

CYCLE FABRICATIONS ELECTRONIQUES

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



FRAMATECH

Session inter-entreprises

Les 17, 18, 19 et 20 décembre 2024, *distanciel*

**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**

Monsieur Stéphane BIONDO

**& Intervention de Monsieur Johan DELAINE de la société WISE
INTEGRATION sur le thème de : l'encapsulation des puces GaN**

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

The slide features the FRAMATECH logo at the top left, which consists of a yin-yang symbol inside a hexagon. To its right, the word 'FRAMATECH' is written in a large, bold, black sans-serif font. Below this, the text 'Electronique de puissance' is centered in a white sans-serif font on a dark blue rectangular background. Underneath, 'Partie 1: Etats des lieux des composants & filière de puissance' is written in a smaller, grey sans-serif font. At the bottom left is the MAGDALA logo, and at the bottom center is the name 'Stéphane Biondo'.

1

The slide is titled 'AGENDA' in a white sans-serif font inside a dark blue hexagon on the left side. At the top left is the FRAMATECH logo, and at the top right is the page number '2/160'. The main content is a bulleted list of topics, with blue brackets on the right indicating time slots. The first bracket, labeled '9h00 à 12h00', covers the introduction and Part I. The second bracket, labeled '14h à 17h30', covers Part II, Part III, and Part IV. The MAGDALA logo is at the bottom left.

- **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 boîtiers, 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


2

FRAMATECH

MAGDALA

INTRODUCTION ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Bases, concepts, enjeux



3

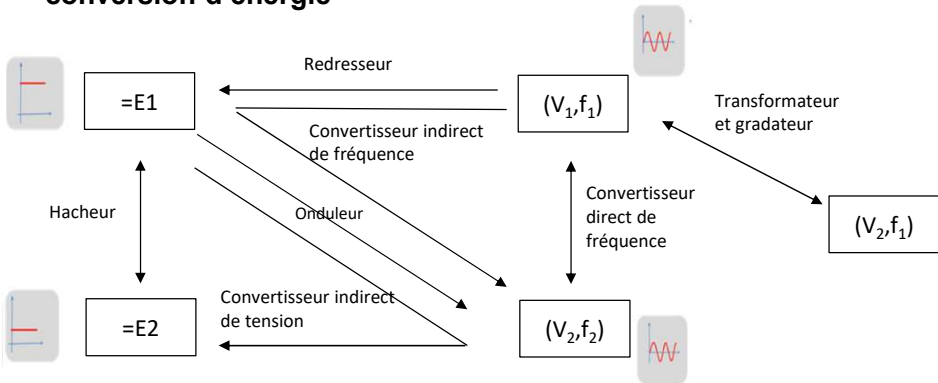
FRAMATECH

4/160

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

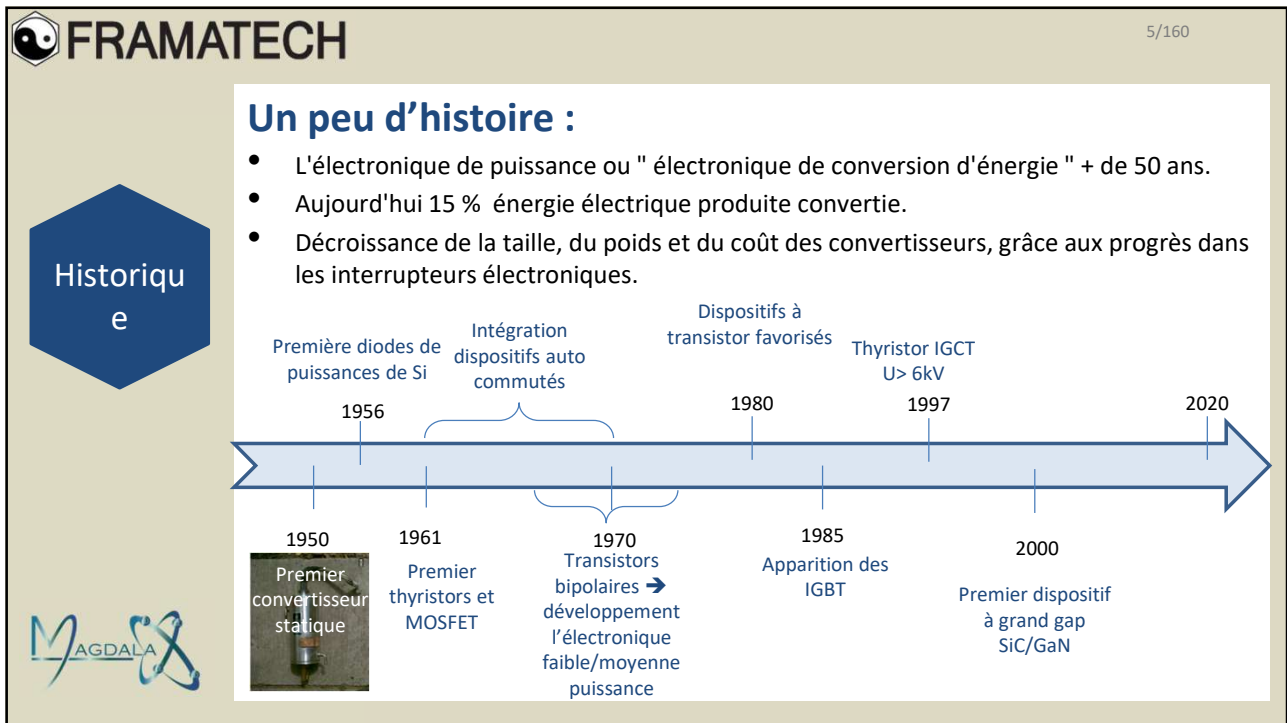
L'électronique de puissance a pour but de **modifier la présentation de l'énergie électrique avec un rendement maximum : Electronique de conversion d'énergie**

