

CYCLE FABRICATIONS ELECTRONIQUES

**INTEGRER L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE
« MODERNE » DANS LES SYSTEMES**



FRAMATECH

Session organisée par le pôle de compétitivité



***Les 14, 15 et 16 octobre 2024
STMicroelectronics, Tours***

**FRAMATECH S.A. au capital de 38112 Euros
Etudes & mises en œuvre de stratégies industrielles internationales Hautes
Technologies**

4 boulevard d'Arras - 13004 Marseille - France
Tél. +33 491 95 55 70 / Fax. +33 491 95 55 75 / Mail : contact@framatech.fr
Organisme de formation n° 93060115506 – Siret 344 351 879 00046 – NAF 742C – RC88B126
Web : www.framatech.fr

CYCLE FABRICATIONS ELECTRONIQUES

INTEGRER L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE « MODERNE » DANS LES SYSTEMES



FRAMATECH

NOTE POUR LE LECTEUR QUI N'AURAIT PAS ASSISTE AU SEMINAIRE

La documentation ci-jointe est celle qui a servi de support pour illustrer les exposés faits pendant le séminaire **INTEGRER L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE « MODERNE » DANS LES SYSTEMES** et ne représente donc qu'une partie des informations données à cette occasion.

FRAMATECH S.A. au capital de 38112 Euros
Etudes & mises en œuvre de stratégies industrielles internationales Hautes Technologies

4 boulevard d'Arras - 13004 Marseille - France
Tél. +33 491 95 55 70 / Fax. +33 491 95 55 75 / Mail : contact@framatech.fr
Organisme de formation n° 93060115506 – Siret 344 351 879 00046 – NAF 742C – RC88B126
Web : www.framatech.fr

CYCLE FABRICATIONS ELECTRONIQUES

**INTEGRER L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE
« MODERNE » DANS LES SYSTEMES**



FRAMATECH

PARTIE I

**ETAT DES LIEUX DES COMPOSANTS & FILIERE EN ELECTRONIQUE DE
PUISSANCE**

Introduction aux grands enjeux

Stéphane BIONDO, MAGDALA
Johan DELAINE, Wise Integration

FRAMATECH S.A. au capital de 38112 Euros
**Etudes & mises en œuvre de stratégies industrielles internationales Hautes
Technologies**

4 boulevard d'Arras - 13004 Marseille - France
Tél. +33 491 95 55 70 / Fax. +33 491 95 55 75 / Mail : contact@framatech.fr
Organisme de formation n° 93060115506 – Siret 344 351 879 00046 – NAF 742C – RC88B126
Web : www.framatech.fr

FRAMATECH

Electronique de puissance

Partie 1: Etats des lieux des composants & filière de puissance

MAGDALA

Stéphane Biondo

1

FRAMATECH 2/160

AGENDA

- **Introduction : Electronique de puissance ; bases, concepts et enjeux**
- **PARTIE I : Etats des lieux des composants passifs et actifs**
 - Les composants passifs
 - Résistances, Condensateurs, Inductances, Refroidissements
 - Les semi-conducteurs
 - Qu'est ce qu'un semi-conducteur
 - Bref rappel sur l'histoire du Si
 - Les composants S.C (Diode, IGBT, MOSFET...)
 - Les nouveaux composants de puissances « grand gap » SiC et GaN
 - Avantages et Inconvénients des grands gap
- **PARTIE II – Méthode de fabrication pour grand gap**
 - Les grandes étapes de fabrication des composants ex : diode SiC
 - Les acteurs dans la filière
 - Les boitiers, modules & nouvelles tendances
- **PARTIE III – les marchés de l'électronique de puissance**
 - Taille du marché de l'électronique de puissance, perspectives
 - Aéronautique : Convertisseur DC/DC
 - Automobile : Convertisseur AC/DC et DC/AC
 - Grand public : alimentation de découplage
- **PARTIE IV : Les nouvelles perspectives**
 - ZVS & ZCS
 - Problème pour le Si
 - Pour les grands gap
 - Les futures composants

9h00 à 12h00

14h à 17h30

MAGDALA

2

INTRODUCTION ELECTRONIQUE DE PUISSANCE



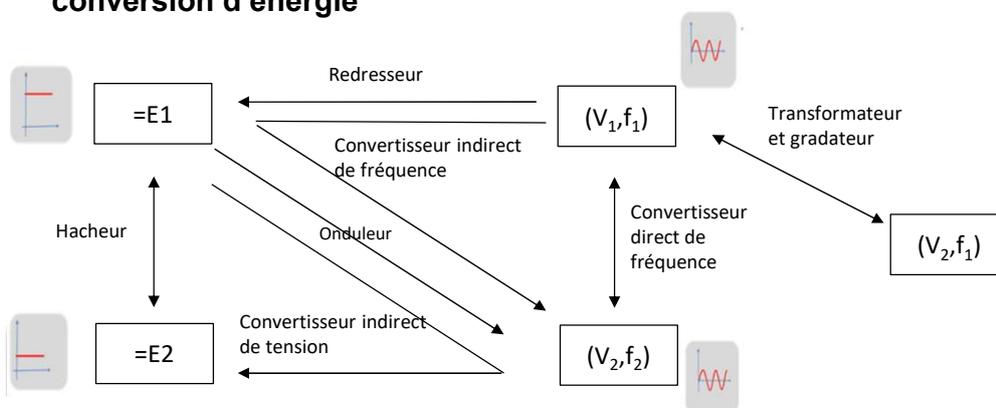
Bases, concepts, enjeux

3

Qu'est-ce que l'électronique de puissance?

L'électronique de puissance a pour but de **modifier la présentation de l'énergie électrique avec un rendement maximum : Electronique de conversion d'énergie**

Définition

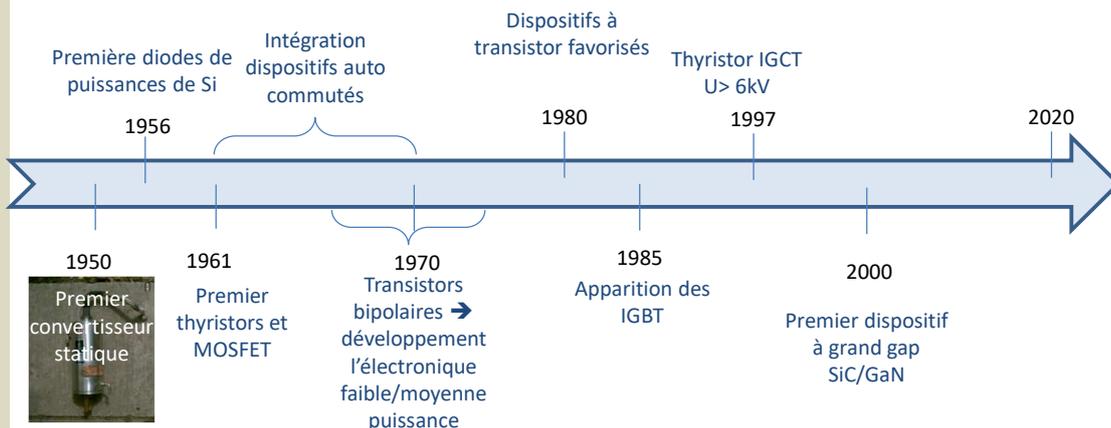


4

Historique

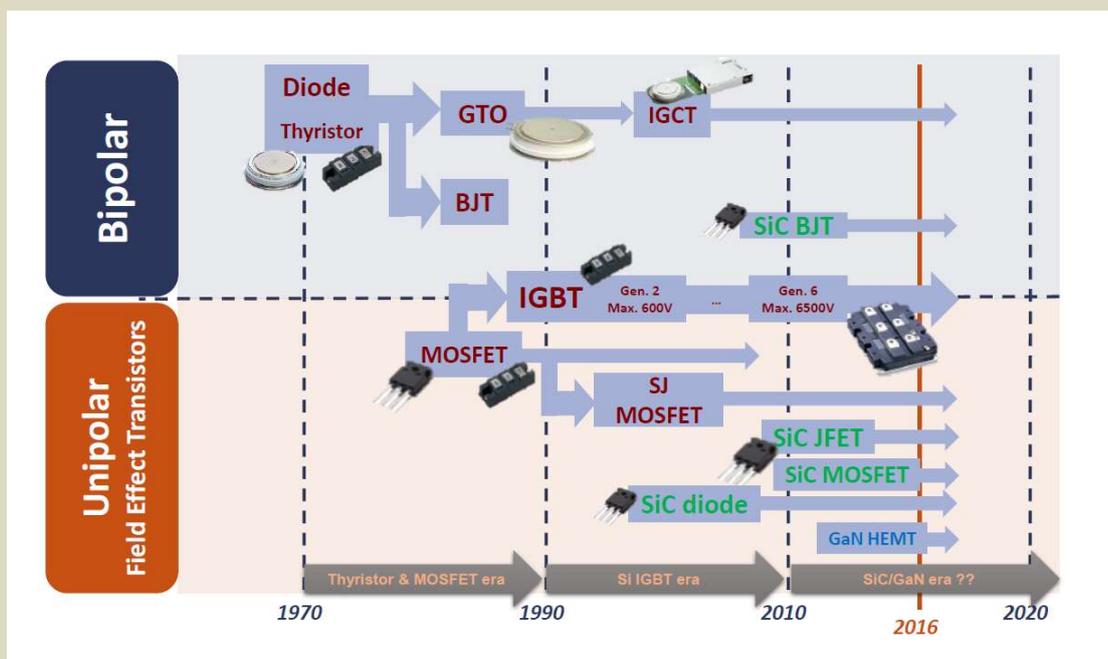
Un peu d'histoire :

- L'électronique de puissance ou " électronique de conversion d'énergie " + de 50 ans.
- Aujourd'hui 15 % énergie électrique produite convertie.
- Décroissance de la taille, du poids et du coût des convertisseurs, grâce aux progrès dans les interrupteurs électroniques.



5

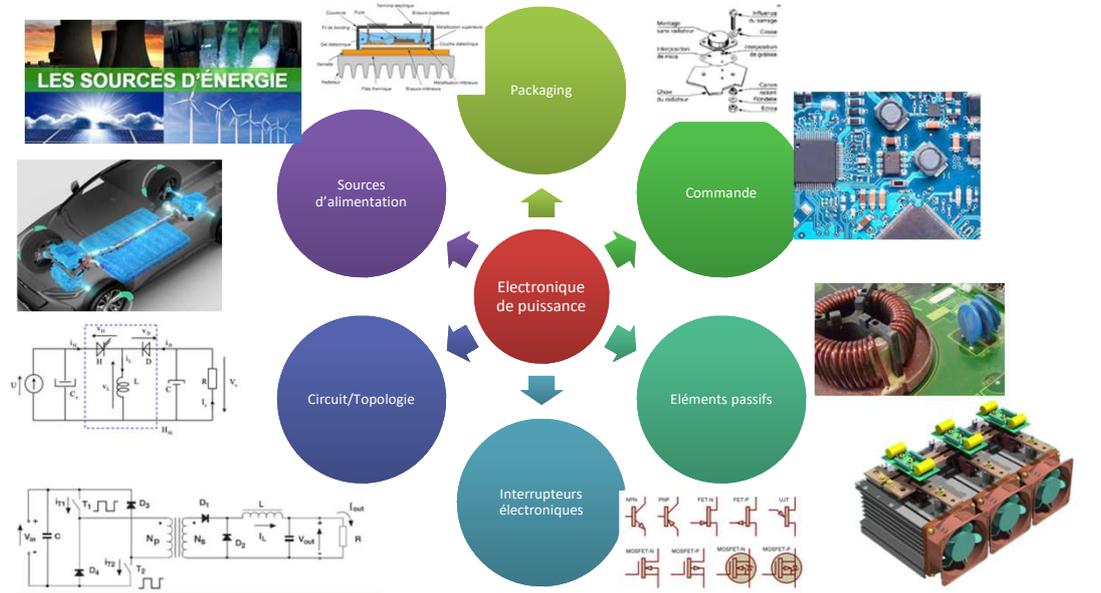
Intégration dans le marché



6

Concepts

Les éléments présents dans un système de puissance

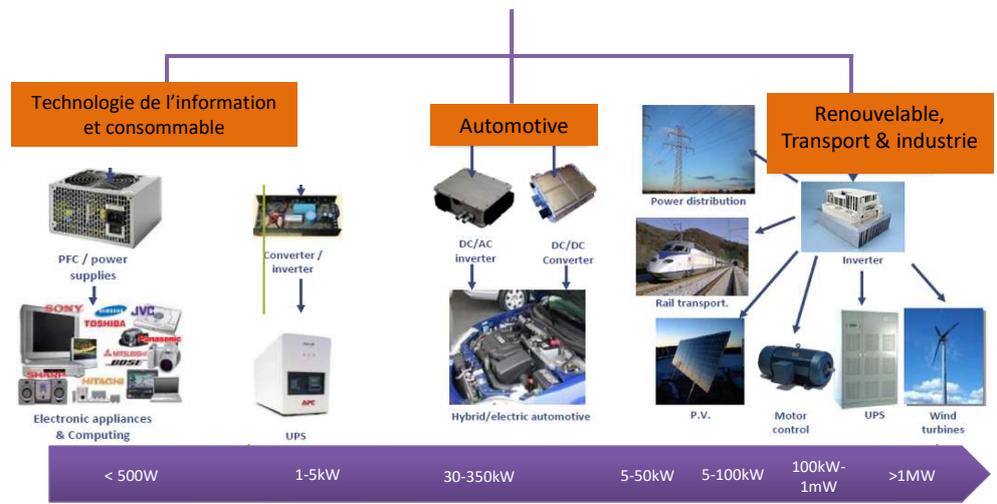


MAGDALA

Concepts

Domaines d'applications

Electronique de puissance



MAGDALA

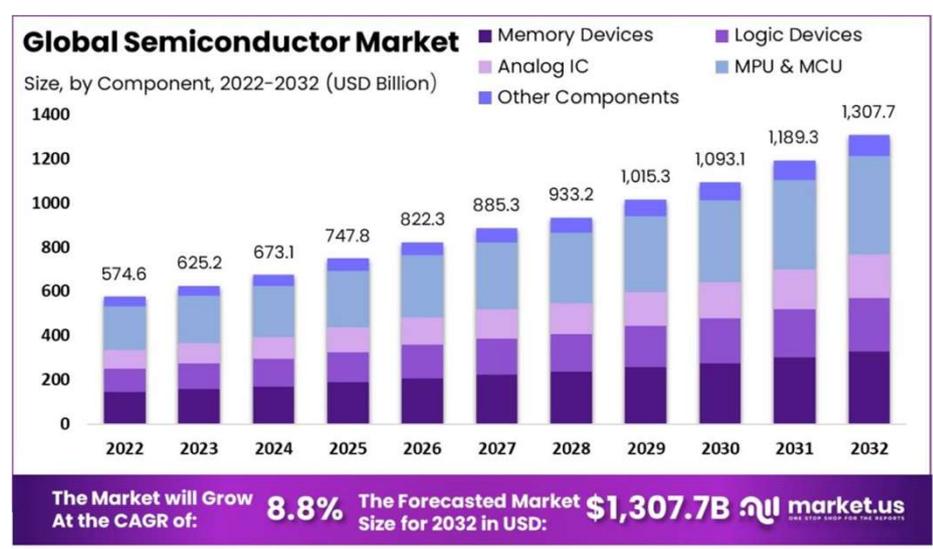
Enjeux

Filière du semi-conducteur



Enjeux

Filière du semi-conducteur

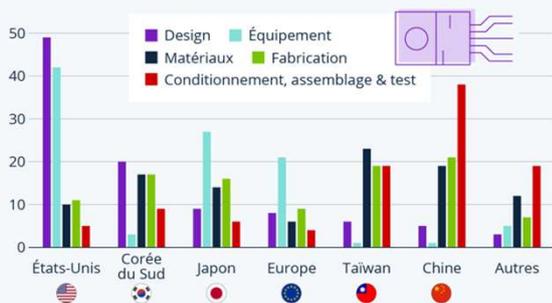


Marché

Répartition mondiale de l'industrie du semi-conducteur

Où est répartie l'industrie des semi-conducteurs ?

Valeur ajoutée mondiale des segments de l'industrie des semi-conducteurs par pays/région en 2021 (en %)



Device Analyzer Market -(2020-2027), By Region



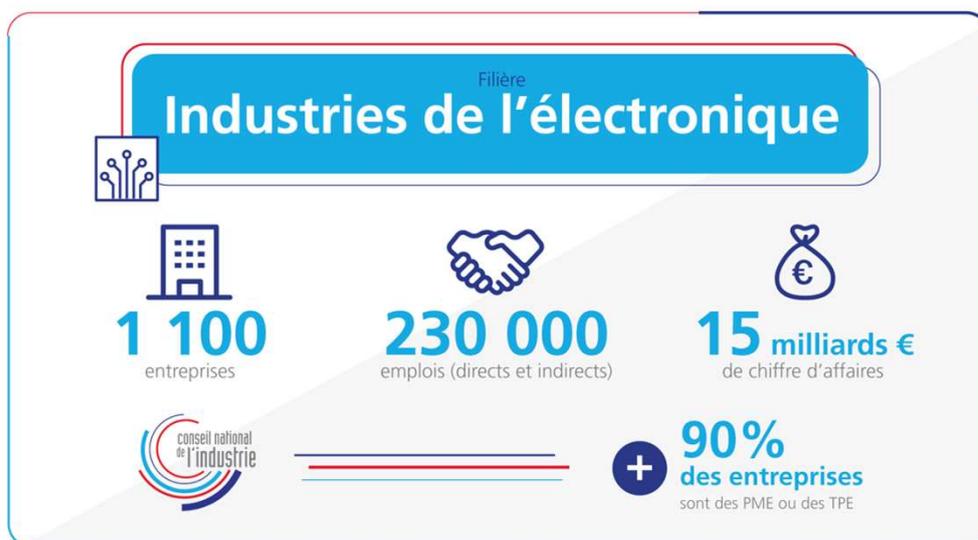
Données arrondies.
Source : Semiconductor Industry Association



11

Enjeux

Enjeux industriel pour la France défini en 2018



12

Enjeux

Enjeux industriels pour la France

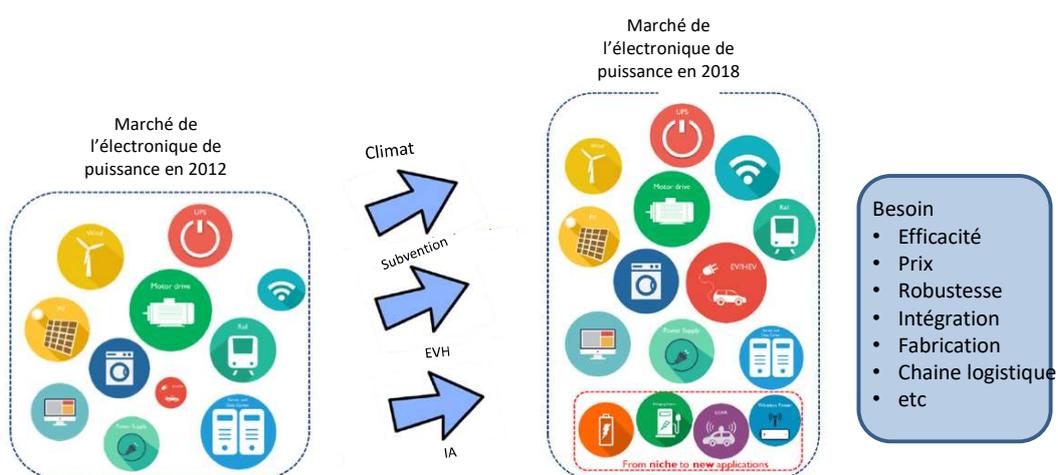
Sur le site du conseil national de l'industrie : C'est un **socle industriel** incontournable pour la révolution numérique, IA, systèmes hybrides, transition énergétique, sécurité. Elle repose sur 4 piliers :

- Les capteurs intelligents : pour créer les données
- Les objets connectés : pour les traiter, les transmettre et développer les services associés
- L'électronique de puissance : pour accompagner la transition énergétique et le développement des mobilités électriques
- La cyber sécurité : pour bâtir la confiance nécessaire au développement des technologies électroniques dans l'industrie



Enjeux

Enjeux économiques pour la France





Enjeux

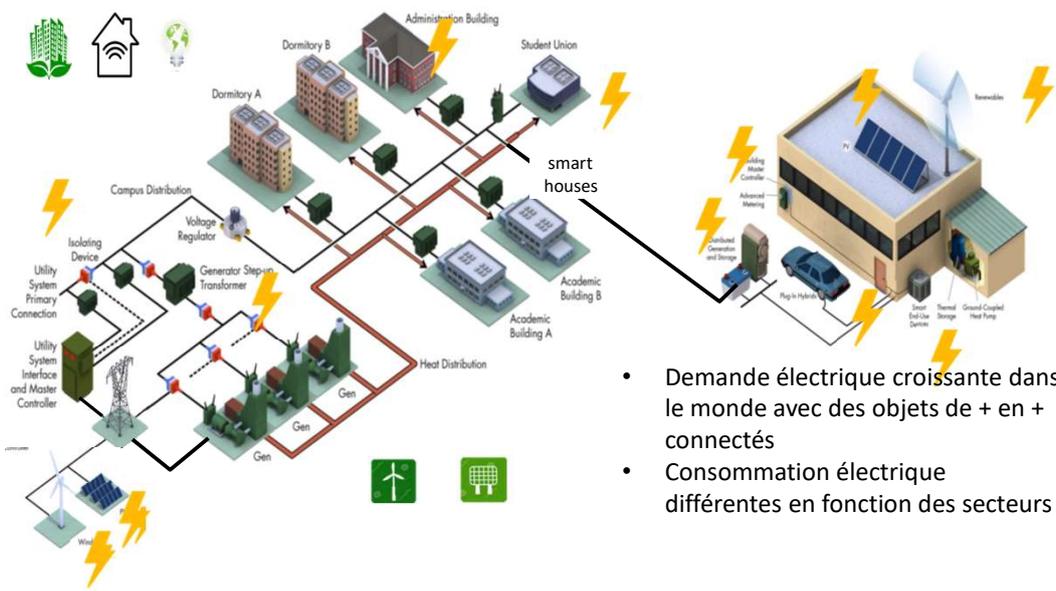
Enjeux économique pour la France

- Plan de relance post COVID: 2 filières, automobile + électronique, a produit le plan d'action pour, construire une initiative industrielle forte en France sur l'électronique de puissance avec le soutien des autorités Françaises. La PFA a décidé de créer une direction de programme pour conduire ce plan.
- L'électronique de puissance représente un champ de valeur très important (entre 300 et 1000€ par voiture).
- Secteur en pleine mutation : volume x 7 et mutation technologique Wide Band Gap d'ici 2030 \approx 2.5 M€
- La France dispose de bons atouts (acteurs industriels, labos de recherche) 15 millions €
- <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/numerique/enjeux/electronique-de-puissance>: liste de projet sur EDP pour l'automobile focalisé sur les composants en SiC et GaN



Enjeux

Enjeux écologique



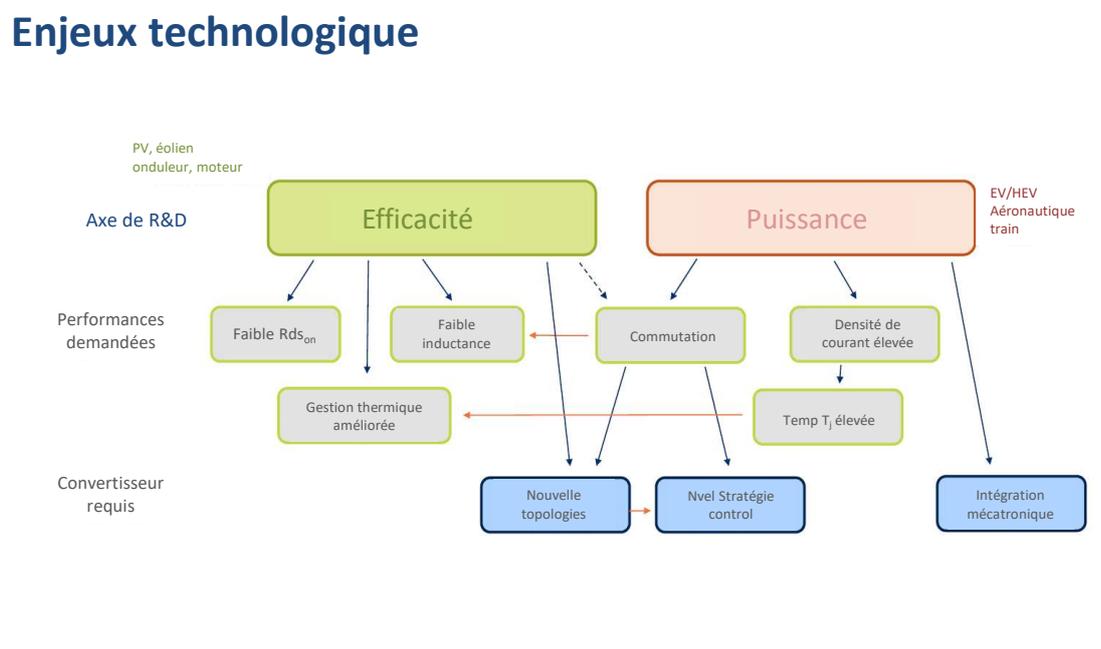
- Demande électrique croissante dans le monde avec des objets de + en + connectés
- Consommation électrique différentes en fonction des secteurs




FRAMATECH
17/160

Enjeux

Enjeux technologique





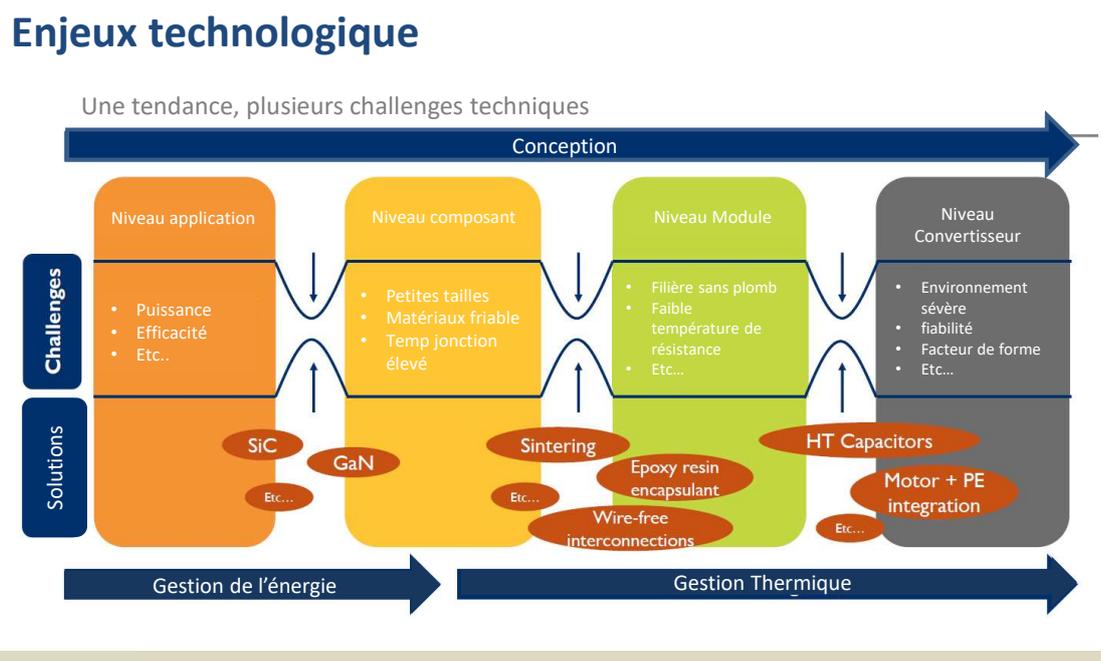
17


FRAMATECH
18/160

Enjeux

Enjeux technologique

Une tendance, plusieurs challenges techniques





18



Enjeux

Des applications dépendant de l'électronique de puissance

- **Sécurité et protection** : Contrôle d'accès, détection incendie, protection des personnes, électronique sécurisée pour milieu hospitalier.
- **Eclairage professionnel** : Fabrication d'éclairage professionnel à leds de puissance, éclairage architectural, éclairage RGB scénique pour le marché de l'événementiel et du spectacle, agencement de vitrines et de magasins.
- **Industrie** : Régulation, Pompage, dosage, asservissements de vitesse et de position, contrôle commande.
- **Ferroviaire** : Convertisseurs auxiliaires, liseuses à led, signalisation, validateurs.
- **Médical et paramédical** : Imagerie médicale, matériel hospitalier, alimentations de sécurité



Enjeux

Des applications dépendant de l'électronique de puissance

- **Militaire** : Convertisseurs chargeurs de batterie au plomb, Lithium-Ion et NiMh, pour véhicules terrestres et véhicules de combat.
- **Transport** : Electronique embarquée sur véhicules utilitaires et bus, normes UTAC → Retrofit de voiture thermique
- **Péage et monétique** : Automates de paiement et de réservation, billetterie, surveillance et contrôle d'accès.
- **Production** : Machines spéciales, reprographie, imprimantes.
- **Energie** : Production et gestion de l'énergie, application en énergies renouvelables.



 **FRAMATECH** 

**ETATS DES LIEUX
DES
COMPOSANTS**

 Les composants passifs

21

 **FRAMATECH** 22/160 

Les composants passifs

Présentation et définition :

- « Passifs » car ni augmentation ou diminution de la tension d'entrée et pas besoin d'alim
- Important dans les convertisseurs → masse et volume
- Particulièrement dans les convertisseurs DC-DC isolés car dispositif d'isolation supplémentaire.
- Dans certains convertisseur → 50% de la masse composants passifs
- L'augmentation de la densité de puissance passe donc par une meilleure connaissance des composants passifs et des matériaux qui les constituent.

