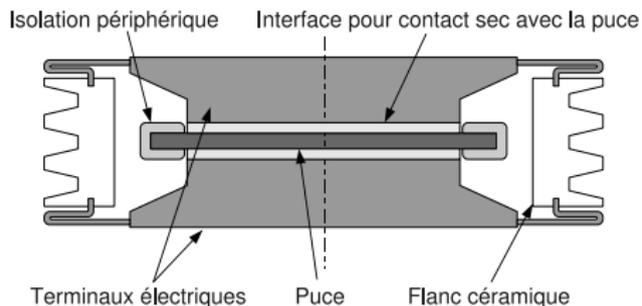
- ▶ technologie bas coût ;
- ▶ grande cadence de production ;
- ▶ matériaux : cuivre, brasure, aluminium, epoxy
- ▶ courant max. $< 100\text{ A}$
- ▶ tension max. $< 1200\text{ V}$



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

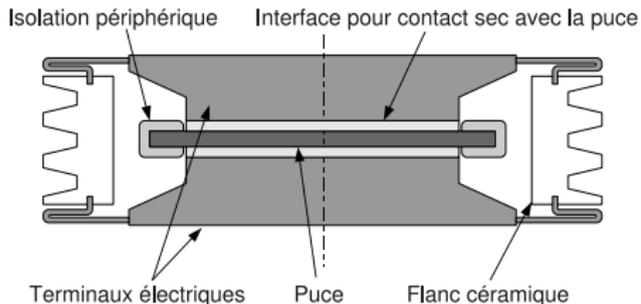
Les discrets pour la forte puissance

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



Les discrets pour la forte puissance

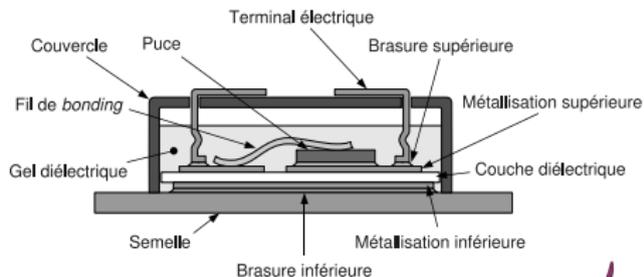
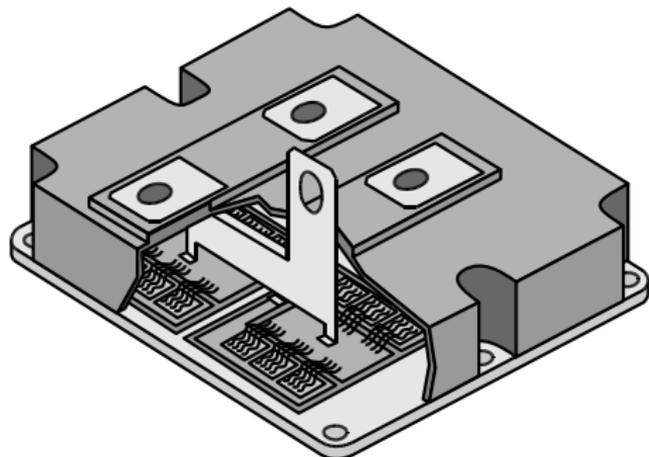
- ▶ Tensions jusqu'à 6.5 kV
- ▶ Courants de plusieurs kA
- ▶ Puces jusqu'à 10 cm diam.
- ▶ conçus pour la mise en série.



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

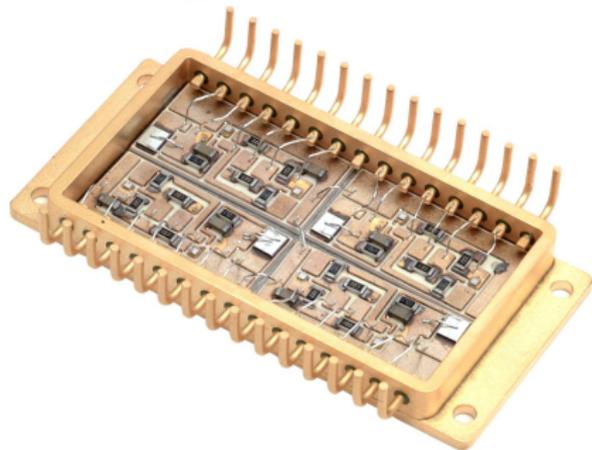
Modules

- ▶ 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...)





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



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

Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques

- Aspects thermiques

- Aspects thermo-mécaniques

- Substrats

- Interconnexions

- Gestion thermique

Gestion thermique des composants

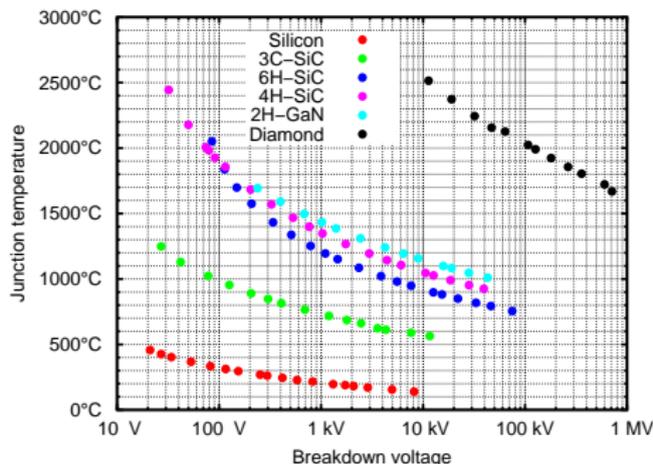
Évolutions, Recherche et Développement

Exercices

Limites thermiques : composants à semiconducteurs

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)

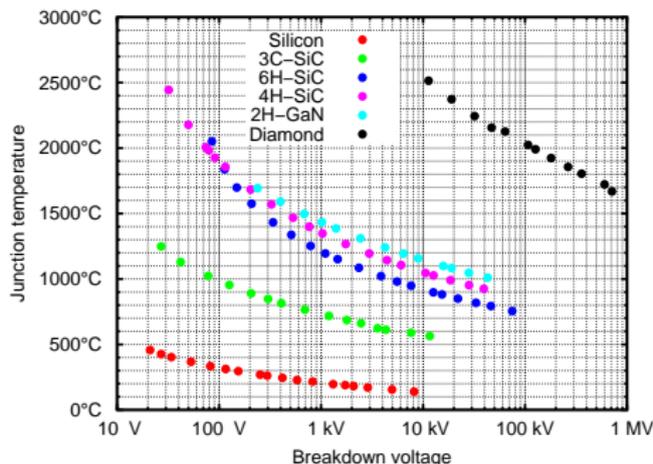


- ▶ De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- ▶ Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.

Limites thermiques : composants à semiconducteurs

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)

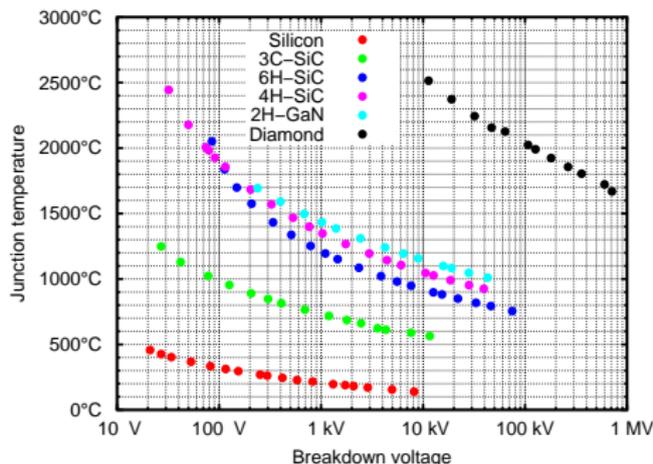


- ▶ De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- ▶ Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.

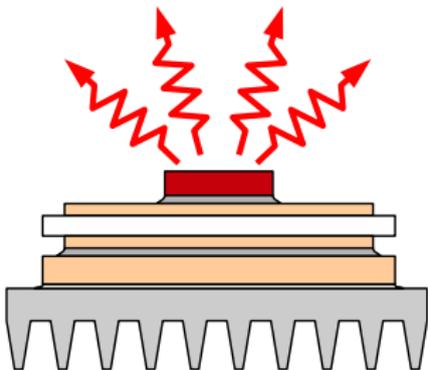
Limites thermiques : composants à semiconducteurs

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 : $P = \varepsilon S \sigma T^4$
avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
- 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 $\Delta T=1 \text{ }^\circ\text{C}$, $P=400 \text{ W}$

► Convection

- Déplacement de matière
- Pas d'expression simple (convection forcée, naturelle, type d'écoulements. . .)

► Rayonnement

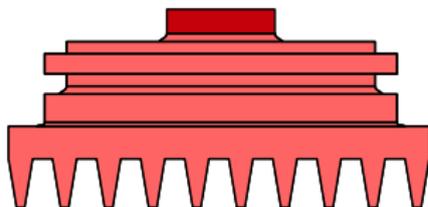
- Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \varepsilon S \sigma T^4$
avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
- à 400 K, $P = 0,15 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$
- Négligeable pour les dimensions et températures classiques des puces

► 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 $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 400 \text{ W}$

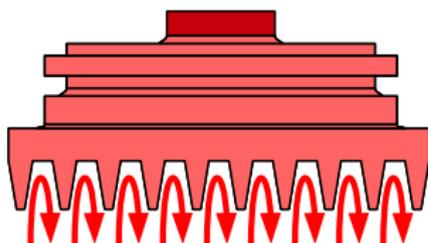
► Convection

- Déplacement de matière
- Pas d'expression simple (convection forcée, naturelle, type d'écoulements. . .)



► Rayonnement

- Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \varepsilon S \sigma T^4$
avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
- 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 $\Delta T=1 \text{ }^\circ\text{C}$, $P=400 \text{ W}$

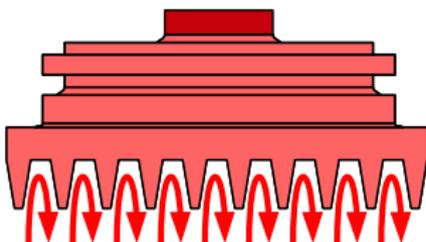
► Convection

- Déplacement de matière
- Pas d'expression simple (convection forcée, naturelle, type d'écoulements. . .)

Mécanismes de transport de la chaleur

► Rayonnement

- Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \varepsilon S \sigma T^4$
avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
- à 400 K, $P = 0,15 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$
- Négligeable pour les dimensions et températures classiques des puces



► Conduction

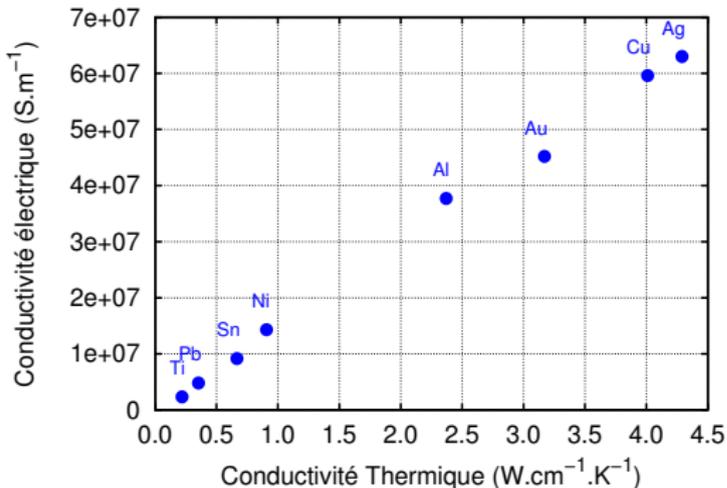
- transfert de chaleur dans la matière
- $P = -\frac{\lambda S}{e} \Delta T$, $\lambda = 20 \dots 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Pour une piste en cuivre avec $e = 100 \mu\text{m}$,
 $S = 1 \text{ cm}^2$ et $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 400 \text{ W}$

► 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

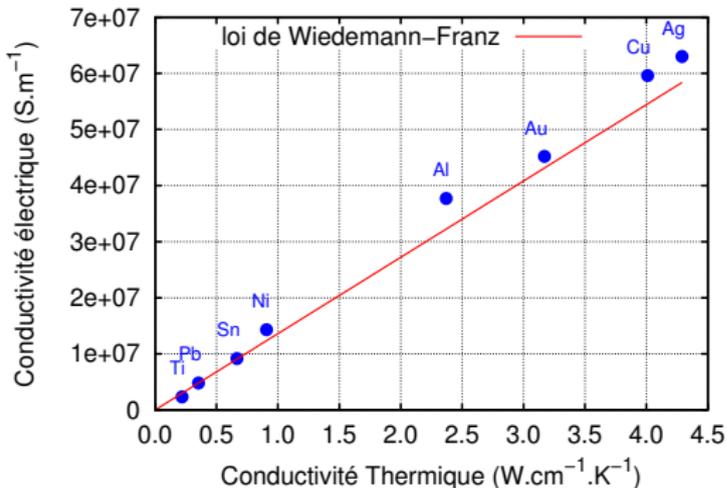
Relation entre conductivités thermique et électrique



cond. thermique $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$

- ▶ λ_e : porteurs de charges (électrons)
 $\lambda_e = LT\sigma$
(L constante de Lorentz = $2,44 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$).
- ▶ λ_p : phonons (vibrations réseau atomique)

Relation entre conductivités thermique et électrique



cond. thermique $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$

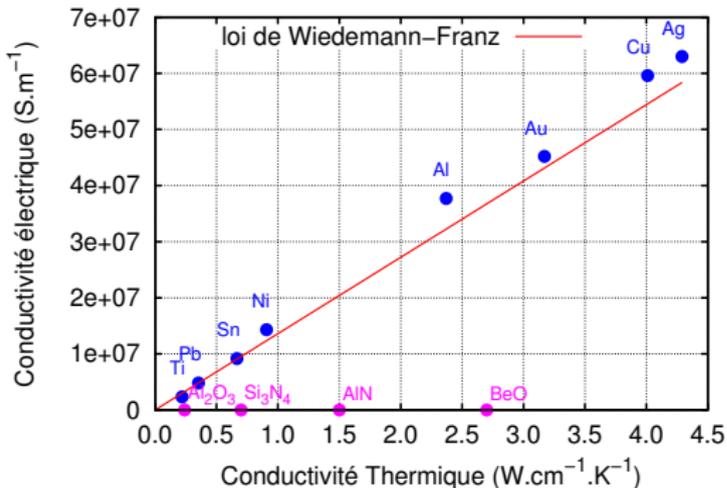
- ▶ λ_e : porteurs de charges (électrons)

$$\lambda_e = LT\sigma$$

(L constante de Lorentz = $2,44.10^{-8} W.\Omega.K^{-2}$).

- ▶ λ_p : phonons (vibrations réseau atomique)

Relation entre conductivités thermique et électrique



cond. thermique $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$

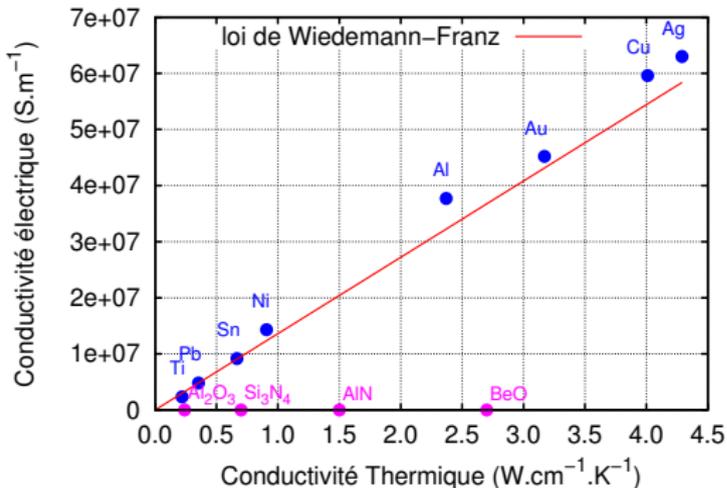
- ▶ λ_e : porteurs de charges (électrons)

$$\lambda_e = LT\sigma$$

(L constante de Lorentz = $2,44 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$).

- ▶ λ_p : phonons (vibrations réseau atomique)

Relation entre conductivités thermique et électrique



cond. thermique $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$

- ▶ λ_e : porteurs de charges (électrons)

$$\lambda_e = LT\sigma$$

(L constante de Lorentz = $2,44 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$).

- ▶ λ_p : phonons (vibrations réseau atomique)

→ Les matériaux bons conducteurs thermiques/isolants électriques sont rares (diamant, AlN, Si₃N₄, Al₂O₃)

Isolants/conducteurs électrique/thermique

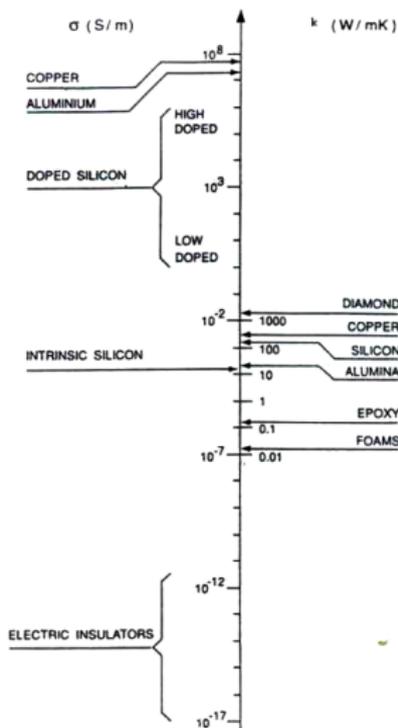
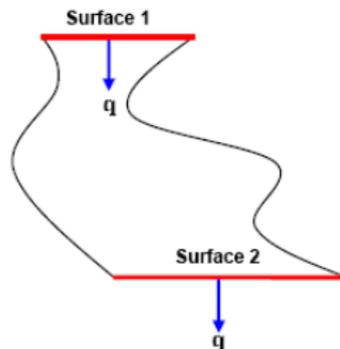


Figure 1: Comparison between electrical and thermal conductivities

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

Représentation circuit thermique

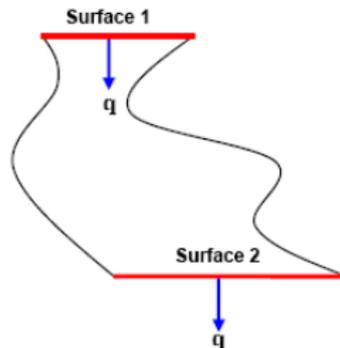


Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance,
ECPE Workshop on advanced cooling, 20–21 November, Delft.

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

Représentation circuit thermique



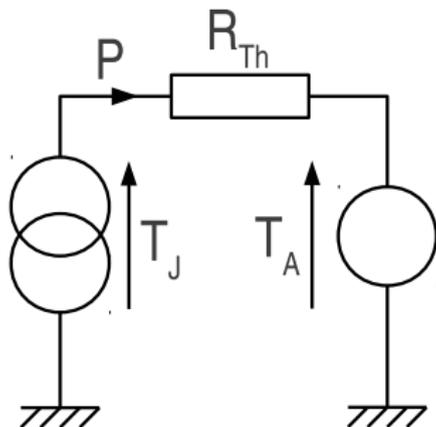
Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20-21 November, Delft.

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)
- ▶ $T_J = T_A + R_{Th} \times P$



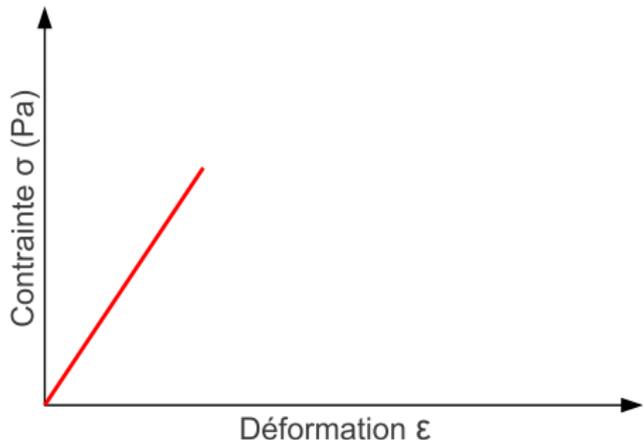
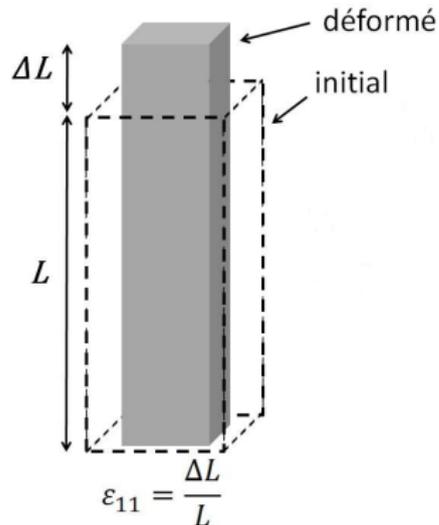
Un composant dissipe 15 W. Il est refroidi à travers une résistance thermique de 10 °C/W vers l'air ambiant, à une température de 25 °C

- ▶ 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^2

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

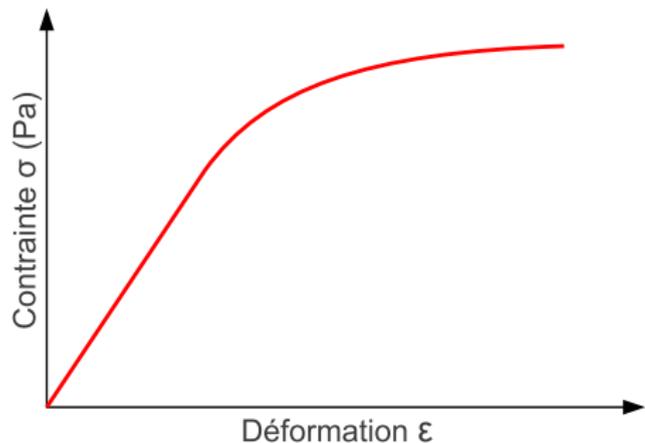
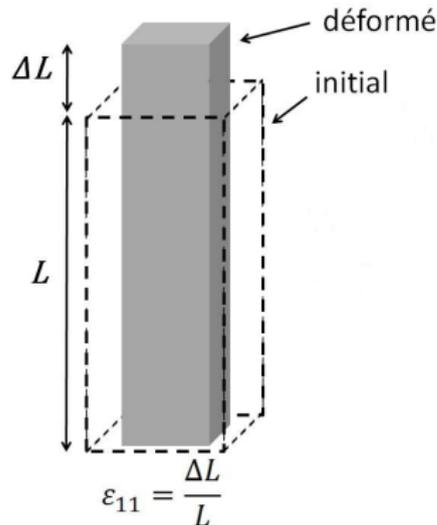
Un peu de mécanique...