Définition

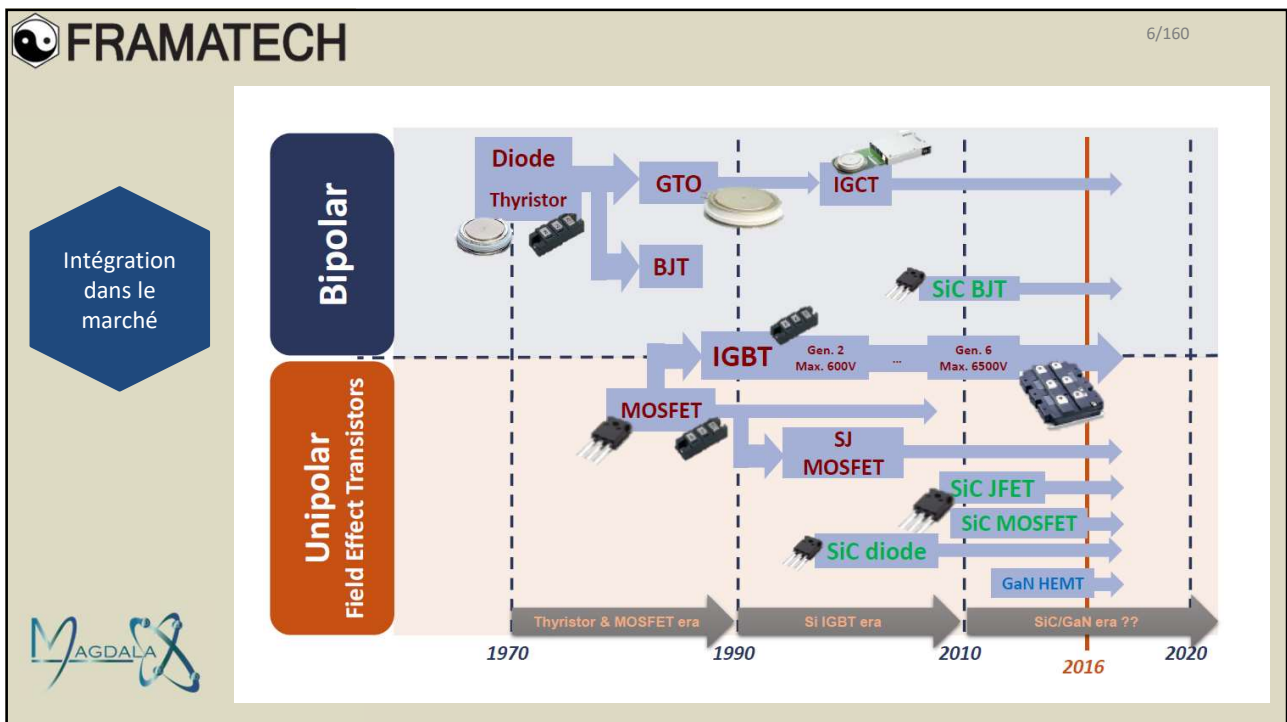


MAGDALA

4




5



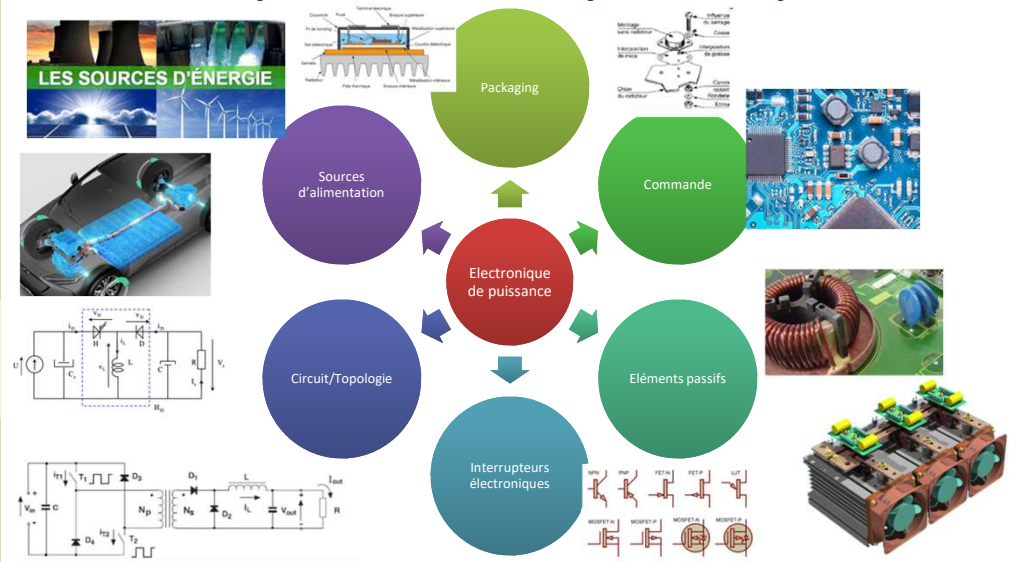
6

FRAMATECH 7/160

Les éléments présents dans un système de puissance



Concepts



The diagram illustrates the components of a power system. At the center is 'Électronique de puissance'. Surrounding it are six interconnected elements: 'Sources d'alimentation' (top-left), 'Packaging' (top), 'Commande' (top-right), 'Éléments passifs' (bottom-right), 'Interrupteurs électroniques' (bottom), and 'Circuit/Topologie' (bottom-left). Each element is accompanied by representative images and technical diagrams. 'LES SOURCES D'ÉNERGIE' shows nuclear and wind power. 'Packaging' shows a power MOSFET. 'Commande' shows a PCB. 'Éléments passifs' shows inductors and capacitors. 'Interrupteurs électroniques' shows various semiconductor symbols. 'Circuit/Topologie' shows a power converter circuit with a transformer and various components labeled with V_{in} , V_{out} , I_{in} , I_{out} , L , C , D_1 , D_2 , T_1 , T_2 , N_p , N_s , R_l , R_o , V_{ce} , V_{ds} , V_{gs} , V_{ds} , V_{ce} , V_{gs} , V_{ds} , V_{ce} , V_{gs} .