 ➤ Les résistances
➤ Les Condensateurs
➤ Les bobines
➤ Les systèmes de refroidissement



22

FRAMATECH 23/160

Les Résistances

Résistance pour la puissance :

```
graph TD; A[2 techno] --> B[Traversant]; A --> C[CMS]; B --> D[Résistance carbone]; B --> E[Résistance métallique]; B --> F[Résistance bobinée]; C --> G[Différentes tailles];
```

carbonne 5 W
carbonne 1 W
carbonne 1/2 W
carbonne 1/4 W
carbonne 1/8 W

SMR3Z1

MAGDALA

23

FRAMATECH 24/160

Les Résistances

Résistance pour la puissance :

On distingue généralement 4 catégories de résistances :

- **Résistance à couche de carbone** : usage grand public, performances correctes, faible prix, précision moyenne 5 % dissipation maximale 2 W
- **Résistance à couche métallique** : prix ↑, usage professionnelle, précision jusqu'à 1%, bonne stabilité, 2W de dissipation
- **Résistance bobinée** : utilisé pour les puissances jusqu'à 1kW, attention aux hautes fréquences
- **Résistance CMS** : très peu couteuse, gain de place, max 3W de puissance

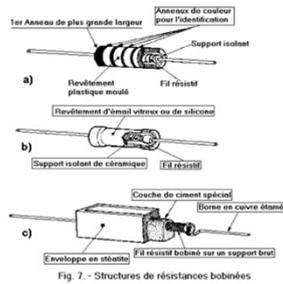
MAGDALA

24

Les Résistances

Résistance pour la puissance :

- Tolérance
- La température de travail $R=R_0(1+\alpha T)$
- La stabilité : caractérise l'évolution relative de la résistance effective dans le temps
- Les résistances traversant peuvent générées de l'inductance à causes des pates métalliques



Les condensateurs

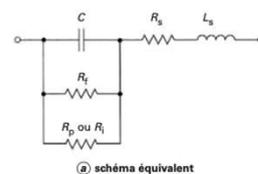
Condensateur pour la puissance :

Schéma équivalent d'un condensateur

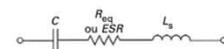
- C : condensateur parfait
- Ls : inductance série
- Req : (ESR) résistance équivalente
- Rf : résistance de fuites
- Rp : résistance représentant les pertes du diélectrique
- Rs : résistance série

Le circuit équivalent d'un condensateur montre qu'il est nécessaire de connaître l'évolution de son impédance en fonction de la fréquence. Le minimum correspond à la résonance série :

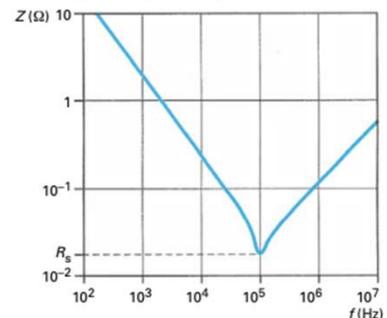
$$L_s C \omega_0^2 = 1$$



(a) schéma équivalent



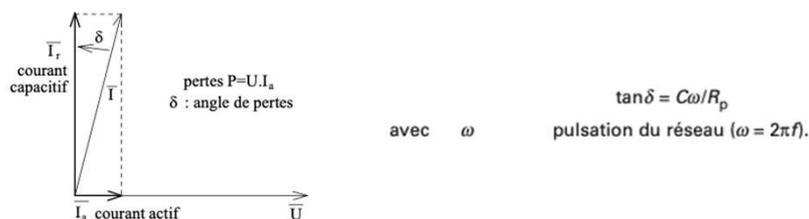
(b) schéma équivalent simplifié



Les condensateurs

Condensateur pour la puissance :

- Pertes diélectrique : Cette dernière dépend de la nature du diélectrique, de la tension, de la fréquence et de la température.



- Pertes thermique :
 - la température **affecte la valeur de la capacité.**
 - Elle accroît le taux de défaillance et la **durée de vie**. Pour chaque diélectrique, on définit une **plage de température**.
 - Comme les pertes et la capacité dépendent de la température \rightarrow la $\tan \delta$ aussi
 - Lorsque la température croît, le courant de fuites augmente.



Les condensateurs

Familles technologiques

Condensateurs électrolytiques

- Filtrage de tension continue
- 2 grandes familles Al & Ta

Condensateurs céramiques

- principalement utilisé en HF
- 2 classes 1 & 2

Condensateurs films

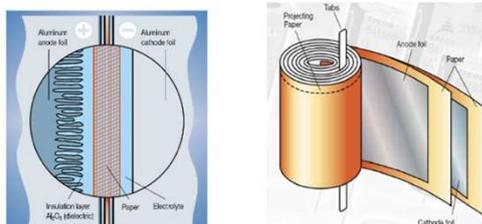
- Métallisation et/ou armature
- 3 principaux diélectriques



Les condensateurs

Les condensateurs électrolytiques Al

- L'isolant est Al_2O_3 . L'anode est gravée → augmentation surface équivalente (mais la résistance série aussi) → facteur de l'ordre de 100 basse tension, 20 à 30 haute tension



- 2 types d'électrolyte : liquide ou semi-conducteur (MnO_2)

- Tension max : 600V
- Temp : $-40^{\circ}C$ à $105^{\circ}C$
- Résistivité : $100 \mu\Omega \cdot m$

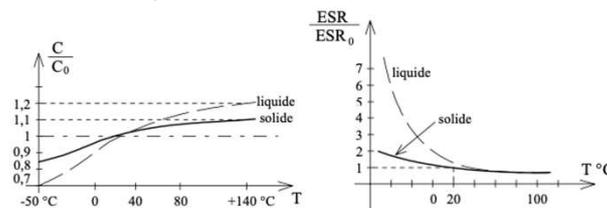
- Tension max : 25V mais peu aller négatif
- Temp : $-55^{\circ}C$ à $105^{\circ}C$ bonne stabilité
- Résistivité : environ $0,02 \Omega \cdot m$



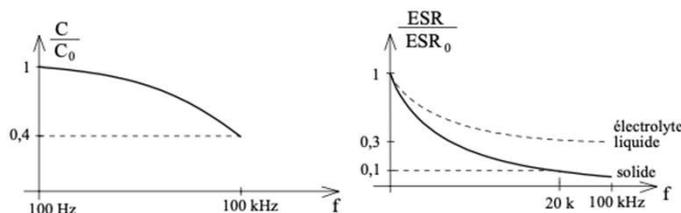
Les condensateurs

Les condensateurs électrolytiques Al

- Impact de la température



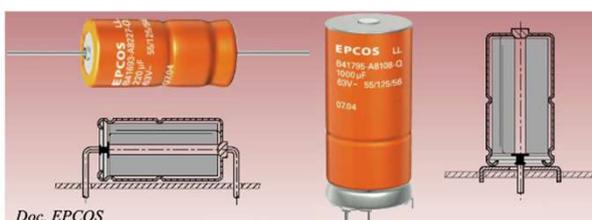
- Impact de la fréquence



Les condensateurs

Les condensateurs électrolytiques Al : Applications

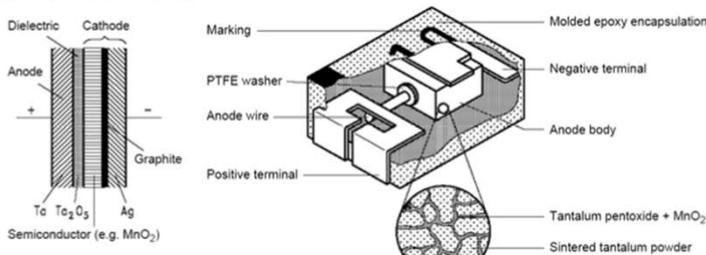
- **filtrage secteur redressé** : Le condensateur doit donc être spécifié en courant et en résistance série à cette fréquence.
- **filtrage HF (>20 kHz) en sortie des alimentations à découpage** : les spécifications doivent alors être effectuées pour la fréquence de travail. On utilise alors des condensateurs dits à faible ou très faible résistance série.
- **découplage pour convertisseurs de puissance** : ici aussi les spécifications doivent être faites à la fréquence de commutation.



Les condensateurs

Les condensateurs électrolytiques Ta

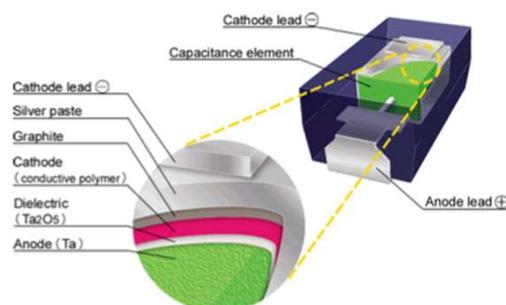
- L'isolant est Ta_2O_5 (électrolyse de l'Ta) : 2 types d'électrolytes Liquide (acide sulfurique) ou Solide (MnO_2 ou polymères)
- Les caractéristiques de la technologie tantale sont les suivantes :
 - tensions : 2 à 125 V
 - $\tan\delta$ (à 1 kHz) : 400.10⁻⁴
 - plage de température : - 55°C à +175°C (gélifié) ou + 125°C (solide)
Valeurs de 100 nF à qq 1000 μ F (qq 10 000 μ F avec la technologie tantale humide de Vishay 2007)



Les condensateurs

Les condensateurs électrolytiques Ta

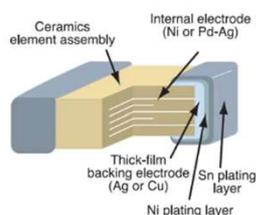
- La capacité volumique des condensateurs tantale est plus élevée que celle aluminium + le courant de fuites est très faible mais $U < 100$ V environ,
- Bonne stabilité en température, de hautes températures sont possibles, mais le prix est plus élevé. Les fortes capacités sont obtenues par assemblage de condensateurs élémentaires.



Les condensateurs

Les condensateurs céramiques

- constitués 2 ou plus de couches céramique séparés par une couche de métal (électrode). Les matériaux céramiques → impact les caractéristiques électriques → norme IEC, 2 classes :



Exemple de composant céramique en CMS, existe en ThT

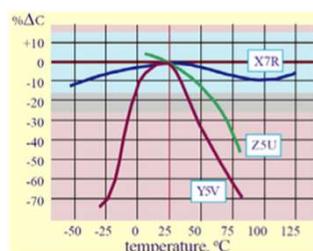
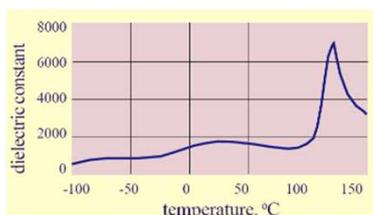
- Classe 1 : matériaux à base TiO_2 (modifié additifs : Zn, de Zr, de Nb, Mg, Ta, Co et Sr) → comportement très stable et linéaire de la valeur de C dans une plage de $T^\circ C$ spécifiée et de tension DC appliquée, Faibles pertes HF. Pb : permittivité relativement faible → plus faible volume parmi les condensateurs céramique.



Les condensateurs

Les condensateurs céramiques

- Classe 2 : Mélanges de matériaux ferroélectriques : titanate de baryum avec additifs : Al_2SiO_5 , $MgSiO_4$ & Al_2O_3 → ↑ la permittivité diélectrique. Pb : ΔC non linéaire vs T° et U, précision inférieure à ceux de la classe 1. Etiquetage fct ΔC dans la gamme de température.



- Norme RS-198 EIE :
 - Les premières lettres représente la gamme de Temp : Z : +10°C à +45°C, Y : -30°C à +65°C, X5 : -55°C à +85°C et X7 : -55°C à 105°C.
 - La dernière lettre la variation de la capacité sur la plage de Temp : A : +/- 1% jusqu'à V : +22%/-82% → X7R : +/-15% sur -55°C/+125°C

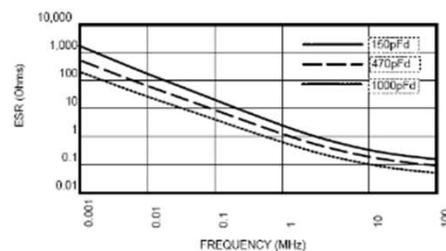
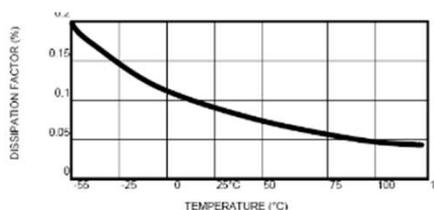


Les condensateurs

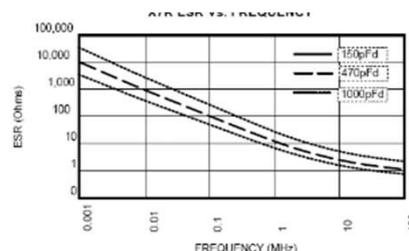
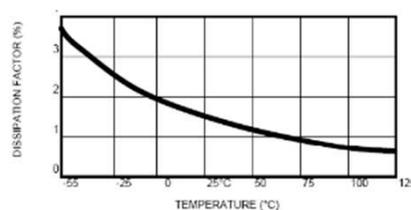
Les condensateurs céramiques

- Comparaison entre les classes 1 & 2

Classe 1



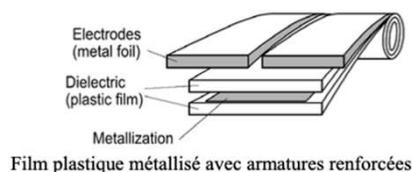
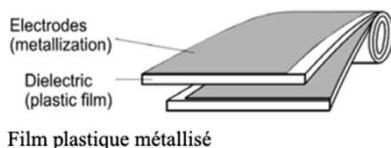
Classe 2



Les condensateurs

Condensateurs films

- 2 grand types de fabrications métallisation et/ou armature
 - Métallisation seule => (1) auto cicatrisation : en cas de claquage local, le diélectrique n'est pas détruit et la métallisation très fine se reforme. (2) faible encombrement.
 - armatures (2 à 8 μm) => (3) augmentation considérable de I_{eff} et de I_M ou dV/dt
 - armature + métallisation => (1) et (3)



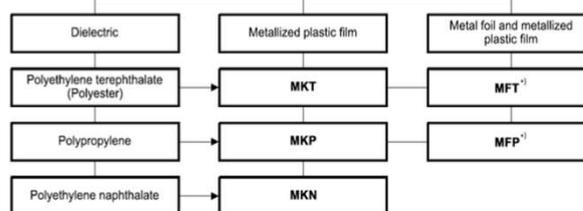
Auto cicatrisation : lorsque des cellules claquent, le film plastique se vaporise et se reforme. La technologie multicellulaires permet d'éliminer les cellules défailtantes. Les cellules sont reliées en parallèle par des bus (LCC, Siemens, Evox-Rifa) : en cas de court circuit de cellules, la métallisation fond et les isole des autres, la capacité totale diminue. Lorsqu'elle à chuté de 3%, on estime qu'il faut changer le condensateur (possibilité de maintenance préventive).



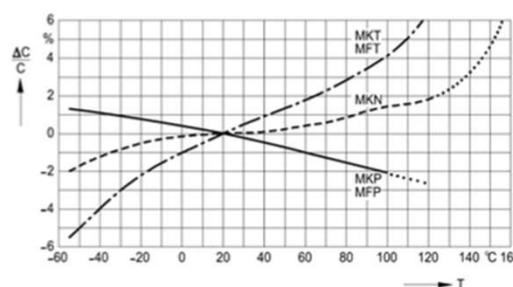
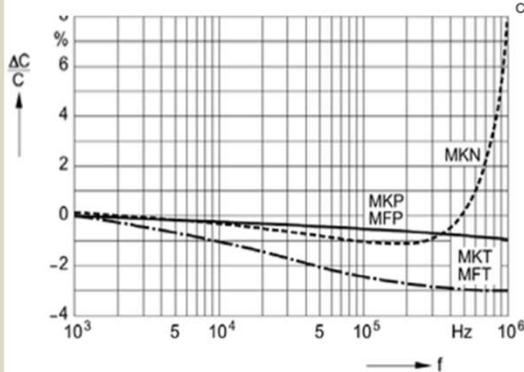
Les condensateurs

Condensateurs films

Selon les matériaux employés et l'usage d'armatures, les condensateurs films sont déclinés sous plusieurs appellations :



Classification of film capacitors in DIN 41379





Condensateurs films

Caractéristiques du polypropylène

$$\epsilon_r = 2,2$$

$$\tan \delta < 4.10^{-4} \text{ à } 1 \text{ kHz} - 25 \text{ °C}$$

$$k_r = 30 \text{ à } 50 \text{ kV/mm selon épaisseur (épaisseur minimale : } 4 \text{ }\mu\text{m)}$$

$$\lambda = 0,22 \text{ W/m/K}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = -200.10^{-6} \cdot K^{-1}$$

gamme de température extrême : -55 °C à +100 °C (souvent +85 °C), $T_{\text{fusion}} = 165 \text{ °C}$.
tenue en tension : jusqu'à 2000 V et 10 kV en diélectrique mixte papier/polypropylène.

Applications :

- découplage de puissance (hacheurs, onduleurs, SMPS)
- snubbers (forts courants crêtes) : transistors, thyristors, GTO ...
on réalise même des boîtiers amagnétiques pour les environnements magnétiques : circuits d'extinction de thyristors ...
- réservoirs d'énergie (allumage électronique automobile) / filtrage.

C'est la technologie film qui offre la plus grande compacité avec des valeurs d'énergie volumique de l'ordre de 150 à 300 J/dm³.



Condensateurs films

Caractéristiques du polyester (PET)

(=Polyéthylène téréphtalate d'Éthylène Glycol) ou encore **Mylar** : fabricant du film différent.

$$\epsilon_r = 3,25$$

$$\tan \delta \cong 40.10^{-4} \text{ (} 25 \text{ °C} - 1 \text{ kHz)}$$

$$k_r \approx 29 \text{ à } 50 \text{ kV/mm (épaisseur de diélectrique minimale : } 0,9 \text{ }\mu\text{m)}$$

$$\lambda = 0,24 \text{ W/m/K}$$

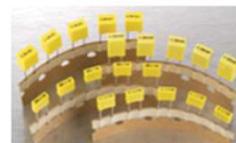
gamme de température extrême : -55 °C à +125 °C (et même 150 °C), $T_{\text{fusion}} = 255 \text{ °C}$.
tenue en tension jusqu'à 15 kV (s'associe aussi au papier)

Applications :

découplage électronique
économique

circuits RC limiteurs de tension (pas $\frac{dV}{dt}$)

antiparasitage (filtres EMI) : bon comportement jusqu'à 1 MHz
hautes tensions





Condensateurs films

Polycarbonate :

$\epsilon_r = 2,8$ à $3,2$
 $\tan\delta \approx 10 \cdot 10^{-4}$ à $25^\circ\text{C} - 1\text{kHz}$
 $k_r \approx 18\text{ kV/mm}$ (épaisseur minimale de diélectrique : $2\ \mu\text{m}$)
 gamme de température : -55°C à $+125^\circ\text{C}$
 tenue en tension : 1000 V
 10 kV avec papier imprégné (et même 50 kV)

Applications : circuits écrêteurs RC
 lorsque l'on a besoin de précision et d'une faible $\tan\delta$
 (**Attention :** sensibilité à l'humidité)

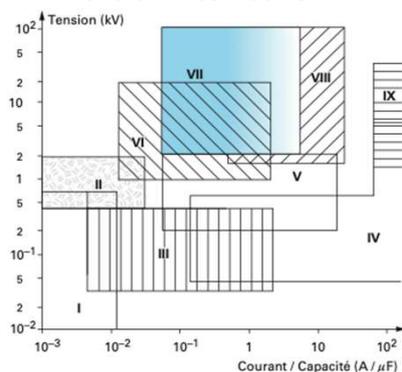


41



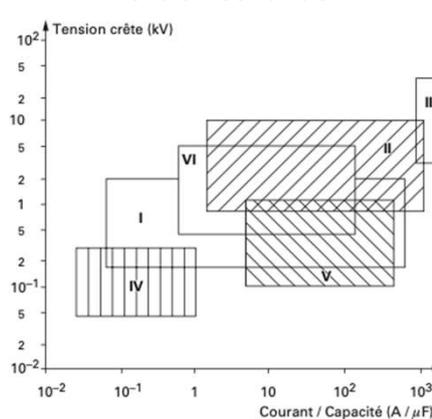
Domaine d'application Vs Techno

Tension Alternative



- I condensateur électrolytique (§ 2.6)
- II condensateur électrolytique par montage série-parallèle (§ 2.6)
- III condensateur film polyester, métallisé sec (§ 2.5.2)
- IV condensateur céramique multicouche, sec (§ 2.1)
- V condensateur au polypropylène, métallisé sec (§ 2.5.1.2)
- VI condensateur au polypropylène, métallisé imprégné (§ 2.5.1.2) et condensateur au papier métallisé imprégné (§ 2.4.2)
- VII condensateur au papier avec armature, imprégné (§ 2.4.1)
- VIII condensateur mixte (papier et film), imprégné (§ 2.5.1)
- IX condensateur céramique HT, sec (§ 2.1)

Tension Continue



- I condensateur au polypropylène, métallisé sec (§ 2.5.1.2)
- II condensateur au polypropylène, *tout film* imprégné (§ 2.5.1.1)
- III condensateur céramique HT, HF (§ 2.1)
- IV condensateur au polyester, métallisé sec (§ 2.5.2)
- V condensateur au polypropylène avec armatures, sec (§ 2.5.1.1)
- VI condensateur type MKW (§ 2.5.1.1)



42

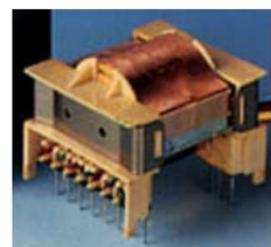
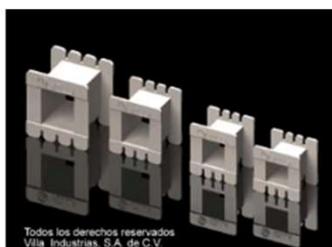
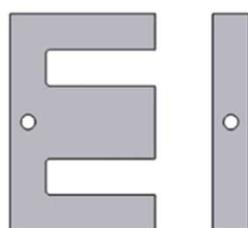


Rappel sur les composants magnétique en EDP

- Transfert d'énergie : transformateur → Isolation galvanique de 2 circuits ou modification de la l'amplitude de U ou I
- Stockage de l'énergie : inductance → élément de stockage, circuit fermé stockage, circuit ouvert restitution

Un composant magnétique se divise en 2 parties :

- Un circuit magnétique ou noyau magnétique
- Un ou plusieurs bobinage → Un primaire et 1 ou + secondaire



Circuit magnétique :

Canalise les lignes de champs → les matériau doivent avoir : perméabilité relative élevée, niveau d'induction à saturation important & résistivité + grande pour les HF → 3 paramètres nécessaire : nature du matériau, géométrie du circuit et dimension de l'entrefer

Le matériau magnétique :

- les matériau magnétique métallique (Fe, alliages FeSi, FeNi, amorphes ou nanocristallins) mais faible résistivité à HF → perte par courant de Foucault ↑ → kHz max
- les ferrites (Fe_2O_3), fabrication par frittage (moulage à chaud et sou pression). Couples associés : Mn-Zn & Ni-Zn → Matériau stable, gd dureté mais sensible au choc et T°

Tableau 7 - Choix du ferrite et de sa perméabilité en fonction de la fréquence de fonctionnement

Fréquence	Ferrite	Perméabilité
Continu à 1 MHz	Mn-Zn	800 à 30 000
1 MHz à 500 MHz	Ni-Zn ou Ni-Zn-Cu	10 à 1 000





Les
composants
magnétiques

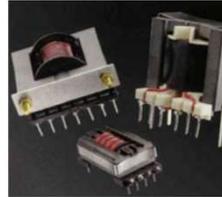
Circuit magnétique :

Formes des noyaux ont principalement 3 origines :

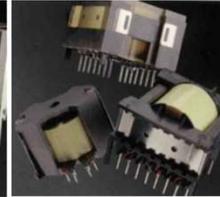
- Les noyaux pour le traitement du signal (pots, tores, E)
- Les noyaux en tôles empilées pour fréquence industrielles (<400 Hz)
- Les noyaux fait à façon



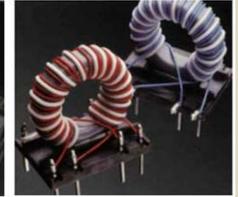
Divers circuits ferrites



Circuits E



Pots



Tores



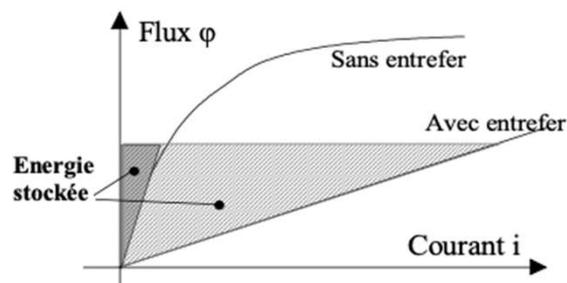
Pots RM



Les
composants
magnétiques

Circuit magnétique

- Entrefer : le but est d'éviter la saturation du matériau magnétique & ↑ le stockage d'énergie. Pour les matériaux comme les ferrites, l'entrefer est classiquement obtenu en rectifiant la jambe centrale du circuit magnétique ou en utilisant des cales. Pour des entrefers de forte valeur il est préférable d'utiliser des matériaux à entrefer reparti.





Circuit magnétique

Les paramètres à maîtriser :

- Pertes totales (Pt) : phénomène d'hystérésis et aux courants de Foucault.
- Inductions à saturation (Bs)
- Fréquence d'utilisation

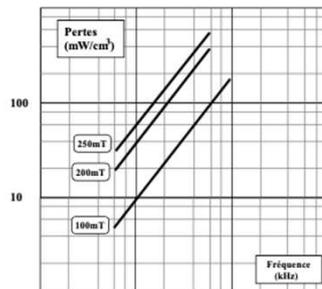


Fig 1.1: Pertes totales en fonction de f et Bs

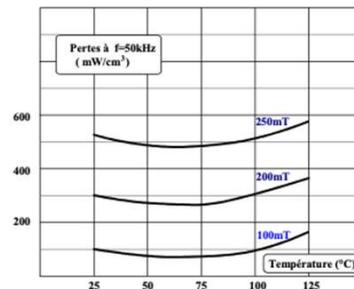


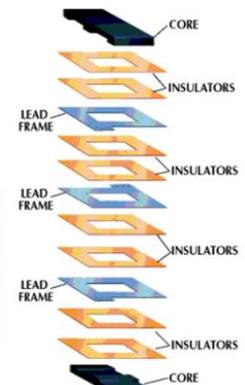
Fig 1.2 : Pertes totales en fonction de la température



Le bobinage

- Fréquence < 400hz utilisation de fils pleins avec une densité e courant de 2 à 5 A/mm²
- HT → les courants de Foucault à l'intérieur des conducteurs → ↑ des pertes. Courants dus aux variations rapides des champs magnétiques dans lesquels sont plongés les conducteurs. 3 pb dus au courant de Foucault :
 - L'effet de peau
 - L'effet de proximité
 - L'effet dû à la présence d'entrefer

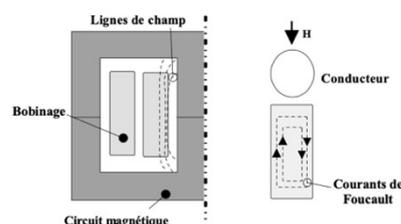
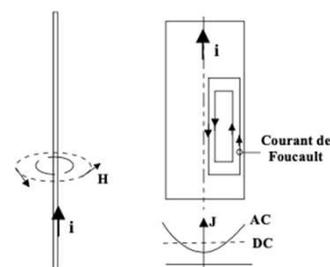
Dans les architectures dites planar (extra plates) la hauteur h est très faible et les fuites sont également très faibles





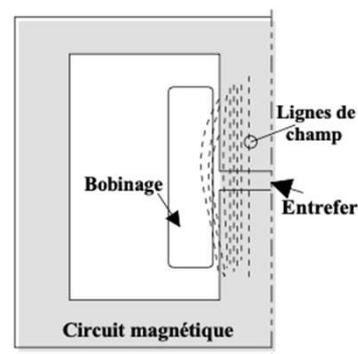
Le bobinage

- Effet de peau : un conducteur isolé parcouru par un courant électrique i → un champ magnétique dont les variations induisent des courants de Foucault à l'intérieur du conducteur → diminution la densité de courant au centre du conducteur & augmentation sur la périphérie → Augmentation de la résistance
- Effet de proximité : Dans un bobinage, les conducteurs ne peuvent plus être considérés indépendamment les uns des autres. Chaque conducteur subit l'influence du champ magnétique créé par l'ensemble des bobinages. Les variations rapides du champ créent des courants de Foucault à l'intérieur des conducteurs.



Le bobinage

Effet dû aux l'entrefer : En conversion d'énergie, les inductances servent à stocker de l'énergie → utilisation d'entrefer avec variation de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres. Dans la région de l'entrefer les lignes de champ sont d'autant moins bien canalisées que l'entrefer est important, on observe alors un épanouissement des lignes de champ. Les conducteurs placés à proximité de l'entrefer se trouvent ainsi plongés dans un champ magnétique variable. Ils sont le siège de pertes importantes. Il est parfois plus judicieux d'utiliser des matériaux à entrefer reparti qui permettent ainsi de limiter ces effets.



Les systèmes
de
refroidissement

Le refroidissement

Plusieurs types de systèmes de refroidissement existent : convection naturelle, convection forcée, refroidissement liquide, caloduc...

- Refroidissement liquide présentent au niveau du convertisseur une meilleure densité de refroidissement ; seule une plaque froide est nécessaire au sein du convertisseur, la chaleur est transportée et évacuée ailleurs, mais au niveau système, il faut inclure l'échangeur final.
- Les systèmes par convection forcés sont plus compacts que les solutions à convection naturelle. Mais peu fiable → Pb applications critiques.
- Les caloducs permettent, quant à eux, d'utiliser un seul dissipateur avec un emplacement optimal ; ces systèmes sont largement utilisés dans les ordinateurs portables à multiples cœurs.

Bien souvent, ces systèmes ne sont pas en concurrence, le type de système est imposé par le cahier de charges ; par exemple : seule la convection naturelle est autorisée, pas de ventilateur pour des questions de fiabilité, pas de refroidissement liquide car toute fuite serait inacceptable

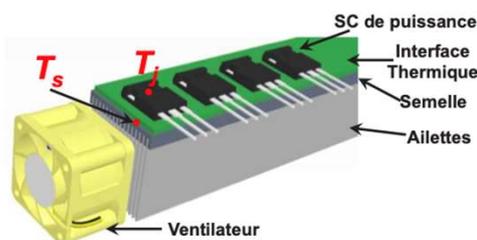


51

Les systèmes
de
refroidissement

Le refroidissement

- Les dissipateurs thermiques ont aussi un impact sur le comportement CEM d'un convertisseur → les dissipateurs sont connectés à la masse électrique (Pour des raisons de sécurité) → Isoler le composant du dissipateur. Cette fonction nécessite un matériau bon conducteur thermique et bon isolant électrique, matériau exotique ; le meilleur compromis consiste généralement à utiliser un très bon diélectrique dont on minimise l'épaisseur. Compte tenu de cette faible épaisseur, la capacité parasite entre les puces et le dissipateur est non négligeable et génère ainsi un courant de mode commun substantiel.
- Pour certaines applications, lorsque les dissipateurs sont séparés et inaccessibles, les dissipateurs peuvent être 'au potentiel' i.e. connectés directement au potentiel de l'une des électrodes de la puce semi-conductrice → Le dissipateur fonctionne comme une antenne et avec l'augmentation de la fréquence de découpage, l'émission devient une contrainte CEM pour la conception. les auteurs comparent l'émissivité de différents dissipateurs. En une routine d'optimisation en vue de réduire l'émissivité CEM des dissipateurs est réalisée.