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

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

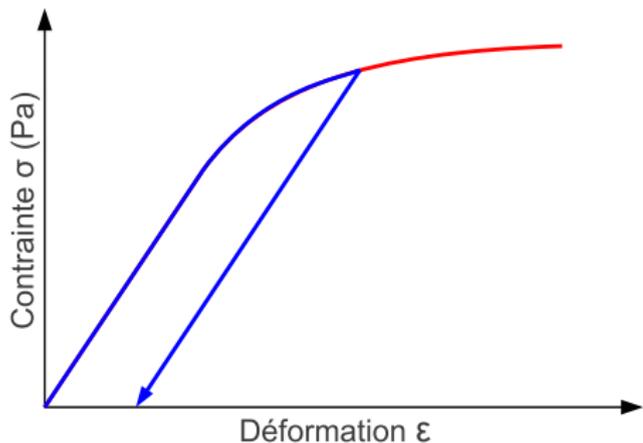
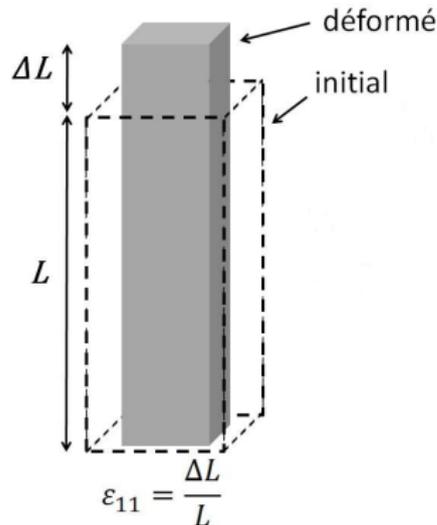
Un peu de mécanique...



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

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

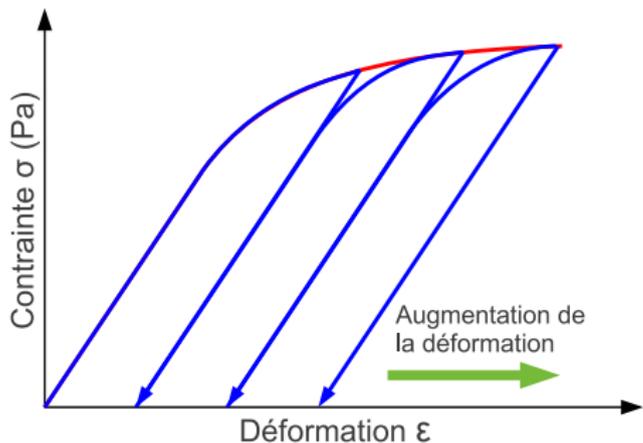
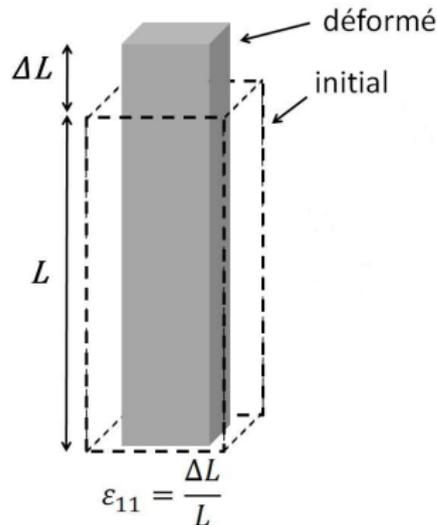
Un peu de mécanique...



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

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

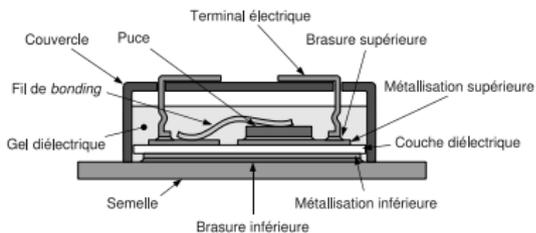
Un peu de mécanique...



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

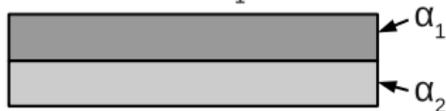
- ▶ Déformation élastique (réversible)
- ▶ Déformation plastique (irréversible)
- ▶ Apparition d'une déformation résiduelle
- ▶ accumulation de la déformation menant à la rupture

Effet des coefficients de dilatation



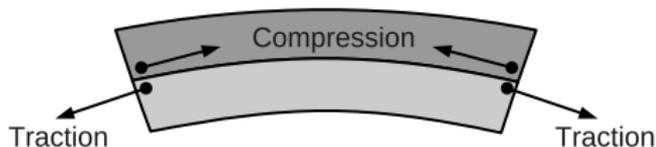
- ▶ α en ppm/K
- ▶ $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- ▶ la température génère des contraintes mécaniques

Température de repos T_1

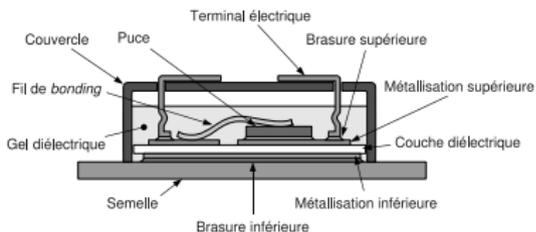


$$\alpha_1 > \alpha_2$$

$T_2 > T_1$



Effet des coefficients de dilatation

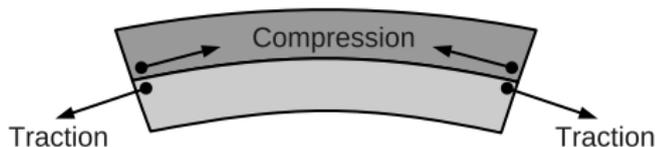


- ▶ α en ppm/K
- ▶ $3 \cdot 10^{-6} < \alpha < 20 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
- ▶ la température génère des contraintes mécaniques

Température de repos T_1



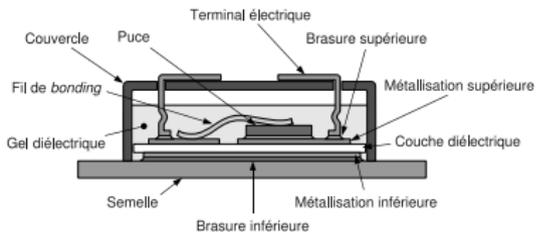
$T_2 > T_1$



Fonctionnement cyclique



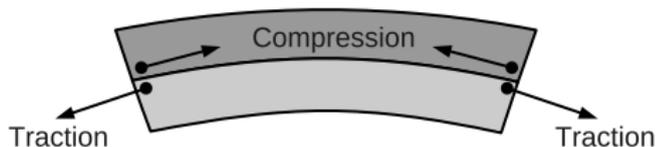
Effet des coefficients de dilatation



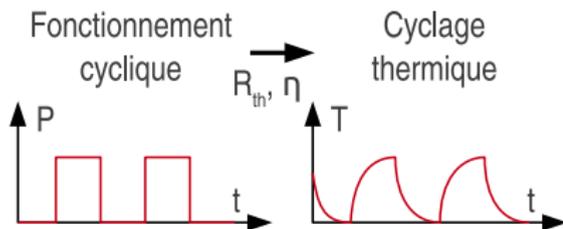
Température de repos T_1



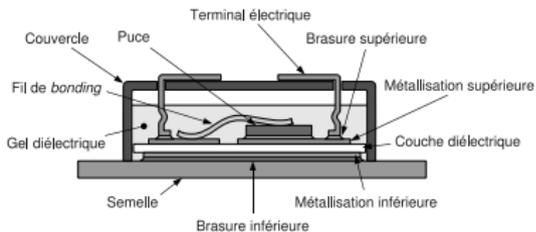
$T_2 > T_1$



- ▶ α en ppm/K
- ▶ $3 \cdot 10^{-6} < \alpha < 20 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
- ▶ la température génère des contraintes mécaniques



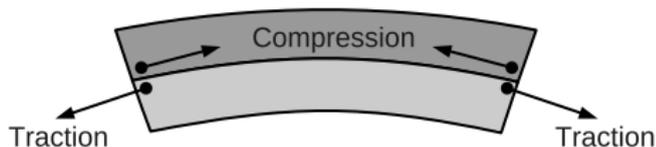
Effet des coefficients de dilatation



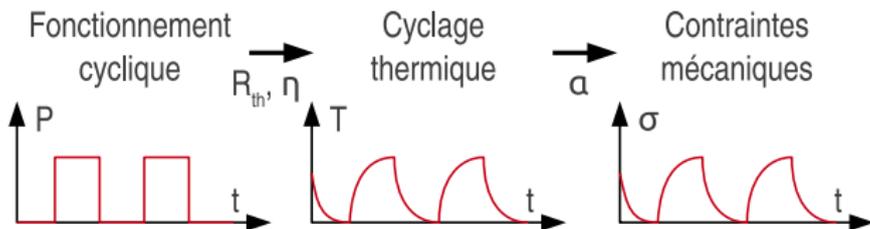
Température de repos T_1



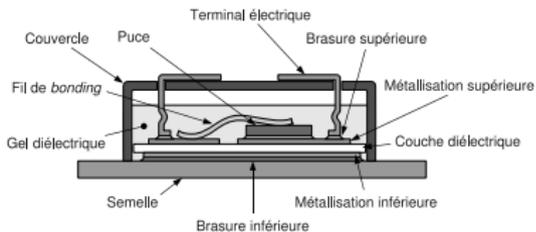
$T_2 > T_1$



- ▶ α en ppm/K
- ▶ $3 \cdot 10^{-6} < \alpha < 20 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
- ▶ la température génère des contraintes mécaniques



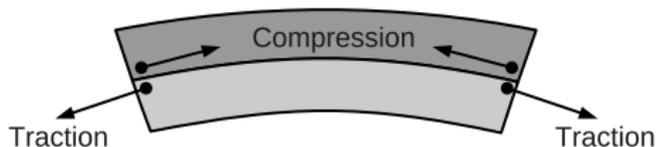
Effet des coefficients de dilatation



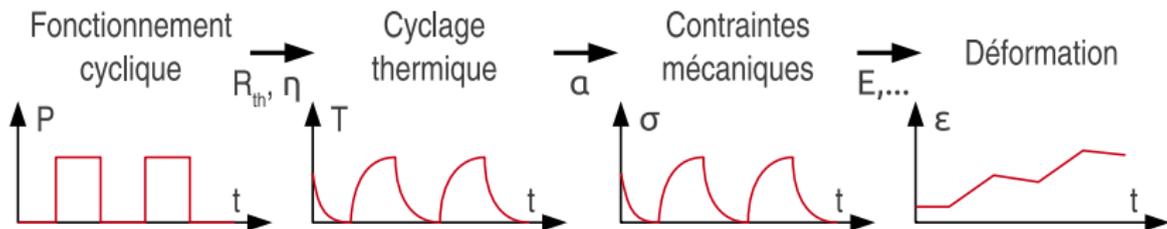
Température de repos T_1



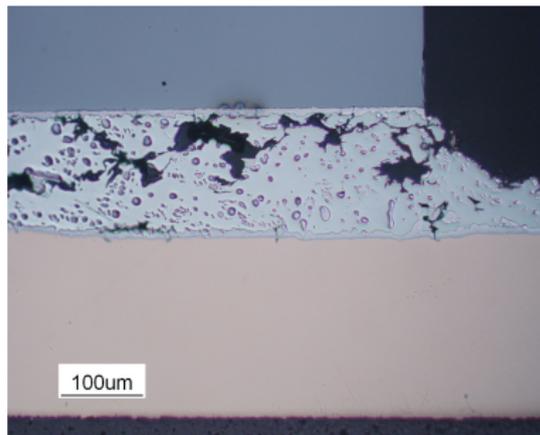
$T_2 > T_1$



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



Effet des contraintes thermo-mécaniques

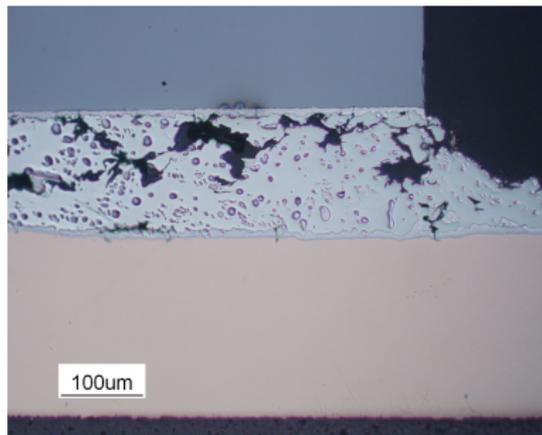


Source : Université de Nottingham

Brasure puce-substrat

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

Effet des contraintes thermo-mécaniques



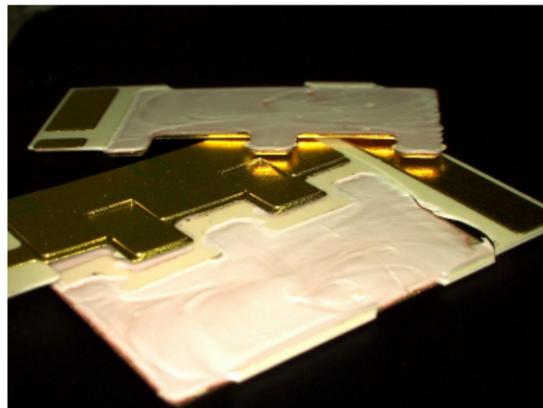
Source : Université de Nottingham

Brasure puce-substrat

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

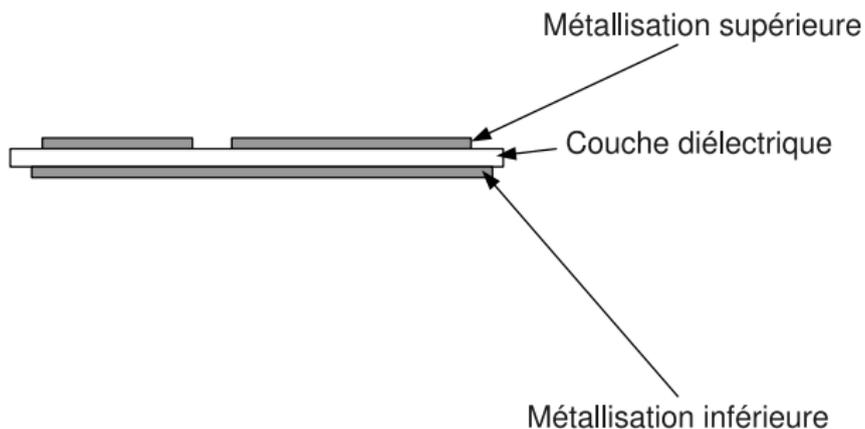
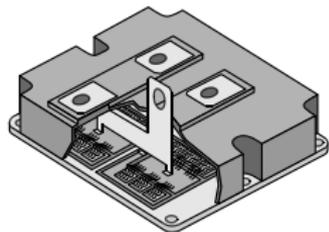
Substrat céramique métallisé

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

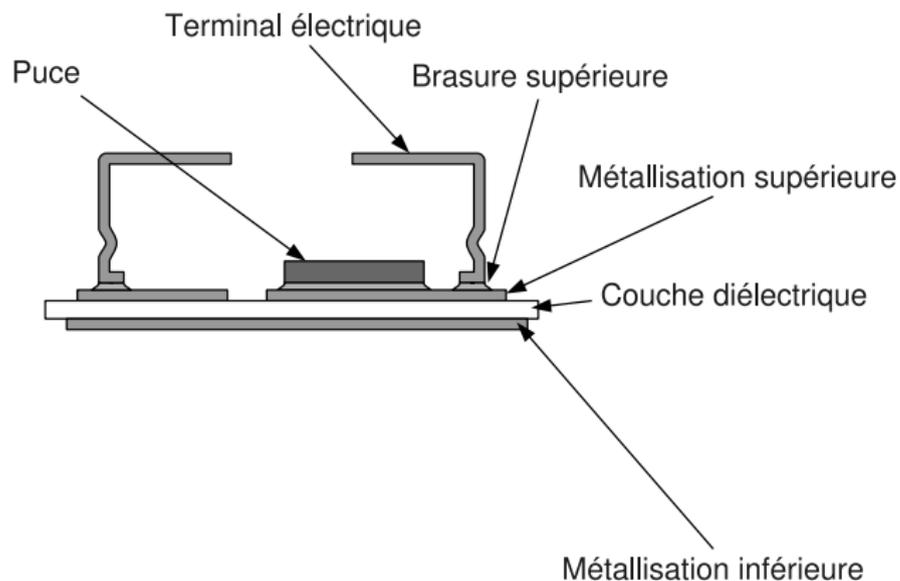
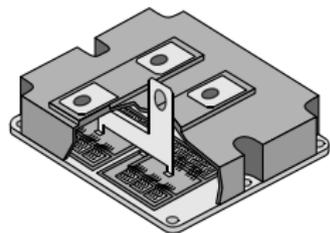


Source : Université de Nottingham

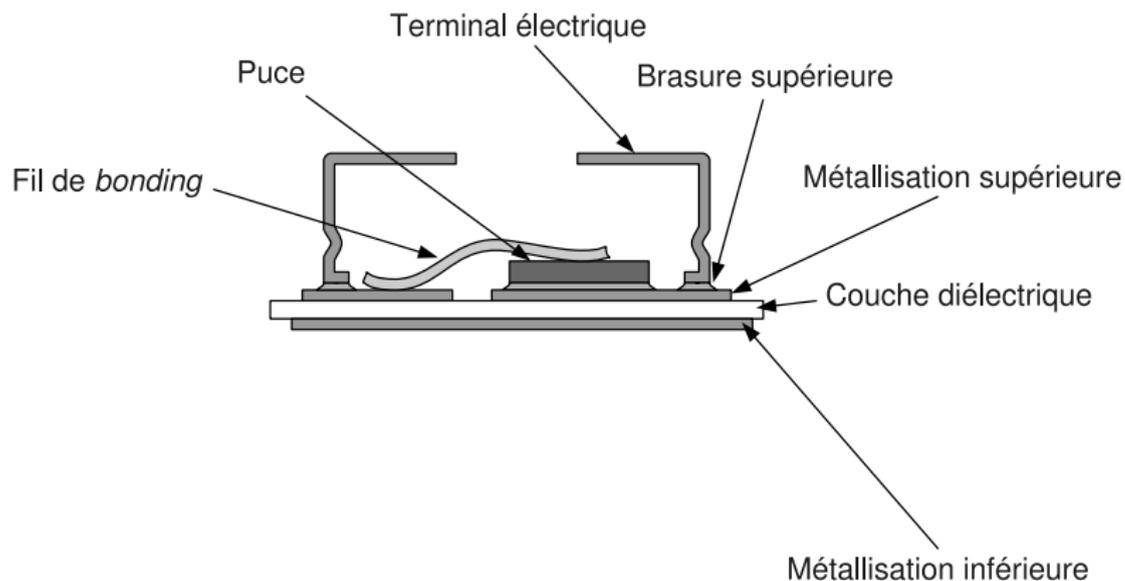
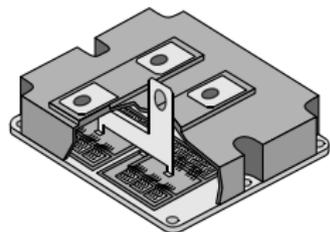
Coupe d'un module de puissance



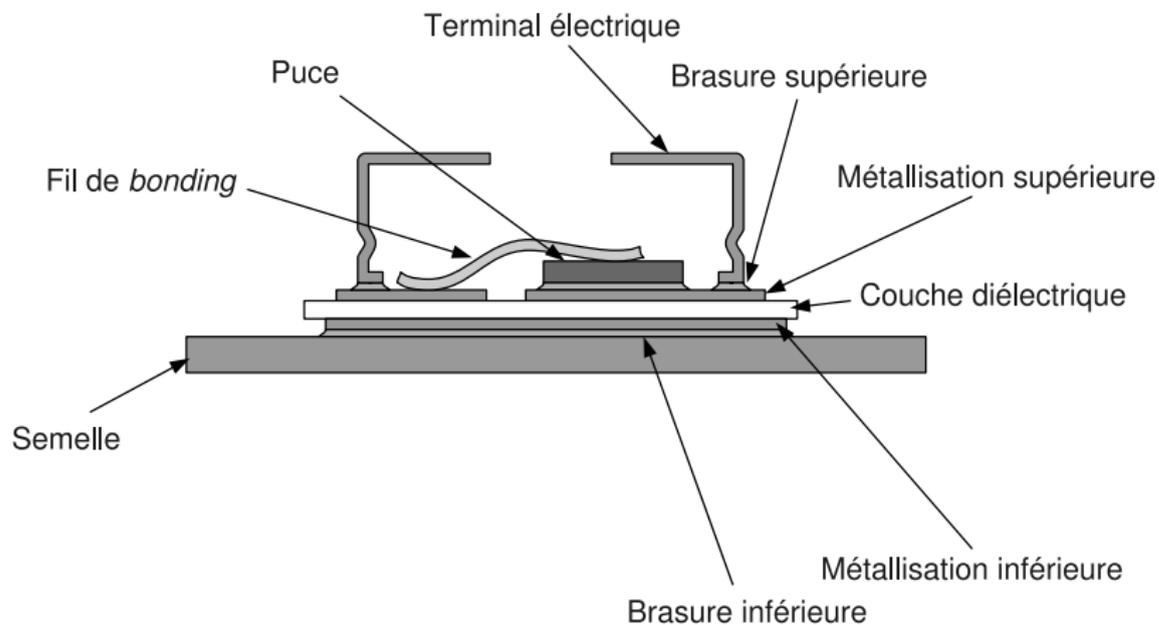
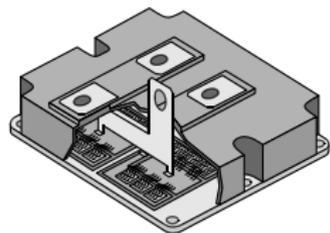
Coupe d'un module de puissance