MAGDALA

7

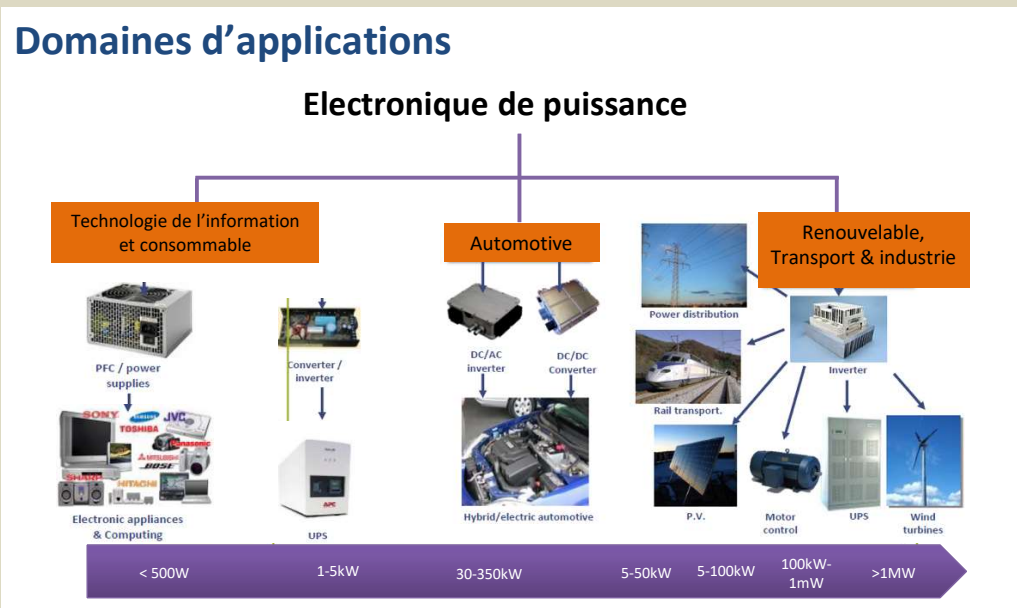
FRAMATECH 8/160

Domaines d'applications

Electronique de puissance



Concepts



The flowchart shows the application domains of power electronics. It branches into three main categories: 'Technologie de l'information et consommable', 'Automotive', and 'Renouvelable, Transport & industrie'. 'Technologie de l'information et consommable' includes 'PFC / power supplies' and 'Electronic appliances & Computing'. 'Automotive' includes 'DC/AC inverter' and 'DC/DC Converter', leading to 'Hybrid/electric automotive'. 'Renouvelable, Transport & industrie' includes 'Power distribution', 'Rail transport', 'P.V.', 'Motor control', 'UPS', and 'Wind turbines'. A power range bar at the bottom indicates the power levels for each domain: < 500W, 1-5kW, 30-350kW, 5-50kW, 5-100kW, 100kW-1mW, and >1MW.