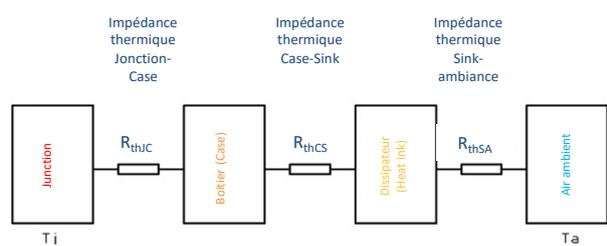
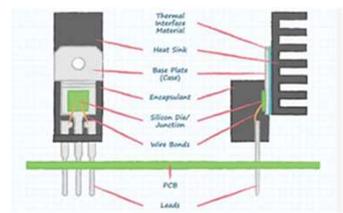


52

Les systèmes de refroidissement

Exemple de dimensionnement d'un dissipateur

Cas Simple



$$P = R_{th}(T_j - T_{amb})$$

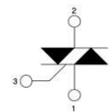
$$R_{th} = R_{thJC} + R_{thCS} + R_{thSA}$$



Les systèmes de refroidissement

Exemple de dimensionnement d'un dissipateur

Cas simple : contrôle d'une commande avec un triac de type CLA80MT1200NHB,



$$P = R_{th}(T_j - T_{amb})$$

$$R_{th} = R_{thJC} + R_{thCS} + R_{thSA}$$

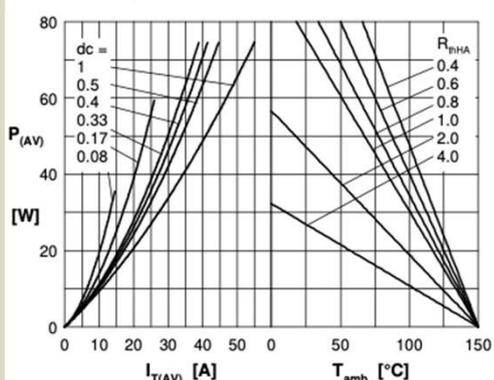


Fig. 7a Power dissipation versus direct output current
Fig. 7b and ambient temperature

Symbol	Definition	Conditions	min.	typ.	max.	Unit	
V_{BRM}	max. non-repetitive reverse/forward blocking voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$			1300	V	
V_{BRM}	max. repetitive reverse/forward blocking voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$			1200	V	
I_{RSM}	reverse current, drain current	$V_{RSM} = 1200\text{ V}$			10	μA	
V_f	forward voltage drop	$I_f = 40\text{ A}$			1.30	V	
		$I_f = 80\text{ A}$			1.59	V	
		$I_f = 40\text{ A}$	$T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$		1.26	V	
I_{FAV}	average forward current	$T_C = 120^{\circ}\text{C}$			40	A	
		$T_C = 150^{\circ}\text{C}$			88	A	
I_{FAS}	RMS forward current per phase	180° sine			10	mΩ	
V_{th}	threshold voltage	$T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$			0.88	V	
r_f	slope resistance	for power loss calculation only				10	mΩ
R_{thJC}	thermal resistance junction to case				0.4	KW	
R_{thCH}	thermal resistance case to heatsink				0.25	KW	

Pour des courants totale de 10A, 20A, 30A, 40A quel type de dissipateur est nécessaire?



Les systèmes de refroidissement

Exemple de dimensionnement d'un dissipateur

Cas simple : contrôle d'une commande avec un triac de type CLA80MT1200NHB

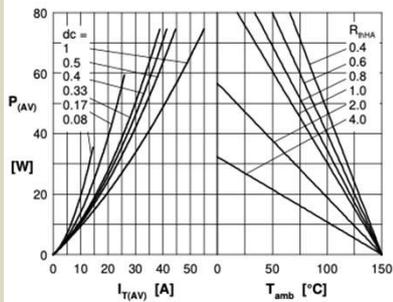


Fig. 7a Power dissipation versus direct output current
Fig. 7b Power dissipation versus ambient temperature

- 10A → $R_{\theta SA} = 4^{\circ}\text{C/W}$ & $T_{\text{amb max}} = 100^{\circ}\text{C}$
- 20A → $R_{\theta SA} = 4^{\circ}\text{C/W}$ & $T_{\text{amb max}} = 50^{\circ}\text{C}$
- 30A → $R_{\theta SA} = 2^{\circ}\text{C/W}$ & $T_{\text{amb max}} = 75^{\circ}\text{C}$
- 35A → $R_{\theta SA} = 2^{\circ}\text{C/W}$ & $T_{\text{amb max}} = 50^{\circ}\text{C}$
- Ou → $R_{\theta SA} = 1^{\circ}\text{C/W}$ & $T_{\text{amb max}} = 100^{\circ}\text{C}$
- 40A → $R_{\theta SA} < 1^{\circ}\text{C/W}$ & $T_{\text{amb max}} = 75^{\circ}\text{C}$



Dissipateur 4W/°C =
64mm x 40mm x 25mm



Dissipateur 1W/°C =
304mm x 57,91mm x
11,56mm



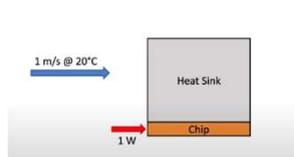
Dissipateur avec ventilateur : 1W/°C =
55mm x 55mm x
39,50mm



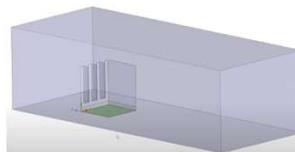
Les systèmes de refroidissement

Exemple de dimensionnement d'un dissipateur

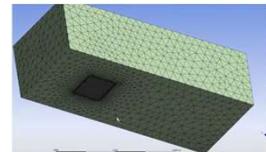
Cas moins simple : Impact d'un mouvement de convection forcé sur un dissipateur, Logiciel de simulation FEM: ANSYS, Comsol, Elmer



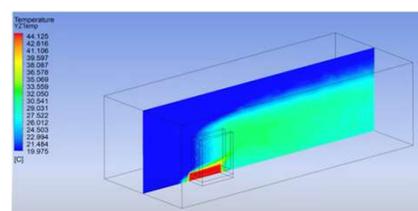
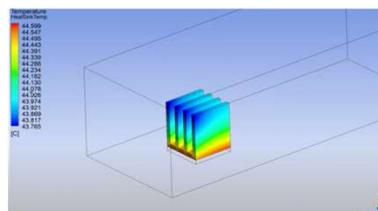
Création du modèle :
paramètre de simulation



Création de la géométrie



Maillage



Résultats de simulation : Intégration de la thermique et du fluide



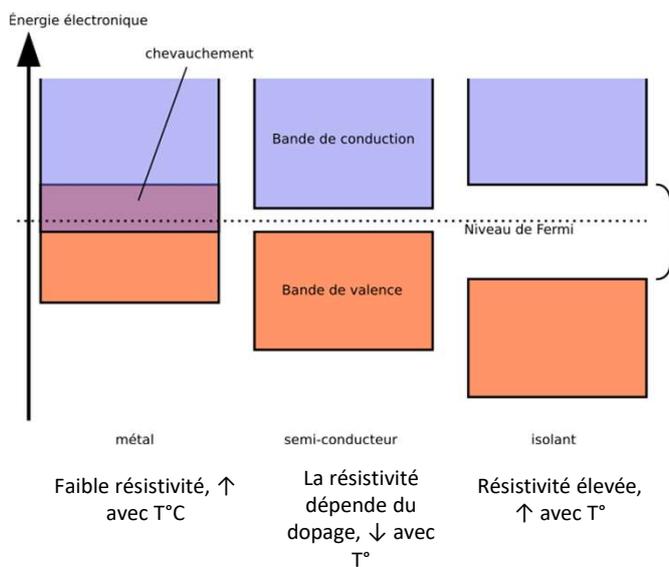
ETATS DES LIEUX
DES
COMPOSANTS



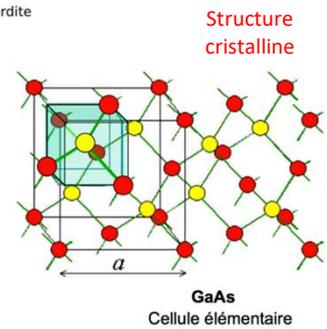
Les composants actifs ; les semi-conducteurs

57

Notions de semi-conducteurs



Le Gap ou bande interdite est l'énergie minimale nécessaire pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction \rightarrow Générer un courant

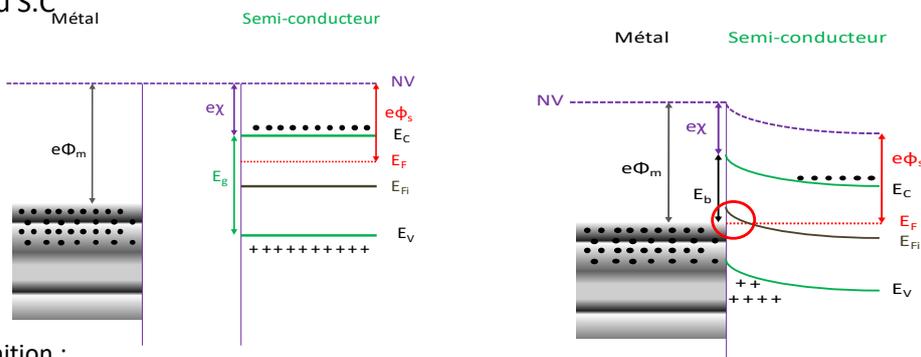


58

Semi-conducteur?

Contact Schottky

La diode Schottky est créée par la mise en contact entre un métal et un semi-conducteur, attention à la différence des niveaux entre les travaux de sortie du métal et du S.C.



Définition :

- Travail de sortie : du métal ($e\Phi_m$) comme étant l'énergie nécessaire à l'extraction d'un électron du niveau de Fermi vers le niveau du vide
- Affinité électronique : qui est l'énergie nécessaire pour extraire un électron du bas de la bande de conduction et l'amener dans le vide

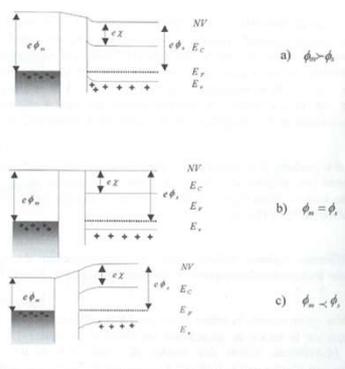


Semi-conducteur?

Contact Métal Semi-Conducteur

Exemple avec un contact métal/S.C type P

Métal S.C



a) $\phi_m > \phi_s$ → Accumulation de charge positive dans le S.C → Contact Ohmique

b) $\phi_m = \phi_s$ → Régime de bande plate

c) $\phi_m < \phi_s$ → Accumulation de charge négative dans le S.C → Contact Schottky

$\phi_m > \phi_s$:
le contact métal-S.C n est Schottky
le contact métal-S.C p est ohmique

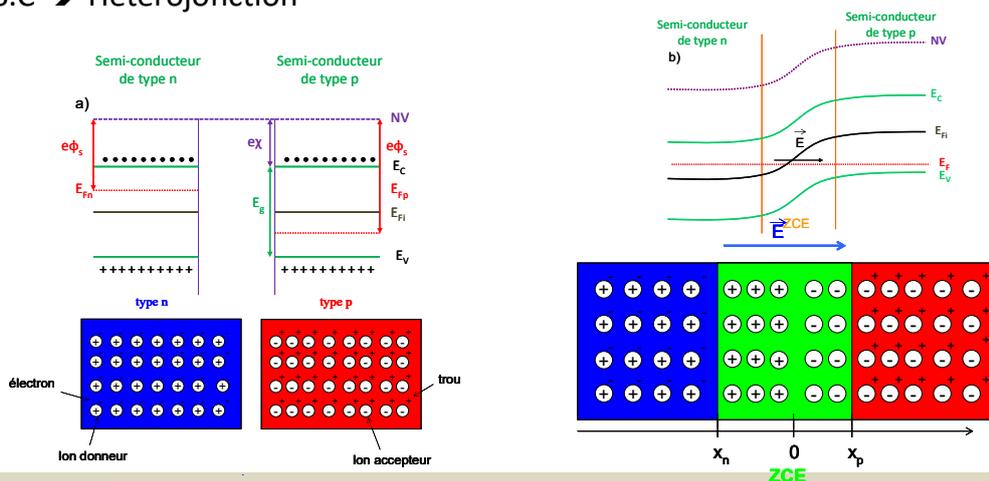
$\phi_m < \phi_s$:
le contact métal-S.C n est ohmique
le contact métal-S.C p est Schottky



Semi-conducteur?

Contact S.C type n/ S.C type p

La jonction p.n est la mise en contact de deux régions de dopages différents, ces régions peuvent être du même S.C → Homojonction, ou ≠ S.C → Hétérojonction



Bref Rappel

1833 M. Faraday observe l'augmentation de la conductivité de certains matériaux en fonction de la T°

1839 : Découverte de l'effet photovoltaïque par A. Becquerel

1905 : F. Braun intégrer la galène pour créer un effet redresseur ancêtre de la diode

1937 : l'ordinateur avant le transistor

Décembre 1947 : Le premier transistor

1954 : Premier application du transistor dans une radio

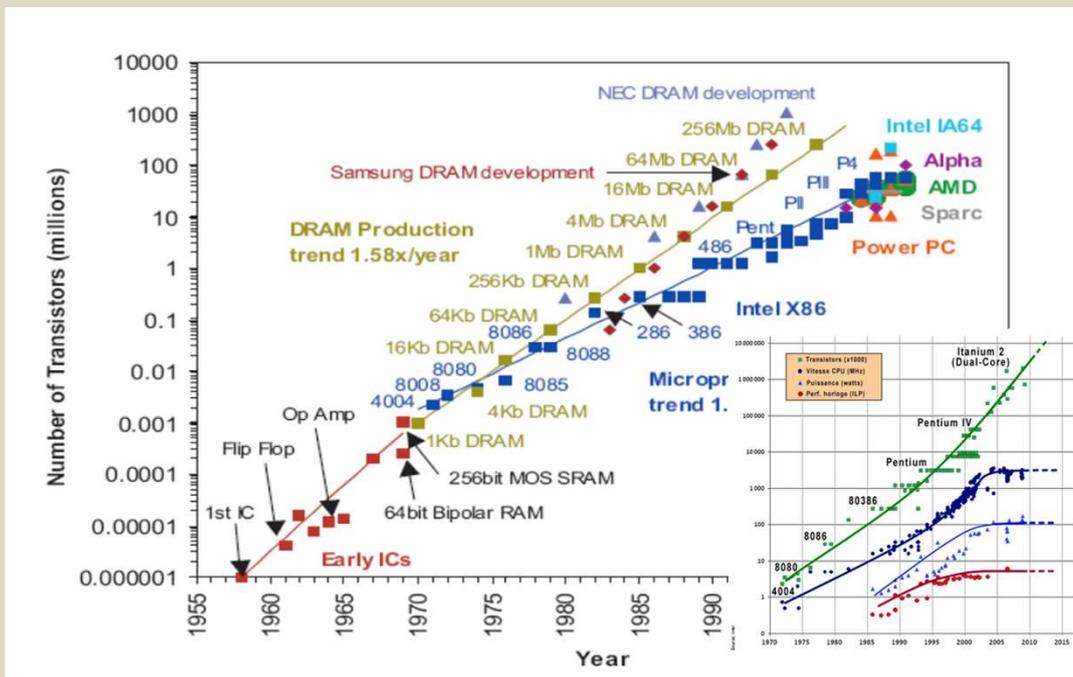
1958 : Premier circuit intégré

1969 : invention du microprocesseur

1971 : Intel 4004 intègre 2 250 transistors et exécute 60 000 op/s

2014 : Processeur i7 2,6x10⁹ transistors

Bref Rappel

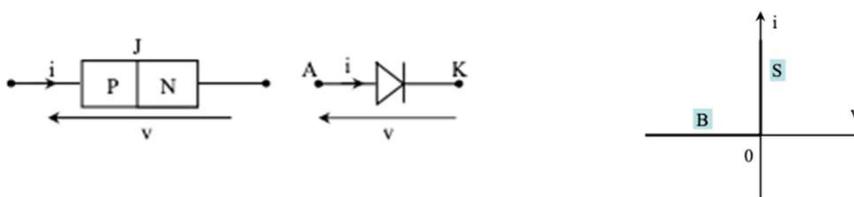


65

Diode de puissance

Principe de fonctionnement

Une diode : semi-conducteur non commandé, qui permet la circulation du courant dans un seul sens. 1 jonction → interrupteur de puissance à 2 segments.

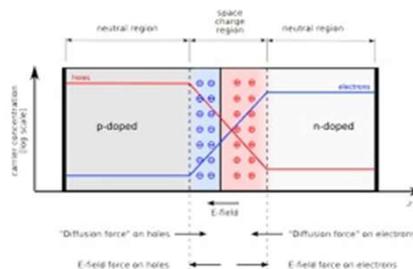
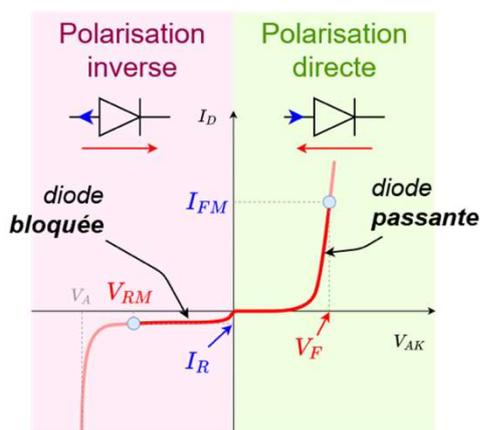


- **Sens direct (passant)** : La diode est conductrice, elle présente une faible chute de tension de l'ordre de quelques volts.
- **Sens inverse (bloqué)** : La diode est non passante, elle présente un très faible courant résiduel de l'ordre de quelques micro-ampères.

66

Diode de puissance

Principe de fonctionnement : cas réel



$$V_F = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right)$$

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e} V_d \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}$$



67

Diode de puissance

Caractéristiques essentielles

De nombreux paramètres peuvent être prises en comptes :

- Le courant direct moyen (I_0 ou I_{FAV}) ou le courant direct continu (I_F) ou le courant de pointe répétitif continu (I_{FRM}) ou le courant de pointe non répétitif de surcharge accidentelle (I_{FSM}),
- La tension continue directe à l'état passant (V_F) ou La tension de seuil (V_d ou V_s) ou la tension inverse de pointe répétitive (V_{RRM}) ou la tension de pointe non répétitive (V_{RSM})
- La résistance dynamique (R_d), temps de commutation (t_{rr})
- La contrainte thermique
- Le type de boîtier,
- Les températures des jonctions,
- etc

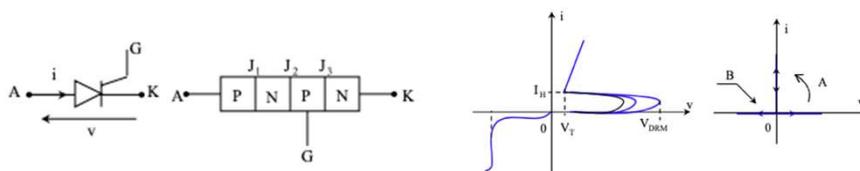


68

Thyristors

Principe de fonctionnement

Un thyristor est un SC commandé par un circuit d' amorçage pour la mise en conduction, le blocage s'effectue lors de la disparition du courant direct. Il permet la circulation du courant dans un seul sens. Il est constitué par trois jonctions + anode et la cathode et électrode de commande appelée gâchette.



Caractéristique statique

Tension sur la gâchette les trous de la zone P sont poussés → Jonction PN principe de la diode



Thyristors

Caractéristiques essentielles

convertisseur à thyristors → redresseur ou gradateur, rarement pour hacheur et onduleur. La puissance nominale envisagée est comprise autour 1 kW et plusieurs MW pour un redresseur, entre 1 kW et quelques centaines de kW pour un gradateur, et supérieure à 250 kW pour un hacheur

Les données techniques suivantes sont généralement nécessaires pour caractériser un thyristor :

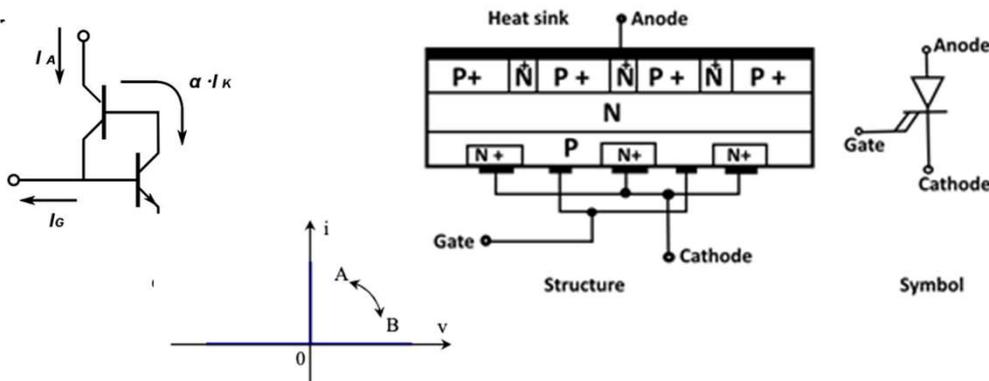
- V_{RSM} : tension de crête maximale accidentelle;
- V_{RRM} : tension de crête maximale répétitive directe ou inverse;
- I_{TAV} : valeur **moyenne maximale** absolue du courant que le composant peut supporter en permanence;
- I_{TRMS} : valeur **efficace maximale** absolue du courant que le composant peut supporter en permanence
- I_{TSM} : courant de surcharge maximale accidentelle;
- I^2t : cette valeur sert au dimensionnement du fusible pour $t = 10$ ms. Il faut que le I^2t du fusible soit inférieur à celui du thyristor pour réaliser une bonne protection contre les surintensités;
- di/dt : vitesse maximale d'amorçage; si le régime transitoire du courant « monte » plus rapidement que cette vitesse, il y a risque de destruction du thyristor. Pour les très gros thyristors, on réduit ce risque en plaçant en série avec le thyristor une petite inductance « à air » qui limite la croissance du courant d'amorçage;
- dV/dt : vitesse limite de blocage. Si cette valeur est dépassée par le régime transitoire, il y a risque d'auto-amorçage du thyristor. On réduit ce risque en plaçant en parallèle avec le thyristor un circuit R-C (snubber) qui limite la croissance de la tension anode-cathode;



Thyristors
GTO

Principe de fonctionnement

C'est un interrupteur pilotable par la gâchette. La commande externe agit pour la **fermeture et pour l'ouverture**. La fermeture de l'interrupteur thyristor correspond à l'amorçage d'un phénomène d'avalanche au niveau de la jonction voisine de la gâchette. Elle s'effectue comme pour le thyristor « simple », par des impulsions entre gâchette G et cathode K



71

Transistor
bipolaire de
puissance

Principe de fonctionnement

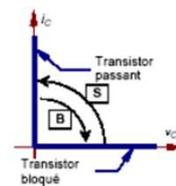
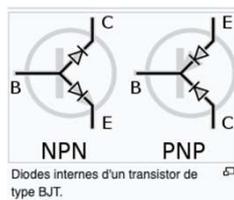
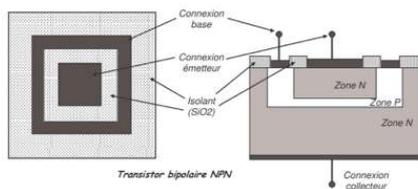
2 types : NPN et PNP, mais principalement NPN car plus rapide en commutation. C'est un composant **totalemt commandé à la fermeture et à l'ouverture**. Il n'est pas réversible en courant, ne laissant passer que des courants de collecteur I_C positifs. Il n'est pas réversible en tension, n'acceptant que des tensions V_{CE} positives lorsqu'il est bloqué.

A l'état saturé : application d'un I_B

- le transistor est limité en puissance : courbe limite dans le plan (V_{CE}, I_C), l'hyperbole de dissipation maximale ;
- le courant maximal moyen de collecteur est donc lui aussi limité (I_{Cmax}) ;
- la tension n'est pas tout à fait nulle ($V_{CEsat} \neq 0$).

A l'état bloqué : $I_B = 0$

- la tension V_{CE} ne peut dépasser une tension (V_{CEO}) qui provoquerait de claquage de la jonction ;
- un courant résiduel dû aux porteurs minoritaires circule dans le collecteur (I_{CBO}).



72

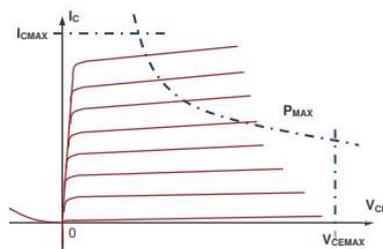
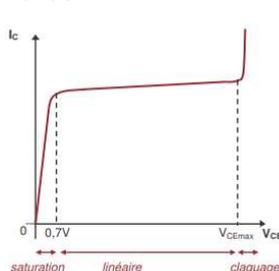
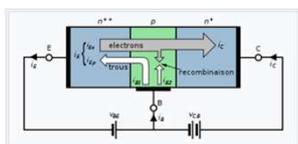
Transistor bipolaire de puissance

Caractéristiques essentielles

Après avoir établi les chronogrammes de fonctionnement (v_{CE} et i_C), on calcule les valeurs extrêmes prises par :

- La tension (à l'état bloqué)
- Le courant maxi (à l'état saturé).

Par sécurité de dimensionnement, on applique un coefficient de sécurité (1,2 à 2) à ces valeurs. Elles doivent être supportées par le composant choisi. On doit ensuite déterminer le courant $I_B (> I_C/\beta)$ que doit délivrer la commande.



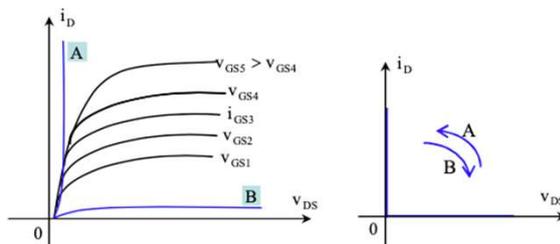
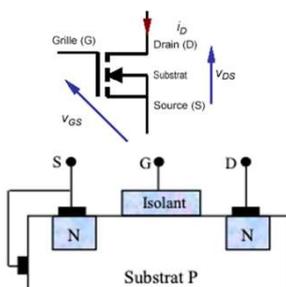
Transistor MOS

Principe de fonctionnement

Le transistor MOS est un composant totalement commandé à la fermeture et à l'ouverture. C'est le composant le plus rapide à se fermer et à s'ouvrir. Il est classiquement utilisé jusqu'à 300 kHz, voire 1 MHz. Il est rendu passant grâce à une tension V_{GS} positive $> V_{th}$.

La grille est isolée du reste du transistor, ce qui procure une impédance grille-source très élevée. La grille n'absorbe donc aucun courant en régime permanent.

Cela n'est pas vrai lors des commutations et c'est pour cela que les microprocesseurs (Pentium ou Athlon) chauffent autant. La jonction drain-source est alors assimilable à une résistance très faible : R_{DSon} de quelques mW. On le bloque en annulant V_{GS} , R_{DS} devient alors très élevée



L'inconvénient majeur est sa résistance à l'état passant (R_{DSon}) qui augmente avec la tension. Pour pallier à cet inconvénient, les fabricants proposent des composants à grande surface de silicium. Cela rend les MOS chers dès que la tension nominale dépasse 200 V.



Transistor
MOS

Caractéristiques essentielles

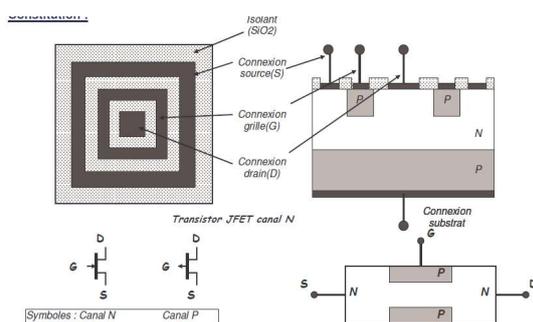
Les données techniques suivantes sont nécessaires pour caractériser un transistor MOS :

- V_{DSS} : tension drain-source maximale;
- I_D : courant de drain;
- $Q_{G(on)}$: charge nécessaire sur la grille pour saturer le transistor;
- $t_{d(on)}$: retard à la commande pour saturer le transistor;
- t_r : temps de montée pour saturer le transistor;
- $t_{d(off)}$: retard à la commande pour bloquer le transistor;
- t_f : temps de descente pour bloquer le transistor;
- $R_{DS(on)}$: résistance drain-source à l'état passant.

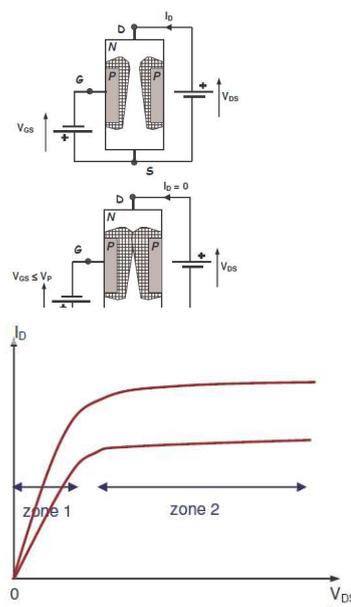


JFET

Principe de fonctionnement



- Consiste à faire varier la conductivité du canal en jouant sur la polarisation inverse de la jonction PN
- Si V_{GS} suffisamment négatif, la largeur du canal devient nulle le canal est pincé: $V_{GS} < V_p$ le courant de passe plus



Transistor IGBT

IGBT : MOFSET + bipolaire

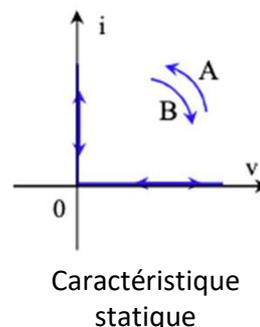
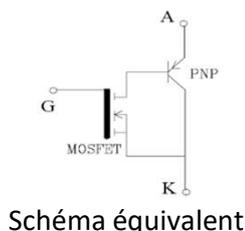
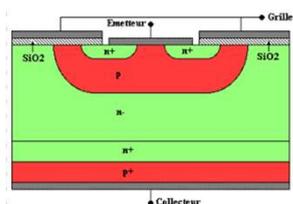
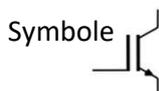
- Un interrupteur idéal doit avoir les caractéristiques suivantes: impédance nulle à l'état fermé et infinie à l'état ouvert, puissance consommée et temps de commutation nuls. On peut donc avancer qu'un interrupteur idéal n'existe pas aujourd'hui et n'existera pas d'avantage demain.
- Les deux plus célèbres composants électroniques réalisant la fonction interrupteur sont : le transistor bipolaire et le transistor MOS. Le premier présente comme avantages une faible tension de déchet à l'état passant et le pouvoir de commuter de forts courants, mais nécessite une puissance de commande non négligeable et sa fréquence de travail est relativement basse. Le MOS quant à lui, connu pour des fréquences de travail plus élevées et une puissance de commande presque nulle, est limité par sa tension de déchet qui est importante pour des dispositifs mettant en jeu des hautes tensions (quelques centaines de Volts).
- Depuis 1979, se développe l'idée d'intégrer sur une même puce un transistor MOS et un transistor bipolaire afin de profiter des avantages de chacun des deux dispositifs en évitant au mieux leurs inconvénients.
- Le transistor IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) est l'association d'un transistor bipolaire (collecteur et émetteur) et d'un transistor MOSFET. Il associe les performances en courant entre collecteur et émetteur (la faible chute de tension collecteur émetteur 0,1 V) et la commande en tension par sa grille qui nécessite un courant permanent quasiment nul.
- Ses caractéristiques sont reprises de celles du transistor bipolaire : V_{CEsat} et i_{CSat} .