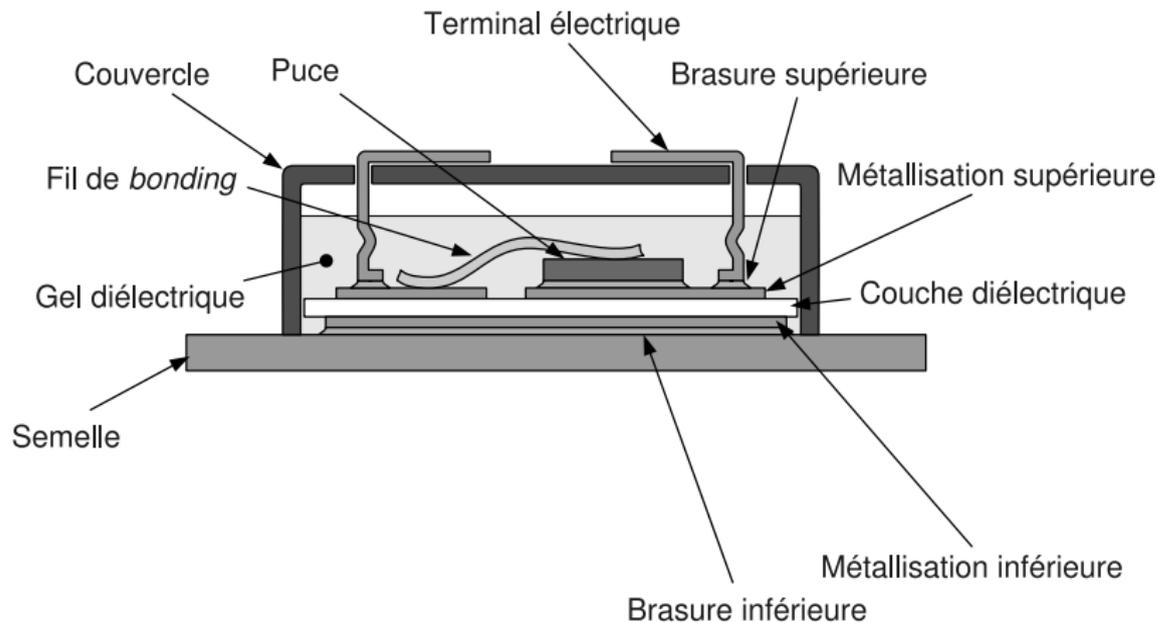
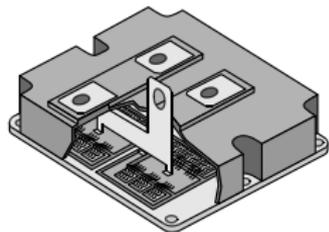
Coupe d'un module de puissance



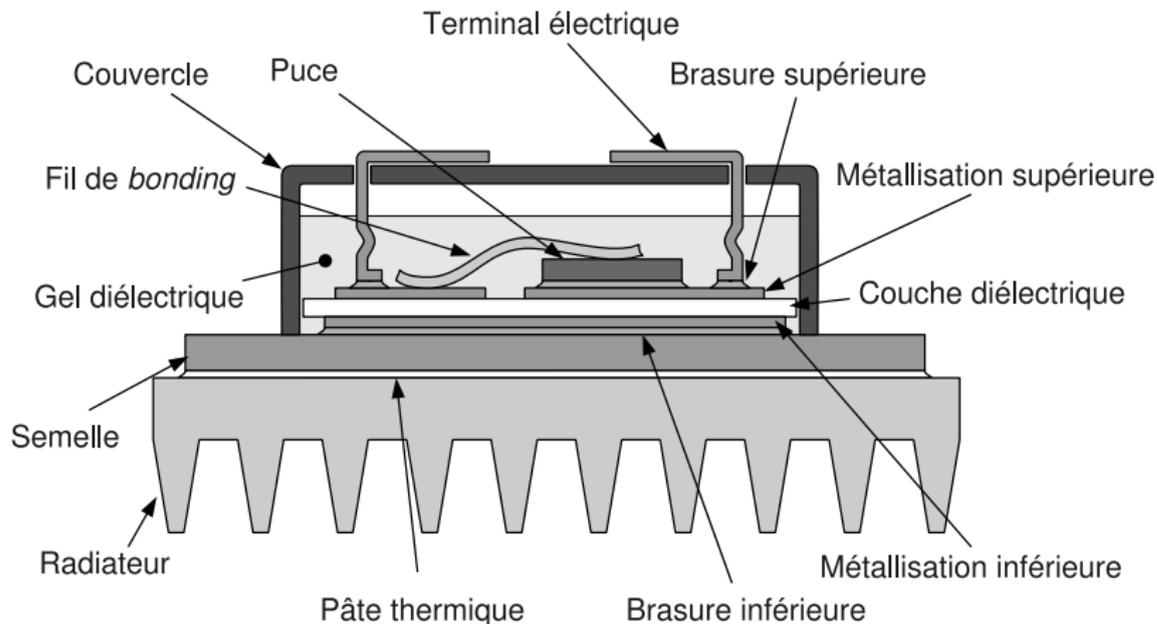
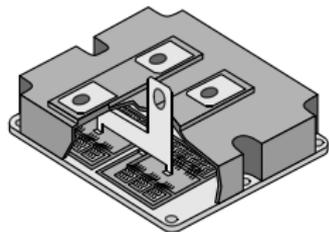
Coupe d'un module de puissance

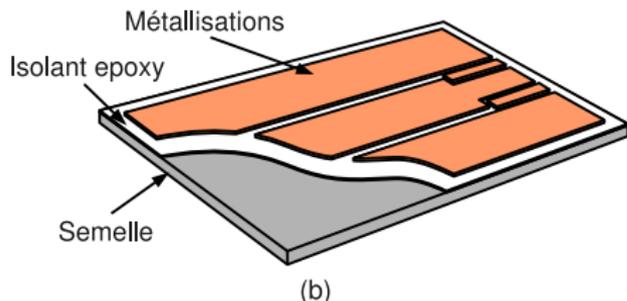
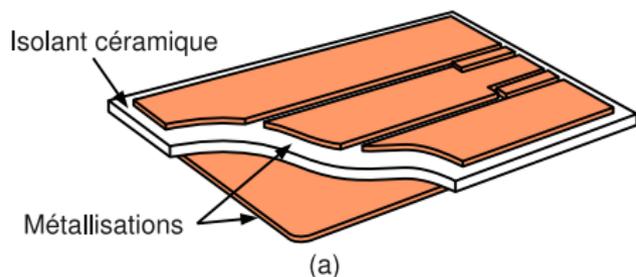


Coupe d'un module de puissance



Coupe d'un module de puissance





Plusieurs technologies :

▶ Les substrats céramiques (DBC, DBA, ...)

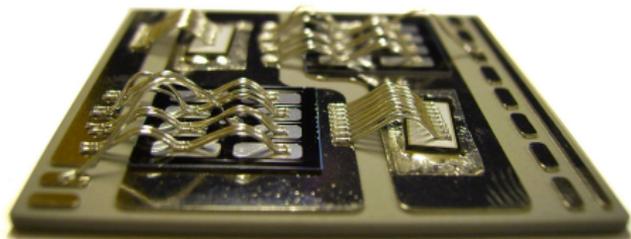
- ▶ céramique (0,3 à 1 mm)
- ▶ cuivre (0,1 à 0,3 mm)
- ▶ Bonnes performances thermiques et électriques
- ▶ Cher

▶ Les Substrats Métalliques Isolés (SMI)

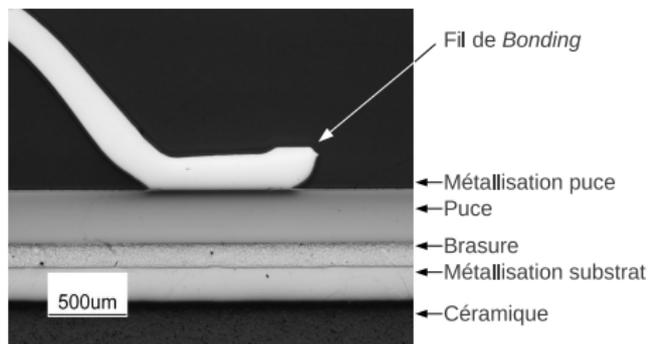
- ▶ aluminium (1 à 3 mm)
- ▶ isolant (0,1 mm)
- ▶ cuivre (0,035 à 0,2 mm)
- ▶ Performances moyennes
- ▶ Coef. de dilatation plus fort
- ▶ Moins cher

Fils de *bonding*

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

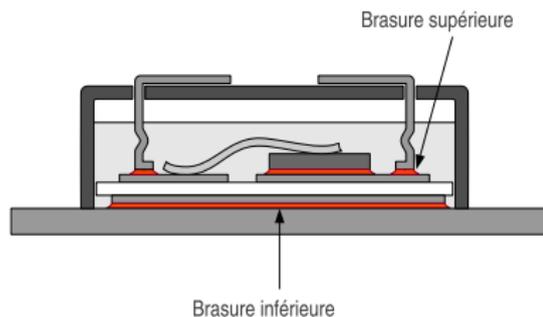


Source : Université Nottingham

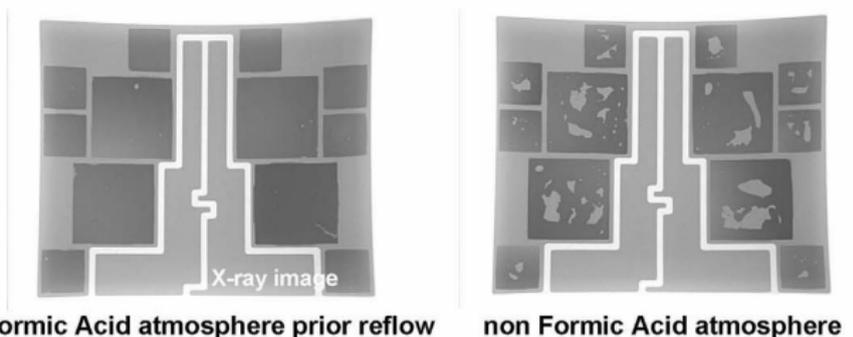


Source : Université Nottingham

- ▶ 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



Formic Acid atmosphere prior reflow versus non

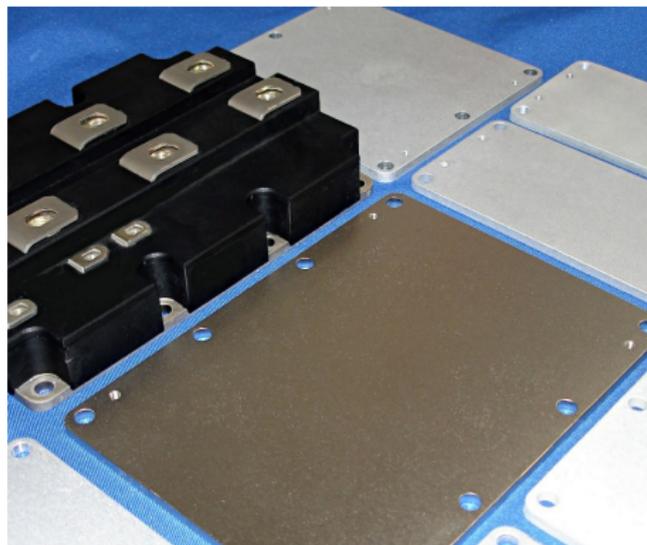


void free solder joints even without vacuum prior and during reflow

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. . .)



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

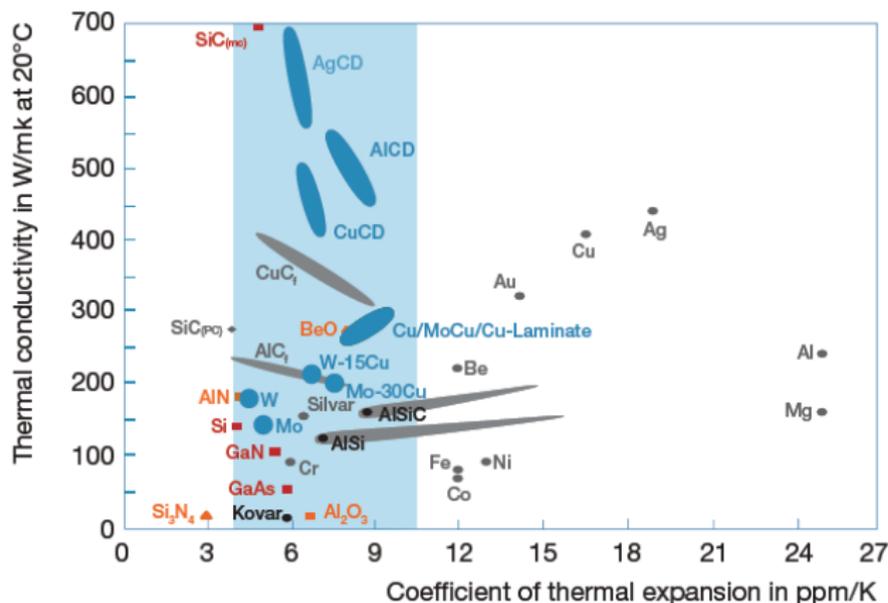
Rôles :

- ▶ 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

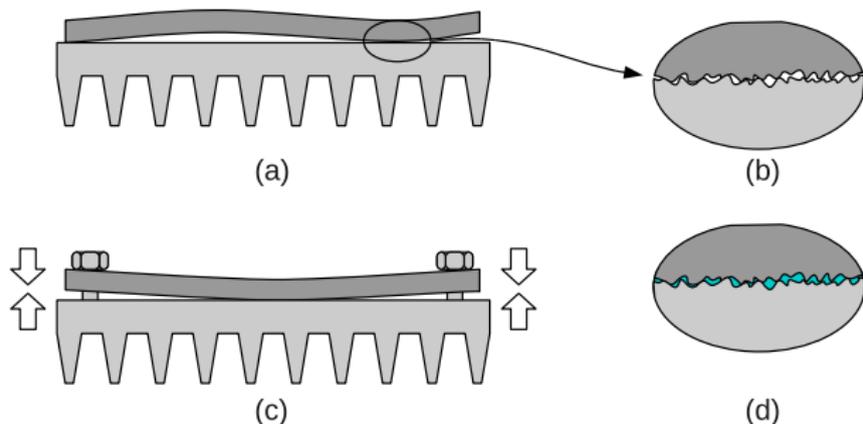
Semelle – Choix des matériaux



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'AlSiC est couramment utilisé dans les transports

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)

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



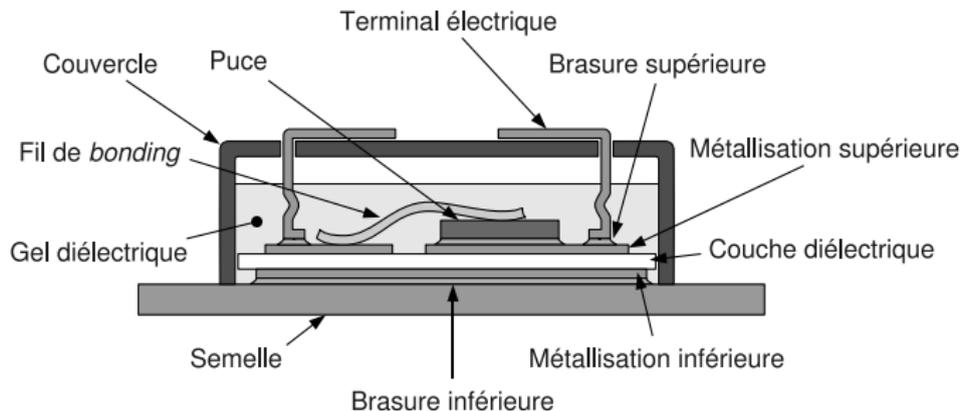
Delft University of Technology

Infineon

Page 9



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)

Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques

- Aspects thermiques

- Aspects thermo-mécaniques

- Substrats

- Interconnexions

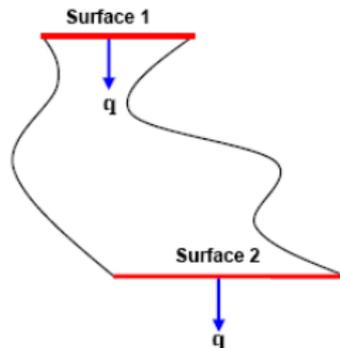
- Gestion thermique

Gestion thermique des composants

Évolutions, Recherche et Développement

Exercices

Résistance thermique

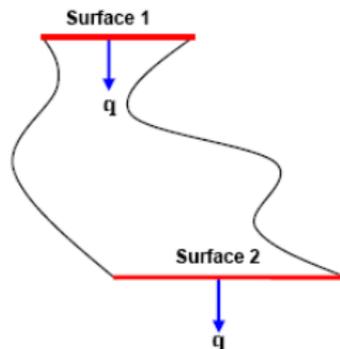


Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance,
ECPE Workshop on advanced cooling, 20–21 November, Delft.

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

Résistance thermique



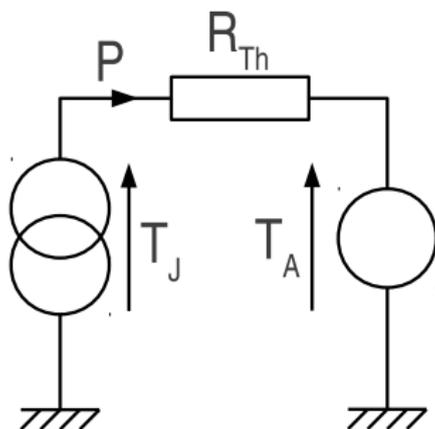
Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20-21 November, Delft.

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

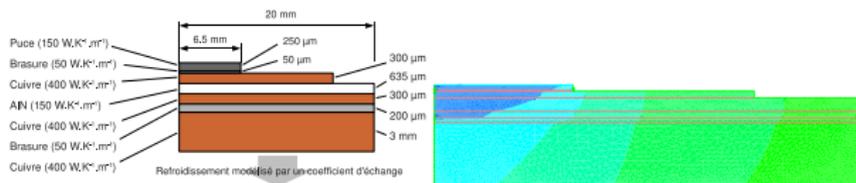
- ▶ Les températures sont des efforts (tensions)
- ▶ Les puissances dissipées des flux (courants)
- ▶ $T_J = T_A + R_{Th} \times P$



Calcul de la résistance thermique

▶ À partir des données “matériau” :

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



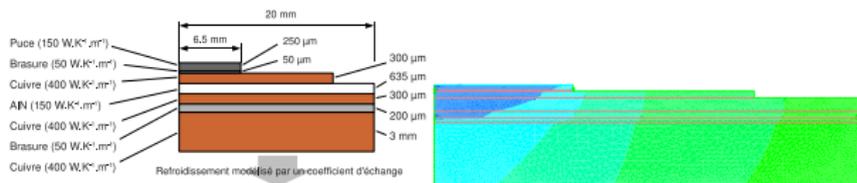
▶ À partir des données constructeur :

- ▶ 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) !