MAGDALA

8

FRAMATECH 9/160

Filière du semi-conducteur

Enjeux

SEMICONDUCTORS
from materials and devices
to circuits, packaging and
modules/systems

- Power electronics**
 - Wide bandgap semiconductors
 - Power devices and IC
 - Power modules
 - Power applications
- MEMS, Sensing & Imaging**
 - MEMS sensors and actuators
 - 3D imaging and sensing (ToF, CIS, thermal imaging, LIDAR, imaging Radar, event-based camera, etc.)
 - AI/ML, sensor data fusion
- RF & Wireless communications**
 - RF substrate & epiwafers
 - RF devices (SAW, BAW, PA/LNA, etc.), RFIC, MMIC
 - RF front-end module, RF packaging
 - MIMO, beamforming, carrier aggregation
 - 5G & 6G networks, Radar, mm-waves, microwaves, THz
- Memory**
 - SRAM, DRAM, flash
 - 3D-stacked memories
 - Emerging non-volatile memories (MRAM, PCM, RRAM, etc.)
 - Embedded NVM
- Photronics, Lighting & Display**
 - Optoelectronics & optical components (LED, OLED, laser, optical transceivers, waveguides, metasurfaces, etc.)
 - Photonic crystal, photonic IC, silicon photonics
 - Optical communications, AR/VR, quantum
- Advanced packaging**
 - Fan-Out WLP/PLP, 2.5D/3D IC
 - SiP, SoC, Chiplets
 - TSV, μbumps, interposer, interconnect bridge, hybrid bonding
- Materials & Substrates**
 - Compound semiconductors
 - Engineered substrates
 - Epiwafers

MAGDALA

9

FRAMATECH 10/160

Filière du semi-conducteur

Enjeux

Global Semiconductor Market

Size, by Component, 2022-2032 (USD Billion)

Year	Market Size (USD Billion)
2022	574.6
2023	625.2
2024	673.1
2025	747.8
2026	822.3
2027	885.3
2028	933.2
2029	1,015.3
2030	1,093.1
2031	1,189.3
2032	1,307.7

The Market will Grow At the CAGR of: **8.8%** The Forecasted Market Size for 2032 in USD: **\$1,307.7B** market.us

MAGDALA

10

FRAMATECH 11/160

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 %)

Pays/Région	Design	Équipement	Matériaux	Fabrication	Conditionnement, assemblage & test
États-Unis	~48	~10	~10	~10	~12
Corée du Sud	~20	~15	~15	~15	~15
Japon	~10	~28	~15	~15	~10
Europe	~10	~20	~10	~10	~10
Taiwan	~5	~20	~20	~20	~20
Chine	~5	~10	~10	~10	~35
Autres	~5	~10	~10	~10	~15

Données arrondies.
Source : Semiconductor Industry Association

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

- Asia Pacific
- North America
- Europe
- South America
- MEA

MAXIMIZE MARKET RESEARCH PVT. LTD.

statista

11

FRAMATECH 12/160

Enjeux

Enjeux industriels pour la France défini en 2018

Filière

Industries de l'électronique

1 100
entreprises

230 000
emplois (directs et indirects)

15 milliards €
de chiffre d'affaires

conseil national de l'industrie

+ 90%
des entreprises
sont des PME ou des TPE

statista

12

FRAMATECH 13/160

Enjeux industriel 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

13

FRAMATECH 14/160

Enjeux économique pour la France

Marché de l'électronique de puissance en 2012

Marché de l'électronique de puissance en 2018

Climat
Subvention
EVH
IA

From niche to new applications

Besoin

- Efficacité
- Prix
- Robustesse
- Intégration
- Fabrication
- Chaîne logistique
- etc

14

FRAMATECH 15/160

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, labs 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

MAGDALA

15

FRAMATECH 16/160

Enjeux

Enjeux écologique

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

MAGDALA

16

FRAMATECH 17/160

Enjeux technologique

Enjeux

Axe de R&D

- Effacité
- Puissance

Performances demandées

- Faible $R_{ds_{on}}$
- Faible inductance
- Commutation
- Densité de courant élevée

Convertisseur requis

- Nouvelle topologies
- Nivel Stratégie control
- Intégration mécatronique

Applications: PV, éolien, onduleur, moteur; EV/HEV, Aéronautique, train

MAGDALA

17

FRAMATECH 18/160

Enjeux technologique

Enjeux

Une tendance, plusieurs challenges techniques


Conception

	Niveau application	Niveau composant	Niveau Module	Niveau Convertisseur
Challenges	<ul style="list-style-type: none"> Puissance Efficacité Etc... 	<ul style="list-style-type: none"> Petites tailles Matériaux friable Temp jonction élevé 	<ul style="list-style-type: none"> Filière sans plomb Faible température de résistance Etc... 	<ul style="list-style-type: none"> Environnement sévère fiabilité Facteur de forme Etc...
Solutions	SiC, Etc...	GaN, Sintering, Etc...	Epoxy resin encapsulant, Wire-free interconnections, Etc...	HT Capacitors, Motor + PE integration, Etc...

Gestion de l'énergie Gestion Thermique

MAGDALA

18


 **FRAMATECH** 19/160

 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



19

 **FRAMATECH** 20/160

 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.