Transistor IGBT

Principe de fonctionnement

- L'action de la tension V_{GE} entre la grille G et l'émetteur E provoque à travers la couche d'isolant une succession d'actions internes qui entraînent la saturation du transistor. Cette fermeture s'effectue en envoyant une tension V_{GE} positive supérieure à la tension de seuil V_{th} avec une tension collecteur-émetteur positive
- L'état bloqué est réalisé par une tension V_{GE} nulle



Transistor IGBT

Caractéristiques essentielles

Si le choix se porte sur l'utilisation d'un tel transistor, c'est que le convertisseur est un hacheur ou un onduleur, la puissance nominale envisagée est comprise environ entre 1 kW et 500 kW. Les données techniques sont les suivantes pour caractériser un transistor IGBT :

- V_{CES} : tension collecteur-émetteur maximale;
- I_C : courant de drain;
- $Q_{Ge(on)}$: charge nécessaire sur la grille pour saturer le transistor;
- $td(on)$: retard à la commande pour saturer le transistor;
- tr : temps de montée pour saturer le transistor;
- $td(off)$: retard à la commande pour bloquer le transistor;
- tf : temps de descente bloquer le transistor;
- $V_{CE(sat)}$: tension collecteur-émetteur à l'état saturé;
- t_{rr} : temps de recouvrement inverse de la diode en antiparallèle;
- les températures sont celles de la jonction principale.



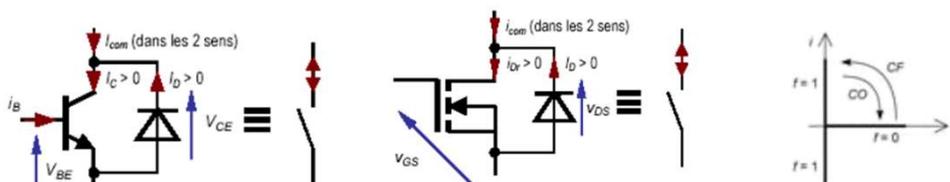
Autres

Et d'autres composants...

Le triac : interrupteur semi-commandable bidirectionnel. La fermeture de l'interrupteur triac correspond à l'amorçage d'une avalanche, comme dans le thyristor. Il est équivalent à deux thyristors montés en antiparallèle; mais, à la différence du montage à deux thyristors, il ne comporte qu'une seule gâchette.

Diac : un interrupteur ouvert tant que la tension à ses bornes ne dépasse pas un seuil. Le diac est souvent connecté à la gâchette d'un thyristor ou d'un triac. Il permet une commande plus franche en devenant brutalement conducteur.

Transistor dual : Il est équivalent à l'association d'un transistor et d'une diode en antiparallèle



Transistor bipolaire réversible en courant

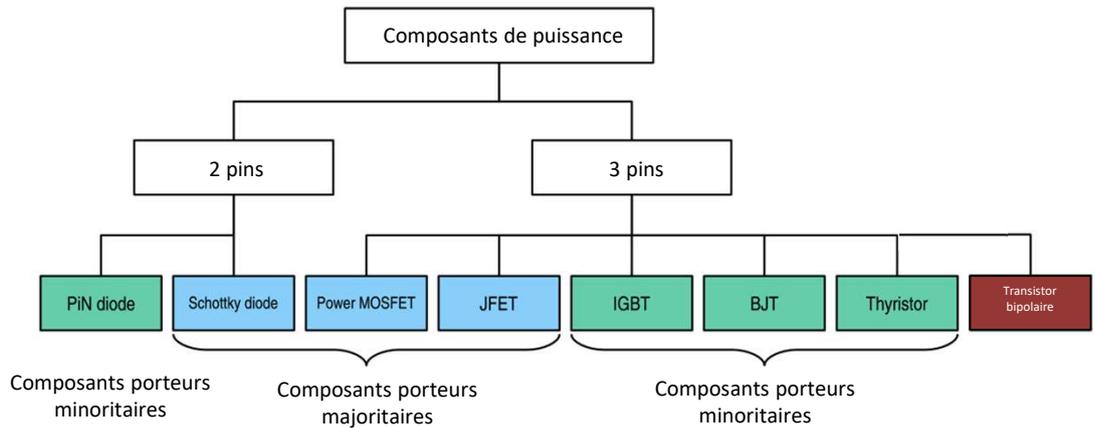
Transistor Mos réversible en courant





Résumé

Les composants de puissances en silicium couvrent une grande gamme de puissance et fréquence

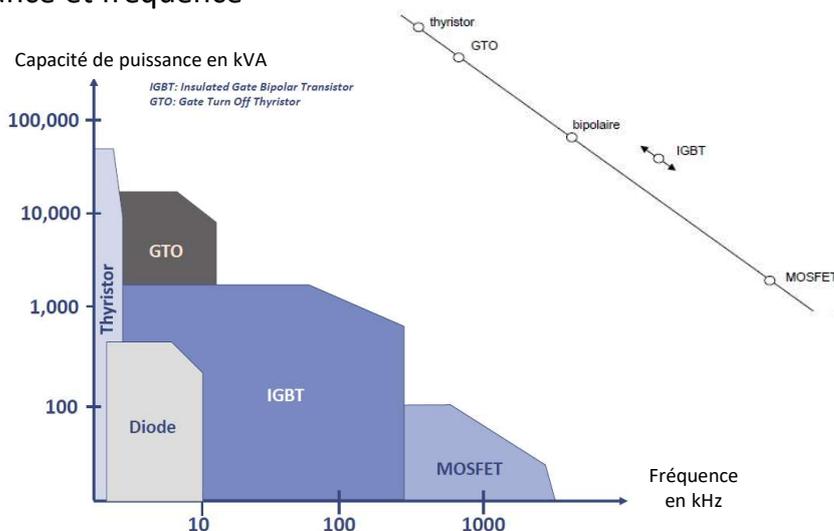


81



Avantages du Si

Les composants de puissances en silicium couvrent une grande gamme de puissance et fréquence

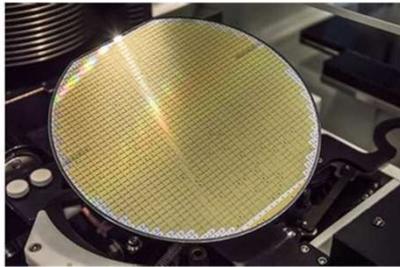


82

Avantages
du Si

Avantages du Silicium

- Taille des wafers
- Industrie 1947
- Industrie forte : PV, CI, puissance...
- Matière abondante



Avantages
du Si

Avantages du Silicium

- Technologie maîtrisée gate : 3nm :
- Avancée vers le 2nm :
- Structure 3D

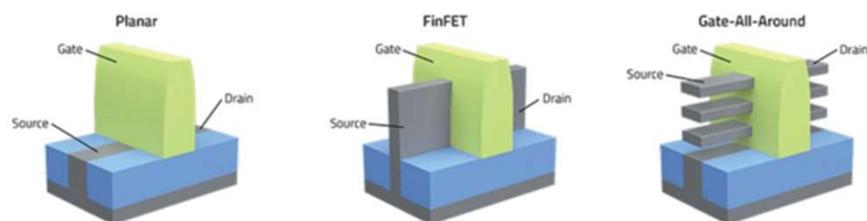


Fig. 1: Planar transistors vs. finFETs vs. gate-all-around Source: Lam Research

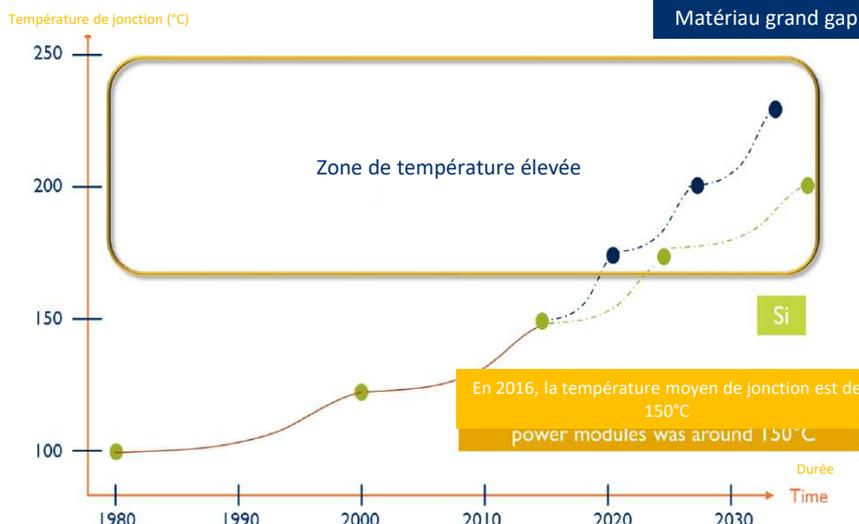


Inconvénients du Si

Inconvénients

Avec l'augmentation de la puissance, le développement des grands gaps, miniaturisation et le progrès générales en EDP, la température des jonction peuvent travailler à des T° + élevée

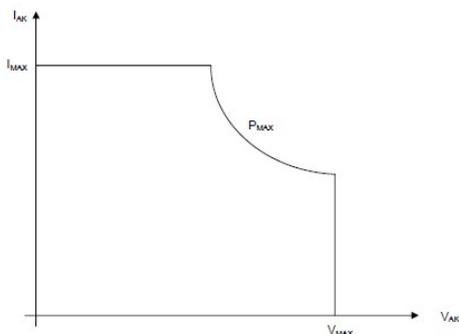
Une divergence des technologies est attendu avec les différents types de matériaux



Inconvénients du Si

Aire de sécurité en fonctionnement direct

- Un composant de puissance ne peut pas faire passer un courant infini, ni supporter des tensions infinies.
- On définit une aire de sécurité en direct qui correspond aux performances maximum du composant.
- Elle se découpe en 3 parties :
 1. limitation du courant maximum par la section des connexions de sortie ;
 2. limitation par la puissance maximum que peut dissiper le composant $I_{AK} \times V_{AK} < P_{MAX}$;
 3. limitation par l'avalanche (tension inverse maximum).



Ces trois paramètres sont essentiels pour le choix d'un composant de puissance.

 **FRAMATECH** 

**COMPOSANTS
S.C EN EDP**

 Les nouveaux composants de puissance « grand gap » SiC et GaN

87

 **FRAMATECH** 88/160

 Grand Gap
SiC/GaN

Notions de Gap ou bande interdite

S.C CRISTALLIN USUEL	S.C EXOTIQUE
<p>S.C à petit gap</p> <ul style="list-style-type: none">• Ge : 0,661eV• Si : 1,12eV• GaP : 2,26eV	<p>S.C Organiques</p> <ul style="list-style-type: none">• Tétracène 1eV • P3HT : 3,2eV • PCBM : 2,7eV 
<p>S.C à grand gap</p> <ul style="list-style-type: none">• SiC-4H : 3,21 eV• GaN : 3,2eV• C : 5,46-5,6eV	<p>S.C Inorganiques</p> <ul style="list-style-type: none">• CIGS (Cu, In, Ga, Se) : 1,2eV• CdS : 2,5eV• ZnO : 3,3eV

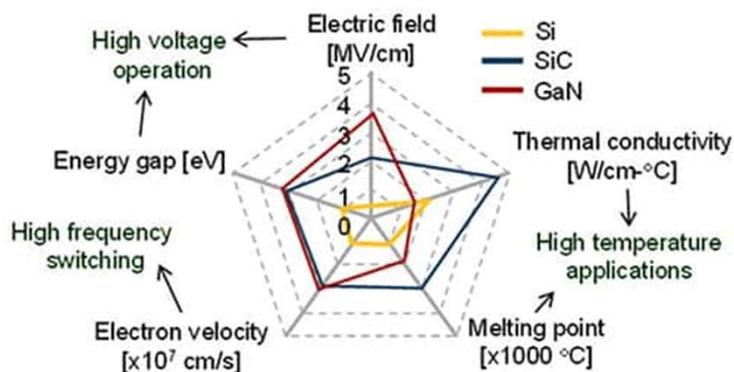


88

Grand Gap
SiC/GaN

Pourquoi des matériaux à grand gap pour EDP?

- évolution du ni plus faible avec la température → travaille à des T° plus haute
- Tension de blocage plus élevée → Travail en tension inverse plus importante
- Vitesse de recouvrement plus important
- Résistance spécifique plus faible



Grand Gap
SiC/GaN

Impact du grand Gap

- Rappel de la formule sur la concentration de porteurs intrinsèques ni

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} e^{-E_G/2kT}$$

- La formule permettant de calculer la tension de seuil est

$$V_d = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right)$$

Valeurs dépendantes de la concentration de dopants

	Ge	Si	SiC-4H	GaN
Eg (eV) à 300k	0,67	1,12	3,28	3,44
Ni (cm-3)	2.10 ³	1,45.10 ¹⁰	6,7.10 ⁻⁹	3.10 ⁻¹⁰
Vd (V)	0,25	0,7	2,97	3,13

- Tension de commande différentes en fonction du matériau
- Courant de fuite plus faible

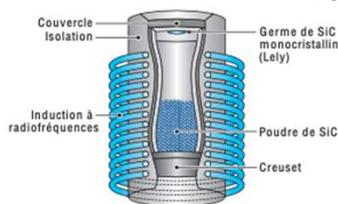
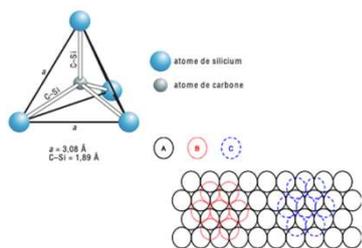


Le Carbure de Silicium : croissance

+ plus 200 polytypes : tous bicouches Si-C

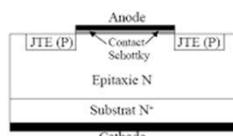
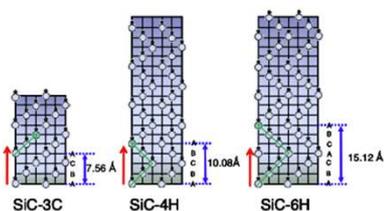
Fabrication de **substrat** :
réacteur de croissance

Spécificité
du SiC



Problème de générations de défauts micropores,
dislocations → Amélioration du procédé de fab

Empilement de Bi-couches Si-C



Croissance par épitaxie →
Fautes d'empilement



Le Carbure de Silicium : le dopage

Spécificité
du SiC

13 Bore B 10,8135	14 Carbone C 12,0106	15 Azote N 14,006435	16 Oxygène O 15,99940	17 Fluor F 18,99840316	Hélium 2 He 4,002602
Aluminium 13 Al 26,9815385	Silicium 14 Si 28,085(1)	Phosphore 15 P 30,97376200	Soufre 16 S 32,0675	Chlore 17 Cl 35,453	Argon 18 Ar 39,948(1)
Gallium 31 Ga 69,723(1)	Germanium 32 Ge 72,630(8)	Arsenic 33 As 74,921595	Sélénium 34 Se 78,971(8)	Brome 35 Br 79,904(1)	Krypton 36 Kr 83,798(2)
Indium 49 In 114,818(1)	Étain 50 Sn 118,710(1)	Antimoine 51 Sb 121,760(1)	Tellure 52 Te 127,60(1)	Iode 53 I 126,90447	Xénon 54 Xe 131,29(1)
Thallium 81 Tl 204,3835	Plomb 82 Pb 207,2(1)	Bismuth 83 Bi 208,98040	Polonium 84 Po (209)	Astate 85 At (210)	Radon 86 Rn (222)

- Type P :
 - Bore
 - Aluminium
- Type N :
 - Azote
 - Phosphore

Les atomes doivent se retrouver en
site substitutionnel de C ou Si

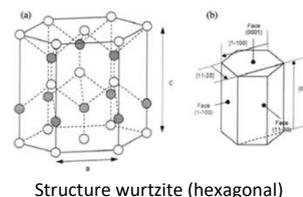


Spécificité du GaN

GaN : croissance

→ Enjeu est l'accord de maille entre le substrat et le GaN

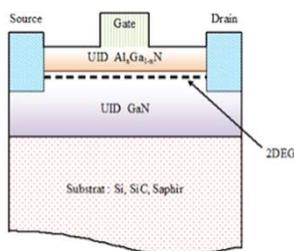
- Substrat saphir :
 - désaccord de maille de 16%
 - fort désaccord de coefficient de dilatation thermique suivant l'axe a avec le GaN
 - Faible conductivité thermique du substrat
- Substrat SiC :
 - Bonne conductivité thermique
 - 96,5% d'accord de maille
 - Très onéreux & procédure de croissance délicate
- Substrat Si :
 - Symétrie de surface hexagonal (comme le GaN)
 - Peu chère et abondant
 - Désaccord de maille de 17% et coef d'expansion thermique (54%)



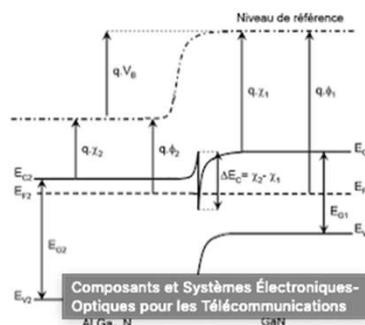
Spécificité du GaN

GaN un composant latéral

- HEMT a été conçu et réalisé simultanément au sein de deux laboratoires, par Thomson en France et par Fujitsu au Japon en 1980.



structure d'un transistor HEMT $Al_xGa_{1-x}N/GaN$



Diagrammes des bandes après jonction des deux couches qui constituent l'HEMT $AlGaN/GaN$ l'équilibre thermodynamique.



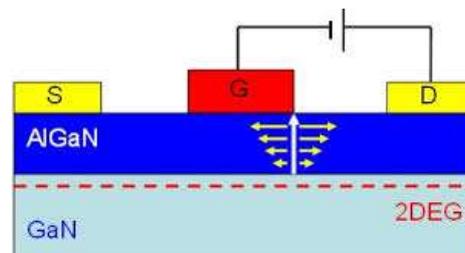
Spécificité
du GaN

GaN un composant latéral

Historique : développement pour les composants et leds à hautes fréquences

Principe

- 2 couches sur Si :
 - GaN (qlq μm)
 - AlGaN (qlq nm)
- Génération d'un gas d'électron 2deg à très hautes mobilité dû à des propriétés
- Composant Planar



Caractéristique principale :

- Naturellement ouvert
- Commutation ultra rapide (qlq ns)
- Limitation de la tension dû à la faible épaisseur de la couche GaN (600V to 1200V...1700V ?)
- Faible coût (wafer 150 to 200mm et bénéficie des infrastructure du Si)

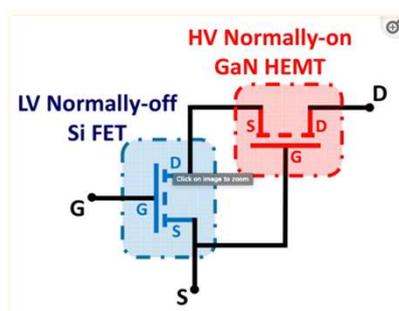


99

Spécificité
du GaN

GaN un composant latéral

Avancé pour le GaN : normally off



Cascode Configuration : Combinaison d'un Silicium et du GaN

- ➔ Augmentation de la complexité du packaging (2 composants matériaux différents)
- ➔ Introduit des effets d'inductances parasites diminue les effets de switch
- ➔ La température de travail est limitée par le Si
- ➔ Recherche d'un véritable GaN normally off



100

Spécificité
du GaN

GaN et ses dopants

- Le dopage de type n est assez facile et utilise le Si comme élément dopant. Cependant à forte concentration lors d'épitaxie une dégradation de surface est observé → Orientation vers le Ge
- Le dopage type p est plus complexe car les énergies d'ionisation sont élevées → N_{rj} de fermi éloignée de la bande de valence. Le meilleur élément reste le Mg car il possède un rayon covalent proche du Ga, mais son incorporation reste difficile de 0,1 à 1%

Espèce	Type de dopant	Energie d'ionisation (E _{ion}) dans le GaN (meV)
Si	n	30
Ge	n	19
O	n	30
Ca	p	169 (260)
Mg	p	170 (210-260)
Be	p	90 (230-550)



Avantages &
inconvénients

Si

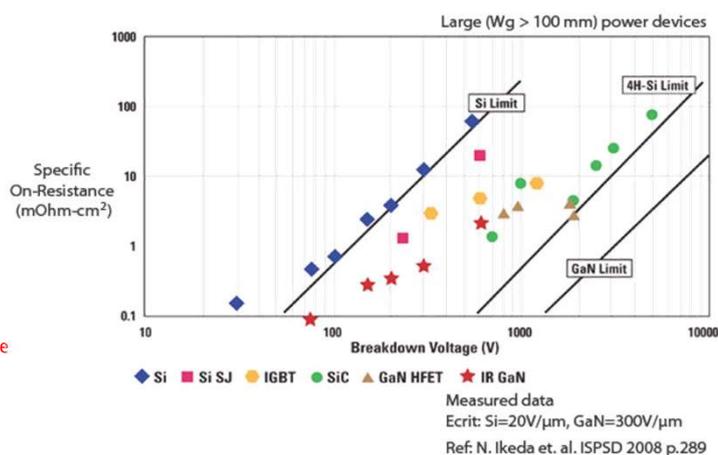
- 😊 Faible coût
- 😊 Composants mature
- 😊 Grande fiabilité
- ☹ Limitation du matériau
- ➔ Maturité du marché

SiC

- 😊 Tenue en tension et faible Ron
- 😊 Bonne conductivité thermique
- 😊 Substrat massif
- ☹ Coût de fabrication
- ➔ Secteurs des HT et faibles Fréquence

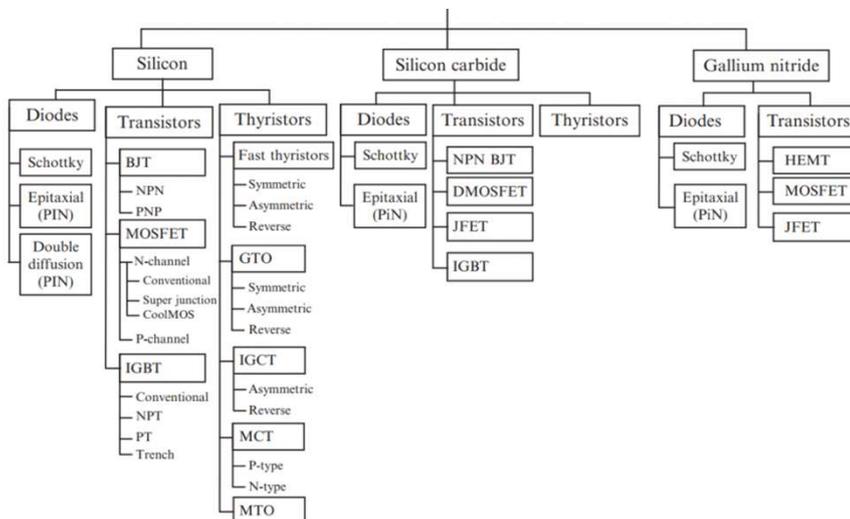
GaN on Si

- 😊 faible Ron
- 😊 Faible coût
- 😊 Hétérojonction → gde fréquence commutation
- ☹ Limitations de la tension
- ➔ Secteurs des bases tensions et hautes fréquence



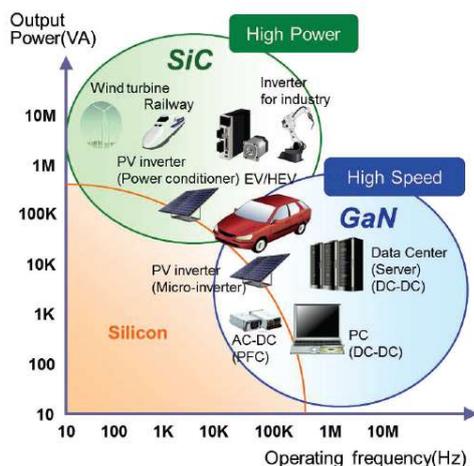
Avantages & inconvénients

Résumé des composants de puissance vs matériau



Comparatif des technos

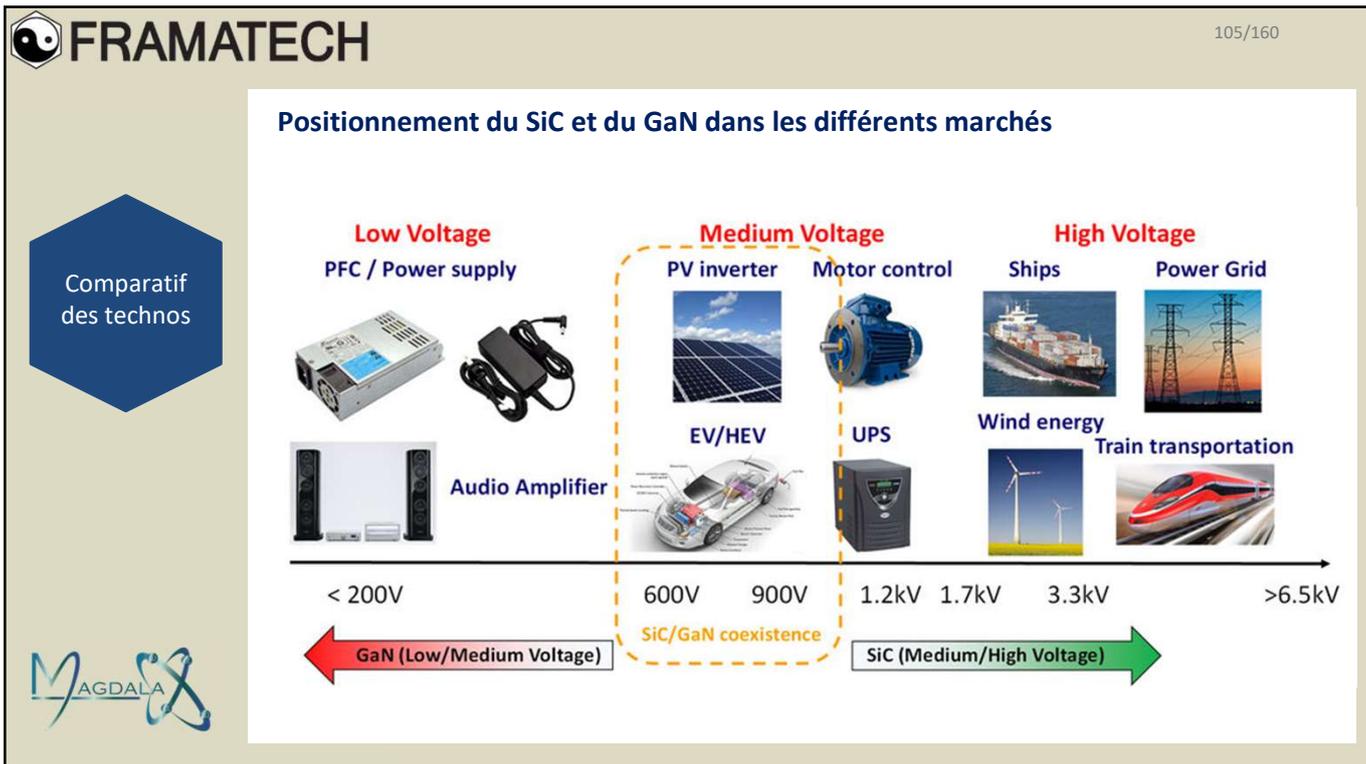
Positionnement du SiC et du GaN dans les différents marchés



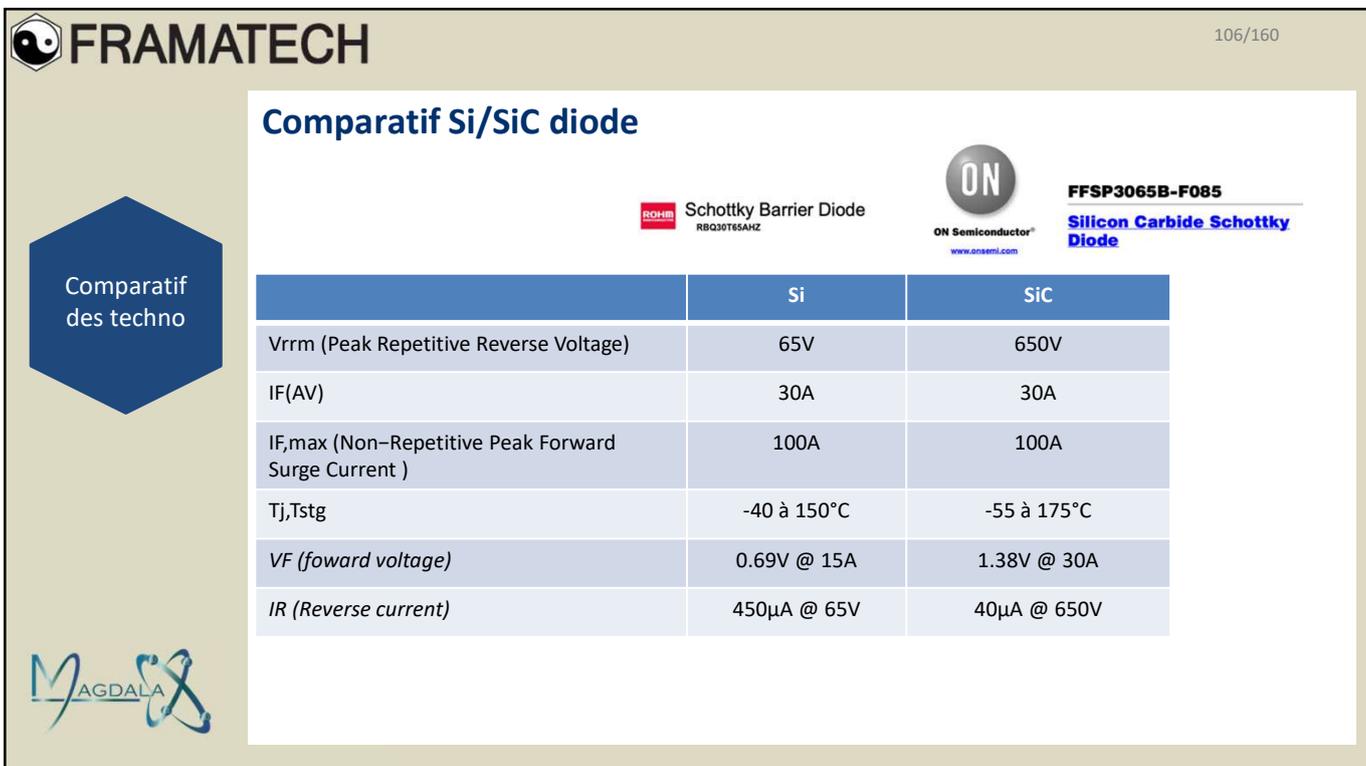
SiC pour les fortes tension (>1kV) et forts courants = marché de niche

GaN sur Si hautes fréquence à tension moyenne (<1kV et 100A) = marché de masse





105



106

FRAMATECH 107/160

Comparatif
des technos

**Comparatif Si/SiC/GaN
mosfet**

	Si IPW90R120C3	SiC C2M0080120D	GaN GAN063-650WSA
V _{dsmax}	900V	1200V	650V
V _{gsmx}	-20/20V	-10/25V	-20/20V
I _D	36A	36A	34.5A
I _D (pulse)	96A	80A	150A
T _j ,T _{stg}	-55 à 150°C	-55 à 150°C	-55 @ 175°C
R _{DS(on)}	120mOhm	80mOhm	60mOhm
Q _{G(on)}	270nC	62nC	15nC
t _{d(on)} Turn-on delay time	70ns	11ns	57ns
T _r Rise time	20ns	20ns	10ns
T _f Turn-off delay time	400ns	23ns	88ns

107

FRAMATECH

**MÉTHODE DE
FABRICATION
POUR GRAND
GAP**

Encapsulation

108

FRAMATECH **MAGDALA**

MÉTHODE DE FABRICATION POUR GRAND GAP



Etape fabrication d'un S.C

109

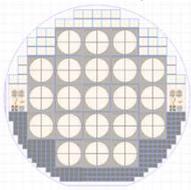
FRAMATECH 110/160

Etapes de fabrication

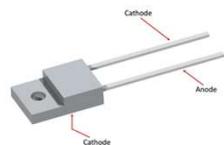
Fabrication d'un composant S.C

➤ Les grandes phases de fabrications d'u composant S.C

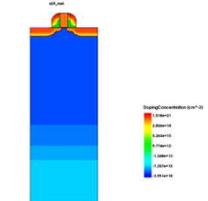
Simulation



Fabrication



Conception Masque

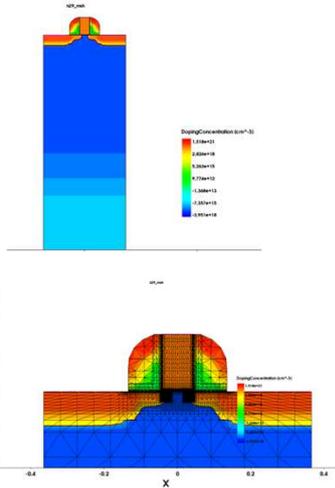


110

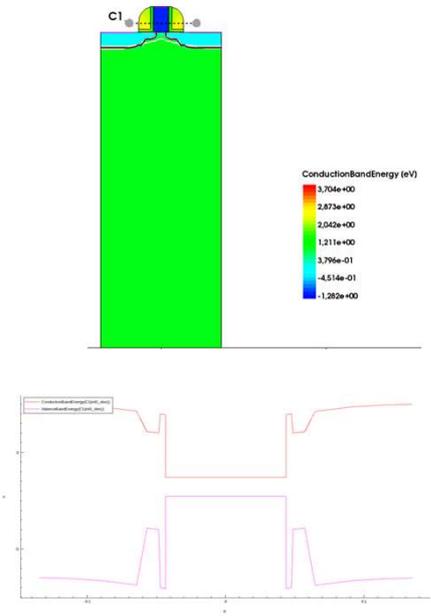


Simulation d'un composant S.C

➤ Simulation F.E.M : Sentaurus, Silvaco, etc...