Calcul de la résistance thermique

▶ À partir des données “matériau” :

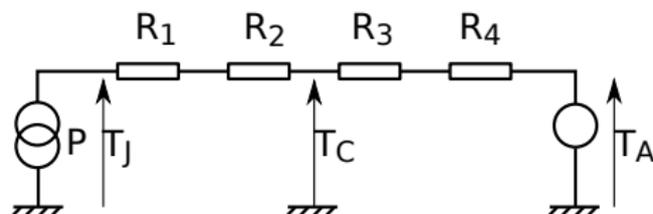
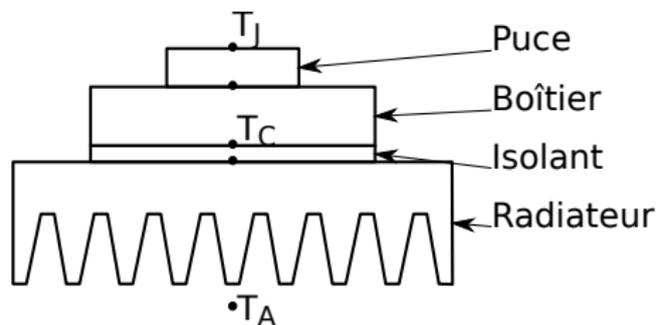
- ▶ si hypothèse 1-D acceptable : $R_{Th} = \frac{l}{\lambda S}$
 λ conductivité thermique, l longueur et S section
- ▶ Si géométrie complexe, plusieurs matériaux : calcul numérique



▶ 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



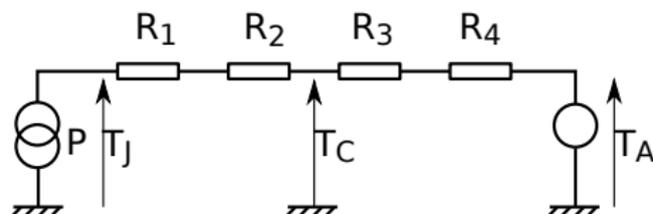
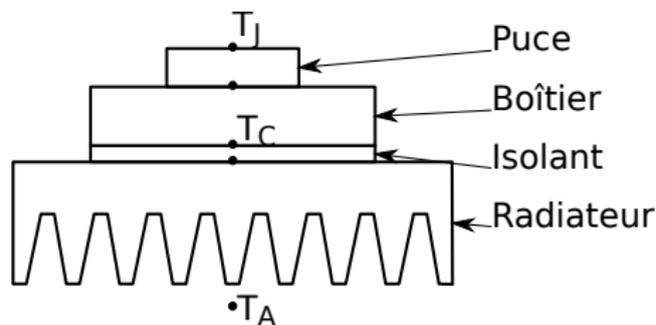
Si on peut considérer que les interfaces sont **isothermes** :

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

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

Équation de la chaleur

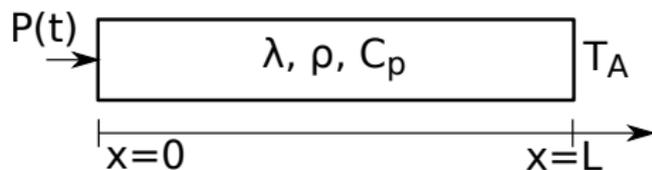
Équation de la chaleur 1-D :

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

Conditions aux limites :

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

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



- ▶ S section du barreau (m^2)
- ▶ C_p chaleur spécifique ($J/K/kg$)
- ▶ ρ densité (kg/m^3)

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 :

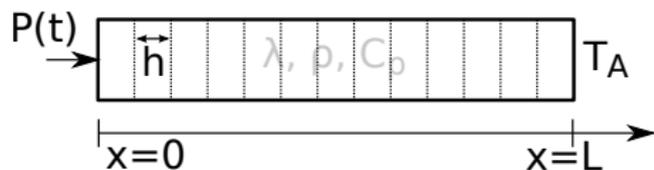
$$S \cdot \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -P(t)$$

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

Discrétisation de l'équation :

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

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



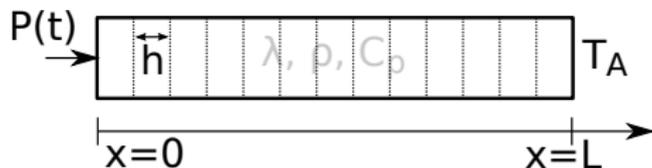
- ▶ S section du barreau (m^2)
- ▶ C_p chaleur spécifique ($J/K/kg$)
- ▶ ρ densité (kg/m^3)



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

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

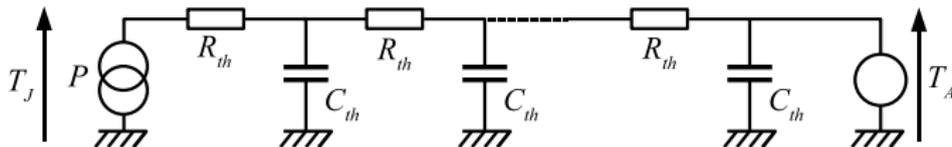
$$C_{Th} \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{R_{Th}} - \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{R_{Th}}$$



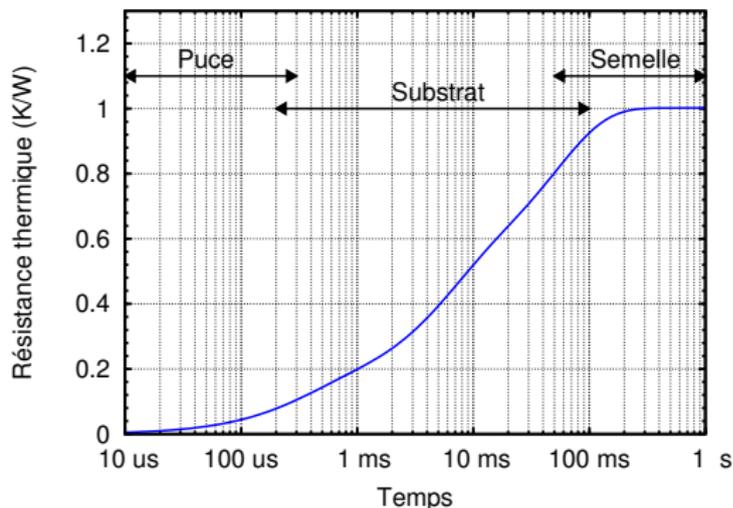
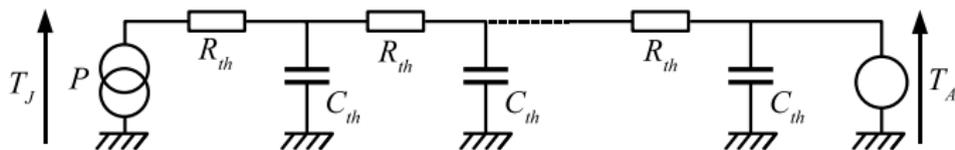
$$hS\rho C_p \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \lambda S \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{h} - \lambda S \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{h}$$

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

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



Impédance thermique



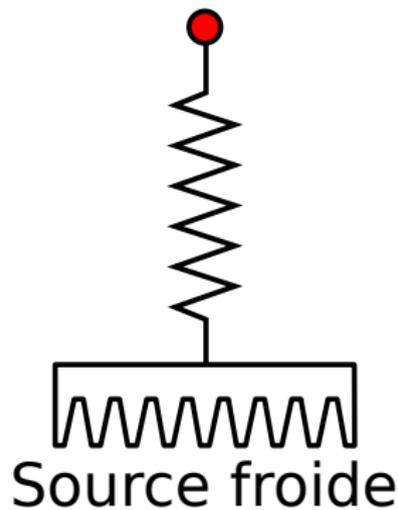
Extension au régime dynamique :

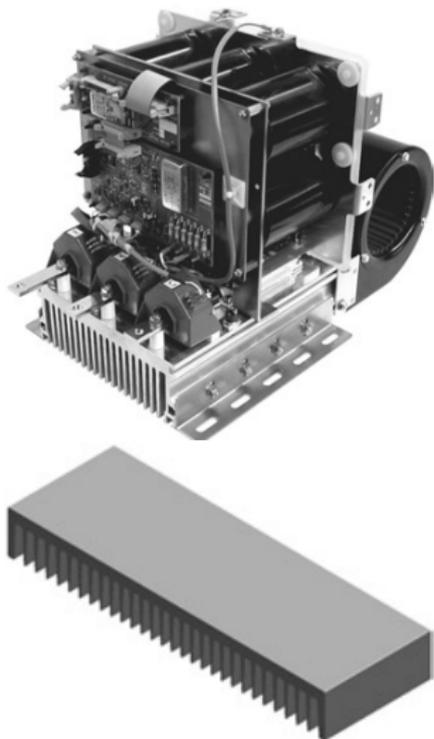
- ▶ mêmes conditions (conservation du flux, surfaces isothermes)
- ▶ aux courtes échelles de temps, fonctionnement propagatif

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





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

Efficacité des méthodes de refroidissement

Tableau 5 – Valeurs de h selon le mode de refroidissement

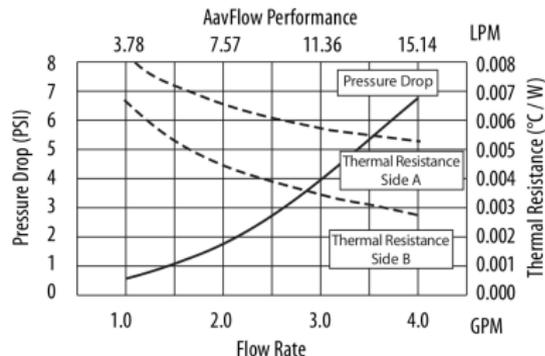
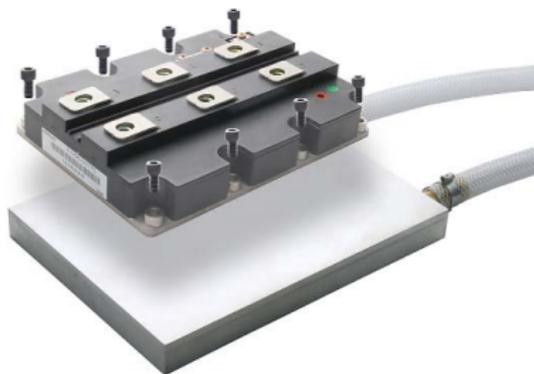
Mode de refroidissement	Fluide	h ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
Convection naturelle	Gaz	5 à 30
	Eau	100 à 1 000
Convection forcée	Gaz	10 à 300
	Eau	300 à 12 000
Changement de phase	Ébullition	3 000 à 60 000
	Condensation	5 000 à 110 000

- ▶ 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

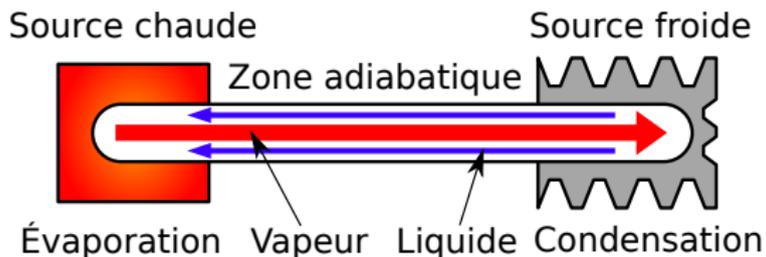


Refroidissement liquide

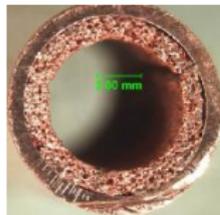


Source : Aavid Thermalloy, AavFlow Liquid Cold Plates

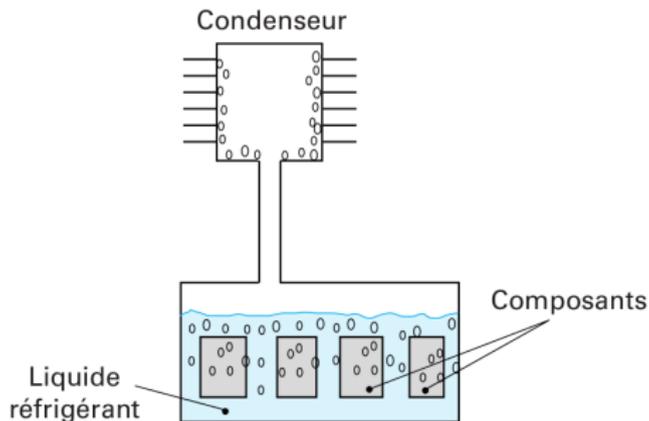
- ▶ Circuit comprenant :
 - ▶ Plaque(s) à eau
 - ▶ Tuyauterie, pompe
 - ▶ Échangeur eau-air
- ▶ R_{Th} de la plaque très faible
- ▶ Avantages :
 - ▶ fort effet d'étalement thermique
 - ▶ faibles dimensions au niveau du module
- ▶ inconvénients :
 - ▶ Système actif (fiabilité, rendement)
 - ▶ Pas plus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



- ▶ 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. . .)



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

Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques

- Aspects thermiques

- Aspects thermo-mécaniques

- Substrats

- Interconnexions

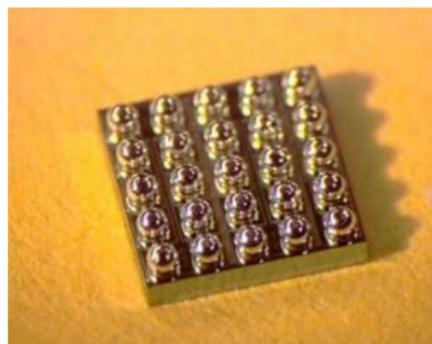
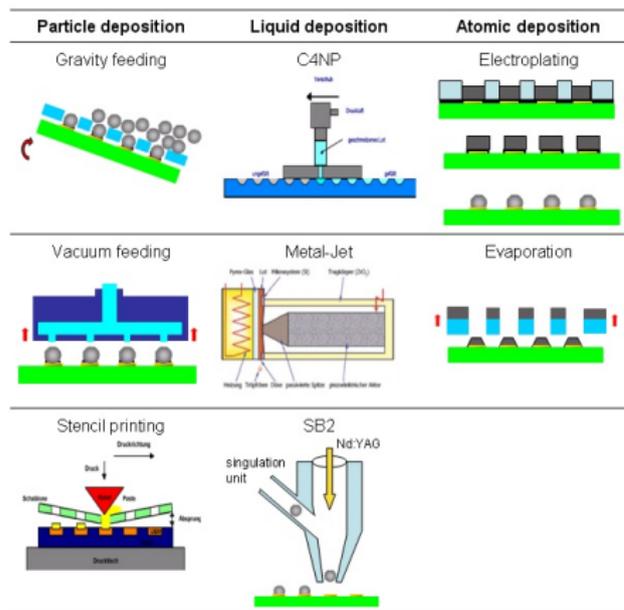
- Gestion thermique

Gestion thermique des composants

Évolutions, Recherche et Développement

Exercices

Le Wafer-Level Packaging

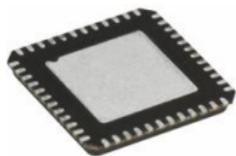


- ▶ Procédé collectif
- ▶ Orienté faible tension/puissance
- ▶ Nombreux procédés de réalisation

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

Après le *flip-chip*, l'enterré

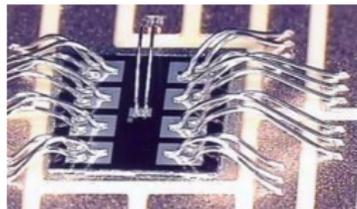
Interconnect Evolution



chip & wire



established since
40 years

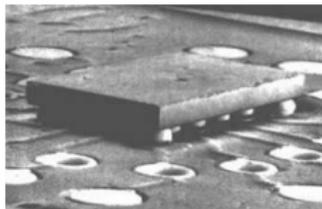


First level chip interconnection technologies inside a package:

flip chip



smallest in 2D



chip embedding



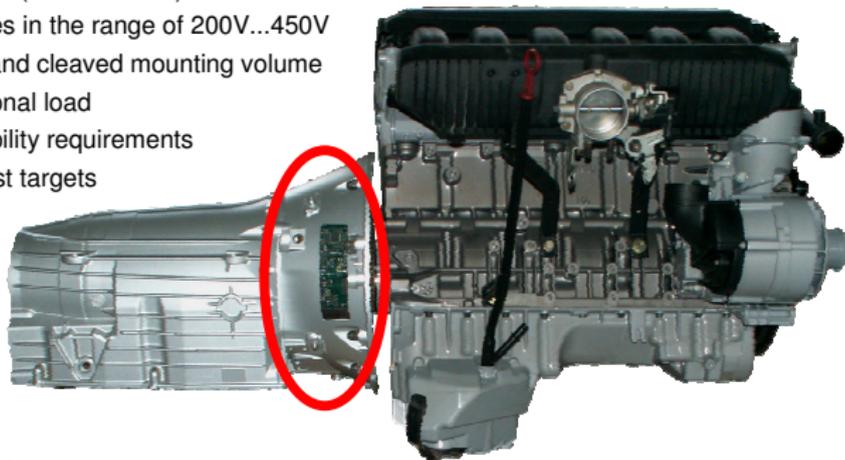
smallest in 3D



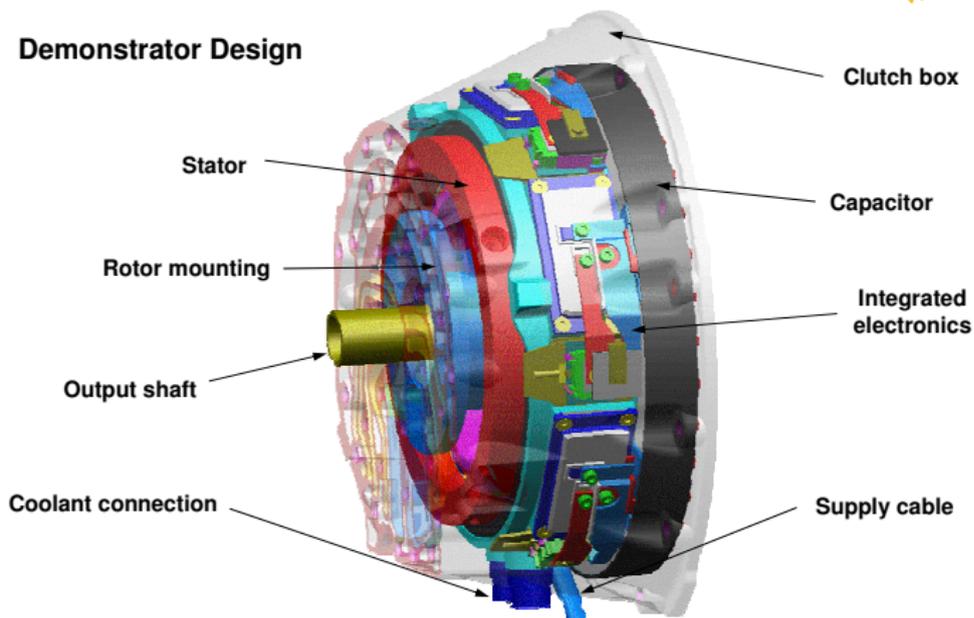
Advanced Power Electronics Packaging Workshop, Paris, France, September 30, 2009
Lars Böttcher, System Integration & Interconnection Technologies
lars.boettcher@izm.fraunhofer.de

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

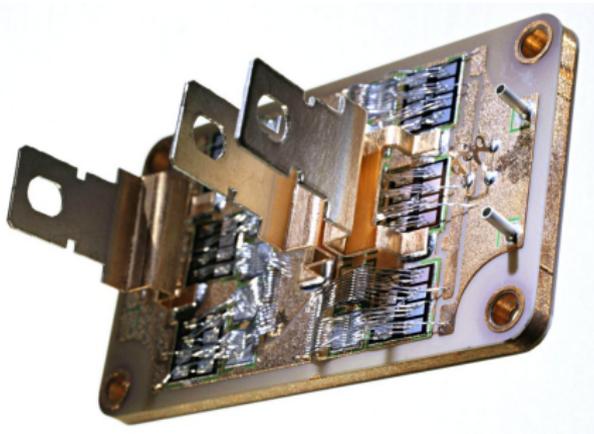


Demonstrator Design



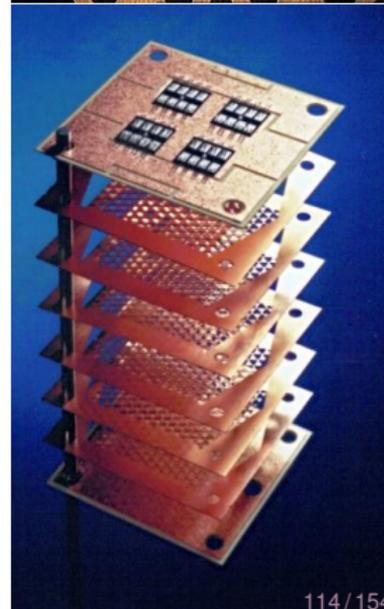
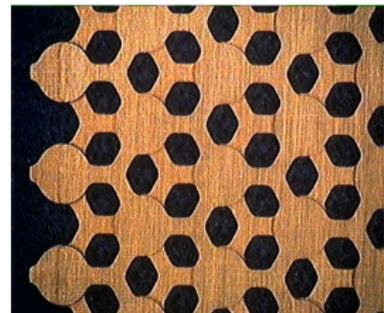
ECPE, 9/2009, Page 8

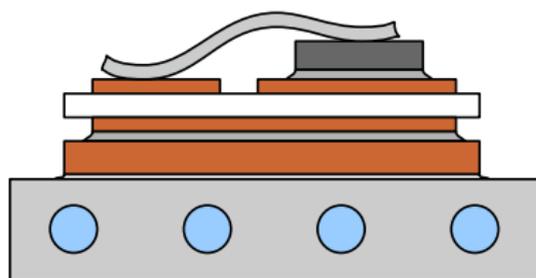
Le refroidissement intégré – 1



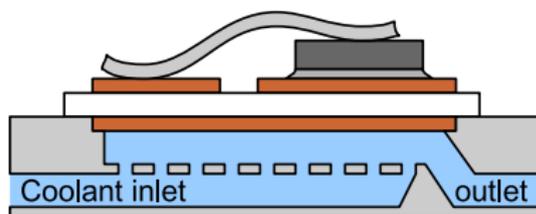
Source : Schulz-Harder, J. Ceramic Substrates and Micro Channel Cooler Curamik Electronics GmbH, 2006

- ▶ 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 $5 \times 5 \text{ cm}^2$





Classical liquid-cooling



Direct cooling

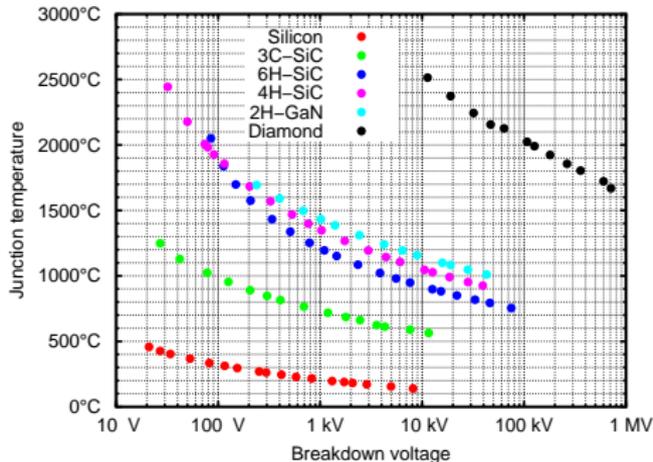
Mettre le fluide de refroidissement en contact direct avec le substrat

- ▶ 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.