20

FRAMATECH

MAGDALA

ETATS DES LIEUX DES COMPOSANTS



Les composants passifs

21

FRAMATECH

22/160

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

Les composants passifs

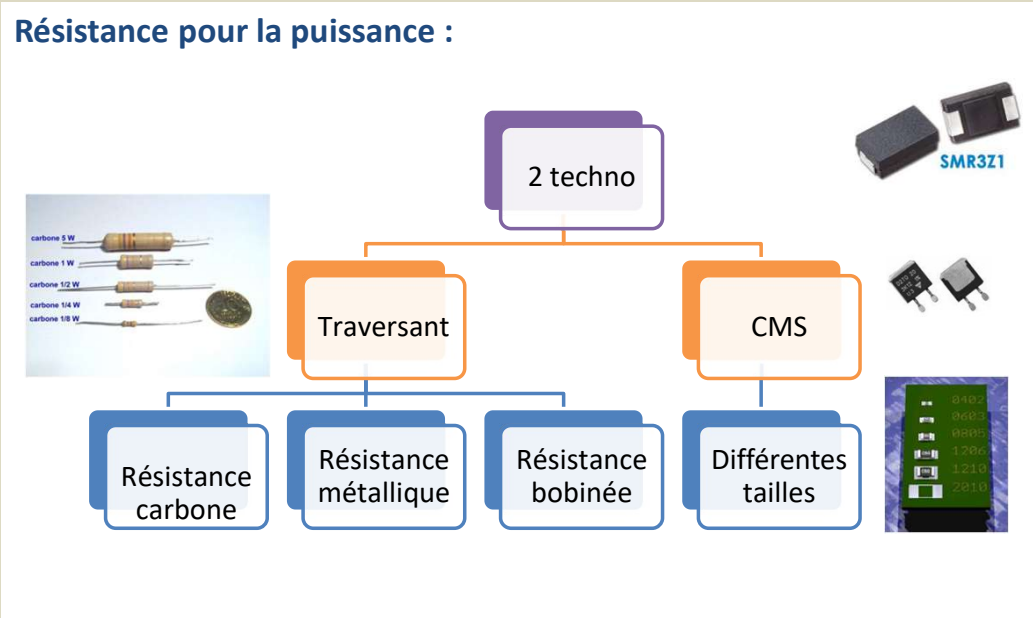
MAGDALA

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];
```

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 coûteuse, gain de place, max 3W de puissance

MAGDALA

24


25/160

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 pattes métalliques

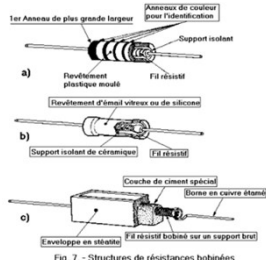






Fig. 7 - Structures de résistances bobinées

25


26/160

Les
condensateurs

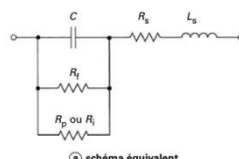
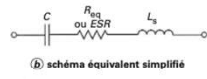
Condensateur pour la puissance :

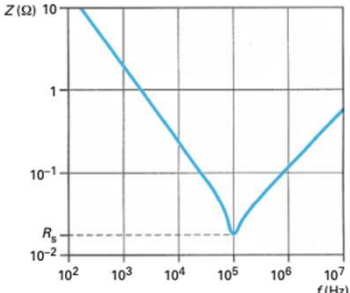
Schéma équivalent d'un condensateur


- C : condensateur parfait
- L_s : inductance série
- R_{eq} (ESR) résistance équivalente
- R_f : résistance de fuites
- R_p : résistance représentant les pertes du diélectrique
- R_s : 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 :

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





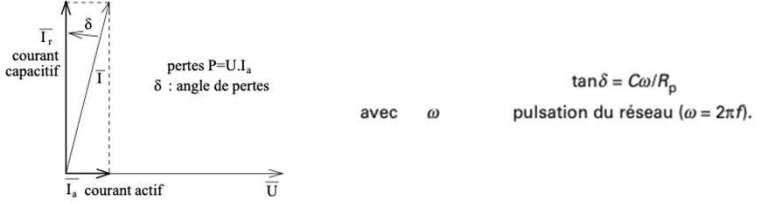
26

FRAMATECH 27/160

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.



avec ω pulsation du réseau ($\omega = 2\pi f$).

$\tan \delta = C\omega/R_p$

- 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 → la $\tan \delta$ aussi
 - Lorsque la température croît, le courant de fuites augmente.

MAGDALA

27

FRAMATECH 28/160


Les condensateurs

Familles technologiques

Condensateurs électrolytiques	<ul style="list-style-type: none">• Filtrage de tension continue• 2 grandes familles Al & Ta
Condensateurs céramiques	<ul style="list-style-type: none">• principalement utilisé en HF• 2 classes 1 & 2
Condensateurs films	<ul style="list-style-type: none">• Métallisation et/ou armature• 3 principaux diélectriques

MAGDALA

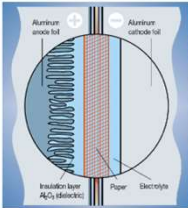
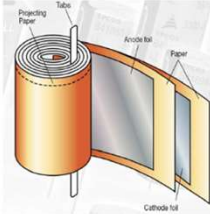
28


29/160

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 : $100 \mu\text{ohm.m}$

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



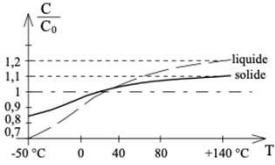
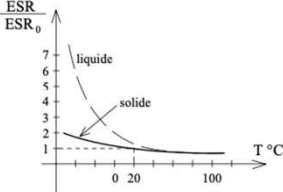
29

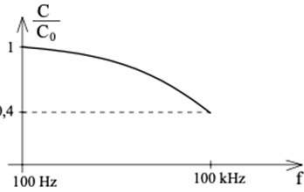