Résolution des équations de continuité + ajout d'équations de analytiques



Simulation d'un composant S.C

➤ Résolution des équations de continuité + ajout d'équations de analytiques

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R(n, p) - \frac{1}{q} \nabla \cdot (-qn\mu_n \nabla \phi - k_B T \mu_n \nabla n)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R(n, p) - \frac{1}{q} \nabla \cdot (qn\mu_p \nabla \phi - k_B T \mu_p \nabla p)$$

$$\Delta \phi = -\frac{\rho(x, y, z)}{\epsilon_0 \epsilon_{sc}}$$

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p \left(n + n_i \exp\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right) \right) + \tau_n \left(p + n_i \exp\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right) \right)}$$

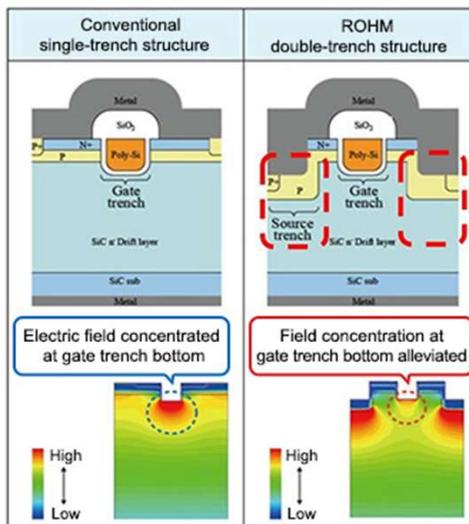
$$R_{Auger} = (C_n n + C_p p)(np - n_i^2)$$

- n, p sont les concentrations des électrons et des trous
- Gn et Gp la génération des porteurs
- R(n,p) la recombinaison des porteurs
- q la charge élémentaire
- μ_n et μ_p les mobilités
- T la température
- k_B la constante de Boltzmann
- ϕ le potentiel électrique
- ρ la densité de charge
- ϵ_0 la permittivité du vide
- ϵ_{sc} la permittivité du S.C



Simulation d'un composant S.C

➤ Exemple de simulation FEM pour l'optimisation de composant



Etapes de fabrication

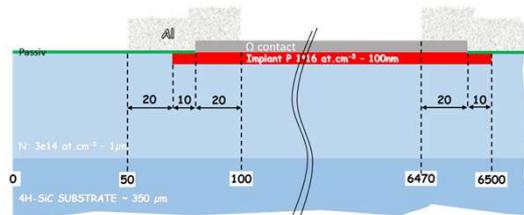
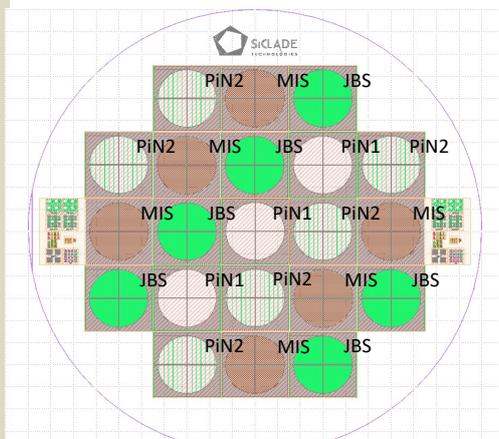


113

Etape de création du masque de d'un composant S.C

➤ Création des différents niveaux de masques

Mask levels	Name	Type	Comments
1	Zero	Passivation	Alignment marks for implantation level
2	P-plus	Passivation	Definition of the P+ regions
3	Passiv1	Passivation	First step of the passivation and Ohmic contact self-alignment
5	Meta1_MIS	Metallization	Ohmic contact only for MIS structure
6	Meta2_Recharge	Metallization	Metal layer for wirebonding interconnexion



Etapes de fabrication



114

Etapes de fabrication

Fabrication en salle blanche

- Développé en 1960 par Willis Whitfield : Prise en compte de nombreux paramètres atmosphériques dont la température, l'hydrométrie, la concentration de poussière, taux de renouvellement d'air



Particules par mètre cube (concentrations maximales admissibles en particules de taille égale ou supérieure à celles données ci-dessous)

Classe	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
ISO 1	10	d	d	d	d	e
ISO 2	100	24	10	d	d	e
ISO 3	1 000	237	102	35	d	e
ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	d, e
ISO 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO 7	c	c	c	352 000	83 200	2 930
ISO 8	c	c	c	3 520 000	832 000	29 300
ISO 9	c	c	c	35 200 000	8 320 000	293 000

- ➔ Pilier de l'industrie de la microélectronique
- ➔ Contrôler au maximum l'environnement de fabrication

c : Les concentrations maximales admissibles ne s'appliquent pas dans cette partie du tableau car elles sont très élevées.

d : Les limites du prélèvement et les limites statistiques sur ces faibles concentrations rendent la classification inappropriée.

e : Les limites des mécanismes de prélèvement, dues à la fois aux faibles concentrations et au prélèvement de particules de tailles supérieures à 1 µm, rendent la classification inappropriée à cause des particules potentiellement non mesurées car retenues à l'intérieur du système de prélèvement.



Etapes de fabrication

Enjeux de la conception des composants

- Le design est une phase mettant en place toutes les étapes technologiques nécessaires à la fabrication du composant.
- Les différentes étapes technologiques représentent un procédé simple et unique, qui doit absolument être respecté à l'instar de la recette de cuisine en pâtisserie



	6 oeufs + 2 blancs	Etape 1 Préchauffer le four à 180° (thermostat 6).
	310 g de sucre en poudre	Etape 2 Battre 4 oeufs en omelette avec 160 g sucre et faire cuire 10 minutes au bain-marie.
	160 g de Poudre d'amande	Etape 3 Laisser refroidir et ajouter la poudre d'amandes, la farine, 50 g de beurre fondu et les blancs montés en neige.
	40 g de farine	Etape 4 Beurrer un moule, y verser la préparation et enfourmer pendant 40 minutes.
	150 g de beurre	Etape 5 Démouler et laisser refroidir le biscuit.
	1 cuillère à soupe d'extrait de café liquide	Etape 6 Dans une casserole, porter l'eau et 75 g de sucre.
	200 g de crème	Etape 7 Verser dans un saladier avec 2 jaunes d'oeufs battues en omelette. Ajouter le café et 100 g de beurre. Réserver la crème de café.
	200 g de chocolat noir	Etape 8 Dans une casserole, porter la crème à ébullition et y incorporer le chocolat.
	75 cl d'eau	Etape 9 Laisser refroidir et mouiller 2 cuillères à soupe de rhum.
	5 cl de rhum	Etape 10 Dans la casserole, faire un sirop avec 75 cl d'eau, 75 g de sucre et 5 cl de rhum.

Ustensiles



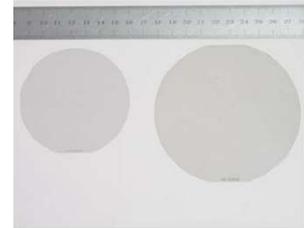
Etapes de fabrication

Enjeux de la conception des composants

- Plusieurs types et plusieurs tailles de wafers SiC



Wafer SiC type n de 1 à 6 pouces avec une résistivité de 0.015~0.028 $\Omega \cdot \text{cm}$



Wafer HPSI SiC résistivité $\geq 1E7 \Omega \cdot \text{cm}$



Etapes de fabrication

Différentes étapes de fabrications : ex diode PIN SiC

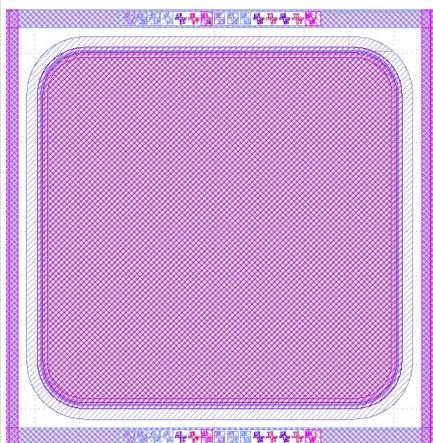
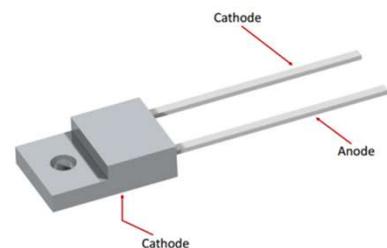


Image du masque d'une diode



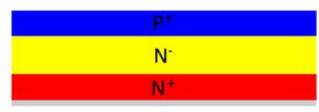
Diode Pin 3.3kV/20A IBS packagée



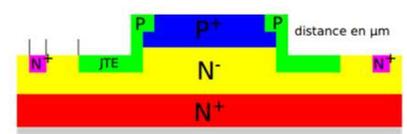
Etape de fabrication

Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

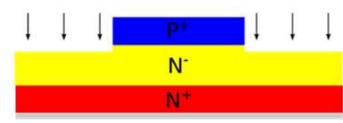
01 - Gravure RIE des croix d'alignement



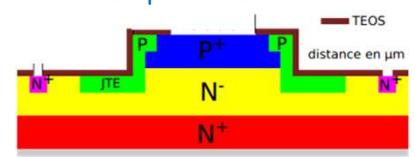
03 - Dopage des zones périphériques



02 - Gravure RIE des zones périphériques



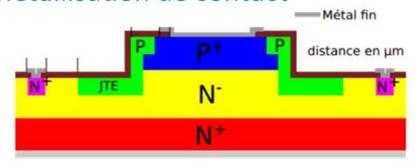
04 - Passivation primaire



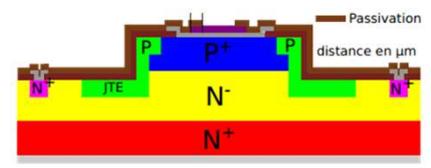
Etape de fabrication

Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

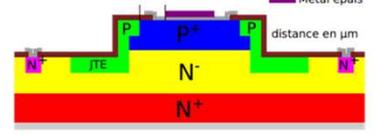
05 - Métallisation de contact



07 - Passivation secondaire



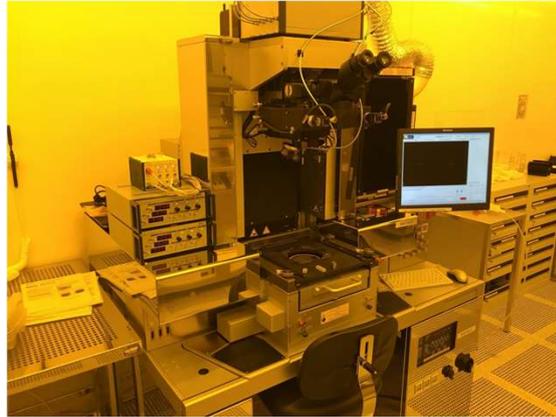
06 - Métallisation épaisse - bonding



Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

➔ Photolithographie

Etape de fabrication



Machine de photolithographie positionnée en salle blanche dans une zone spéciale avec une lumière jaune dus aux résines



Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

➔ Photolithographie

Etape de fabrication

Résine Photorésiste

Nickel déposé

Substrat

SiC

Masque

$h\nu$

Negative

Positive

Exposition

Développement

Gravure

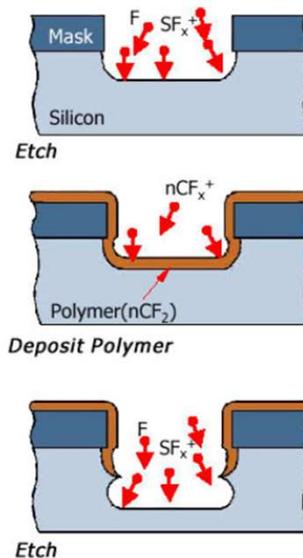
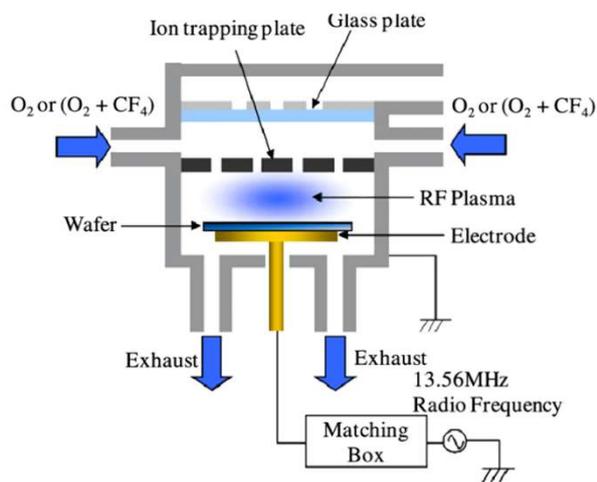
Relèvement



Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

➔ Gravure RIE (reactive ion Etching)

Etape de fabrication



Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

➔ Implantation ionique

Etape de fabrication

> Principe:

- > L'espèce dopante est ionisée (source d'ions)
- > Puis sélectionnées (spectrographe de masse)
- > Puis accélérée (champ électrique)
- > Le faisceau d'ions balaye la plaquette

Principaux ions utilisés pour le dopage du Si et SiC

	Type p	Type n
SiC	5 Bore 10.81	7 Azote 14.007
Si	13 Aluminium 26.982	15 Phosphore 30.974
		33 Arsenic 74.922
		51 Antimoine 121.76

> Différences entre le dopage du Si et SiC

- > Types des dopants
- > Températures d'implantation (jusqu'à 1000°C pour le SiC)
- > Masque d'implantation:
 - Résine pour le Si
 - Oxyde pour le SiC si à chaud

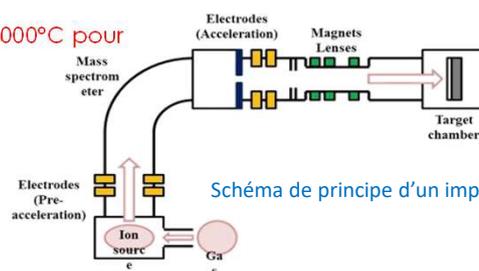


Schéma de principe d'un implanteur

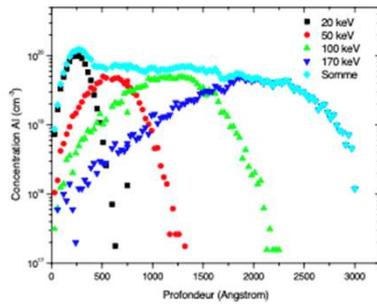
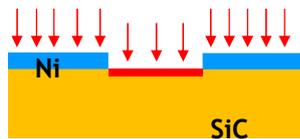




Etape de fabrication

Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

➔ Possibilité de diffusions de dopants



Détermination du profil d'implantation par SRIMS pour la création d'une jonction PN en SiC

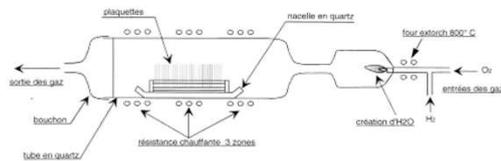


Etape de fabrication

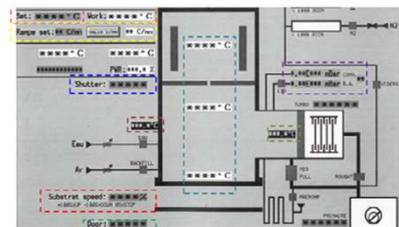
Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

Diffusion/activation de dopants

- Si : 1150°C
- SiC : à partir de 1650°C jusqu'à 1800°C ➔ Protection
- GaN : 1400°C ➔ Protection



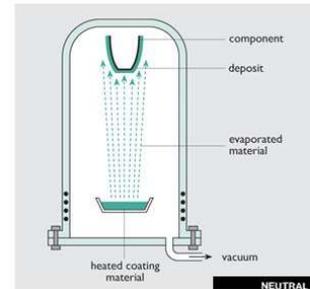
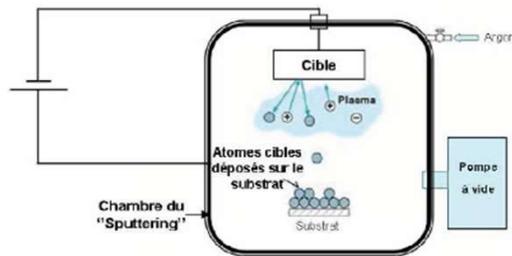
- Rampes de chauffes
- Température à atteindre
- Température de travail
- Température du gaz
- Température de l'eau
- Température du substrat pour trois positions du porte substrat
- Position des écrans thermiques
- Position de la porte
- Position du substrat



Etape de fabrication

Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

- Dépôt d'isolant SiO₂ ou Si₃N₄
- Dépôt de métaux
- Passivation secondaire

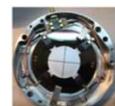
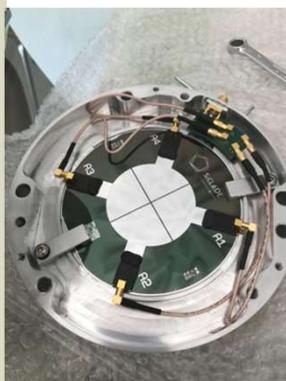


127

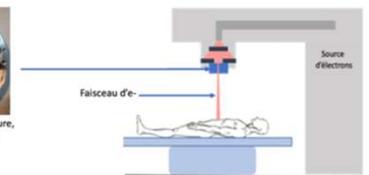
Etape de fabrication

Autre exemple : détecteur d'électron pour le médical

4 Diodes PIN en SiC fabriquées sur un même wafer



Capteur-moniteur SiCure, transparent aux e-



128




MÉTHODE DE FABRICATION POUR GRAND GAP

Les acteurs du marché SiC & GaN

129



130/160

Marché des plaquettes pour SiC

Les acteurs des wafers SiC à l'internationale

➔ Marché dominé par les USA et l'Asie

SiC Wafer Market
Market Size in USD Billion
CAGR 19.04%

Year	Market Size (USD Billion)
2023	USD 0.99 B
2028	USD 2.38 B

Source : Mordor Intelligence

↓ Share

Période d'étude	2018 - 2028
Taille du Marché (2023)	USD 0.99 milliard(s)
Taille du Marché (2028)	USD 2,38 milliards
TCAC(2023 - 2028)	19.04 %
Marché à la Croissance la Plus Rapide	Asie-Pacifique
Plus Grand Marché	Asie-Pacifique

Principaux acteurs

*Avis de non-responsabilité : les principaux acteurs sont triés sans ordre particulier

Leaders du marché des plaquettes SiC

- 1 Wolfspeed Inc.
- 2 II-VI Incorporated
- 3 Xiamen Powerway Advanced Material Co. Ltd
- 4 STMicroelectronics (Norstel AB)
- 5 Showa Denko KK

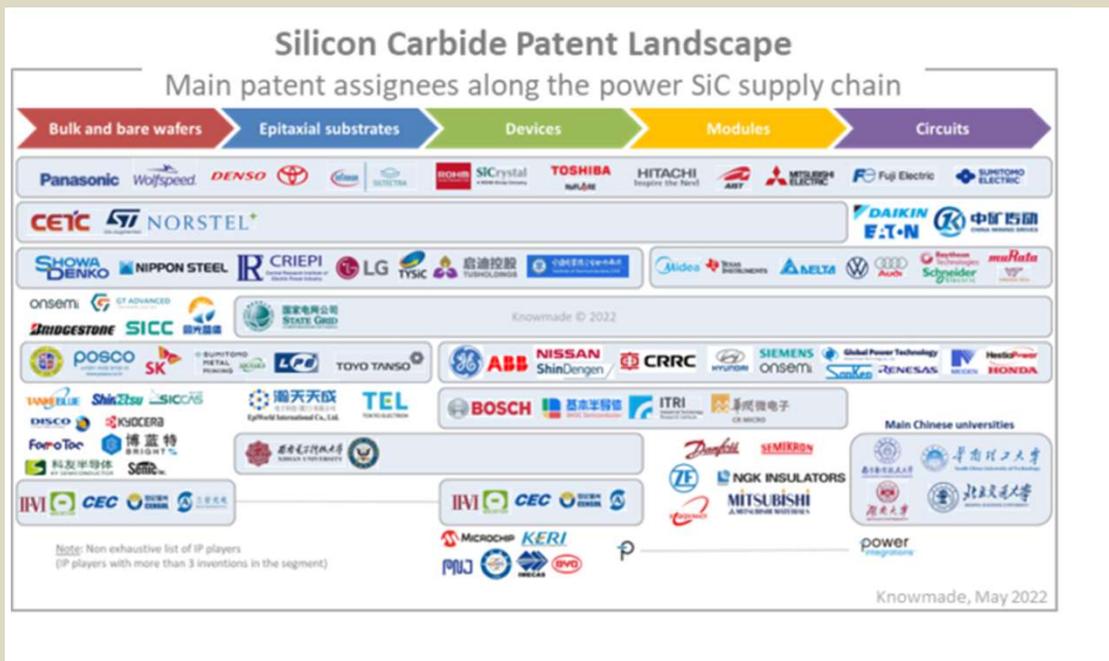


130

Acteurs du SiC



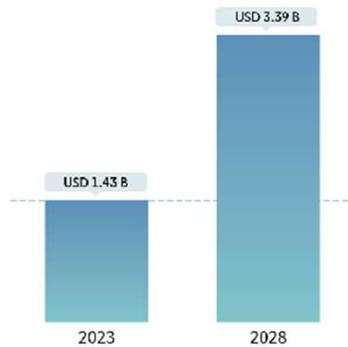
Acteurs du SiC



Acteurs du GaN

Le marché du GaN orienté RF

RF GaN Market
Market Size in USD Billion
CAGR 18.76%



Source : Mordor Intelligence

Période d'étude	2018 - 2028
Taille du Marché (2023)	USD 1,43 milliard(s)
Taille du Marché (2028)	USD 3,39 milliards
TCAC(2023 - 2028)	18.76 %
Marché à la Croissance la Plus Rapide	Asie-Pacifique
Plus Grand Marché	Amérique du Nord

Principaux acteurs



*Avis de non-responsabilité : les principaux acteurs sont triés sans ordre particulier

133

Acteurs du GaN

Le marché du GaN continue d'évoluer, en particulier avec le développement de composants en GaN à large bande pour les applications de communication sans fil de nouvelle génération comme la 5G.

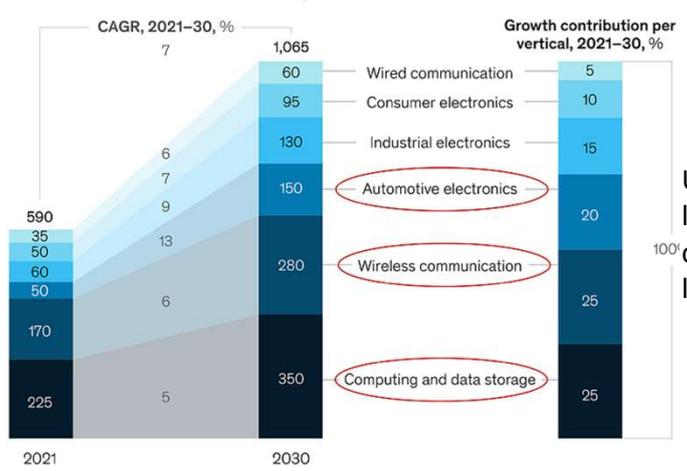
- **Cree, Inc.** : Cree est un acteur majeur dans le domaine du GaN, offrant des produits pour diverses applications, notamment l'éclairage LED et l'électronique de puissance.
- **Qorvo, Inc.** : Qorvo est une entreprise qui propose des composants RF en GaN pour les applications de communication sans fil, notamment dans les réseaux 5G.
- **MACOM Technology Solutions** : MACOM est un fabricant de dispositifs RF en GaN pour les applications de communication, la défense et l'aérospatiale.
- **Infineon Technologies** : Infineon propose des produits en GaN pour des applications telles que l'électronique de puissance, les chargeurs sans fil et les systèmes d'alimentation.
- **NXP Semiconductors** : NXP est actif dans le domaine du GaN pour les applications de communication sans fil, en particulier dans les secteurs de l'automobile et de l'Internet des objets (IoT).
- **Analog Devices, Inc.** : Analog Devices fabrique des composants en GaN pour les applications RF et micro-ondes.
- **GaN Systems** : GaN Systems est spécialisé dans les transistors en GaN et les modules de puissance.
- **EPC (Efficient Power Conversion)** : EPC fabrique des dispositifs de puissance en GaN pour diverses applications, y compris l'électronique de puissance et l'alimentation.
- **Nichia Corporation** : Nichia est un acteur clé dans le domaine de l'éclairage LED en utilisant des semi-conducteurs en GaN.
- **Sumitomo Electric Industries** : Sumitomo est un important fabricant de matériaux en GaN et de dispositifs pour les applications RF et de puissance.