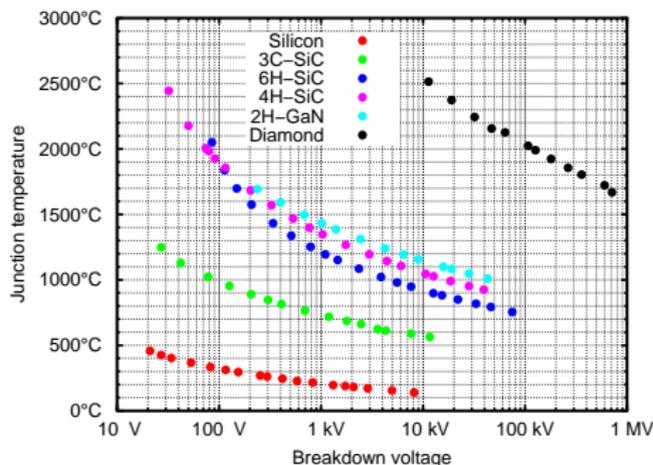
- ▶ Les limites actuelles sont *packaging*
- ▶ Souvent fort cyclage thermique
- ▶ Applications
 - ▶ Aéronautique
 - ▶ Automobile
 - ▶ Forage
 - ▶ ...



Vers les hautes températures

Les semiconducteurs “grand gap” fonctionnent à plus haute temp.

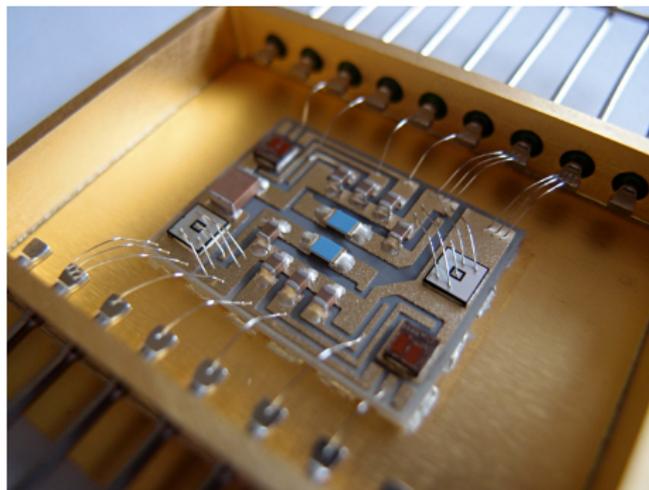
- ▶ Les limites actuelles sont *packaging*
- ▶ Souvent fort cyclage thermique
- ▶ Applications
 - ▶ Aéronautique
 - ▶ Automobile
 - ▶ Forage
 - ▶ ...



Problèmes liés au packaging :

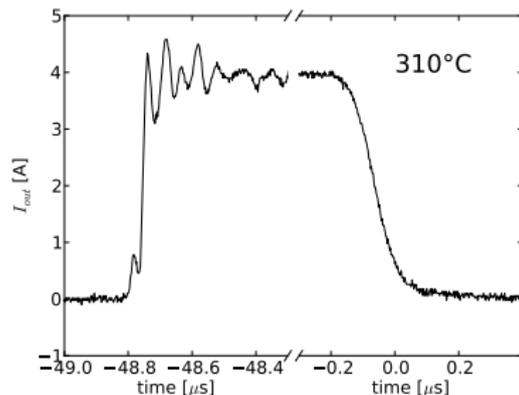
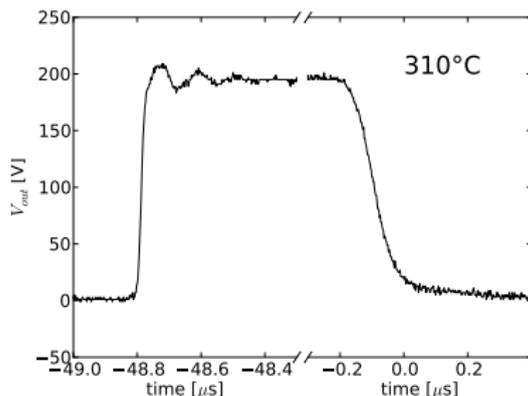
- ▶ Fusion des brasures
- ▶ Limite des matériaux polymères (gels, passivants, boîtier plastique)
- ▶ Amplification des problèmes mécaniques dûs au cyclage

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



Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques

Aspects thermiques

Aspects thermo-mécaniques

Substrats

Interconnexions

Gestion thermique

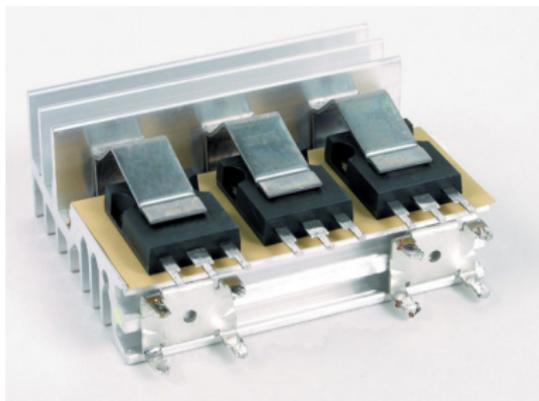
Gestion thermique des composants

Évolutions, Recherche et Développement

Exercices

Exercice 1

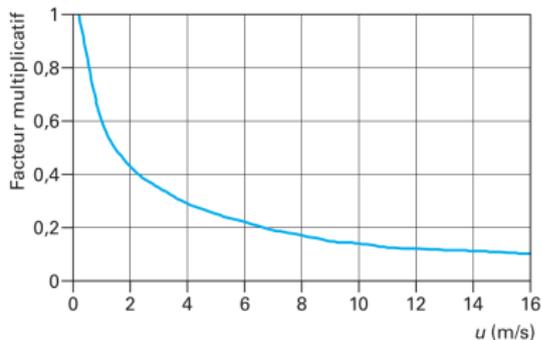
- ▶ Diode, $R_{Th_{JA}} = 62 \text{ K/W}$,
 $R_{Th_{JC}} = 0.9 \text{ K/W}$, $T_{J_{Max}} = 150^\circ\text{C}$,
 $P_{dis.} = 15 \text{ W}$
- ▶ Pad thermique souple,
 $2,35 \text{ K/W} > R_{Th} > 1,76 \text{ K/W}$
suivant pression d'appui
- ▶ Radiateur $R_{Th} = 4,4 \text{ K/W}$



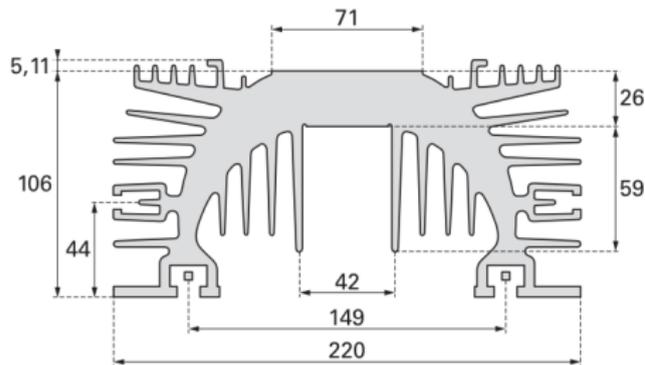
Source : the Bergquist Company

- ▶ Calculer la température de jonction de la diode sans refroidisseur, pour une température ambiante de 25°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°C
- ▶ Conclusions ?

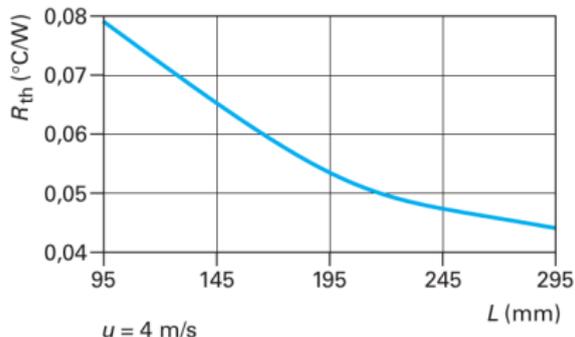
Exercice 2



- ▶ 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 $R_{Th_{JC}} = 0,03 K/W$. Calculez la puissance maximale dissipable à $T_{J_{max}} = 125^{\circ}C$ et $T_A = 50^{\circ}C$.
- ▶ Quelle température atteint alors le module si les ventilateurs s'arrêtent ? (cas 4 m/s uniquement)

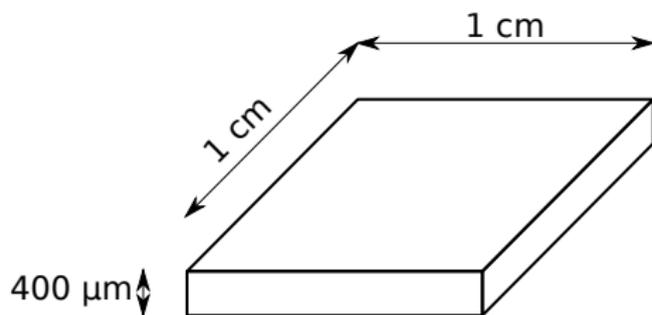


Les cotes sont indiquées en millimètres.



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

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 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 ?

Troisième partie III

Aspects pratiques

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



IDP30E120

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

Product Summary

V_{RRM}	1200	V
I_F	30	A
V_F	1.65	V
T_{jmax}	150	°C

PG-TO220-2



Type	Package	Ordering Code	Marking	Pin 1	PIN 2	PIN 3
IDP30E120	PG-TO220-2	-	D30E120	C	A	-

Maximum Ratings, at $T_j = 25\text{ °C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage	V_{RRM}	1200	V
Continuous forward current	I_F	30	A
$T_C=25\text{ °C}$		50	
$T_C=90\text{ °C}$		30	
Surge non repetitive forward current	I_{FSM}	102	
$T_C=25\text{ °C}$, $t_p=10\text{ ms}$, sine halfwave			
Maximum repetitive forward current	I_{FRM}	76.5	
$T_C=25\text{ °C}$, t_p limited by T_{jmax} , $D=0.5$			
Power dissipation	P_{tot}	138	W
$T_C=25\text{ °C}$		66	
$T_C=90\text{ °C}$			
Operating and storage temperature	T_j, T_{stg}	-55...+150	°C
Soldering temperature	T_S	260	°C
wavesoldering, 1.6mm (0.063 in.) from case for 10s			



IDP30E120

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

Product Summary

V_{RRM}	1200	V
I_F	30	A
V_F	1.65	V
T_{jmax}	150	°C

PG-TO220-2



Type	Package	Ordering Code	Marking	Pin 1	PIN 2	PIN 3
IDP30E120	PG-TO220-2	-	D30E120	C	A	-

Maximum Ratings, at $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage	V_{RRM}	1200	V
Continuous forward current	I_F	30	A
$T_c=25\text{ }^\circ\text{C}$		50	
$T_c=90\text{ }^\circ\text{C}$		30	
Surge non repetitive forward current	I_{FSM}	102	
$T_c=25\text{ }^\circ\text{C}$, $t_p=10\text{ ms}$, sine halfwave			
Maximum repetitive forward current	I_{FRM}	76.5	
$T_c=25\text{ }^\circ\text{C}$, t_p limited by T_{jmax} , $D=0.5$			
Power dissipation	P_{tot}	138	W
$T_c=25\text{ }^\circ\text{C}$		66	
$T_c=90\text{ }^\circ\text{C}$			
Operating and storage temperature	T_j, T_{stg}	-55...+150	°C
Soldering temperature	T_S	260	°C
wavesoldering, 1.6mm (0.063 in.) from case for 10s			

Référence du composant



IDP30E120

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

Product Summary

V_{RRM}	1200	V
I_F	30	A
V_F	1.65	V
T_{jmax}	150	°C

PG-TO220-2



Type	Package	Ordering Code	Marking	Pin 1	PIN 2	PIN 3
IDP30E120	PG-TO220-2	-	D30E120	C	A	-

Maximum Ratings, at $T_j = 25\text{ °C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage	V_{RRM}	1200	V
Continuous forward current	I_F	50	A
$T_c=25\text{ °C}$		30	
Surge non repetitive forward current	I_{FSM}	102	
$T_c=25\text{ °C}$, $t_p=10\text{ ms}$, sine halfwave			
Maximum repetitive forward current	I_{FRM}	76.5	
$T_c=25\text{ °C}$, t_p limited by T_{jmax} , $D=0.5$			
Power dissipation	P_{tot}	138	W
$T_c=25\text{ °C}$		66	
Operating and storage temperature	T_j, T_{stg}	-55...+150	°C
Soldering temperature wavesoldering, 1.6mm (0.063 in.) from case for 10s	T_S	260	°C

Description
rapide du composant

Référence du composant



IDP30E120

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

Product Summary

V_{RRM}	1200	V
I_F	30	A
V_F	1.65	V
T_{Jmax}	150	°C

PG-TO220-2



Type	Package	Ordering Code	Marking	Pin 1	PIN 2	PIN 3
IDP30E120	PG-TO220-2	-	D30E120	C	A	-

Maximum Ratings, at $T_J = 25\text{ °C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage	V_{RRM}	1200	V
Continuous forward current	I_F	50	A
$T_C=25\text{ °C}$		30	
$T_C=90\text{ °C}$			
Surge non repetitive forward current	I_{FSM}	102	
$T_C=25\text{ °C}$, $t_p=10\text{ ms}$, sine halfwave			
Maximum repetitive forward current	I_{FRM}	76.5	
$T_C=25\text{ °C}$, t_p limited by T_{Jmax} , $D=0.5$			
Power dissipation	P_{tot}	138	W
$T_C=25\text{ °C}$		66	
$T_C=90\text{ °C}$			
Operating and storage temperature	T_J, T_{stg}	-55...+150	°C
Soldering temperature	T_S	260	°C
wavesoldering, 1.6mm (0.063 in.) from case for 10s			

Description
rapide du composant
Référence du composant
Performances principales



IDP30E120

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

Product Summary

V_{RRM}	1200	V
I_F	30	A
V_F	1.65	V
T_{Jmax}	150	°C

PG-TO220-2



Type	Package	Ordering Code	Marking	Pin 1	PIN 2	PIN 3
IDP30E120	PG-TO220-2	-	D30E120	C	A	-

Maximum Ratings, at $T_J = 25\text{ °C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage	V_{RRM}	1200	V
Continuous forward current	I_F	50	A
$T_C=25\text{ °C}$		30	
$T_C=90\text{ °C}$			
Surge non repetitive forward current	I_{FSM}	102	
$T_C=25\text{ °C}$, $t_p=10\text{ ms}$, sine halfwave			
Maximum repetitive forward current	I_{FRM}	76.5	
$T_C=25\text{ °C}$, t_p limited by T_{Jmax} , $D=0.5$			
Power dissipation	P_{tot}	138	W
$T_C=25\text{ °C}$		66	
$T_C=90\text{ °C}$			
Operating and storage temperature	T_J, T_{stg}	-55...+150	°C
Soldering temperature	T_S	260	°C
wavesoldering, 1.6mm (0.063 in.) from case for 10s			

Description
rapide du composant

Référence du composant

Performances principales

Brochage/vue d'un des
boîtiers



IDP30E120

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

Product Summary

V_{RRM}	1200	V
I_F	30	A
V_F	1.65	V
T_{jmax}	150	°C

PG-TO220-2



Type	Package	Ordering Code	Marking	Pin 1	PIN 2	PIN 3
IDP30E120	PG-TO220-2	-	D30E120	C	A	-

Maximum Ratings, at $T_j = 25\text{ °C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage	V_{RRM}	1200	V
Continuous forward current	I_F	30	A
$T_c=25\text{ °C}$		50	
$T_c=90\text{ °C}$		30	
Surge non repetitive forward current	I_{FSM}	102	
$T_c=25\text{ °C}$, $t_p=10\text{ ms}$, sine halfwave			
Maximum repetitive forward current	I_{FRM}	76.5	
$T_c=25\text{ °C}$, t_p limited by T_{jmax} , $D=0.5$			
Power dissipation	P_{tot}		W
$T_c=25\text{ °C}$		138	
$T_c=90\text{ °C}$		66	
Operating and storage temperature	T_j, T_{stg}	-55...+150	°C
Soldering temperature wavesoldering, 1.6mm (0.063 in.) from case for 10s	T_S	260	°C

Description
rapide du composant

Référence du composant

Performances principales

Brochage/vue d'un des
boîtiers

Grandeurs extrêmes
(destruction du composant
au-delà)



IDP30E120

Thermal Characteristics

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
Characteristics					
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 @ 6 cm ² cooling area ¹⁾	R_{thJA}	-	-	62	
		-	35	-	

Electrical Characteristics, at $T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

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

¹⁾ ST020 and JE5022

²⁾ Device on 40mm²40mm²1.5mm epoxy PCB FR4 with 6cm² (one layer, 70 μm thick) copper area for drain connection. PCB is vertical without blown air.



IDP30E120

Thermal Characteristics

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
Characteristics					
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 @ 6 cm ² cooling area ¹⁾	R_{thJA}	-	35	62	

Performance thermiques

Electrical Characteristics, at $T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

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

¹⁾ ST020 and JESD22

²⁾ Device on 40mm²40mm²1.5mm epoxy PCB FR4 with 6cm² (one layer, 70 μm thick) copper area for drain connection. PCB is vertical without blown air.



IDP30E120

Thermal Characteristics

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
Characteristics					
Thermal resistance, junction - case	$R_{\theta jC}$	-	-	0.9	K/W
Thermal resistance, junction - ambient, leaded	$R_{\theta jA}$	-	-	62	
SMD version, device on PCB: @ min. footprint @ 6 cm ² cooling area ¹⁾	$R_{\theta jA}$	-	35	-	

Performance thermiques

Electrical Characteristics, at $T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

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

Performances électriques

¹⁾ S-TD20 and JE5D22

²⁾ Device on 40mm²40mm²1.5mm epoxy PCB FR4 with 6cm² (one layer, 70 μm thick) copper area for drain connection. PCB is vertical without blown air.





IDP30E120

Thermal Characteristics

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
Characteristics					
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 @ 6 cm ² cooling area ¹⁾	R_{thJA}	-	35	-	

Performance thermiques

Electrical Characteristics, at $T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

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

Performances électriques

Valeur
minimale

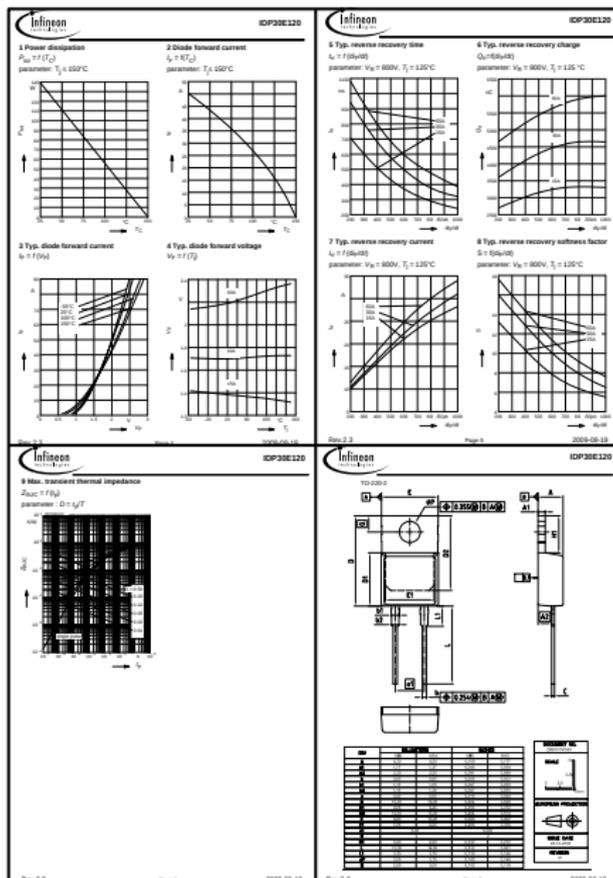
Valeur
nominale

Valeur
maximale

¹⁾ STD20 and JE5022

²⁾ Device on 40mm²40mm²1.5mm epoxy PCB FR4 with 6cm² (one layer, 70 μm thick) copper area for drain connection. PCB is vertical without blown air.





Caractérisations électrique
 (attention aux conditions)

Abaque thermique

Information de *packaging*

Caractéristiques électriques

Diode

MOSFET

IGBT

Commutation des composants

Exercices

Conclusion

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"...)

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"...)

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" ...)

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”...)