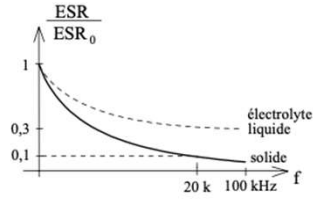

30/160


Les condensateurs

Les condensateurs électrolytiques Al

- Impact de la température



- Impact de la fréquence



30


31/160

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.





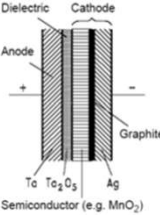
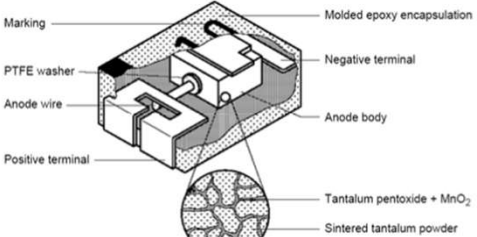

31



32/160

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 μF (qq 10 000 μF avec la technologie tantale humide de Vishay 2007)



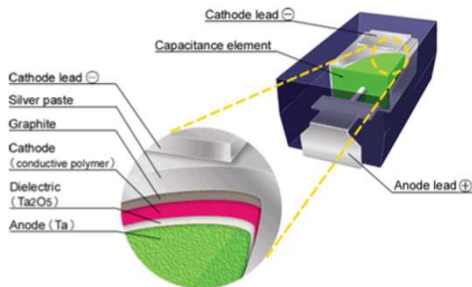
32

FRAMATECH 33/160

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.



The diagram illustrates the internal structure of a tantalum electrolytic capacitor. It shows a cross-section of the capacitor with various layers: Cathode lead (⊖), Silver paste, Graphite, Cathode (conductive polymer), Dielectric (Ta₂O₅), and Anode (Ta). A 3D view of the capacitor element is also shown, with labels for Cathode lead (⊖), Capacitance element, and Anode lead (⊕).

MAGDALA

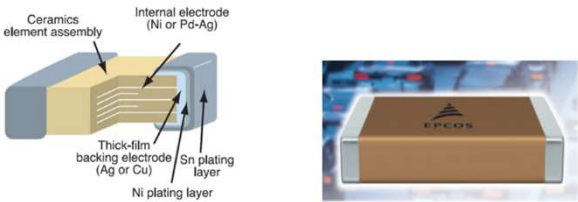
33

FRAMATECH 34/160

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 :



The diagram shows a cross-section of a ceramic capacitor element assembly. It consists of alternating layers of Ceramics element assembly and Internal electrode (Ni or Pd-Ag). The assembly is supported by a Thick-film backing electrode (Ag or Cu) and a Ni plating layer. A Sn plating layer is also shown. A photograph of a real ceramic capacitor component is shown to the right, with the text: Exemple de composant céramique en CMS, existe en ThT.

- Classe 1 : matériaux à base TiO₂ (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°C spécifiée et de tension DC appliquée, Faibles pertes HF. Pb : permittivité relativement faible → plus faible volume parmi les condensateurs céramique.

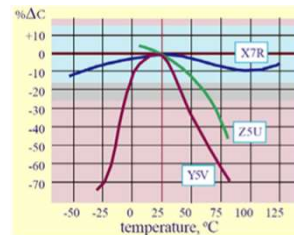
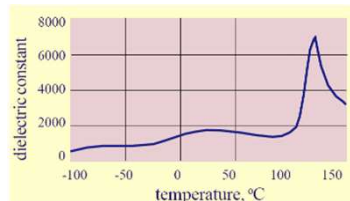
MAGDALA

34

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 : $+10^\circ C$ à $+45^\circ C$, Y : $-30^\circ C$ à $+65^\circ C$, X5 : $-55^\circ C$ à $+85^\circ C$ et X7 : $-55^\circ C$ à $105^\circ C$.
 - La dernière lettre la variation de la capacité sur la plage de Temp : A : $\pm 1\%$ jusqu'à V : $+22\%/-82\%$ → X7R : $\pm 1\%$ sur $-55^\circ C/+125^\circ C$