134



Filière du semi-conducteur

Global semiconductor market value by vertical (\$ billion)

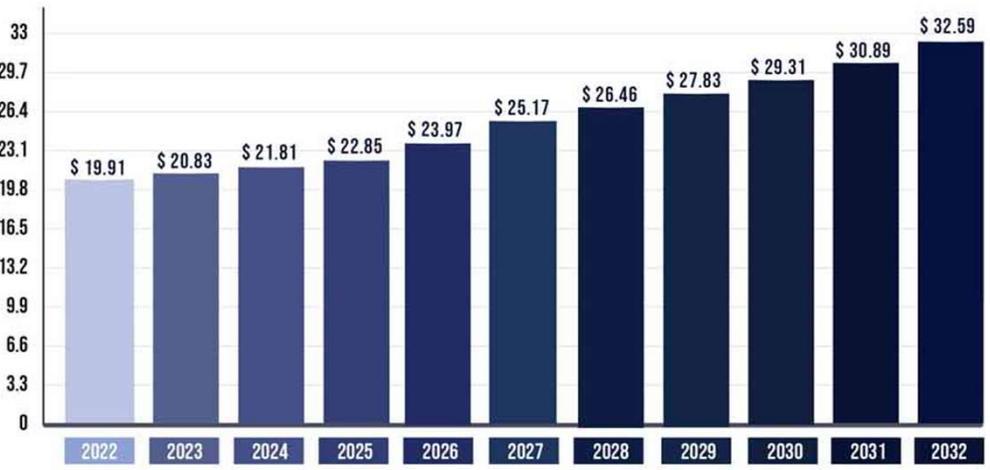


Une part du marché de l'industrie du semi-conducteur correspond à la partie automotive

Source: McKinsey & Company, SPEAR Invest



PRECEDENCE RESEARCH POWER ELECTRONICS MARKET SIZE, 2022 TO 2032 (USD BILLION)



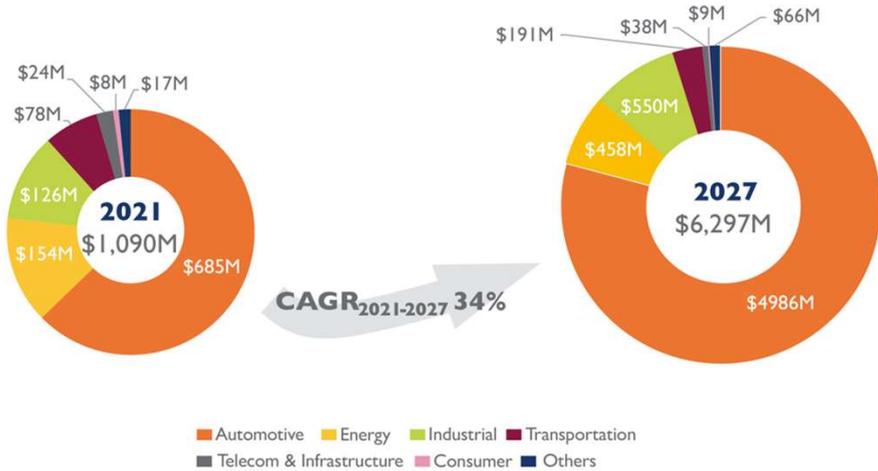
Source: www.precedenceresearch.com





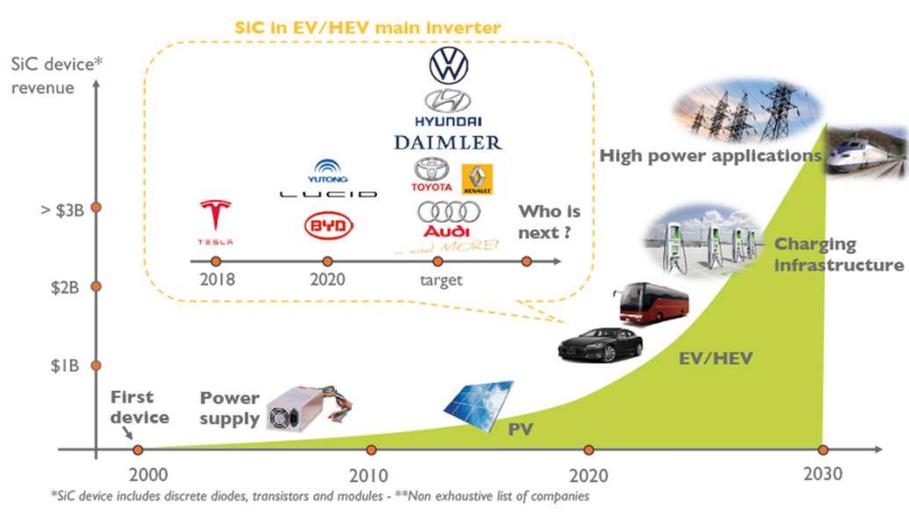
Marché du SiC sur 2021-2027 divisé par segments

(Source: Power SiC 2022 report, Yole Développement, 2022)



Roadmap pour le SiC

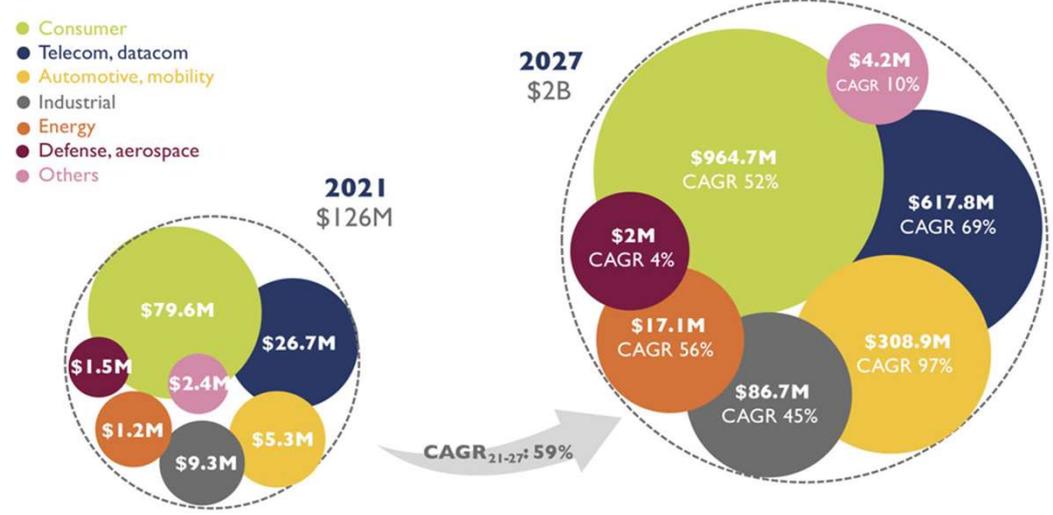
(Source: Power SiC: Materials, Devices and Applications 2020, Yole Développement, November 2020)



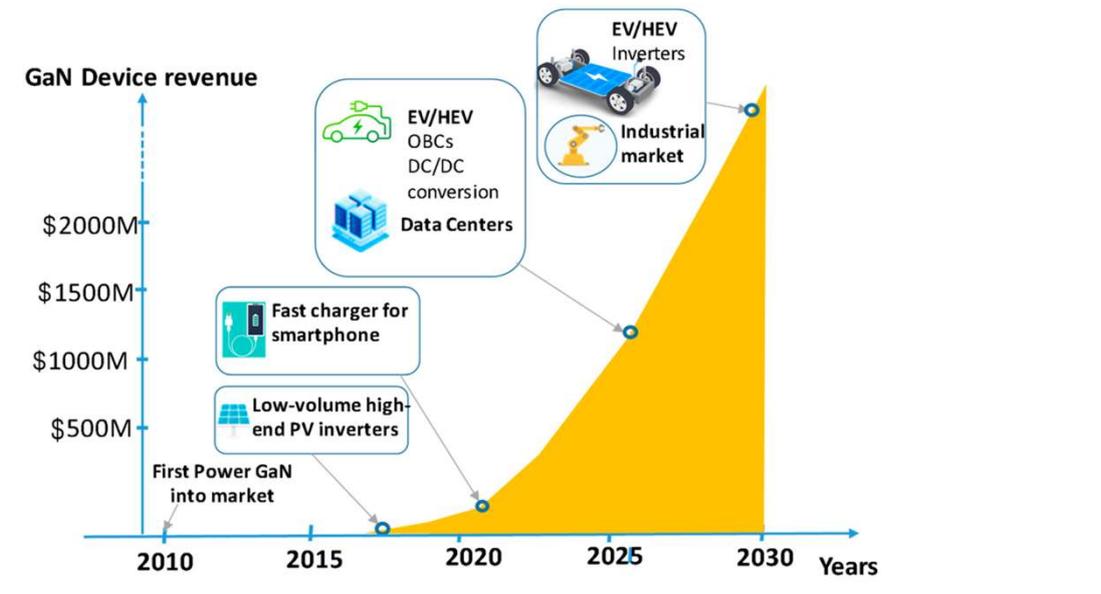


Marché du GaN sur 2021-2027 divisé par segments

(Source: Power GaN 2022 report, Yole Développement, 2022)



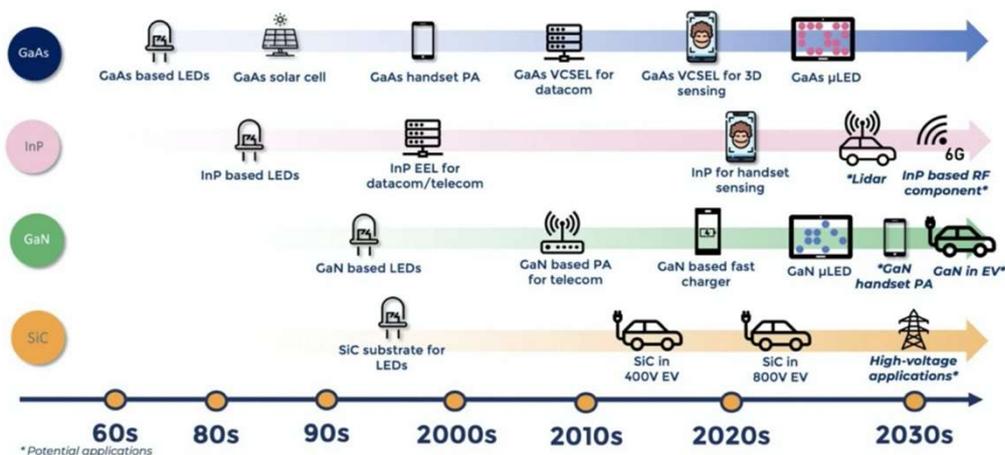
Roadmap pour le GaN



Marché

Evolution des applications Vs Matériaux

Source: Status of the Compound Semiconductor Industry report, Yole Intelligence, 2022



143

Attentes des
marché

Applications	Drivers	Coût	Rendement	Fiabilité	Sureté de fonction	Taille	Poids
Industrie		+++	++	+	+	++	+
Electronique grand-public		+++	+	+	+	++	+
Telecom & Informatique		+++	++	+	+++	+	+
Photovoltaïque		++	+++	++	+	+	+
Eolien		++	+++	++	+	++	++
Véhicules électriques		+++	+	++	+++	+++	++
Ferroviaire		+	++	+++	+++	+++	++
Aéronautique		+	++	+++	+++	++	+++
Eclairage LED		+++	++	+++	+	++	+
Médical		+	+	+++	+++	++	+



144



FRAMATECH



MAGDALA



ENJEUX DES CDP
DANS LES
MARCHÉS



Cas de l'aéronautique

145



FRAMATECH

146/160



Marché de
l'Aéronautique

Présentation des enjeux pour l'aéronautique

- Intégration de système électrique à la place de système hydraulique
 - gain de place, de poids et de maniabilité, ex : Classiquement les avions possèdent trois circuits hydrauliques, dans l'A380 un de ces trois a été remplacé par un circuit électrique, dans le Boeing 787 les réseaux pneumatiques ont été remplacés par des réseaux uniquement électriques.
- Evolution dans des besoins électriques :
 - 1950 Caravelle SE 210 consommait environ 27kW avec une distribution électrique de 28V en continu
 - 1980 l'Airbus A320 consommait 300kVA
 - Début 2000 l'A380 possède une puissance installée de 600kVA
 - Prévission sur le Boeing 787, la puissance installée est aujourd'hui de 1MVA.

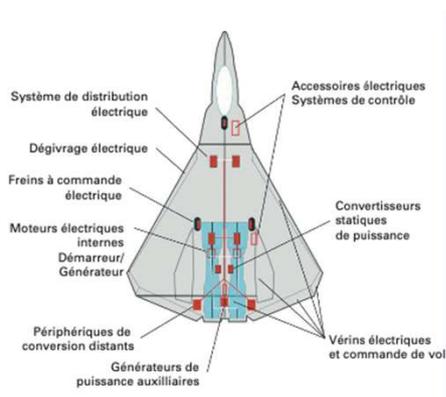


MAGDALA

146

Marché de
l'Aéronautique

Présentation des enjeux pour l'aéronautique



Concept d'un avion plus électrique



Marché de
l'Aéronautique

Présentation des enjeux pour l'aéronautique

Avion hybride nouveaux constructeurs Français



Présentation au salon du Bourget 2023 les avions électrique hybride avec de nouveaux acteurs sur le marché :

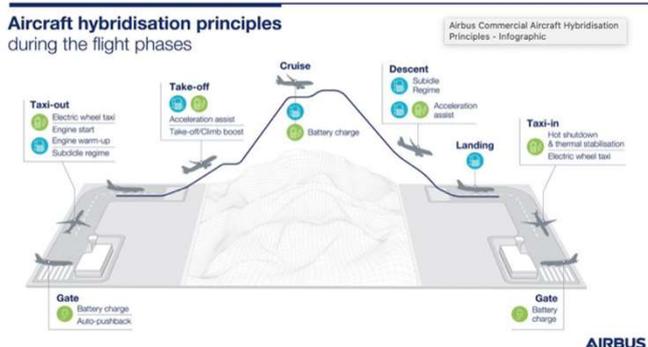
- Cassio l'avion de VoltAero : 5 personnes sur 1200km
- Era d'Aura Aero avion hybride-electrique de 19 places et 8 moteurs sur 1600km



Marché de l'Aéronautique

Présentation des enjeux pour l'aéronautique

Avion hybride Airbus



Annonce d'un partenariat entre Airbus et ST. Les deux entreprises vont collaborer pour développer des composants de puissance plus efficaces et plus légers, essentiels à la fabrication d'avion à propulsion hybride et les futurs ADAV, avion à décollage vertical, électriques.



Marché de l'Aéronautique

Présentation des enjeux pour l'aéronautique

➤ Sur les futurs modèles d'avions plus électriques, les concepteurs envisagent des conversions HVDC/DC à partir de l'unité appelée BBCU

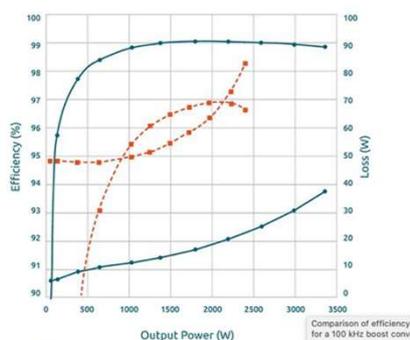
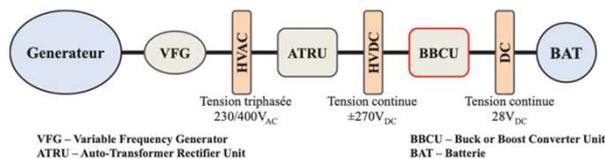


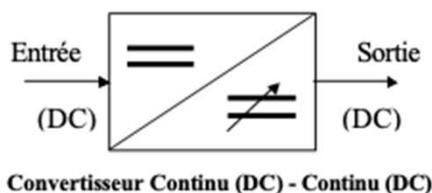
Figure 2: Comparison of efficiency between Si and GaN for a 100 kHz boost converter. (Image source: Nexperia)



Marché de l'Aéronautique

Principe Conversion DC-DC : le hacheur

Le hacheur ou convertisseur continu-continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne. C'est l'analogie, pour les sources de tensions continues, du transformateur utilisé en régime alternatif.



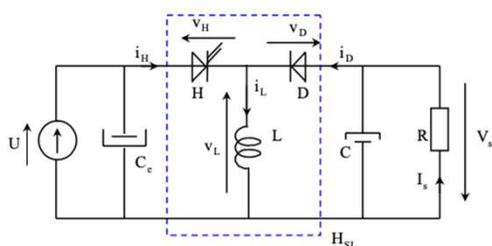
Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur. Dans le cas contraire, il est dit survolteur. Il existe des hacheurs capables de travailler des deux manières (Boost-Buck).



Marché de l'Aéronautique

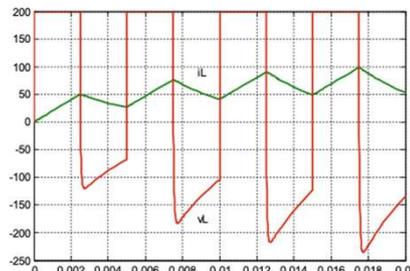
Hacheur à accumulation d'énergie : Les hacheurs à accumulation d'énergie permettent le transfert d'énergie entre deux sources dynamiques de même nature. L'énergie est dans un premier temps transférée de la source vers l'élément de stockage (condensateur ou inductance), et qui la restitue à la charge dans un deuxième temps. On distingue deux types d'hacheurs :

Hacheur à stockage inductif (Buck and Boost)



$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} U$$

Ce montage peut abaisser ou élever la tension d'entrée en agissant sur le rapport cyclique. La tension de sortie est négative « montage inverseur ».



ENJEUX DES CDP
DANS LES
MARCHÉS



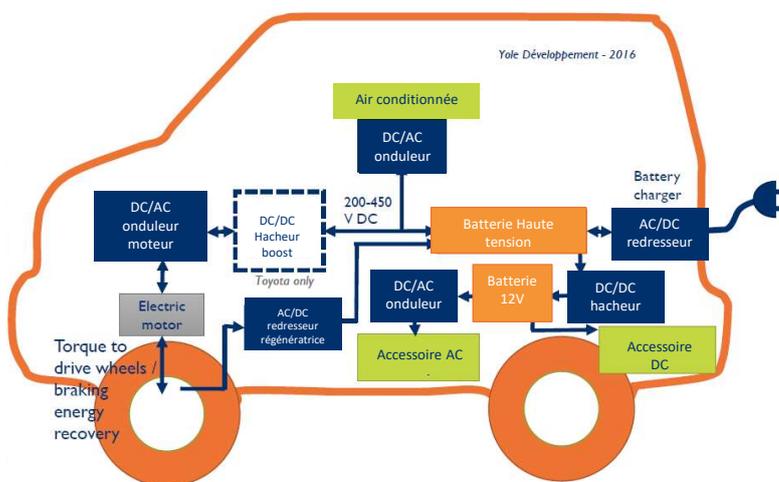
Cas des voitures hybride et électrique

153



EDP dans le secteur de l'automobile

- Le GaN et le SiC sont les candidats pour les futurs onduleurs et redresseur dans le EV/HEV
- Technologiquement parlant le SiC est utilisé pour les onduleurs de puissance et le GaN est mieux adapter pour des puissances + faibles pour hacheur et redresseur
- Mais le choix n'est pas aussi manique in et dépend de plusieurs paramètres
- Le SiC peut être également être implémenter dans des systèmes faible puissances dû a un manque de maturation technologique



Secteur automobile véritable « moteur » pour l'industrie de puissance

154


FRAMATECH
155/160

Marché HEV

EDP dans le secteur de l'automobile

Un facteur essentiel de compétitivité pour l'Automobile...

	Electronique de puissance Valeur moyenne par véhicule(€)	Marché Europe	CA Europe (G€)
2020	110 €	13%	1.6 G€
2030	670 €	100%	10.5 G€

Ambition Fr : 2,5 G€

Le coût de l' Electronique de puissance représente pour un VE:
 > 80% à 110% du coût d'un moteur essence complet

Potentiel de + 4 000 emplois R&D et Production en France en 2030
 (filiale automobile seule)




155


FRAMATECH
156/160

Marché HEV

Onduleur pour les moteurs brushless

Rappel moteur classique : Un courant dans un fil soumis à un champ magnétique, → la génération d'une force magnétique. Dans un moteur électrique, cette force, engendrée par le passage du courant dans les bobinages qui sont soumis au champ magnétique des aimants, est utilisée pour produire une rotation. → Le moteur électrique est convertisseur de nrj électrique en nrj mécanique. Pour créer le "champ tournant" des bobinages, il faut utiliser un système de commutation de manière à faire passer le courant dans ces bobinages dans un ordre précis et au bon moment. Dans un moteur à charbons ou balais, cette commutation des bobinages est réalisée mécaniquement par l'intermédiaire des lamelles du collecteur situées sur l'axe moteur

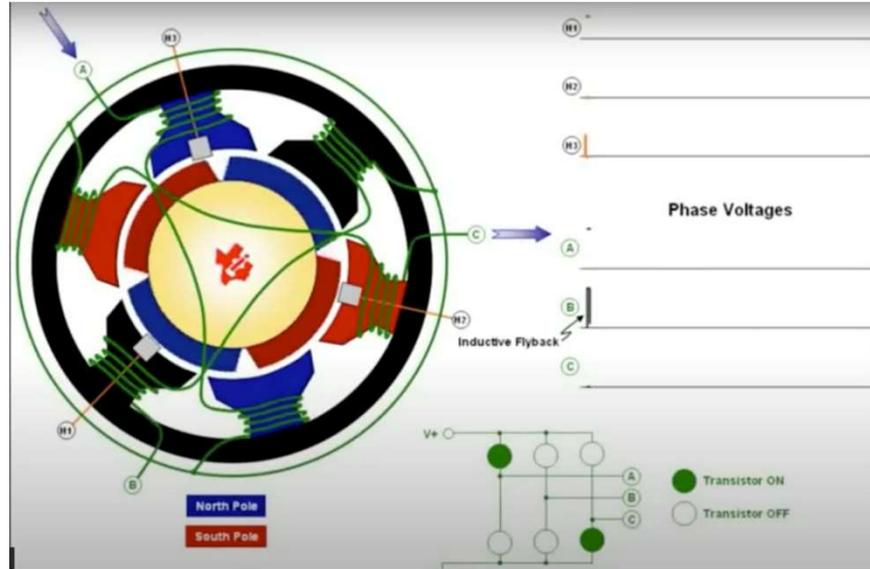
Le moteur brushless; la commutation des enroulements est faite non pas mécaniquement comme précédemment mais de manière électronique par un système complexe appelé "contrôleur". Celui-ci transforme le courant continu en courant triphasé à fréquence variable et va alimenter successivement les bobines du moteur pour créer le champ tournant et donc la rotation qui nous intéresse. On comprend aisément qu'avec ce principe d'alimentation, il est impératif que les bobines soient fixes dans le moteur, et non pas en rotation comme dans un moteur à charbons. Tous les brushless ont donc la même architecture de construction : un stator fixe qui porte les bobines, et un rotor mobile sur lequel les aimants permanents sont collés. Les bobinages peuvent être réalisés de manières différentes : en étoile ou en triangle (appelé également delta), mais vous trouverez toujours trois fils à la sortie du moteur, qui réunissent les bobinages.



156



Onduleur pour les moteurs brushless

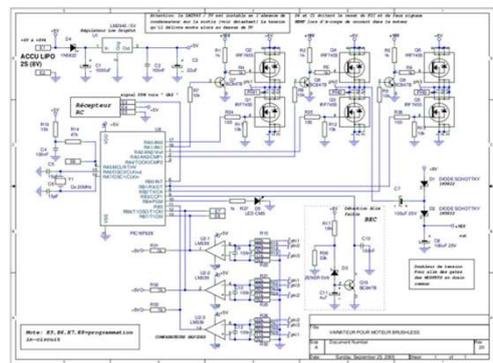
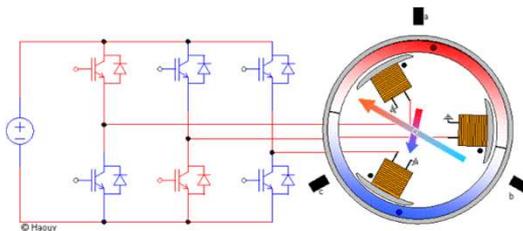
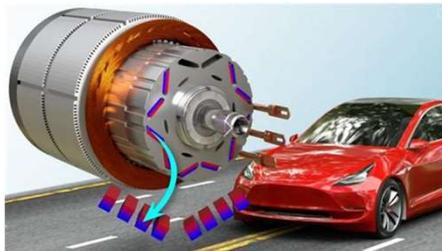


157



Onduleur pour les moteurs brushless : Tesla série S

Réflexion sur la disposition des aimants permanents afin d'augmenter le rendement du moteur →
Brevet Tesla



IRF7455 → MOSFET Si 30V 15A
SCT10N120 → MOSFET SiC 1200V 12A



158

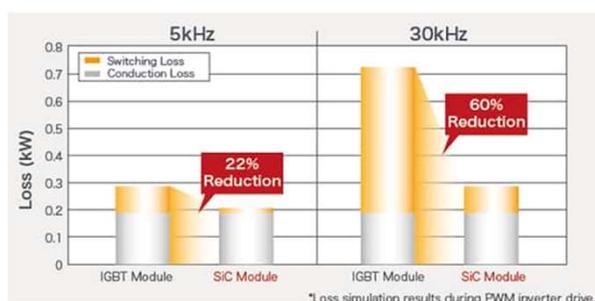


Onduleur pour les moteurs électrique : application SiC & GaN

- Onduleur permet la conversion CC en AC 3phases pour commander le moteur & la conversion CA du freinage régénératif tension CC la batterie.
- Importance du rendement lors du transferts d'nrj pertes entre batterie/moteur et freinage/batterie → La conductivité améliorée et la fréquence de commutation plus rapide des dispositifs SiC vs Si permettent de réduire la perte de puissance, → - de perte th → + de km
- Les MOSFET SiC qui sont 2x plus petits permettent :
 - Haute tension
 - Faible résistance à l'état passant
 - Haute vitesse de commutation
 - Faibles pertes de commutation



Onduleur pour les moteurs électrique : SiC vs Si



Source de l'image : ROHM Semiconductor

Tableau 1 – Densité de puissance de convertisseurs pour différentes gammes de fréquences de fonctionnement

Fréquence de fonctionnement	< 30 kHz	30 à 70 kHz	> 70 kHz
Interrupteur	Si IGBT	Si IGBT	Si MOSFET
Diode	Si Diode	SiC Diode	SiC Diode
Densité de puissance (W/cm ³)	< 10	15	30



Marché HEV

Onduleur pour les moteurs électrique : SiC vs Si



Figure 4: Improvement of performance and size reduction in power train inverter with SiC SBD technology for Formula-E racing car



Figure 2: Potential for SiC power devices in automotive applications

	PIM-IGBT	PIM-SiC
Pertes de conduction	13,33 W	13,6 W
Fréquence de commutation	16 kHz	40 kHz
Pertes à l'allumage Eon	3,8 W	7,22 W
Pertes à l'extinction Eoff	34,66 W	8,34 W
Pertes totales	51,79 W	29,16 W
Tj	137,9°C (Tc = 95°C)	133,6°C (Tc = 110°C)

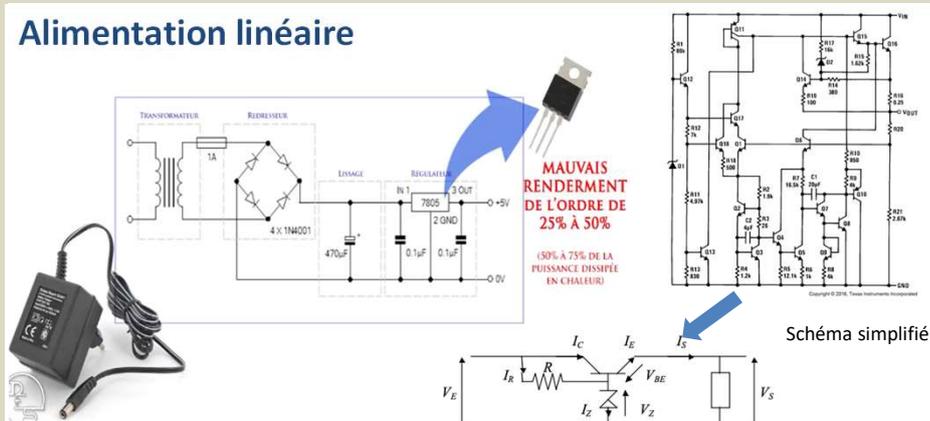
ENJEUX DES CDP DANS LES MARCHÉS



Cas du consommateur : les alimentations à découpage

Marché grand public

Alimentation linéaire



MAUVAIS RENDREMENT DE L'ORDRE DE 25% À 50%
(50% À 75% DE LA PUISSANCE DISSIPÉE EN CHALEUR)

Les éléments fondamentaux utilisés dans une alimentation linéaire sont :

- Un transformateur fonctionnant à 50Hz assure une isolation galvanique et la modification de la valeur efficace de la tension (en général abaisseur).
- Un redresseur à diodes suivi d'un condensateur de filtrage permettent de transformer la tension sinusoïdale issue du transformateur en une tension de valeur moyenne non nulle et ondulante peu.
- Une diode Zener accompagnée d'un montage « ballast » à transistor permettent de fournir une tension régulée en sortie de l'alimentation.



Marché grand public

Alimentation linéaire

Ex : Alimentation linéaire pour ordi : Si on utilisait ce genre de système linéaire pour alimenter un PC qui demanderait 300 W, il faudrait consommer pas loin de 900 W pour que le système fonctionne, avec une différence de 600 W qui partirait en chaleur ! En 50 Hz, il faudrait un gros transformateur, pesant pas loin de 10 kg, pour être capable de fournir 300 W, en plus des 600 W de pertes induites par la régulation, qu'il faudra bien dissiper

Dans un transformateur, la tension est donnée par la relation de Boucherot:

$$V_{eff} = 4,44 * B_{max} * f * S * N$$

- avec:
- B_{max}: valeur admissible de l'induction dans le circuit magnétique (T)
 - f: fréquence de fonctionnement du transformateur (Hz)
 - S: section du circuit magnétique (m²)
 - N: nombre de spires de l'enroulement considéré

Pour diminuer le terme S * N (encombrement), on augmente la fréquence f. L'utilisation de tôles feuilletées (comme dans un transformateur 50Hz) n'est plus possible. Le circuit magnétique est en ferrite. L'augmentation de la fréquence de travail entraîne une diminution considérable du volume du transformateur. Par exemple, si la fréquence passe de 50 Hz à 50 KHz, avec une induction de 0,1 T au lieu de 1 T, le produit S * N est divisé par 100, ce qui, à puissance égale, conduit à une réduction d'encombrement de l'ordre de 10





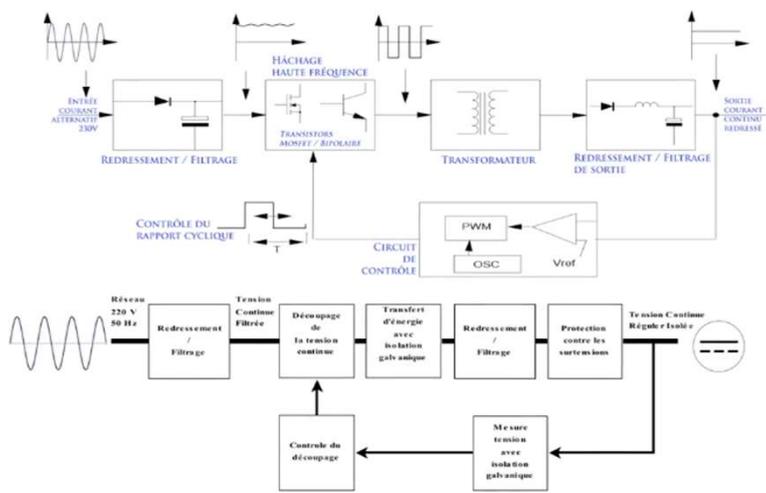
Alimentation linéaire

- Points forts :
 - Faciles à mettre en œuvre
 - Permettent d'obtenir des tensions très stables $\Delta V/V$ d'environ 10-4
 - Très peu perturbatrices pour l'environnement électrique
- Points faibles :
 - Transformateur lourd et volumineux car fonctionnant à 50hz
 - Le transistor « ballast » dissipe de la puissance → utilisation d'un dissipateur encombrant et peut diminuer le rendement de l'alimentation
- Conclusion :
Les alimentations linéaires sont simples, stables peu couteuse mais lourdes, volumineuses et à faible rendement



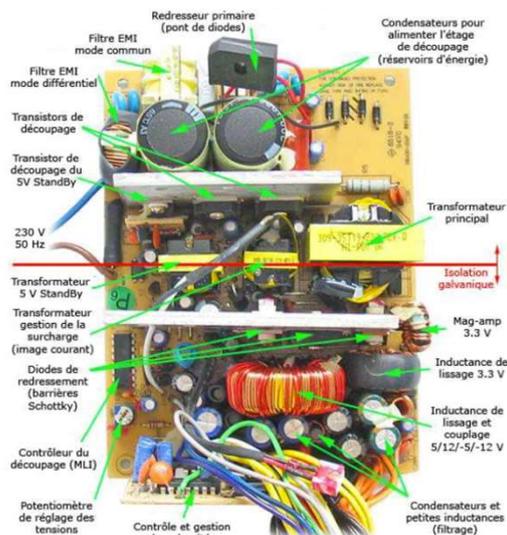
Alimentation à découpage : Synoptique

PRINCIPE D'UNE ALIMENTATION À DÉCOUPAGE



Marché grand public

Alimentation à découpage : LC Power 550 W

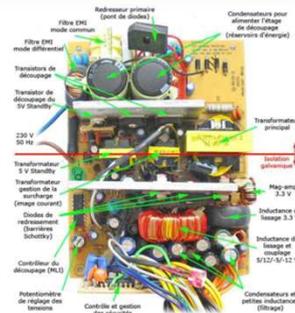
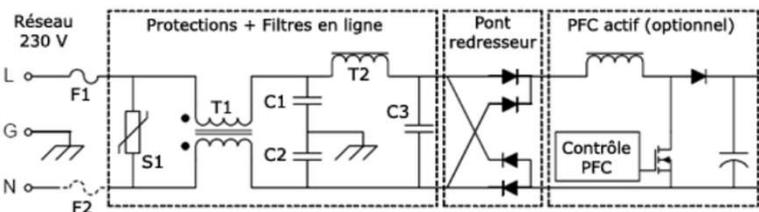


Séparation entre les 2 niveaux du circuits norme IEC60950, séparation galvanique
 → Séparation grâce aux transfo
 → Aux optocoupleurs

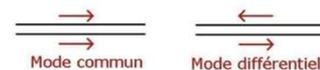


Marché grand public

Alimentation à découpage : 1^{er} étage



- Premier élément : le fusible → Protection du réseau
- Deuxième élément : Varistor S1 → Protection des surtensions
- Troisième élément : le filtre → Blocage des parasites HF; 2 filtres T1 mode commun & T2 mode différentiel.
- Quatrième étage : Pont redresseur → 325V continue non lissé (230V RMS)
- Cinquième étage : module PFC (Power factor Correction) → améliore le pont redresseur supprimant les pics de courants



Marché grand public

Alimentation à découpage : PFC

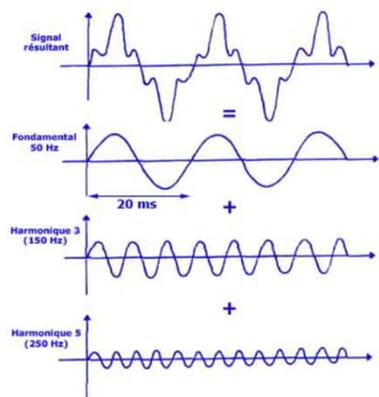
Rappel sur les harmoniques :