Caractéristiques électriques

Diode

MOSFET

IGBT

Commutation des composants

Exercices

Conclusion

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_{DG} et I_D
- ▶ important pour les transistors utilisés à haute fréquence (plusieurs centaines de kHz)

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)

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)

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)

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_{DD} et I_D
- ▶ important pour les transistors utilisés à haute fréquence (plusieurs centaines de kHz)

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

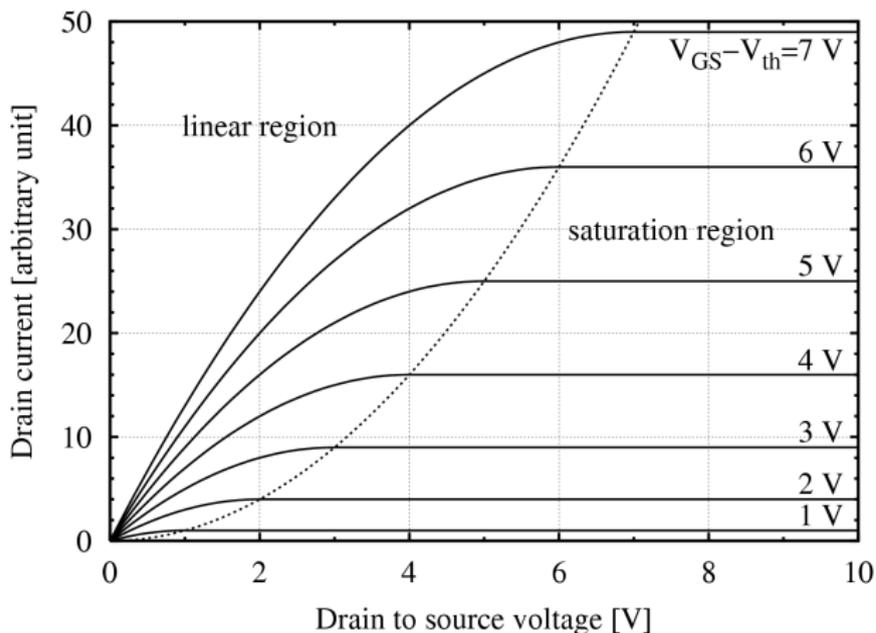
- ▶ Dépend de la température, de la tension V_{GS}

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

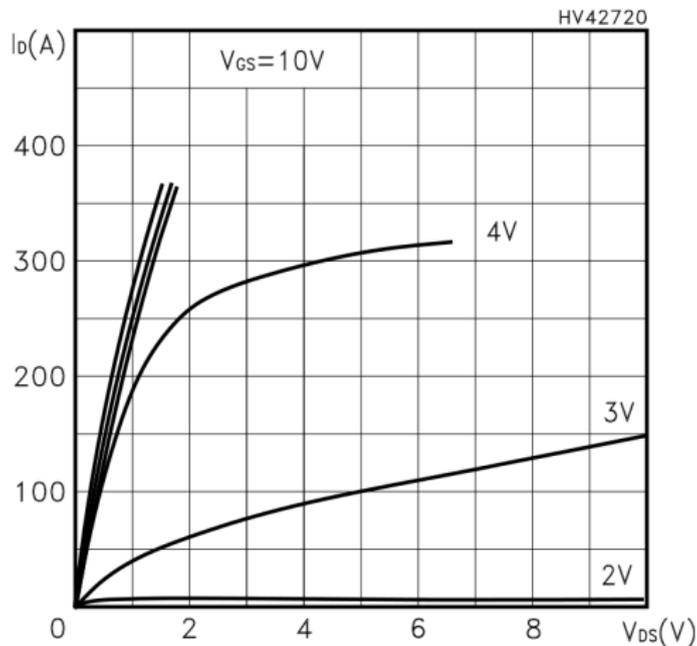
Q_G : Charge nécessaire pour faire commuter le transistor

- ▶ 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)

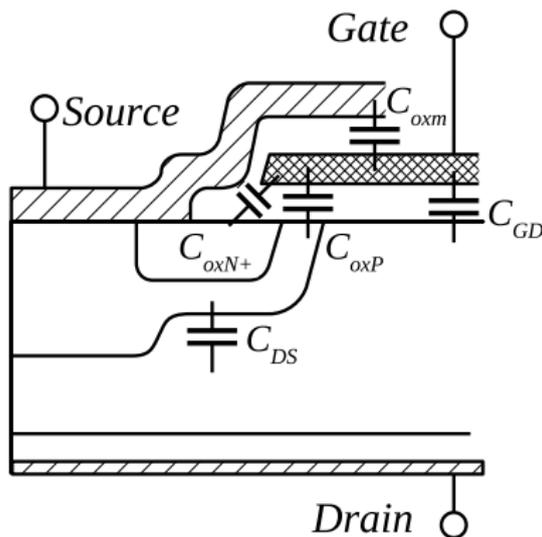
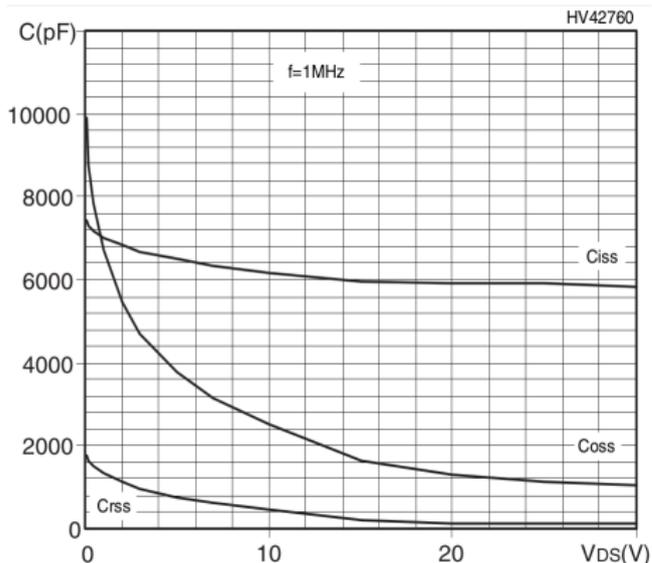




- ▶ Fonctionnement nominal en zone linéaire
- ▶ $R_{DS_{on}}$ modulée par la tension grille-source



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

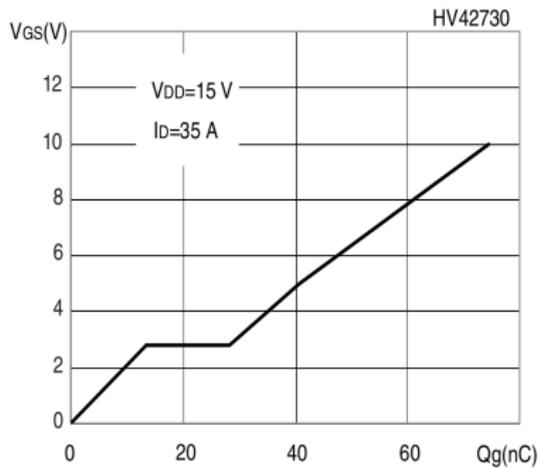


$$C_{GS} = C_{oxN+} + C_{oxP} + C_{oxm}$$

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



- ▶ 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

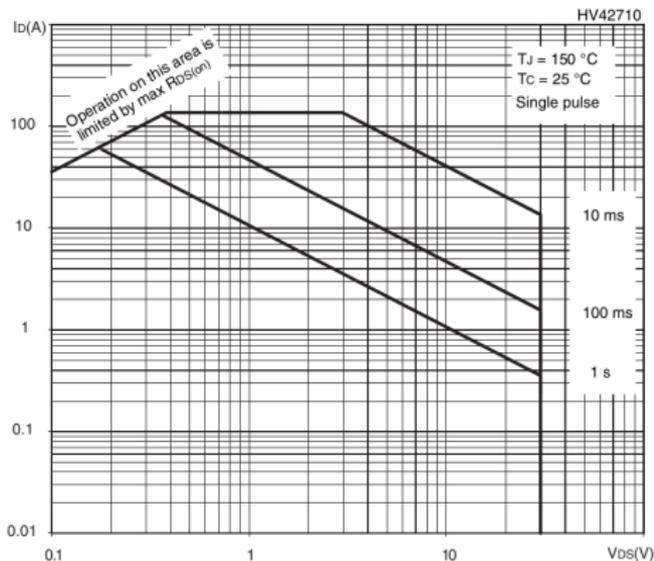
- ▶ La Safe Operating Area définit le domaine de fonctionnement du transistor

- ▶ $I_D = \frac{V_{DS}}{R_{Dson}}$

- ▶ $V_{DS} < V_{BR}$

- ▶ I_D limité par des considérations de fiabilité

- ▶ $P = V_{DS} \times I_D$ limité par l'impédance thermique



Source : datasheet du Mos STL150N3LLH5

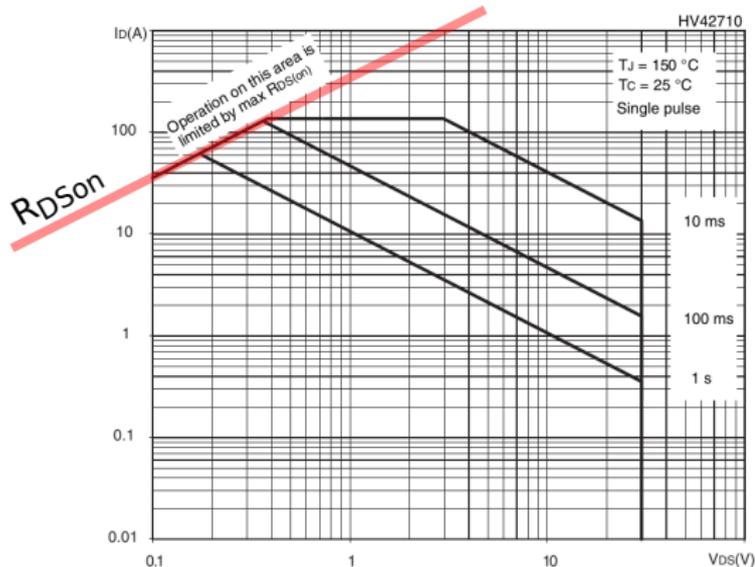
- ▶ La Safe Operating Area définit le domaine de fonctionnement du transistor

- ▶ $I_D = \frac{V_{DS}}{R_{DS(on)}}$

- ▶ $V_{DS} < V_{BR}$

- ▶ I_D limité par des considérations de fiabilité

- ▶ $P = V_{DS} \times I_D$ limité par l'impédance thermique



Source : datasheet du Mos STL150N3LLH5

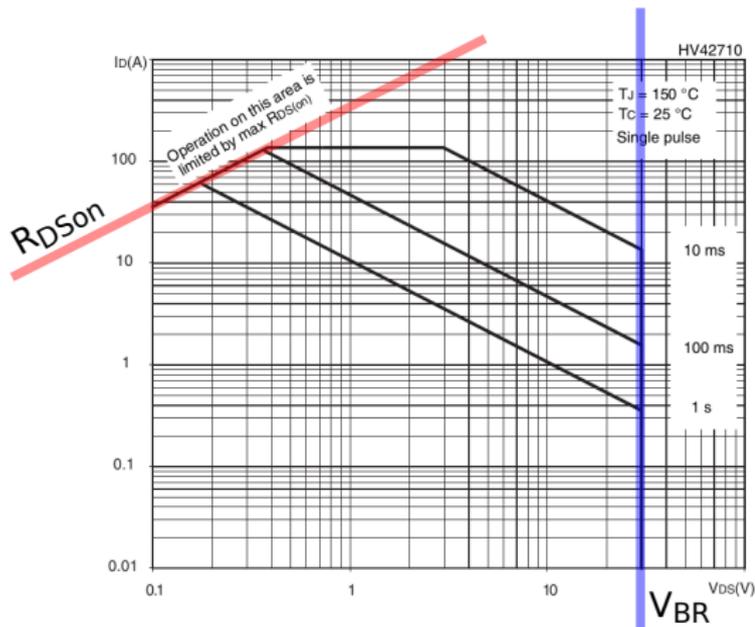
- ▶ La Safe Operating Area définit le domaine de fonctionnement du transistor

- ▶ $I_D = \frac{V_{DS}}{R_{DS(on)}}$

- ▶ $V_{DS} < V_{BR}$

- ▶ I_D limité par des considérations de fiabilité

- ▶ $P = V_{DS} \times I_D$ limité par l'impédance thermique



Source : datasheet du Mos STL150N3LLH5

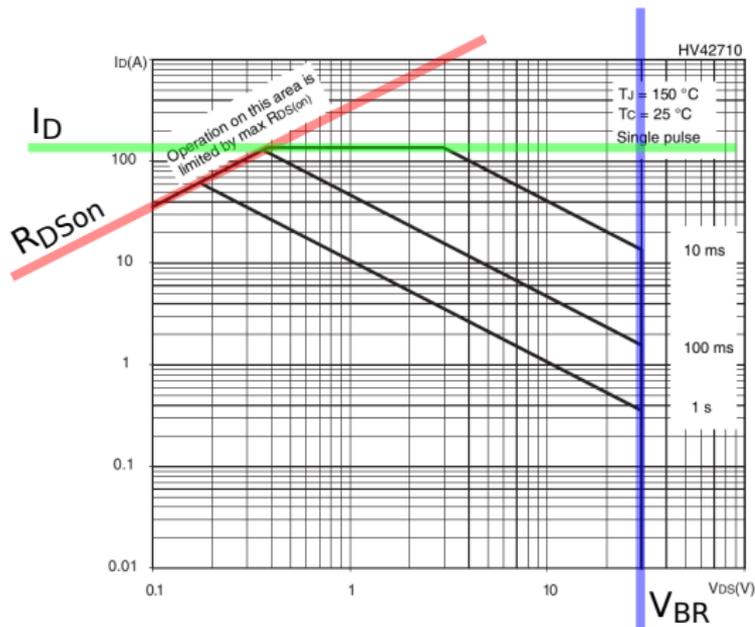
- ▶ La Safe Operating Area définit le domaine de fonctionnement du transistor

- ▶ $I_D = \frac{V_{DS}}{R_{DSon}}$

- ▶ $V_{DS} < V_{BR}$

- ▶ I_D limité par des considérations de fiabilité

- ▶ $P = V_{DS} \times I_D$ limité par l'impédance thermique



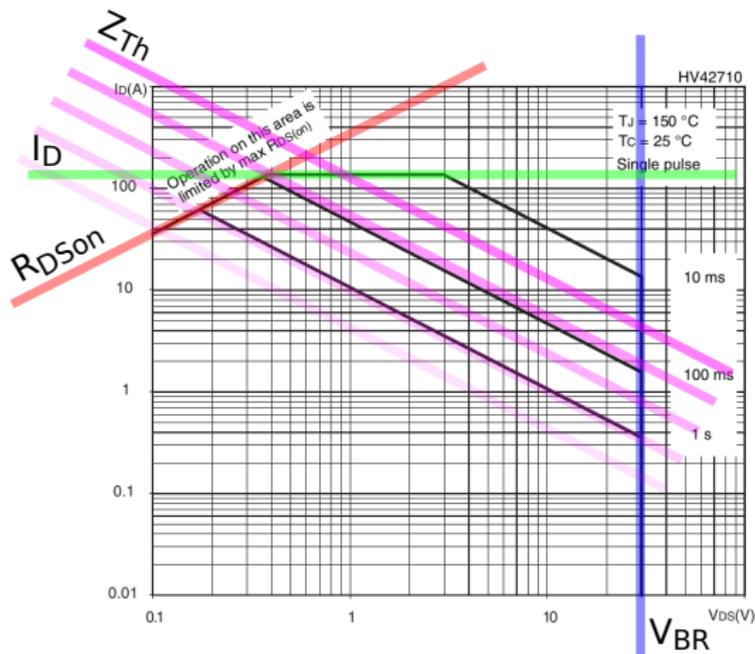
- ▶ La Safe Operating Area définit le domaine de fonctionnement du transistor

- ▶ $I_D = \frac{V_{DS}}{R_{DSon}}$

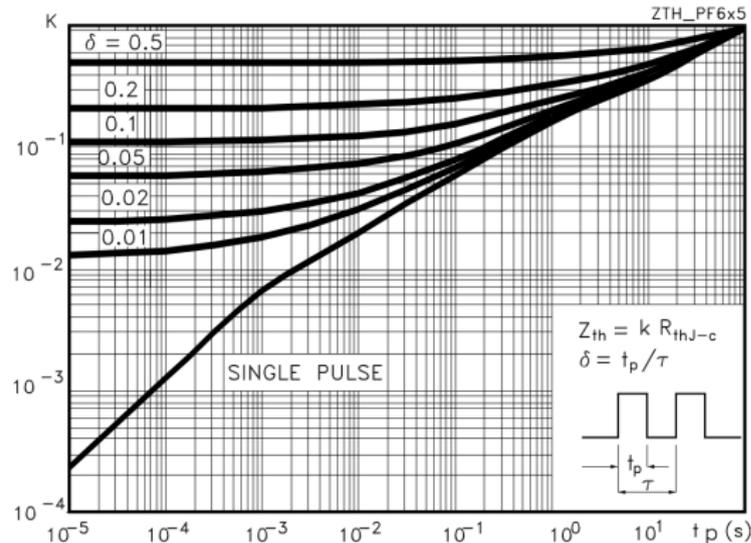
- ▶ $V_{DS} < V_{BR}$

- ▶ I_D limité par des considérations de fiabilité

- ▶ $P = V_{DS} \times I_D$ limité par l'impédance thermique



Source : datasheet du Mos STL150N3LLH5



Source : datasheet du Mos STL150N3LLH5

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

- ▶ *duty cycle* (rapport cyclique) δ
- ▶ 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 ($R_{Th_{apparent}} = \delta R_{Th}$)

Caractéristiques électriques

Diode

MOSFET

IGBT

Commutation des composants

Exercices

Conclusion

V_{CEmax} 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 du plus
- ▶ dépend du refroidissement (taille du radiateur, température ambiante)

V_{CEsat} : 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

V_{CEmax} 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_{CEsat} : 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

$V_{CE_{max}}$ 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

$V_{CE_{max}}$ 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

$V_{CE_{max}}$ 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

$V_{CE_{max}}$ 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

$V_{CE_{max}}$ 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

$V_{CE_{max}}$ 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)

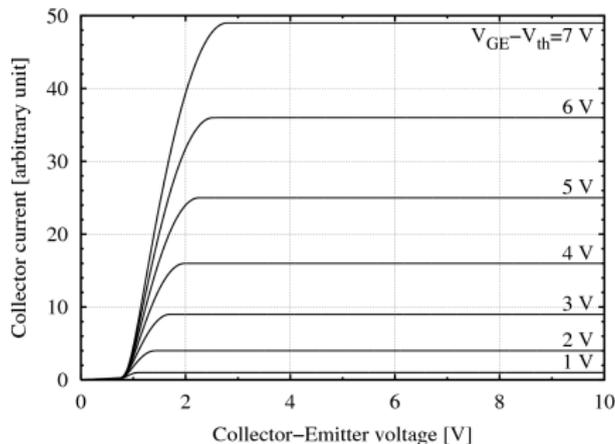
$V_{CE_{Sat}}$: la **chute de tension à l'état passant**

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

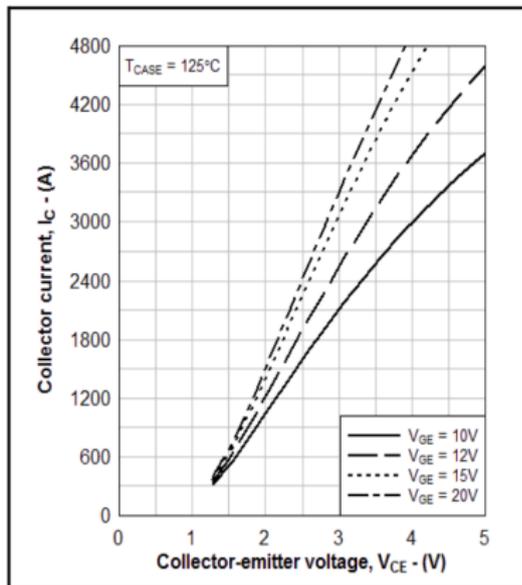
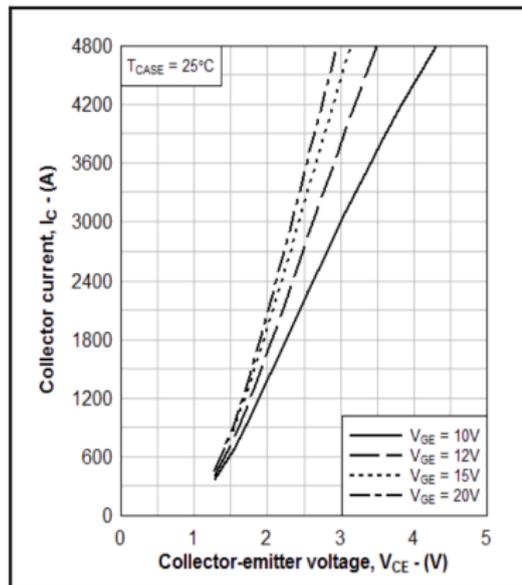
V_{th} (Threshold) : **tension de seuil** (tension de commutation)

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

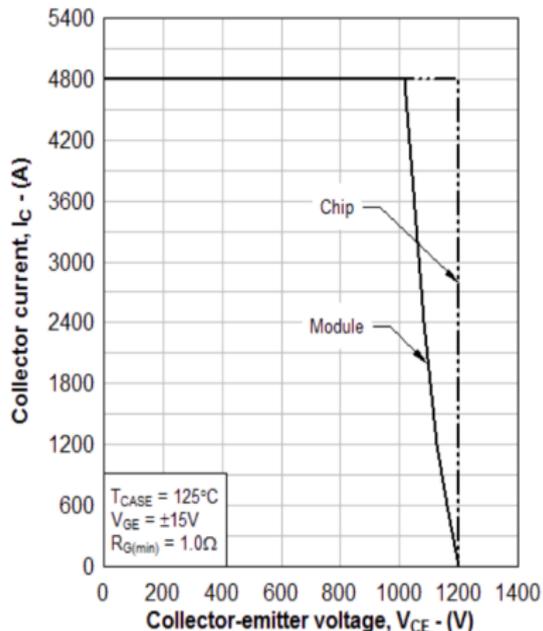
- ▶ PT : faibles pertes en conduction
- ▶ NPT : meilleure tenue en court-circuit



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



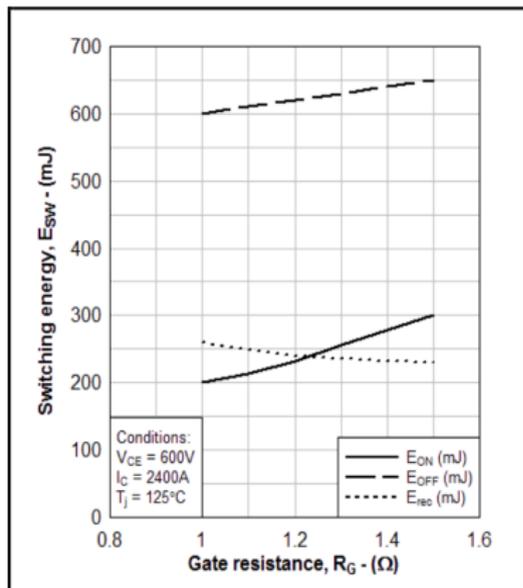
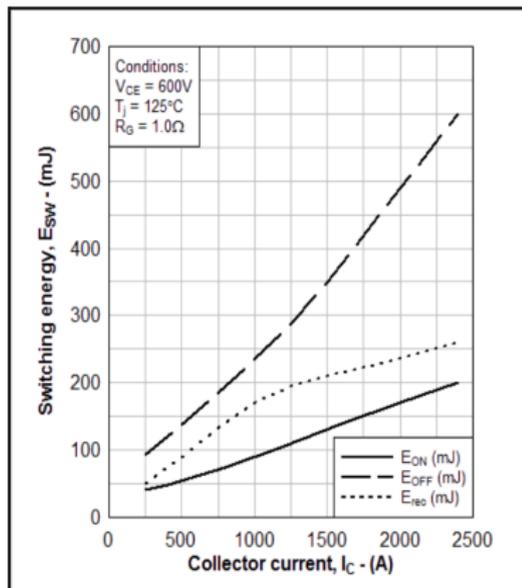
- ▶ Présence d'un seuil ($V_{CE_{sat}}$) dans la caractéristique $I(V)$
- ▶ Modulation de la résistance dynamique en fonction de la tension grille-émetteur



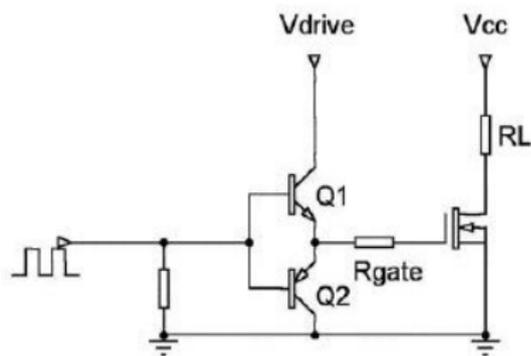
- ▶ zone délimitée par
 - ▶ courant max.
 - ▶ tension max.
 - ▶ puissance max.
 - ▶ tension min (pas visible)
- ▶ la thermique transitoire n'est pas tracée ici.