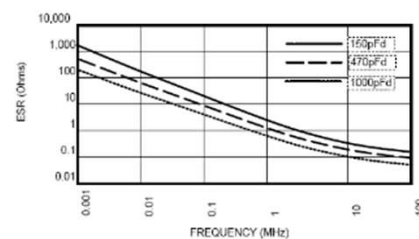
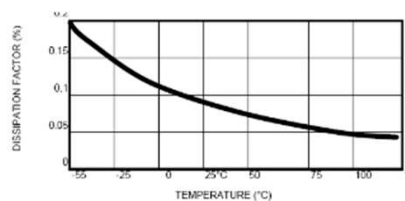


Les condensateurs

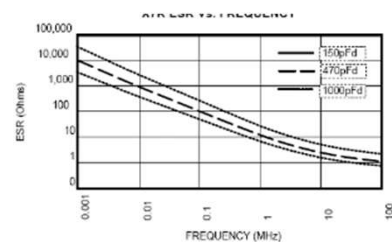
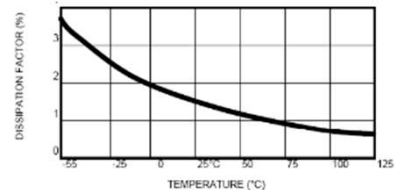
Les condensateurs céramiques


- Comparaison entre les classes 1 & 2

Classe 1



Classe 2

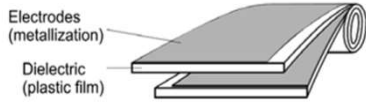



37/160

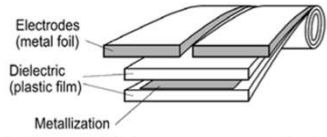
Les condensateurs

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)




Film plastique métallisé




Film plastique métallisé avec armatures renforcées

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 a chuté de 3%, on estime qu'il faut changer le condensateur (possibilité de maintenance préventive).



37


38/160

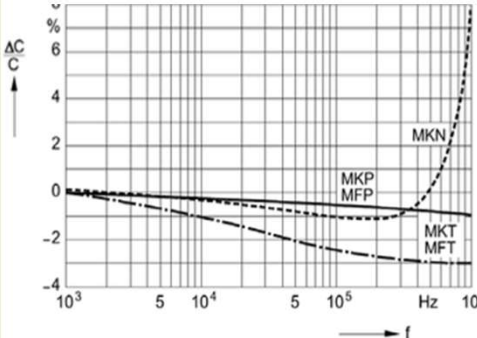
Les condensateurs

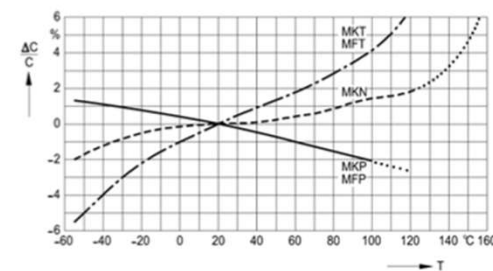
Condensateurs films


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

Dielectric	Metallized plastic film	Metal foil and metallized plastic film
Polyethylene terephthalate (Polyester)	MKT	MFT¹
Polypropylene	MKP	MFP¹
Polyethylene naphthalate	MKN	


Classification of film capacitors in DIN 41379







38

 39/160

Les condensateurs

Condensateurs films

Caractéristiques du polypropylène


$\epsilon_r = 2,2$
 $\tan \delta < 4.10^{-4}$ à 1 kHz - 25 °C
 $k_r = 30$ à 50 kV/mm selon épaisseur (épaisseur minimale : 4 μm)
 $\lambda = 0,22$ 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), $T_{\text{fusion}} = 165^\circ\text{C}$.
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.



39

 40/160

Les condensateurs

Condensateurs films

Caractéristiques du polyester (PET)

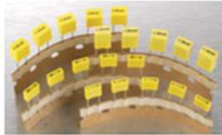
(=Polyéthylène téréphtalate d'Éthylène Glycol) ou encore **Mylar** : fabricant du film différent.


$\epsilon_r = 3,25$
 $\tan \delta \cong 40.10^{-4}$ (25 °C - 1 kHz)
 $k_r \approx 29$ à 50 kV/mm (épaisseur de diélectrique minimale : 0,9 μm)
 $\lambda = 0,24$ W/m/K

gamme de température extrême : -55 °C à +125 °C (et même 150 °C), $T_{\text{fusion}} = 255^\circ\text{C}$.
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





40



41/160

Les condensateurs


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)



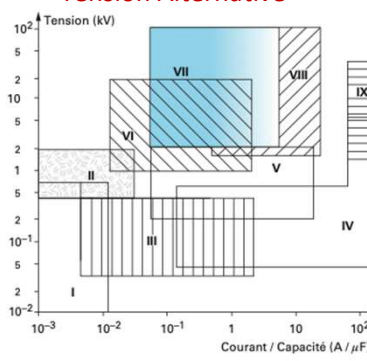