- Tension et courant dans un réseau idéal $f=50\text{Hz}$ avec une sinusoïdale parfaite \rightarrow fréquence fondamentale ou harmonique de rang 1
- Réseau normal \rightarrow parasite provenant de fréquence harmonique, i.e. fréquences multiple du 50Hz. Ex harmonique 2 \rightarrow 100Hz, harmonique 3 \rightarrow 150Hz.
- Le premier étage de notre alim est le redressement du courant \rightarrow Harmonique impaire

Tout signal périodique peut être décomposé en Harmonique \rightarrow Transformé de Fourier

Suppression des harmoniques car :

- Ils ne participent pas à l'alimentation de la charge
- Ils surchargent le réseau en faisant transiter des courants inutiles
- Ils provoquent un échauffement des câbles d'alimentation.
- Ils peuvent faire vieillir les éléments branchés sur le réseau
- Ils peuvent perturber les organes de sécurité tels que les fusibles.
- La capacité du réseau diminue suivant l'ampleur des harmoniques

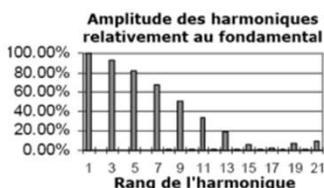
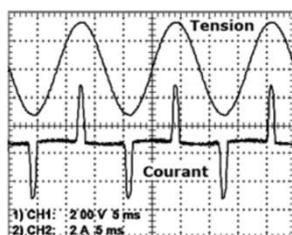


169

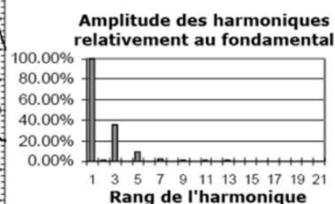
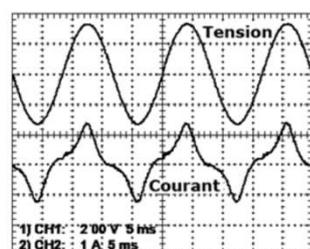
Marché grand public

Alimentation à découpage : PFC

Exemple avec et sans PFC sur une alimentation



Sans PFC \rightarrow Bcp d'harmonique & allure du courant très déformé



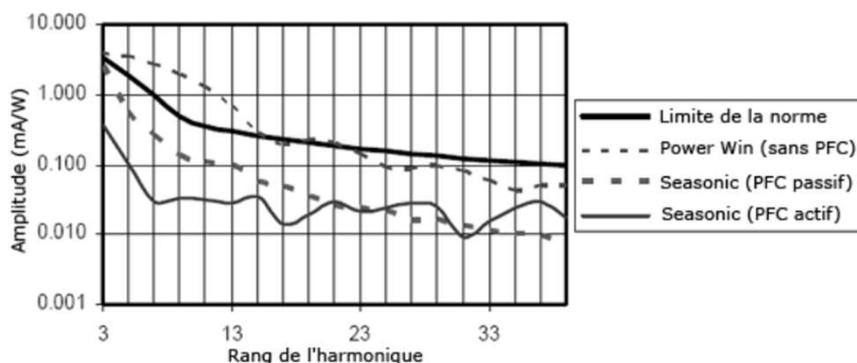
Avec PFC passif \rightarrow onde de courant plus proche d'une sinusoïde

170

Marché grand public

Alimentation à découpage : PFC

Norme IEC61000-3-2 sur la CEM donnant un aperçu des intensité possible en fonction des harmonique. Ex pour 3 appareils de classe D (> 75W mais <600W) de 250W

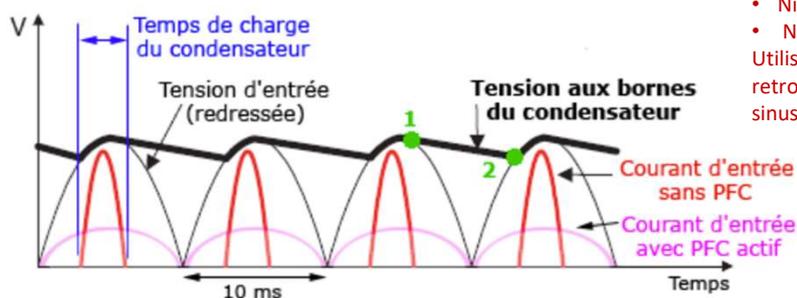
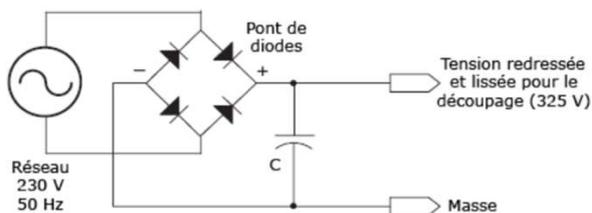


171

Marché grand public

Alimentation à découpage : PFC

Origine des harmoniques : On part de l'étage de redresseage & de lissage!!!



Ces cycles de charge très brefs → des appels de courants brutaux sous forme de pics qui est l'allure du courant tiré sur le réseau :

- Ni sinusoïdal,
- Ni en phase avec la tension.

Utilisation du module PFC pour retrouver un courant d'allure sinusoïdale et en phase



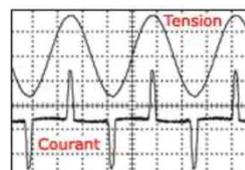
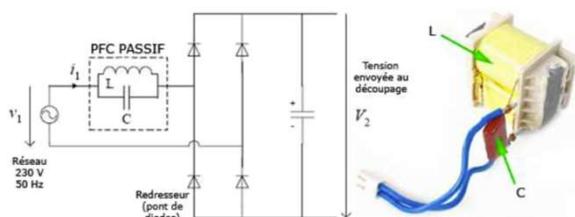
172

Marché grand public

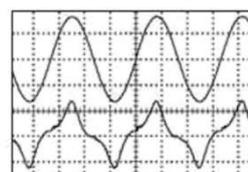
Alimentation à découpage :

PFC passif → Ajout d'élément passif : inductance + condo ce donne un filtre passe-bande ce qui atténue fortement la 3^{ème} harmonique

La bobine va généré une contre-réaction à la variation brutale du courant → Atténuation de la déformation → Facteur de puissance 0.6 & 0.8 max



Pas de PFC
Courant très déformé
Pics de grande intensité



PFC Passif
Pics atténués
Courant non sinusoïdal

Inconvénients : Encombrement + effondrement du facteur de puissance + travaille à 50Hz

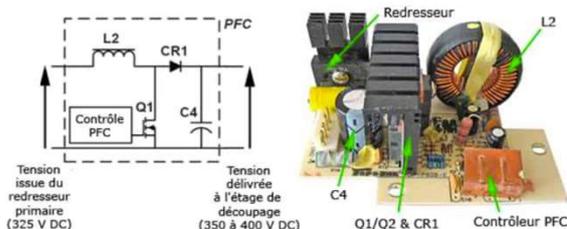


173

Marché grand public

Alimentation à découpage : PFC actif

- Module intercalé entre la source de tension redressée non lissée et le second étage de découpage.
- Il corrige en tps réel l'allure du I par rapport à U → Garder la phase et une forme pseudo sinusoïdale
- Adaptation à une très large gamme de source de tension ex 115V/230V
- Nbreuses topologies différentes de PFC buck, boost, buck & boost, ex :



- Inductance L2
- MOSFET Q1
- Diode rapide CR1
- Condo C4
- Contrôleur PFC



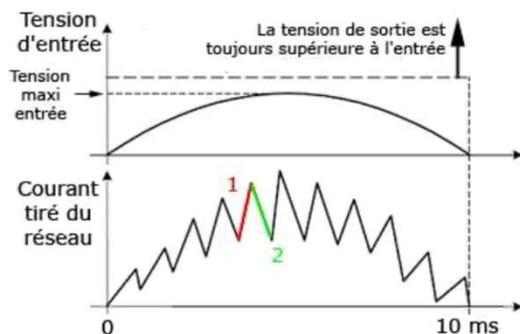
174

Marché grand public

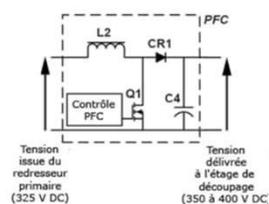
Alimentation à découpage : PFC actif

Principe général : MOSFET travaille à HF en ouvrant et fermant → C4 se charge et décharge grâce à l'inductance L2 qui elle-même emmagasine et relâche l'nrj par l'action de Q1:

- Q1 fermé → CR1 bloquant → L2 se charge en nrj magnétique → Phase montante
- Q1 ouvert → Q1 relâche nrj dirigée vers C4 traversant CR1 → Phase descendante



On se place du cote du réseau pour regarder l'évolution du courant → On obtient le signal d'une résistance



175

Marché grand public

Alimentation à découpage : PFC actif

• Points forts :

- Le transformateur travaille à une fréquence $f_d \geq 20kHz$ très supérieure à celle du réseau 50Hz, il est donc de dimension réduite (voir Annexe 6-1).
- Le transistor de puissance fonctionne en régime de commutation ($V_{CE} \approx 0$ et I_C pour l'état on ; $I_C = 0$ pour l'état off ; soit $P = I_C \cdot V_{CE} \approx 0$) et présente des pertes réduites.

Donc :

Le dissipateur associé est de faibles dimensions, d'où un gain en volume et en masse.

Le rendement de l'alimentation est supérieur à 80 % (contre 60 % maximum pour les alimentations linéaires).

• Points faibles :

- Elles sont moins simples à mettre en oeuvre que les alimentations linéaires.
- Une ondulation résiduelle due au découpage subsiste en sortie ; la stabilité relative se situe entre 10^{-2} et 10^{-3} .
- Elles sont perturbatrices pour l'environnement électrique et électronique ; les parasites rayonnés sont importants du fait du découpage.



176

Marché grand public

Alimentation à découpage : GaN vs Si



- Diminution de la ta taille
- Diminution de perte par effet joules
- Rendement jusqu'à 90%
- Augmentation du nombre de port

Les coûts restent élevés
Car changement de la chaîne de production



Acteurs de la filière chargeur GaN :

- Anker : Chine
- RAVpower : Californie
- Wise-integration : France
- Belkin : France
- Ugreen : chine
- Minix : Hong Kong



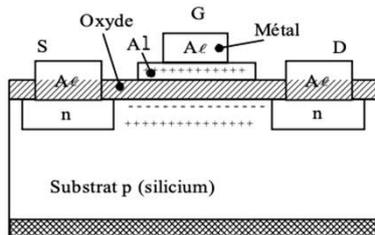
LES NOUVELLES PERSPECTIVES



ZCS & ZVS

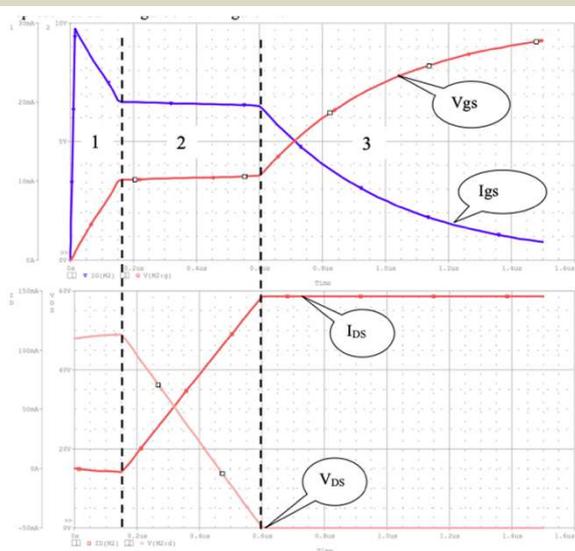
Inconvénients
du Si

Retour sur le MOSFET



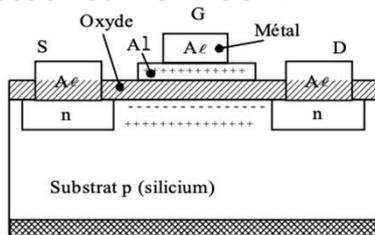
Commutation à la fermeture :

- Phase 1 : $t=0$ Application d'une tension sur la grille
 - tjs Transistor bloqué,
 - C_{gs} se charge,
 - C_{gd} et C_{ds} sont cte
- Phase 2 : Augmentation du courant I_{DS}
 - C_{gd} augmente & s'oppose à C_{gs}
 - Effet miller
- Phase 3 : Phase de saturation
 - V_{gd} est cte
 - C_{gs} jusqu'à E



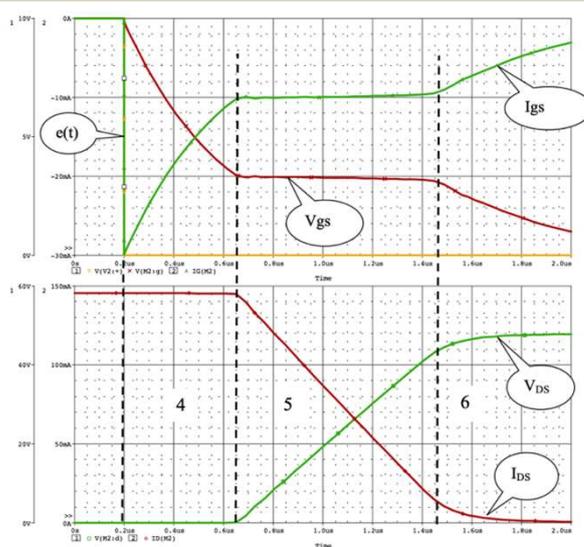
Inconvénients
du Si

Retour sur le MOSFET



Commutation à l'ouverture:

- Phase 4 : $t=0$ coupure de la tension sur la grille
 - C_{gs} évacue les charges accumulées
- Phase 5 : V_{gs} stable car C_{gd} augmente et C_{gs} diminue
 - R_{dson} augmente
- Phase 6 : V_{ds} atteint la tension d'alim
 - V_{gs} diminue (décharge de C_{ds})
 - $R_{ds} = R_{dsoff}$

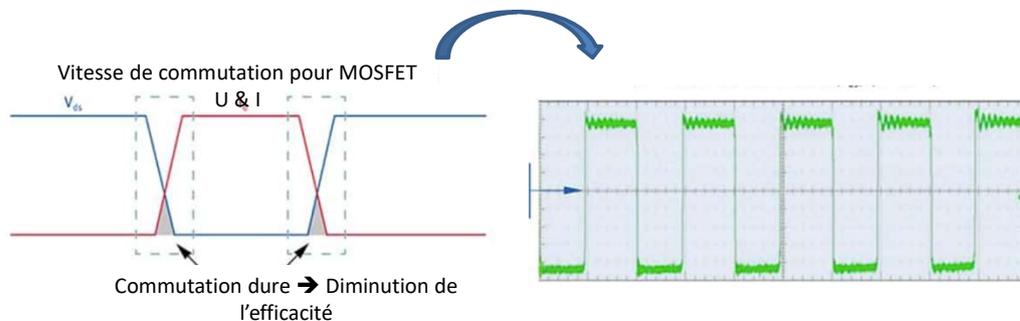


ZVS, ZCS

Pertes Joules en commutations

Contrainte en tension et en courant dans les commutateurs (MOSFET & IGBT) → + la Fréquence augmente + les pertes augmentent

Commutation dure

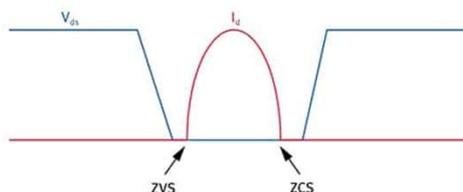


181

ZVS, ZCS

Commutation douce au zéro de la tension

Lors de la commutation douce, la tension tombe à zéro (au lieu d'être ramenée à un niveau minimal) avant l'activation ou la désactivation du transistor MOSFET, ce qui élimine tout chevauchement entre la tension et le courant, et réduit les pertes. La technique permet également de commuter le transistor MOSFET lorsque le courant, et non la tension, atteint zéro → C'est la commutation au zéro du courant (ZCS).) Autre avantage : les formes d'ondes de la commutation douce limitent les interférences électromagnétiques

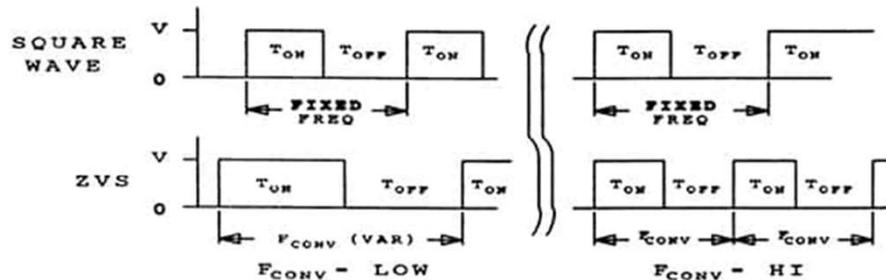


182

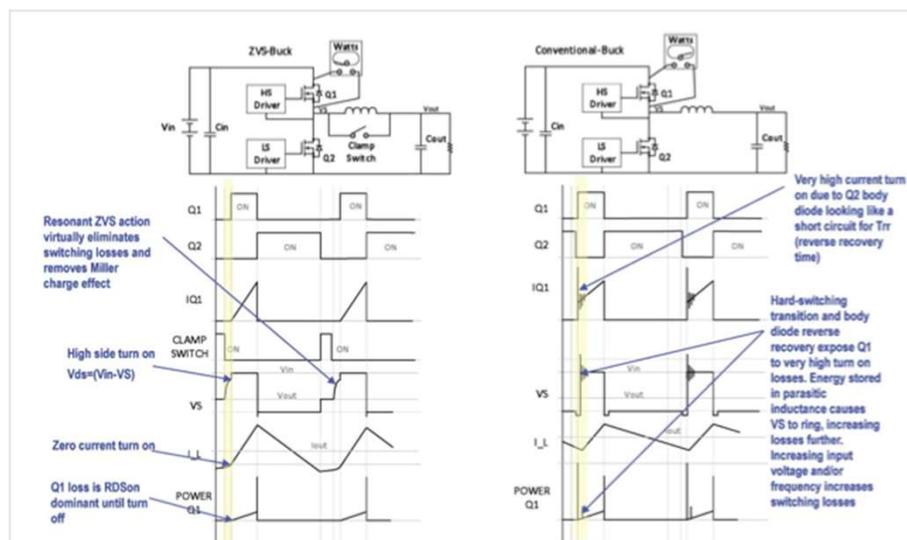


Commutation ZVS & ZCS

La régulation de la tension de sortie repose sur l'ajustement du rapport cyclique effectif. Lors du délai de désactivation du commutateur ZVS, le circuit L-C du régulateur résonne en faisant circuler la tension dans le commutateur de zéro à la valeur maximale, puis à nouveau à zéro lorsque le commutateur peut être réactivé et la commutation ZVS sans perte facilitée. Les pertes de transition du MOSFET sont nulles (quelles que soient la fréquence de fonctionnement et la tension d'entrée), représentant ainsi des économies d'énergie importantes et une amélioration notable du rendement. Grâce à ces caractéristiques, la technique ZVS est adaptée aux conceptions de convertisseurs haute fréquence et haute tension



Commutation ZVS & ZCS





Pour les grands Gap

Du point de vue du matériau :

- Commutation à la fermeture est régi par la mobilité des porteurs minoritaires
- Commutation à la fermeture est régi par la capacité à recombinaison des paires électrons/trous → Durée de vie des porteurs minoritaires
- **Avantage d'avoir un ni très faible**
- **Meilleures mobilités des porteurs minoritaires**
- **Tenue thermique due à la bonne conductivité thermique**
- **Les grands gap sont moins impactés par le chevauchement de V et I à l'ouverture et la fermeture à la même fréquence**



185



LES NOUVELLES PERSPECTIVES



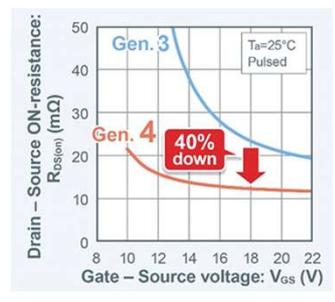
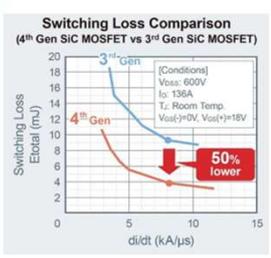
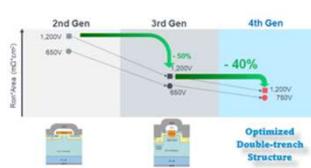
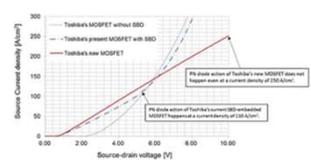
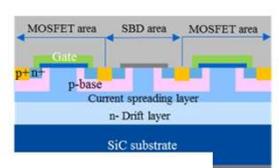
Les futurs composants

186



Les orientations de recherches :

- Substrats HPSI
- Diminution des coûts de production du substrat
- Nouvelle structure de composants ex : Toshiba
- 4th génération de MOSFET chez ROHM



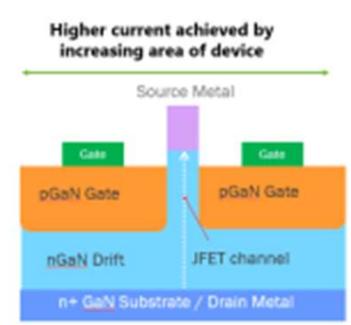
GaN vertical

Attributes	GaN-on-Si	Vertical GaN™
Defect Density, cm ⁻²	10 ⁸	10 ³ to 10 ⁵
Lattice Mismatch, %	17	0
Layer Thickness, μm	1-2	> 40
CTE Mismatch, %	54	0
Breakdown Voltage, (V)	900	4000V
OFF State Leakage	High	1nA (Low)
Avalanche Capability	No	Yes
Reliability	Low	High

Figure 6: Advantages of Homoepitaxially Grown Structure [Image: NextGen Power System]

Higher breakdown voltages achieved by growing thicker Drift region

Vertical GaN™ eJFET



GaN un composant latéral

Avancé pour le GaN : normally off

P-GaN/AlGaN/GaN

Spécificité du GaN

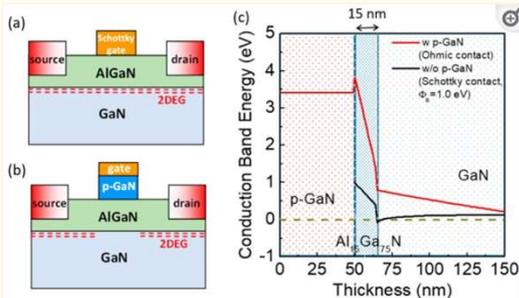


Table 2

Survey of literature data on normally-off HEMTs with p-GaN gates obtained using different Schottky contacts.

Metal Gate	p-GaN Thickness t and Doping N_A	Threshold Voltage V_m (V)	Ref.
Mo (100nm)/Ni (20nm)	$t = 80$ nm, $N_A = 3 \times 10^{19}$ cm ⁻³	1.08	[40]
Mo/Ti/Au	$t = 60$ nm, $N_A = 2 \times 10^{18}$ cm ⁻³	1.9	[33]
Ni	$t = 100$ nm, $N_A = 2 \times 10^{19}$ cm ⁻³	1.23	[32-41]
Ni/Au	$t = 60$ nm, $N_A = 2 \times 10^{18}$ cm ⁻³	1.8	[33]
Ni (25nm)/Au (120nm)	$t = 60$ nm, $N_A = 1 \times 10^{18}$ cm ⁻³	1.7-2.1	[33]
Ni (20nm)/Au (200nm)	$t = 50$ nm, $N_A = 3 \times 10^{18}$ cm ⁻³	0.48	[42]
Pd (50nm)/Au (150nm)	$t = 70$ nm, N_A not given	1.0	[43]
Ti (50nm)/Au (150nm)	$t = 70$ nm, N_A not given	1.2	[44]
Ti/Au	$t = 60$ nm, $N_A = 2 \times 10^{18}$ cm ⁻³	1.7	[33]
Ti (30nm)/Al (170 nm)	$t = 50$ nm, $N_A = 3 \times 10^{19}$ cm ⁻³	1.5	[34]
TiN	$t = 70$ nm, $N_A = 1 \times 10^{18}$ cm ⁻³	1.6	[36]
TiN	$t = 60$ nm, N_A not given	2.1	[30]
W	$t = 100$ nm, $N_A = 1 \times 10^{19}$ cm ⁻³	3.0	[32-41]
WSiN	N.A.	1.87	[35]

189

GaN un composant latéral

Avancé pour le GaN : normally off

Spécificité du GaN

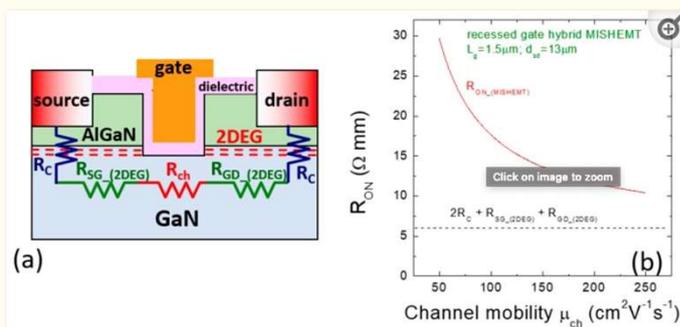


Figure 5

(a) Schematic of a recessed gate hybrid MISHEMT. The contributions to the total series resistance are also indicated. (b) Total resistance of the MISHEMT $R_{ON, MISHEMT}$ as a function of the channel mobility calculated for a device with $L_g = 1.5 \mu\text{m}$ and $d_{sd} = 13 \mu\text{m}$.

190



Des composants en diamant

Le projet GreenDiamond visait à élaborer un convertisseur de puissance électrique intégrant des composants semi-conducteurs en diamant afin de réduire les pertes d'énergie liées à la conversion de courant continu en courant alternatif.



Tableau 1 – Propriétés physiques de différents matériaux semi-conducteurs pour les composants de puissance

Matériau	E_g à 300 K (eV)	μ_n ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	μ_p ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	V_{sat} (cm/s)	E_C (V/cm)	λ (W/cm \cdot K)	ϵ_r
Si	1.12 (i)	1 450	450	10^7	3×10^5	1.3	11
GaAs	1.4 (d)	8 500	400	2×10^7	4×10^5	0.54	12
3C-SiC	2.3 (i)	1 000	45	2.5×10^7	2×10^6	5	9,6
6H-SiC	2.9 (i)	415	90	2×10^7	2.5×10^6	5	9,7
4H-SiC	3.2 (i)	950	115	2×10^7	3×10^6	5	10
GaN	3.39 (d)	1 000	350	2×10^7	5×10^6	1,3	8,9
GaP	2.26 (i)	250	150	10^7	10^7	1,1	11
C	5,6 (i)	2 200	1 800	3×10^7	$5,6 \times 10^7$	20	5,7

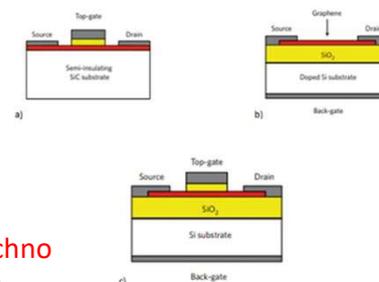
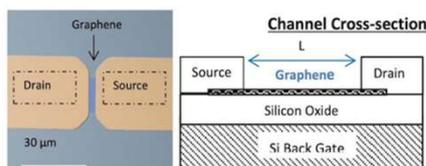
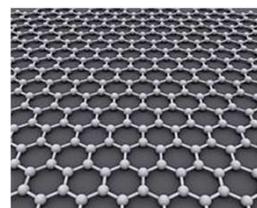
E_g largeur de bande interdite, μ_n et μ_p mobilités des porteurs N et P, V_{sat} vitesse de saturation des porteurs, E_C champ de claquage, λ conductivité thermique, (d) gap direct, (i) gap indirect, ϵ_r permittivité relative.

- Verrou technologique sur le dopage n car niveau trop profond
- Couches réalisées par dépôt CVD → Taille max de 5x5m2 et ép de 1mm
- Coût de fabrication



Matériau miracle!

- Première fois isolée en 2004 → Matériau avec des couches de C en formes hexagonal
 - Propriété thermique 5 300Wm-1K-1
 - Mobilité des électrons 200 000 $\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
 - Très grande dureté
 - Flexibilité
 - Matériau chimiquement inerte

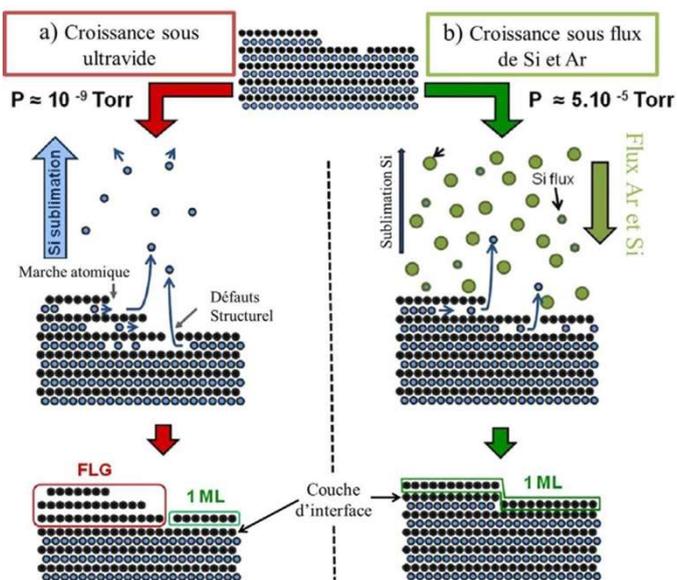


- Processus de fabrications
- Maturité techno
- Coût
- Applications



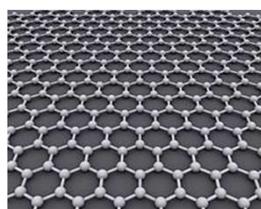
Le graphène

Matériau miracle : exemple de procédé de fabrication sur du SiC



Le graphène

Matériau miracle!



LE GRAPHÈNE

- >> RÉSISTANT : 200 x plus que l'acier
- >> CONDUCTEUR :
 - THERMIQUE : 5 x plus que le diamant
 - ÉLECTRIQUE : 10 x plus que le cuivre
- >> IMPERMÉABLE : aucun gaz ou liquide ne peut le traverser
- >> DUR : comme le diamant
- >> LÉGER : 1g peut couvrir 5000m²
- >> SOUPLE
- >> TRANSPARENT : à 97%
- >> HYDROPHOBE / HYDROPHILE
- >> PROTECTEUR :
 - anti-UV, anti-corrosion, champs électromagnétiques
- >> ANTI-BACTÉRIEN
- >> BIOCOMPATIBLE
- >> IGNIFUGEANT
- >> INERTE
- >> LUBRIFIANT

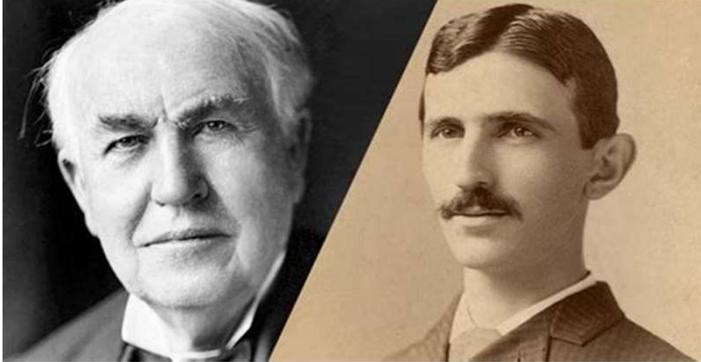
LE GRAPHÈNE vient en tant que charge améliorer les propriétés de tous les polymères,



 **FRAMATECH** 195/160

Pour conclure

C'est la fin!!