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

Source : datasheet de l'IGBT DIM2400ESS12-A000

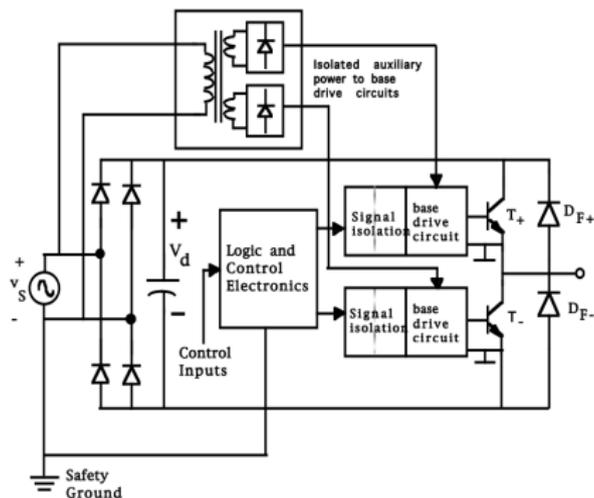


- E_{ON} pertes à la fermeture du transistor
- E_{OFF} pertes à l'ouverture
- E_{rec} pertes dues au recouvrement de la diode (ce module contient 1 IGBT et 1 diode)



source : 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.

Caractéristiques électriques

Diode

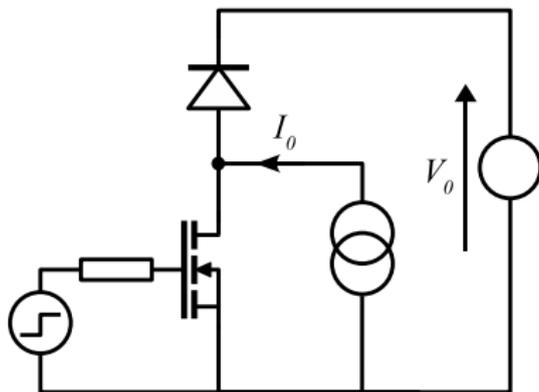
MOSFET

IGBT

Commutation des composants

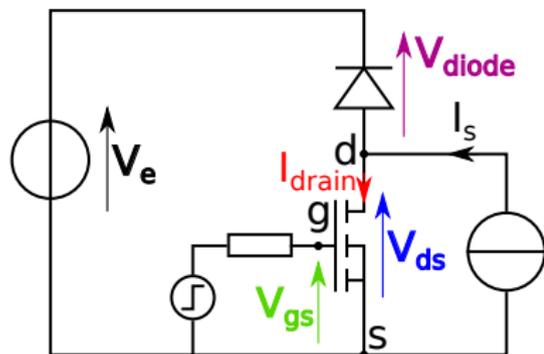
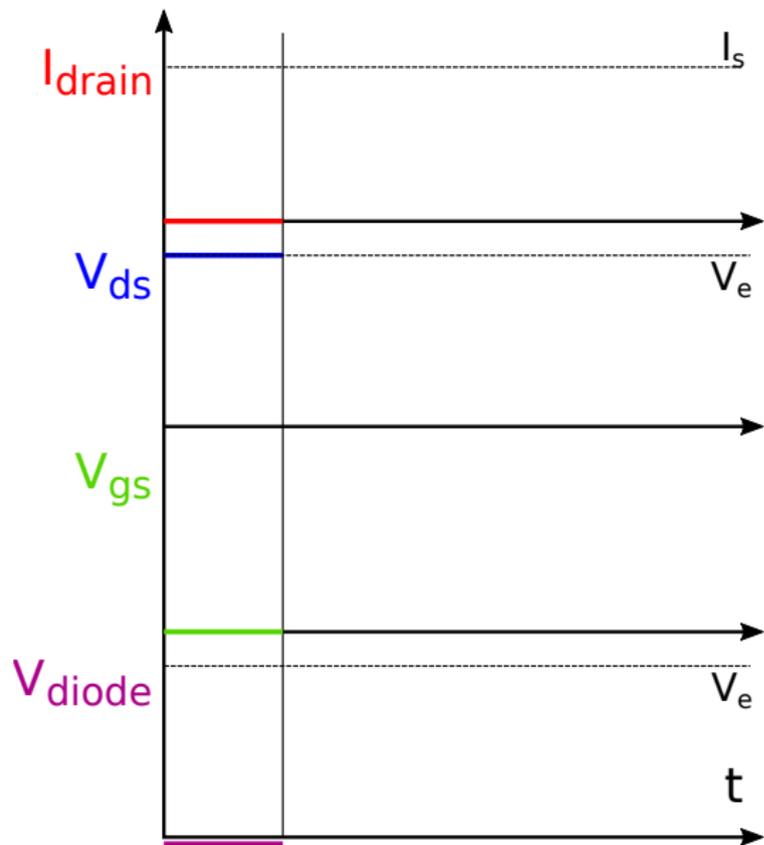
Exercices

Conclusion

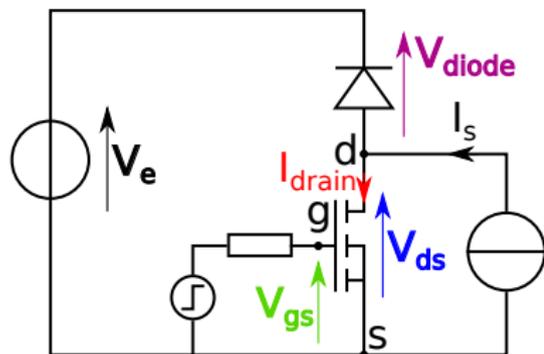
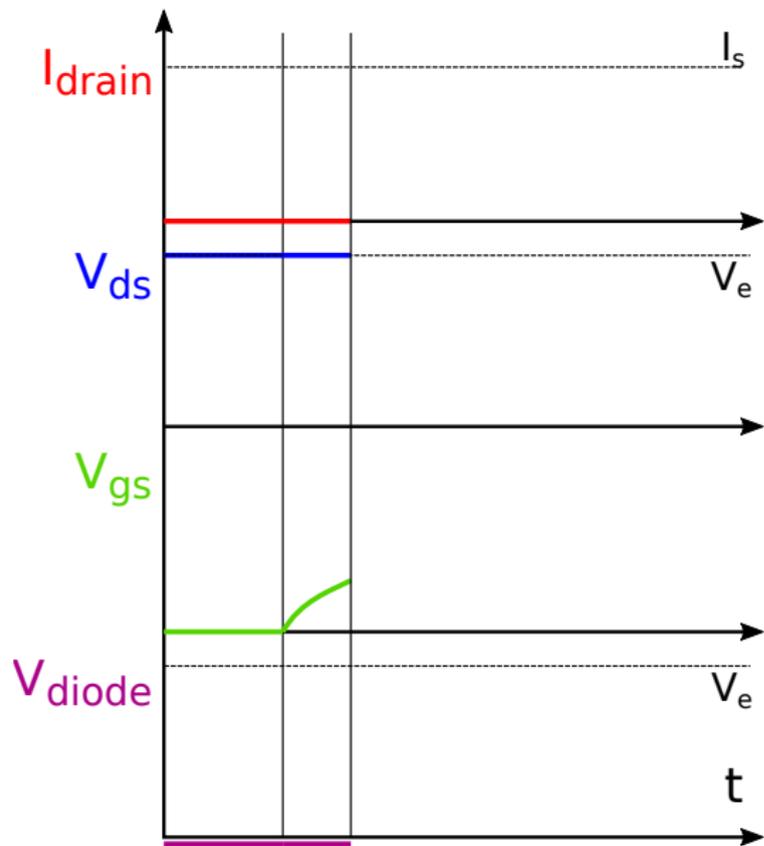


- ▶ La cellule de commutation est la “brique de base” des convertisseurs
- ▶ Connexion entre une source de courant et une source de tension

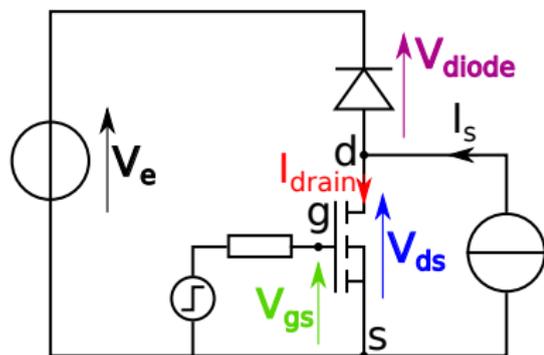
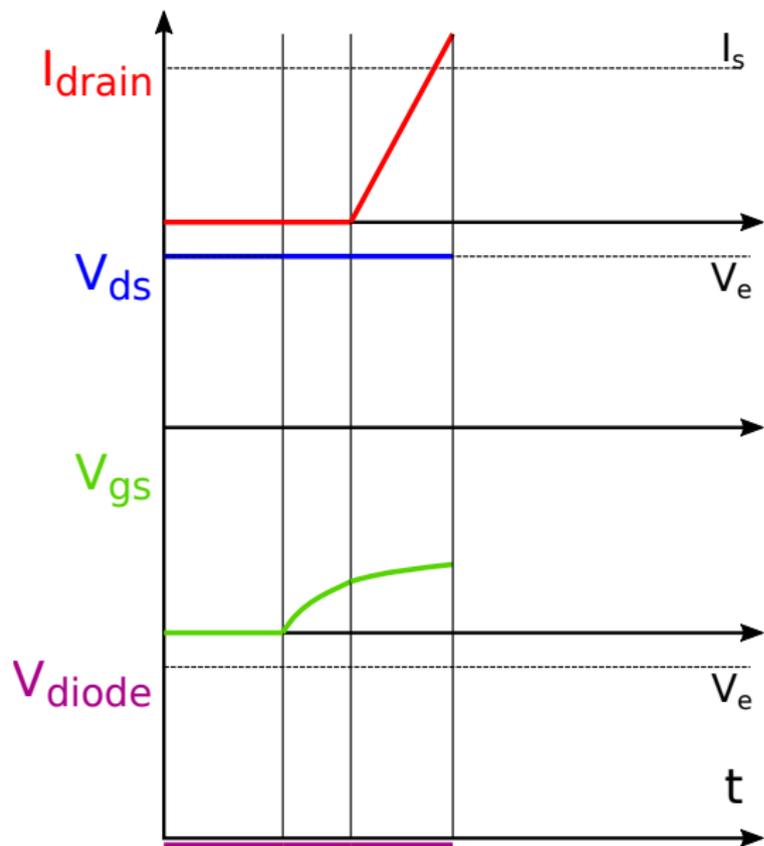
Cellule de commutation – fermeture



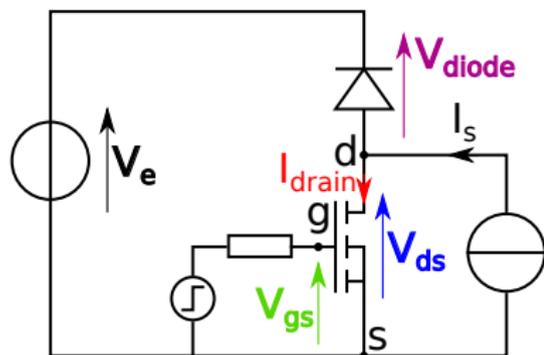
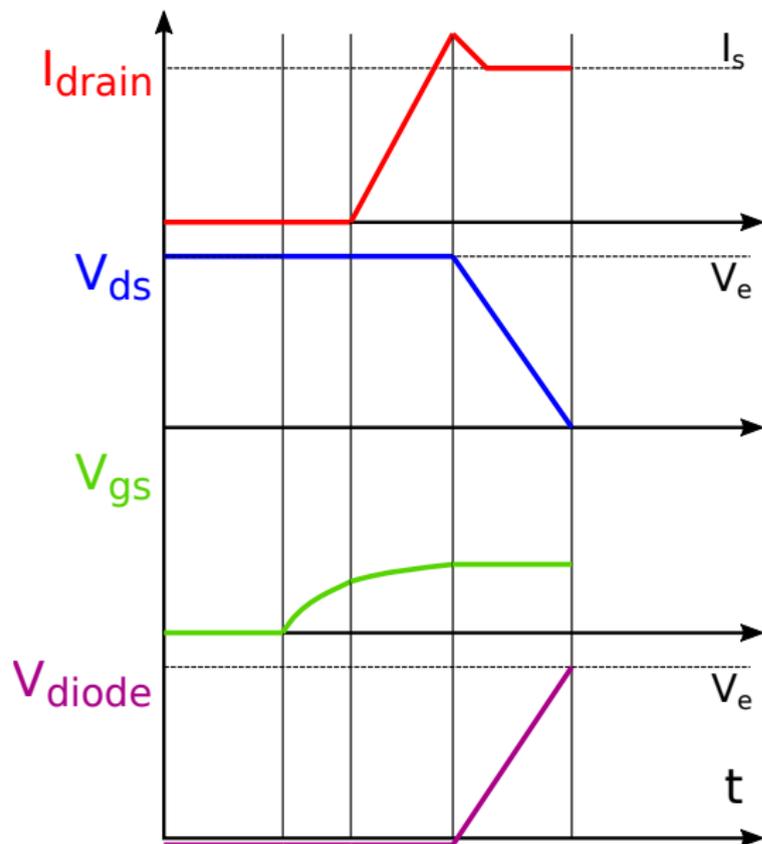
Cellule de commutation – fermeture



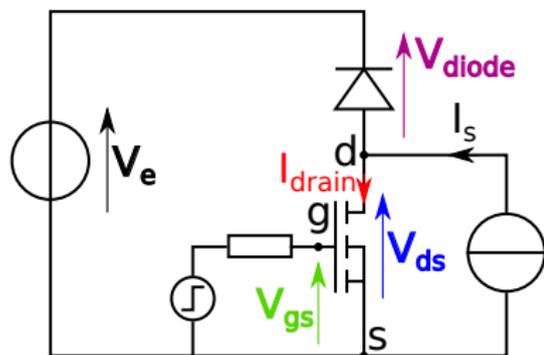
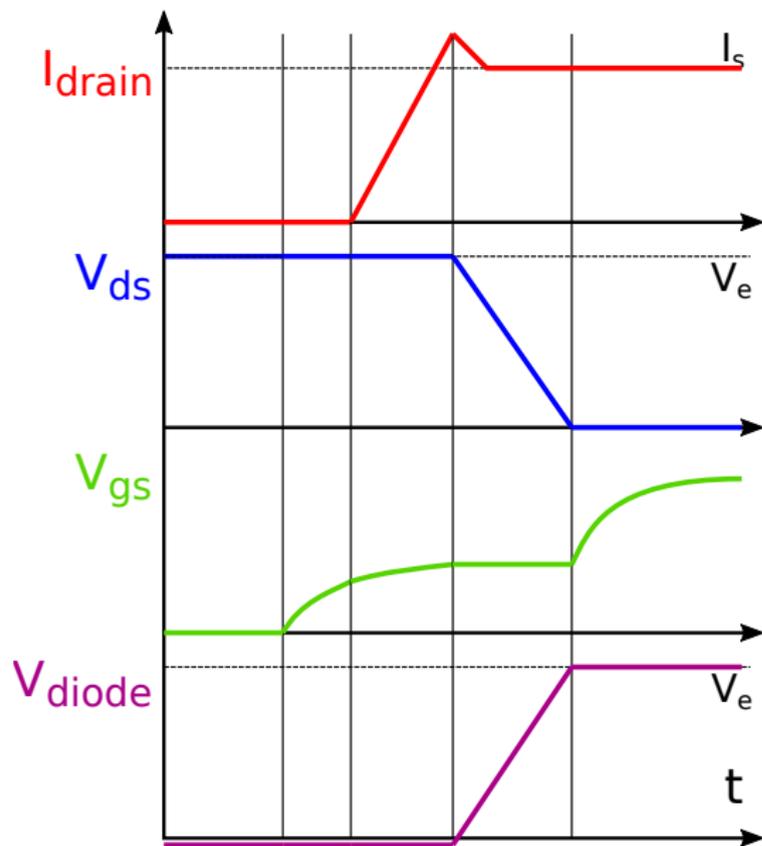
Cellule de commutation – fermeture



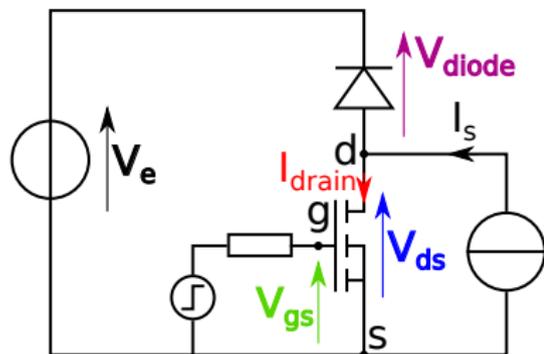
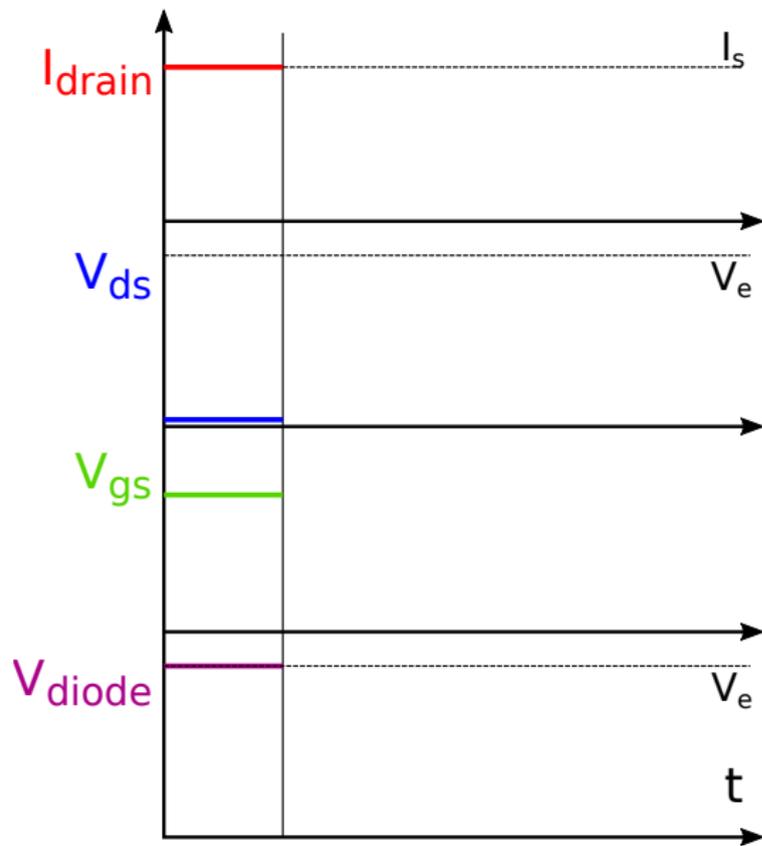
Cellule de commutation – fermeture