En vous remerciant de votre écoute



195

 **FRAMATECH**

Electronique
de puissance

Merci



Stéphane Biondo

196

CYCLE FABRICATIONS ELECTRONIQUES

**INTEGRER L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE
« MODERNE » DANS LES SYSTEMES**



FRAMATECH

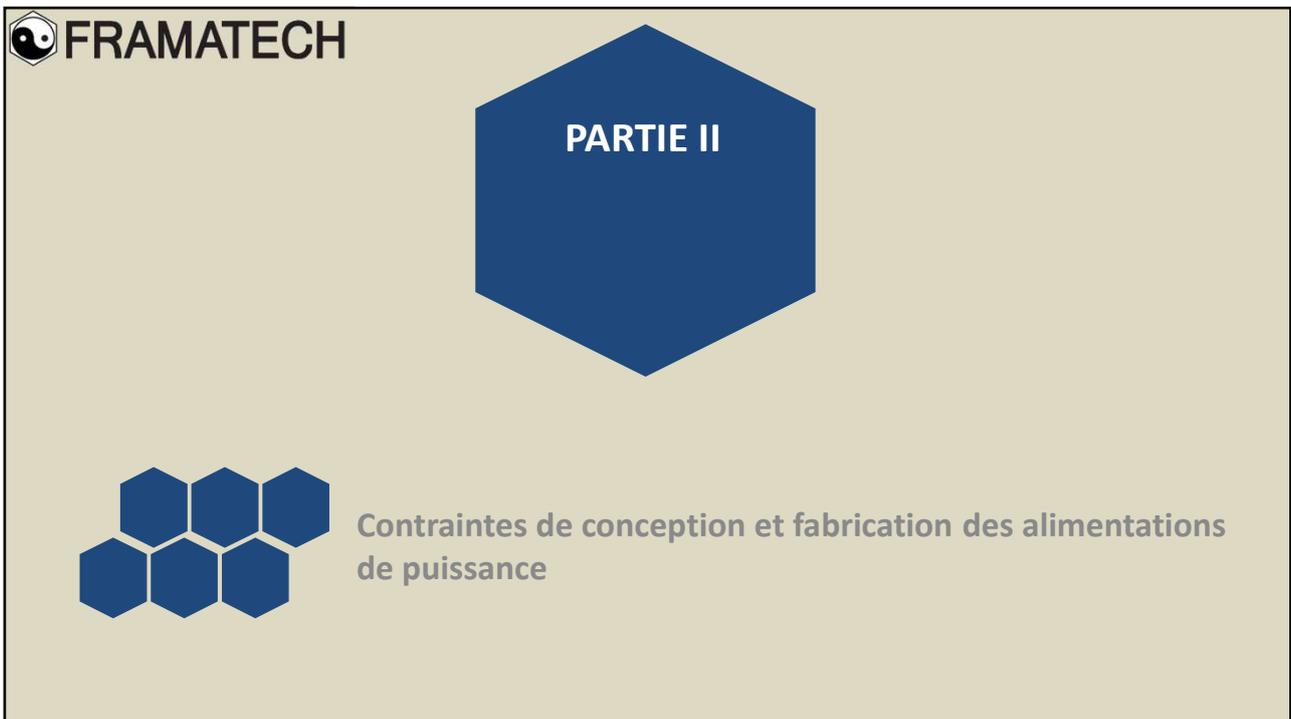
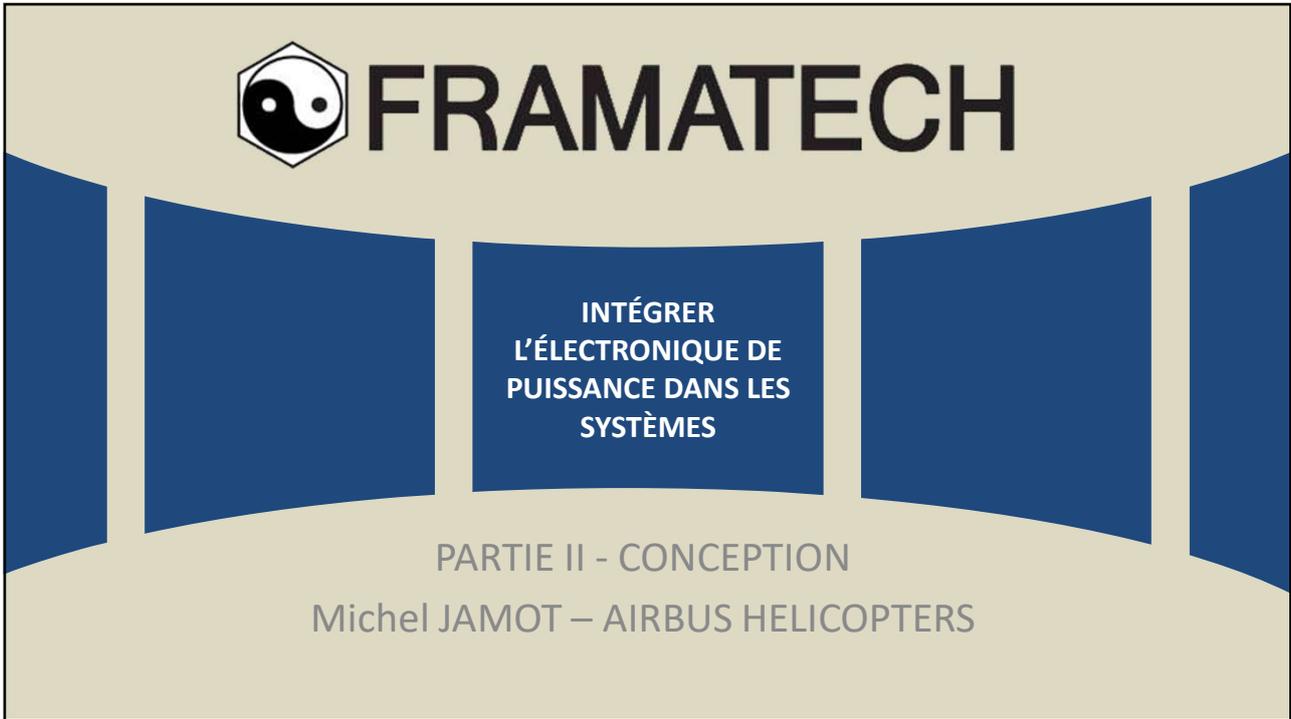
PARTIE II

**CONTRAINTES DE CONCEPTION ET DE FABRICATION, FIABILITE DES
ALIMENTATIONS DE PUISSANCE**
Contraintes sur les alimentations de puissance - Contraintes de fabrication

Michel JAMOT, AIRBUS HELICOPTERS

FRAMATECH S.A. au capital de 38112 Euros
**Etudes & mises en œuvre de stratégies industrielles internationales Hautes
Technologies**

4 boulevard d'Arras - 13004 Marseille - France
Tél. +33 491 95 55 70 / Fax. +33 491 95 55 75 / Mail : contact@framatech.fr
Organisme de formation n° 93060115506 – Siret 344 351 879 00046 – NAF 742C – RC88B126
Web : www.framatech.fr





Contraintes générales de conception



• Contraintes générales:

- Intégration (masse – volume)
- Environnement
- EMI-EMC
- Fiabilité
- Coût
- Ecologiques (ROHS, REACH rendement...)

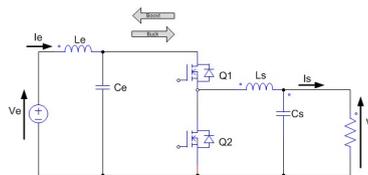
3



Compacité → - Intégrabilité - Coûts



Ex: topologie DC-DC bidirectionnel



- But: adaptation entrée / sortie , délivrer une tension dc à la charge en absorbant un courant dc à la source , (qualité réseau, EMC)

CVS idéal: $V_s = \alpha V_e$; $I_e = \alpha I_s$; $P_s = P_e$

- f_s : fréquence de découpage ; α : rapport cyclique
- Sources tension C_e, C_s : $i = C dv/dt \rightarrow \Delta v = \Delta i / (C f_s) \rightarrow \Delta v$ diminue avec f_s
- Sources courant L_e, L_s : $e = L di/dt \rightarrow \Delta i = \Delta e / (L f_s) \rightarrow \Delta i$ diminue avec f_s
- Filtrage: cellules L_e-C_e & $L_s-C_s \rightarrow$ fréquence propre $\ll f_s$
- Volume inductance : $kLI^2 \rightarrow$ à I fixé on cherche à diminuer L
- Volume capacité: $kCV^2 \rightarrow$ à I fixé on cherche à diminuer C

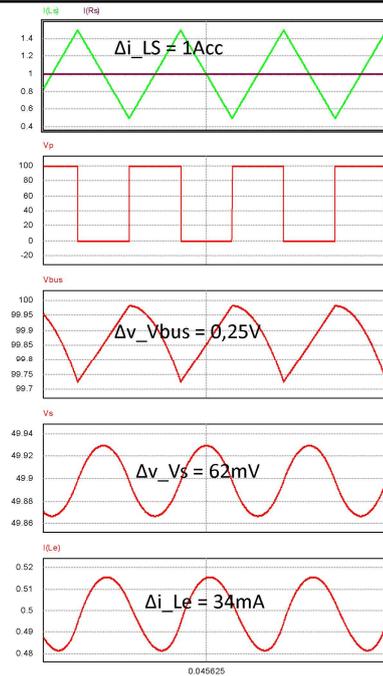
→ on cherche à augmenter la compacité donc f_s !

4

FRAMATECH

DC-DC bidirectionnel
Ex. d'application

*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*



• DC-DC: ex. d'application

- $V_e = 100V$; $V_s = 50V$; $I_s = 1A$; $P = 50W$
- $F_s = 100kHz$; $\alpha = 0,5$
- $L_s = 250\mu H$; $L_e = 10\mu H$; $C_e = 10\mu F$; $C_s = 20\mu F$
 - $f_{0_Le-Ce} = 16kHz \ll f_s$
 - $f_{0_Ls-Cs} = 2,25kHz \ll f_s$

A fréquence fixée, le choix de la valeur de L_s est un facteur clef du design:

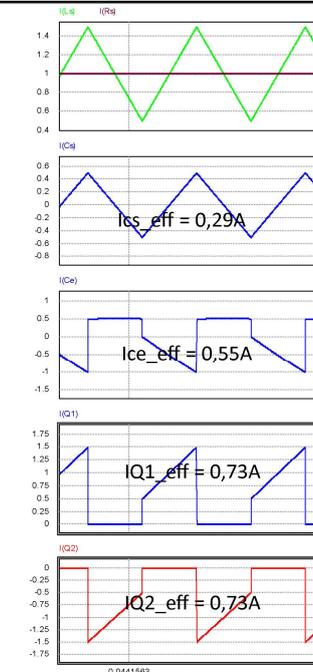
- $\Delta i_{Ls} = 1Acc \rightarrow$ conduction continue
- L_s : Δi max pour $\alpha = 0,5$; on cherche à réduire Δi dans L_s pour:
 - Réduire I_{eff} pour moins de pertes joule et de pertes supplémentaires (effets de peau et proximité) Ici: $I_{moy_Ls} = 1A$; $I_{eff_Ls} = 1,5A$
 - Réduire l'induction max de L_s ($B_{max} = L I_{max} / S_{fer N}$) donc son encombrement
 - Réduire ΔB et les pertes fer (L_s)
 - Réduire I_{eff} dans la capacité de filtrage (C_s)

5

FRAMATECH

DC-DC bidirectionnel
Ex. d'application

*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*



• DC-DC: ex. d'application

Méthodologie de design:

- Identifier / calculer les courants et tensions dans tous les passifs et actifs de puissance (crêtes, eff) dans les pires cas par approche analytique et par simulation (PSIM, LT SPICE, PLECS...);
- La connaissance de ces variables va permettre d'établir le bilan de pertes
- Prêter attention aux régimes transitoires selon le mode de contrôle choisi \rightarrow favoriser les stratégies avec contrôle du courant à bande passante élevée pour limiter les stress des composants actifs.

6



Bilan de pertes Actifs



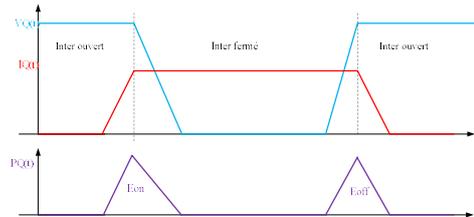
Bilan de pertes:

• Composants Actifs:

– Pertes en conduction:

- MOSFET: (Si, SiC, GaN): $P_{cond} = R_{dson} \times I_{DSeff}^2$ (attention : R_{dson} augmente avec t_j)
- IGBT: $P_{cond} = V_{cesat} \times I_{cemoy}$
- Diode: $P_{cond} = V_F \times I_{Fmoy}$

– Pertes dynamiques (en commutation):



- $P_{com} = F_s \times (E_{on} + E_{off})$; E_{on} - E_{off} sont données directement par la data-sheet composant ou à déterminer selon méthode approchante à partir de la data-sheet (cf AN-6005 Fairchild semiconductor par exemple)
- Ne pas omettre les pertes en commutation des diodes

Les pertes en commutation des semi-conducteurs constituent une limitation majeure à l'augmentation de la fréquence

7



Bilan de pertes Passifs



Bilan de pertes:

• Composants Passifs et PCB

– Inductances et transformateurs

- Pertes ohmiques « dc » : $R_{dc} \times I_{eff}^2$
- Pertes par effet de peau et proximité (**effet de la fréquence**) :

Ex pour un conducteur cylindrique la section utile est :

$$S_u = \pi \cdot (R^2 - (R - \delta)^2)$$

Avec:
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\sigma \mu \pi f}}$$

- δ : épaisseur de peau en mètre [m]
- ω : pulsation en radian par seconde [rad/s] ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$)
- f : fréquence du courant en hertz [Hz]
- μ : perméabilité magnétique en henry par mètre [H/m]
- ρ : résistivité en ohm-mètre [$\Omega \cdot m$] ($\rho = 1/\sigma$)
- σ : conductivité électrique en siemens par mètre [S/m]

Source Wikipedia

- Pertes fer dans les circuits magnétiques (**effet de la fréquence**) :

$$P_{fer} = k f^{\alpha} \times B^{\beta}$$

B: induction ; fs : fréquence ; α et β dépendant du matériau (cf data-sheet matériaux)

– Condensateurs:

- Pertes ohmiques : $R_{se} \times I_{eff}^2$
- Pertes diélectriques : $Q \times tg\delta$ (avec $Q = k V^2 f$ (**effet de la fréquence**)) (Pertes négligeables dans le cas des condensateurs de découplage)

– Circuit imprimé:

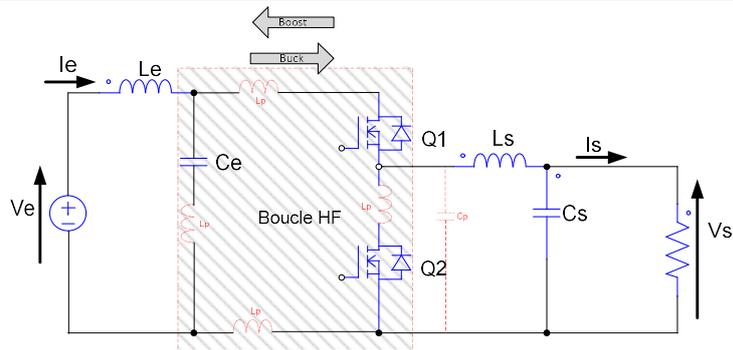
- Pertes ohmiques des pistes de puissance : $R \times I_{eff}^2$ avec : $R = \rho \times L / S$
- Pertes par effet de peau et proximité (**effet de la fréquence**)
- Pertes additionnelles dues aux inductances parasites des liaisons et composants soumises à di/dt : $\frac{1}{2} L_p \times I^2 \times f_s$ avec $L_p \approx 10nH \times cm$ (**effet de la fréquence**)
- Pertes additionnelles dues aux capacités parasites soumises à dv/dt : $\frac{1}{2} C_p \times V^2 \times f_s$ (**effet de la fréquence**)

→ Ces pertes additionnelles sont en générales dissipées par les composants actifs !

8



Limiter les éléments parasites



Réduire les inductances parasites des liaisons soumises à di/dt et les capacités parasites soumises à dv/dt pour:

- Limiter les surtensions et pertes des semi-conducteurs
- Limiter les champs rayonnés
- Limiter les transitoires de courant des semi-conducteurs
- Limiter les courants de mode commun
- Réduction du stress des actifs & augmentation du rendement
- Amélioration de l'auto-immunité équipement
- Réduction des émissions conduites et rayonnées (respect des std CEM)

9



Règles pratiques de conception:



Règles pratiques à implémenter et / ou auditer :

- Comment réduire les inductances parasites de la boucle de commutation:
 - Réduction de la longueur des interconnexions
 - Emploi de composant CMS autant que possible
 - Emploi de capacités de découplage à faible inductance (chip céramique par ex.)
 - Emploi de plans superposés dans le PCB ou bus bars pour la forte puissance
 - Bannir l'emploi du câblage filaire dans les boucles HF
- Limiter les capacités parasites entre potentiels soumis à dv/dt et potentiels fixe (dc bus, châssis) → contraintes de routage CI
- Définir des zones dédiées: filtres EMC, contrôle & monitoring, drivers SC, cellule de commutation
- Ctrlr & monitoring:
 - Emploi impératif d'un plan de masse, si possible référencé au châssis → équi-potentialité / auto immunité
 - Ne pas rompre le plan de masse entre fonctions analogiques et numériques
 - Cartes multiples: à éviter si possible ou garantir l'équi-potentialité des masses (liaisons de masse multiples)
 - Liaisons courte vers la puissance courte (flex, flex rigide...) reproductibles en série
- Filtre EMC:
 - Emploi d'un plan de masse dédié directement connecté au châssis
 - Interconnexions ultra courtes des capacités de MC au plan de masse (CMS)
 - Blindage intégral du filtre (capotage métallique si possible couplé au boîtier équipement)

L'activité du designer ne s'arrête pas au schéma mais doit se poursuivre durant toute l'élaboration de la définition (PCB, mécanique...) !!

10



Les facteurs limitants de la fréquence et les récentes évolutions technologiques



• Facteurs limitants de la fréquence:

- Pertes dynamiques des semi-conducteurs
- Eléments parasites (Lp, Cp)
- Pertes HF des passifs et interconnexions (effet de peau, proximité)
- Pertes fer des magnétiques

fs : compromis nécessitant la détermination précise des pertes (simulation puis prototypage)

• Récentes évolutions technologiques majeures:

- Réduction des Rsdson des MOSFET Si
- Maturité des MOSFET SiC
- Emergence des MOSFET GaN
- Boitiers puissance CMS connexions courtes (TO Lead-Less TOLL)



Drain (courant fort et transfert thermique via le PCB)

Source: connexions multiples: courant fort)

Ex: boitier HSOF INFINEON (MOSFET SI 100V-300A -1,5mΩ)

11



Les récentes évolutions technologiques : SiC



Les MOSFET SiC (600V - 1700V)

- $T_j \rightarrow 200^\circ\text{C}$
- Pertes dynamiques faibles et peu sensible à $t^\circ\text{C}$
- Faible Rsdson
- Diode intrinsèque « sans recouvrement »
- Maturité technologique (ex: AEC-Q101 automotive)

Ex: SIC ST SCTW100N65

Automotive-grade silicon carbide Power MOSFET
650 V, 100 A, 20 mΩ (typ., $T_j = 25^\circ\text{C}$), in a HIP247 package



Features

Order code	Viss	Rds(on) typ.	Is
SCTW100N65G2AG	650 V	20 mΩ	100 A

- AEC-Q101 qualified
- Very high operating temperature capability ($T_j = 200^\circ\text{C}$)
- Very fast and robust intrinsic body diode
- Low capacitance

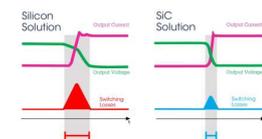
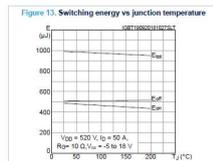
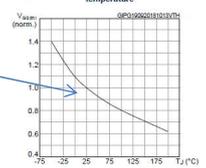


Figure 10. Normalized gate threshold voltage vs. temperature



Vgsth diminue avec $t^\circ\text{C}$ --> précaution de design driver

Exemples d'application grand volume des SiC :

- Solaire
- Automobile → inverter Tesla modèle 3 (IGBT dans modèles S & X)



12



PCB basics : matériaux & classes



PCB basics:

- Isolant standard (époxy FR4) → limitation en température

Matériaux	Tg°
FR4	125°C à 130°C
FR4 Htg	150°C à 180°C
BT Epoxy	175°C à 200°C
CYANATE ESTER	240°C à 260°C
POLYIMIDE	220°C à 280°C

Epaisseurs de cuivre
9µ
12µ
17,5µ
35µ
70µ
105µ

- Epaisseurs de cuivre (pcb fini) → limitation en courant

CRITERES D'APPARTENANCE à une CLASSE

Extraits de la norme NF C 95-713 ANNEXE C janvier 1989

Critères d'appartenance à une classe	CLASSES					
	1	2	3	4	5	6
Valeur de conception						
Epaisseur totale du cuivre sur faces (µm)	105	105	105	70	50	35
Valeurs normales maximales sur couches internes	105	105	70	35	35	17,5
Largeur minimale (mm)	0,80	0,50	0,31	0,21	0,15	0,12
Espacement minimal (mm)	0,68	0,50	0,31	0,21	0,15	0,12
- entre conducteurs, - entre conducteur et pastille ou pliage, - entre pastilles d'interconnexion, entre plages						

Exemples de classe de PCB:

Pistes cuivre : largeur et distances mini selon épaisseur de la couche cuivre

Epaisseur cuivre de base (selon norme NF C 95-713)	Epaisseur cuivre finale (selon préimprégnés)	Largeur mini piste Cu isolée	Distance mini isolée entre 2 pistes Cu
17,5 µm	50 µm	150 µm	150 µm
35 µm	70 µm	200 µm	200 µm
70 µm	105 µm	300 µm	300 µm
105 µm	140 µm	400 µm	400 µm
210 µm	245 µm	500 µm	500 µm

Exemple : Epaisseur cuivre sélectionnée sur configurateur web : 35 µm
Distance mini entre pistes : 200 µm (0,2 mm)
Largeur piste mini : 200 µm (0,2 mm)

- Standard de design des PCB: **IPC-2221**

13



PCB basics: Multicouches



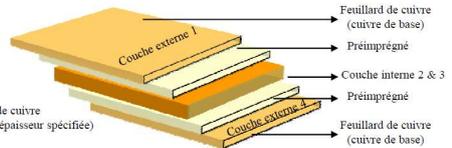
PCB basics: fabrication d'un multicouche (source Union technologique) :

Nombre de couches : couramment jusqu'à 18, applications puissance plutôt moins de 10 couches.

EMPILAGE DES COUCHES INTERNES :

Empilage des couches internes et des préimprégnés pour réaliser le circuit multicouches. Les trous de locating (X5) servent de détrompeur afin d'éviter l'inversion de sens des couches.

EXEMPLE D'UN CIRCUIT 4 COUCHES



- 1 - Empilage du feuillard de cuivre
- 2 - Préimprégnés (suivant épaisseur spécifiée)
- 3 - Couche interne

- 4 - Rajout des préimprégnés suivant épaisseur spécifiée



- 5 - Couches internes suivantes (suivant nombre de couches)



- 6 - Empilage du feuillard de cuivre

14



PCB basics : trous métallisés



PCB basics: perçages et trous (source Union technologique)

POSSIBILITE DE PERÇAGE
Vitesse : 150 000 Tr/min.
Ø mini 0,1 mm.
Trous borgnes.
Trous enterrés.

1. Operation intermédiaire :
Dépôt d'une couche polymère sur les parties isolantes. Celle-ci permettra au cuivre de s'accrocher aux parties non conductrices lors du passage dans le bain électrolytique.

2. Operation finale : Dépôt d'une couche de cuivre électrolytique sur le cuivre de base (en surface et sur les parois des trous).

Microsection of a 6-layer Multilayer PCB:

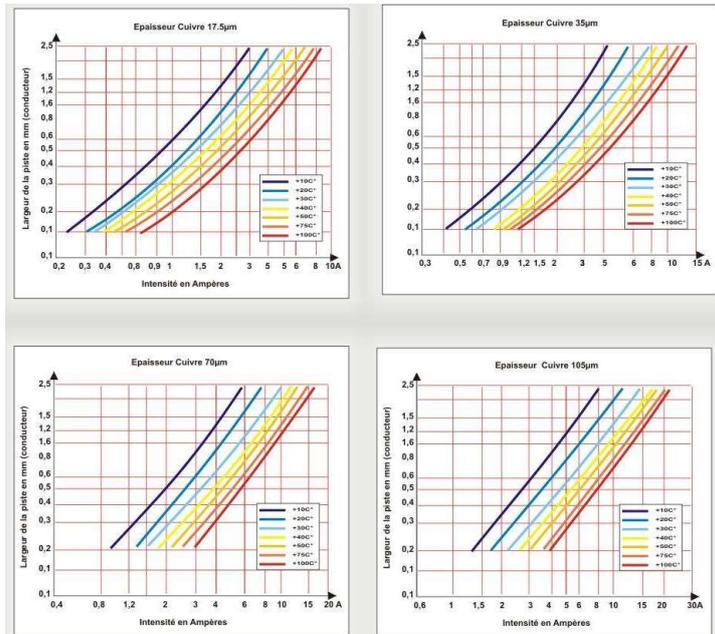
15



PCB basics : Echauffement des pistes



PCB basics: échauffement des pistes



16



PCB basics : CU épais



PCB basics: les PCB puissance « heavy copper »

Augmenter l'épaisseur des pistes pour réduire chute de tension, pertes et échauffement → quelques fabricants proposent des solutions.

Ex: production de la Sté **SCHWEIZER**:

- Couches externes: 50 à 240µm
- Couches internes : ≤ 400 µm



Photo SCHWEIZER

Solution alternatives : report de bus bar forte épaisseur (≥ 1mm) sur couche (s) externe (s)

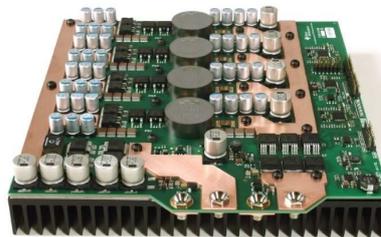


Photo Texas
instrument Design
(TIDA -01168)

17



PCB basics : Transfert thermique

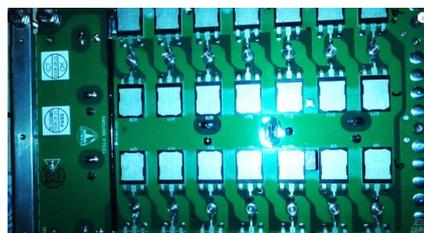


PCB basics: transférer la puissance dissipée du PCB vers la zone froide

Zone froide: radiateur à convection forcée ou naturelle, pièce massive capable d'absorber les calories (ex: plaque froide refroidie par liquide...)

Plusieurs solutions possibles:

- Composants de puissance montés sur la zone froide (solution conventionnelle)
- SMI : Substrat Métallique Isolé, adapté au cooling des CMS
- PCB interfacé à la zone froide avec un intercalaire thermique (gap pad)



Exemple de report d'IGBT TO 247 sur la zone froide : 14 IGBT en // par interrupteur soit 84 TO247 dans l'onduleur de puissance de la TESLA model S

18



PCB basics :
Transfert thermique :
SMI

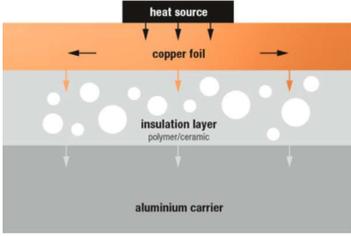


PCB basics: Substrat Métallique Isolé:

Cuivre (385W/m.K): 18 à 105 μm

Isolant (2.7W/m.K): 50 à 200 μm

Substrat métallique (≈140W/m.K): 0,3 à 3mm



Avantages:

- Conductivité thermique couche isolante (2,7 W/m.K) meilleure que FR4 (0.3 W/m.K)
- Ensemble pressé usine: excellent contact thermique avec le substrat métallique
- Montage du SMI sur zone froide avec graisse thermique ou intercalaire graphite

Inconvénients:

- Une seule couche de cuivre :
 - peu adapté à la haute fréquence
 - Implantation très difficile des composants driver et contrôle

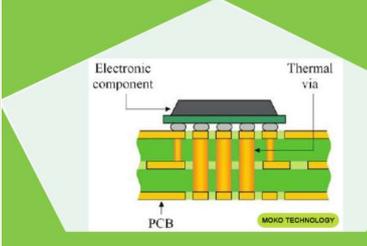
19



PCB basics : vias
thermiques



PCB basics: Transfert de puissance par vias thermiques



Principe:
Conductivité thermique FR4 faible (0.3 W/m.K) comparée à celle du cuivre (385 W/m.K) → transfert thermique par un champs de vias sous le composant à refroidir

Résistance thermique d'une via:

$$R_{thvia} = \frac{L_{via}}{S_{via} \times \lambda_{CU}}$$

L_{via} : épaisseur PCB : (1,6 ...3,2mm)
S_{via} : section du « tube » cuivre de la via (fonction du diamètre et de l'épaisseur du report CU)
Epaisseur sdt du report CU: 25μm

Avantages:

- Composants PU CMS (performances , faible coût de fabrication)
- PCB multicouches adapté à la HF et l'implantation des composants bas niveau (driver, contrôle...) sur la même carte

Inconvénients:

- Interfaçage thermique délicat du PCB à la zone froide: intercalaire thermique (gap pad... avec risque de « voids » à adresser) → émergence de solutions « SMI » multicouches mais couteuses.

20



A large, solid blue hexagon centered on the slide, containing the word "QUESTIONS" in white, uppercase, sans-serif font.



Contraintes de conception et fabrication des alimentations
de puissance



FRAMATECH

**Une offre de formations adaptée
à vos situations professionnelles**



Contacts

Tél. 04 91 95 55 70

Mail : contact@framatech.fr

Alain BARONI, CEO
alain.baroni@framatech.fr

Sheina GUEDJ, Formations
sheina.guedj@framatech.fr

FRAMATECH S.A. au capital de 38112 Euros
Etudes & mises en œuvre de stratégies industrielles internationales Hautes Technologies

4 boulevard d'Arras - 13004 Marseille - France

Tél. +33 491 95 55 70 / Fax. +33 491 95 55 75 / Mail : contact@framatech.fr

Organisme de formation n° 93060115506 – Siret 344 351 879 00046 – NAF 742C – RC88B126

Web : www.framatech.fr