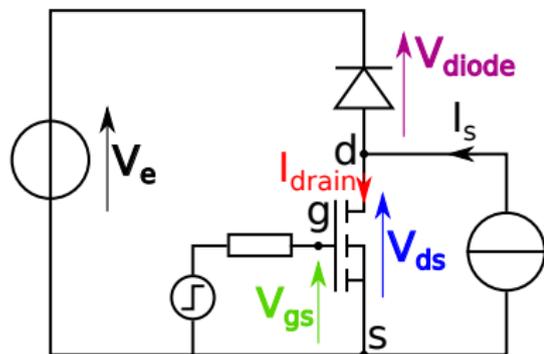
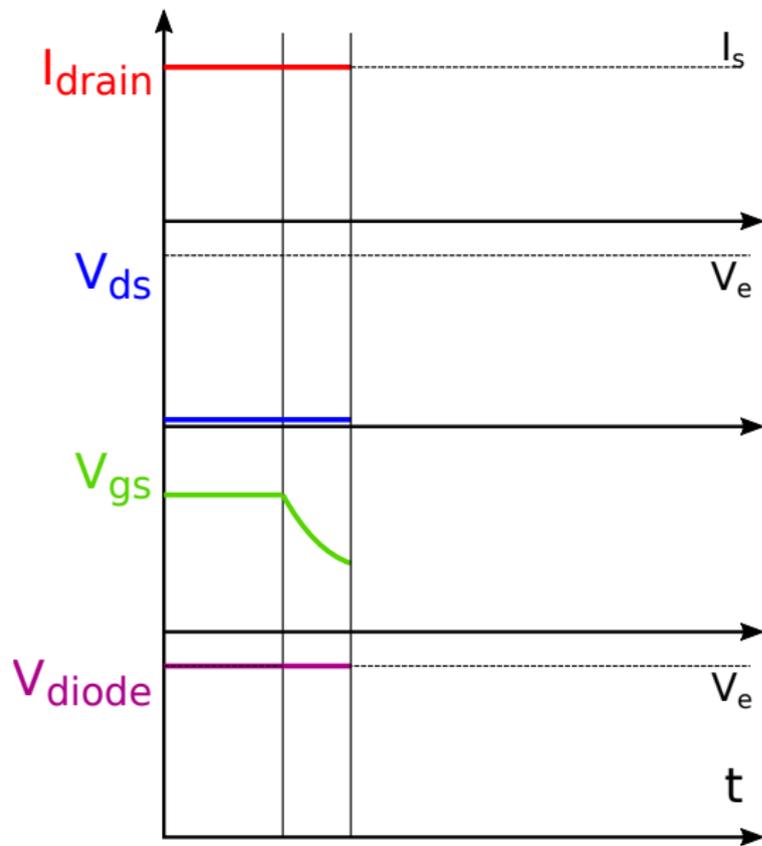
Cellule de commutation – fermeture



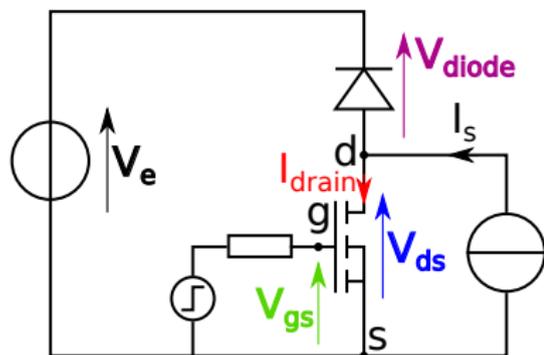
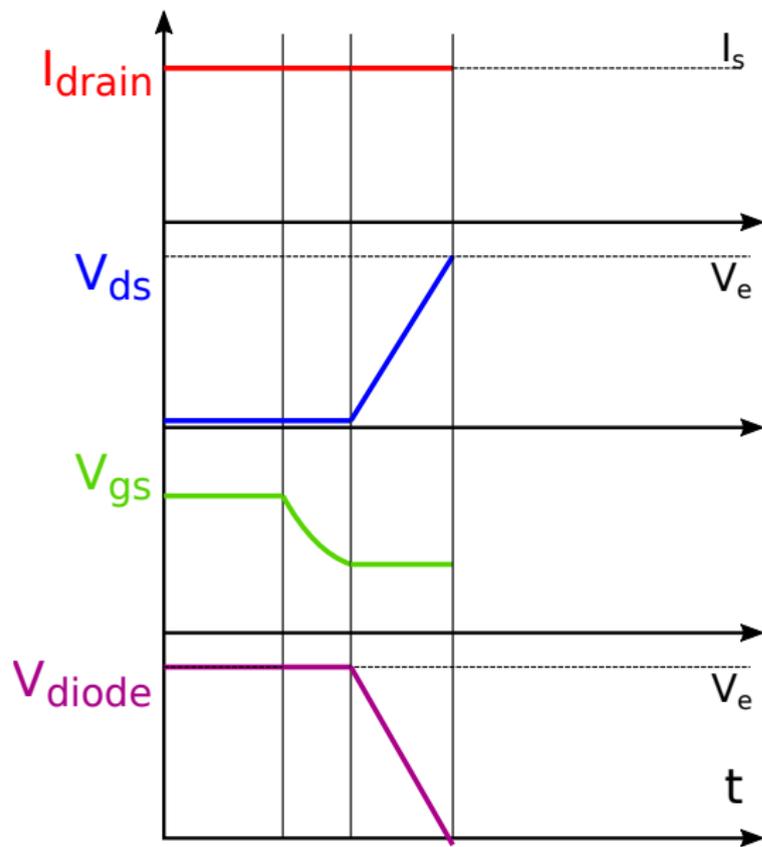
Cellule de commutation – ouverture



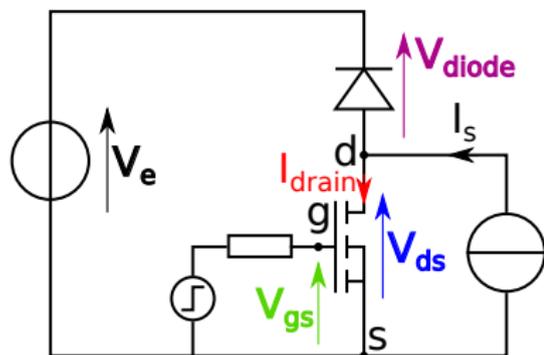
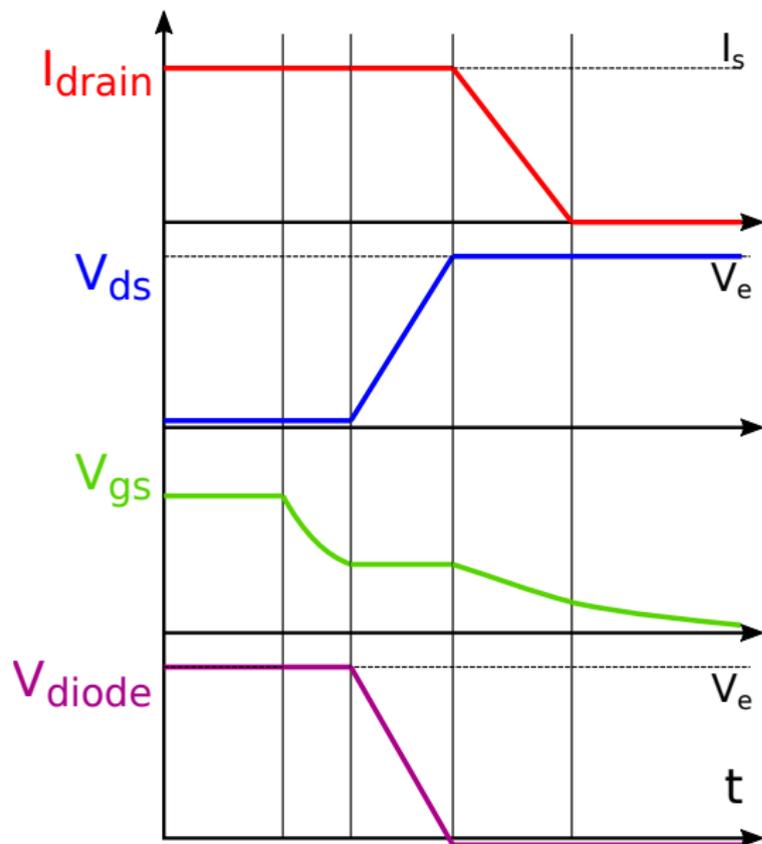
Cellule de commutation – ouverture



Cellule de commutation – ouverture



Cellule de commutation – ouverture



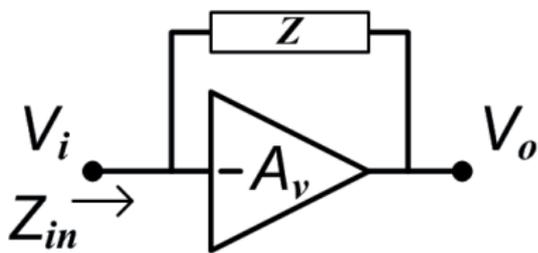
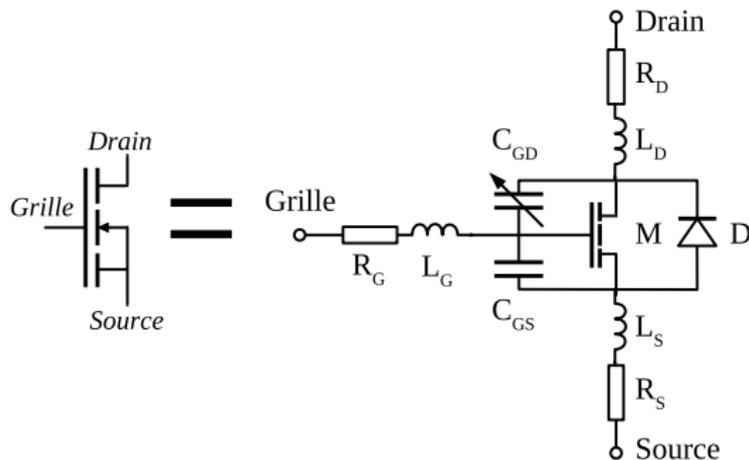


image source : wikipedia

► **courant d'entrée :**

$$I_i = \frac{V_i - V_o}{Z} = \frac{V_i(1 + A_v)}{Z}$$

► **Impédance d'entrée :**

$$Z_{in} = \frac{V_i}{I_i} = \frac{Z}{1 + A_v}$$

► si on considère que $Z = \frac{1}{jC_{GD}\omega}$

► on obtient $C_i = C(1 + A_v)$

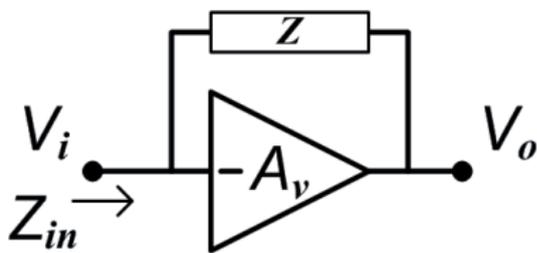
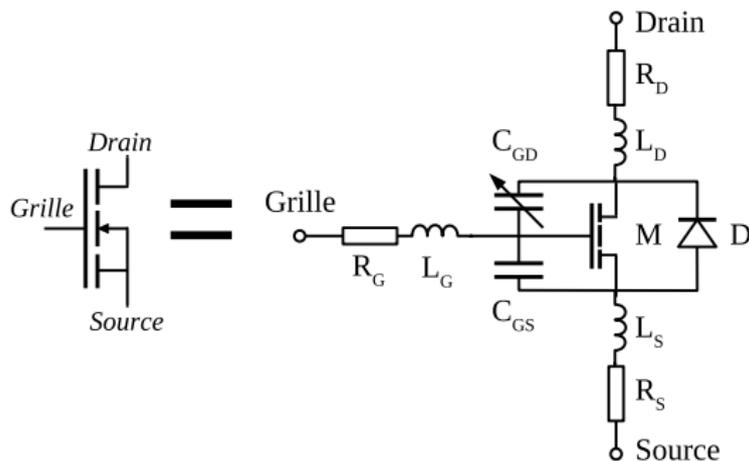


image source : wikipedia

- ▶ courant d'entrée :

$$I_i = \frac{V_i - V_o}{Z} = \frac{V_i(1 + A_v)}{Z}$$
- ▶ Impédance d'entrée :

$$Z_{in} = \frac{V_i}{I_i} = \frac{Z}{1 + A_v}$$

- ▶ si on considère que $Z = \frac{1}{jC_{GD}\omega}$
- ▶ on obtient $C_i = C(1 + A_v)$

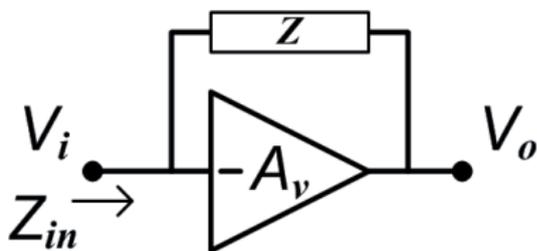
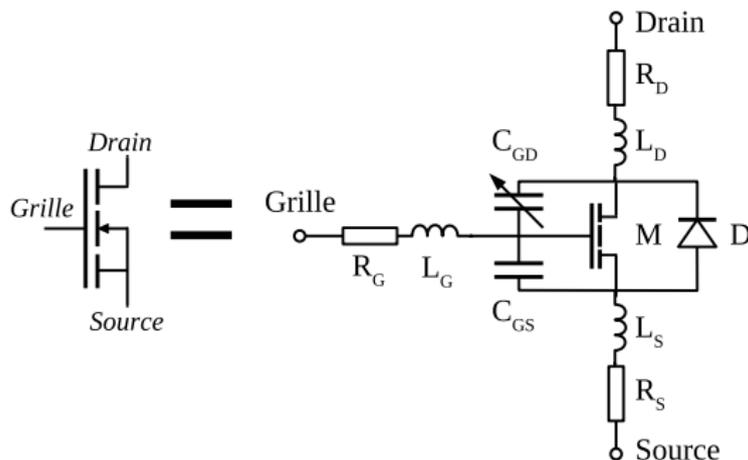


image source : wikipedia

- ▶ courant d'entrée :

$$I_i = \frac{V_i - V_o}{Z} = \frac{V_i(1 + A_v)}{Z}$$
- ▶ Impédance d'entrée :

$$Z_{in} = \frac{V_i}{I_i} = \frac{Z}{1 + A_v}$$
- ▶ si on considère que $Z = \frac{1}{jC_{GD}\omega}$
- ▶ on obtient $C_i = C(1 + A_v)$

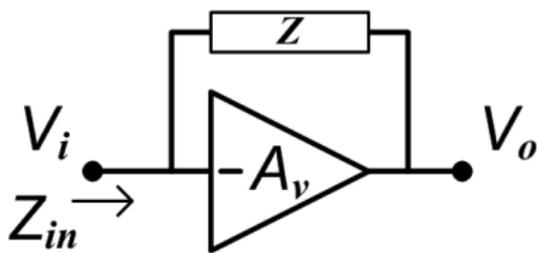
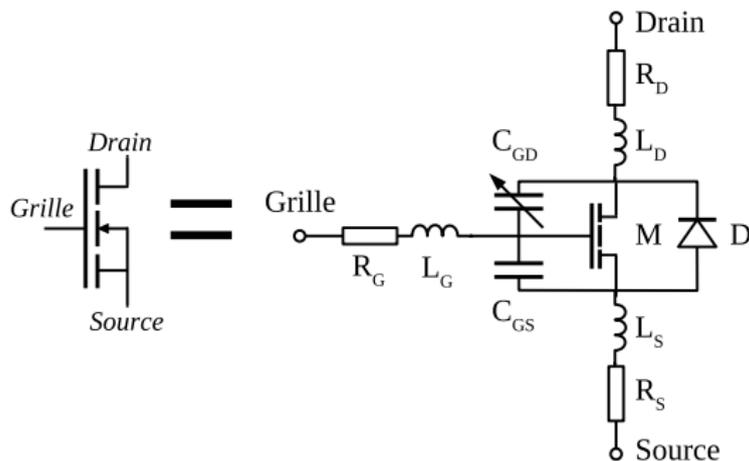


image source : wikipedia

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

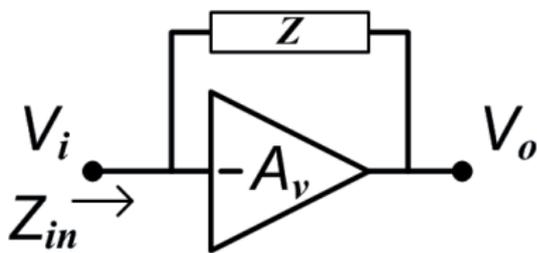
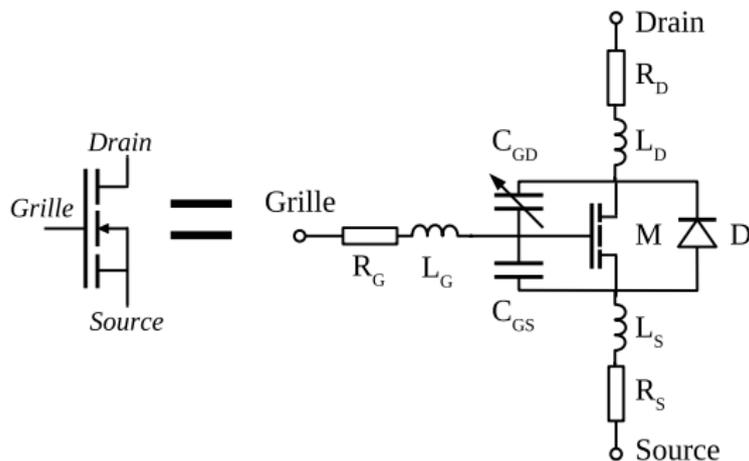
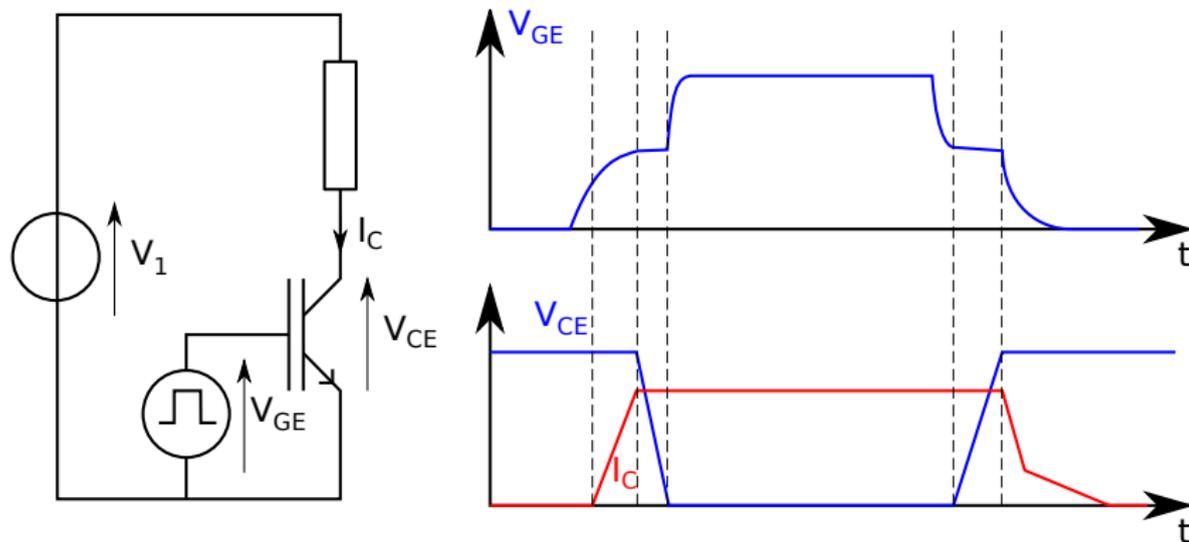


image source : wikipedia

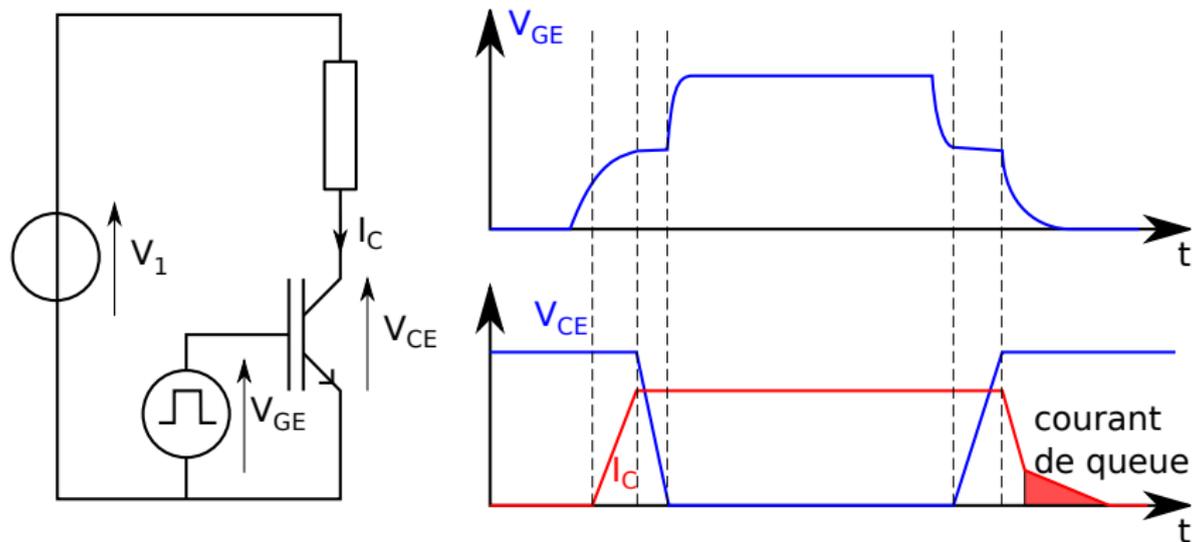
- ▶ courant d'entrée :

$$I_i = \frac{V_i - V_o}{Z} = \frac{V_i(1 + A_v)}{Z}$$
- ▶ Impédance d'entrée :

$$Z_{in} = \frac{V_i}{I_i} = \frac{Z}{1 + A_v}$$
- ▶ si on considère que $Z = \frac{1}{jC_{GD}\omega}$
- ▶ on obtient $C_i = C(1 + A_v)$



- ▶ 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



- ▶ 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

Caractéristiques électriques

Diode

MOSFET

IGBT

Commutation des composants

Exercices

Conclusion

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 A , 60 A à $T_J=-40^\circ\text{C}$, 20°C , 80°C et 140°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°C
- ▶ Quelles sont les températures d'équilibre à 15, 30 et 60 A ?
- ▶ Dans ces conditions de refroidissement, la diode fonctionne à 15 A continus, 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 $T_A=25^\circ\text{C}$?

Caractéristiques électriques

Diode

MOSFET

IGBT

Commutation des composants

Exercices

Conclusion

- ▶ "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 Wiley 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.