41


42/160

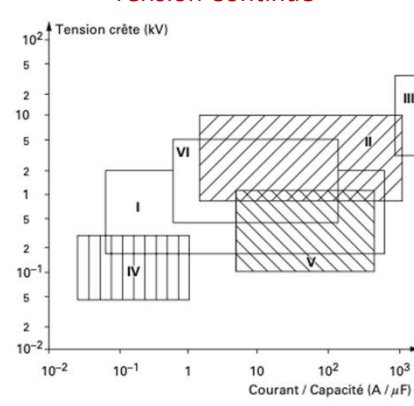
Les condensateurs

Domaine d'application Vs Techno

Tension Alternative




Tension Continue




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)
 et condensateur au polypropylène, métallisé imprégné (§ 2.5.1.2)
VI condensateur au polypropylène, 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)

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



FRAMATECH

43/160

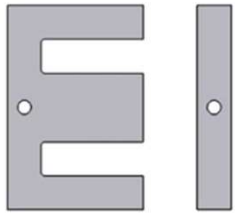
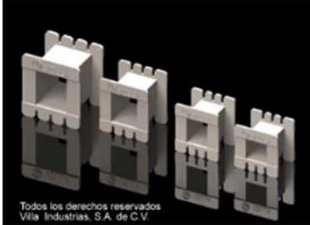
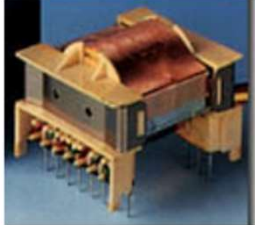
Les
composants
magnétiques


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



43



FRAMATECH

44/160

Les
composants
magnétiques


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 (Fe₂O₃), 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



44

FRAMATECH 45/160

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

MAGDALA

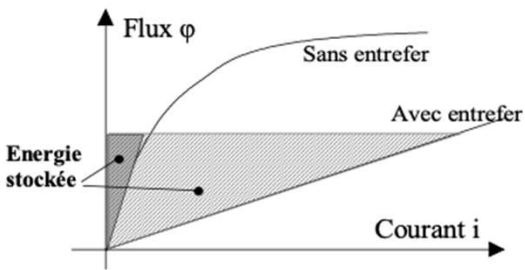
45

FRAMATECH 46/160

Les composants magnétiques

Circuit magnétique

- Entrefers : le but est d'éviter la saturation du matériau magnétique & ↑ le stockage d'énergie. Pour les matériaux comme les ferrites, l'entrefers 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 entrefers repartis.



Flux ϕ

Sans entrefers


Avec entrefers

Energie stockée

Courant i

MAGDALA

46


47/160

Les
composants
magnétiques

Circuit magnétique

Les paramètres à maîtriser :

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

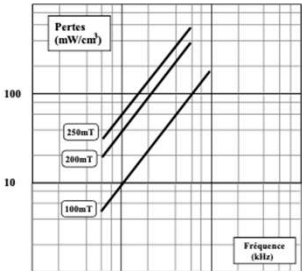


Fig 1.1: Pertes totales en fonction de f et B_{sat}

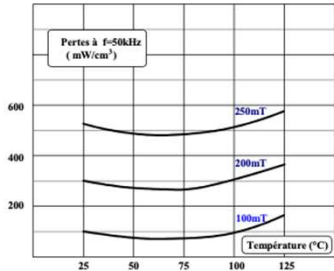




Fig 1.2: Pertes totales en fonction de la température



47

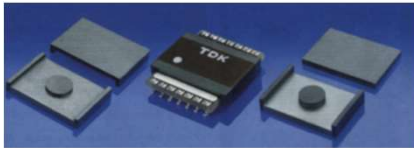

48/160

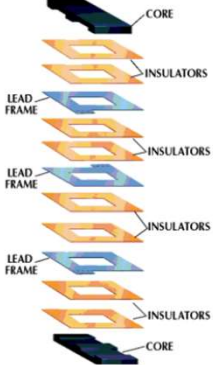
Les
composants
magnétiques


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







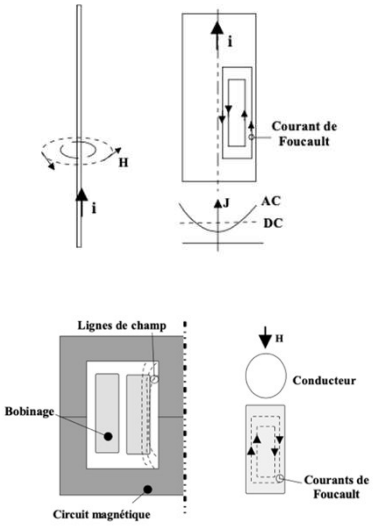
48



49/160


Les
composants
magnétiques

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.



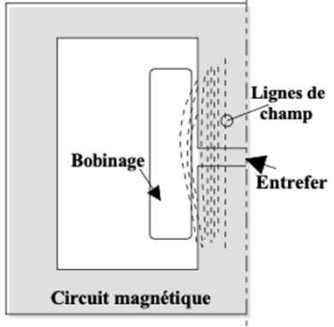

49



50/160

Les
composants
magnétiques

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.




50

FRAMATECH 51/160


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



MAGDALA

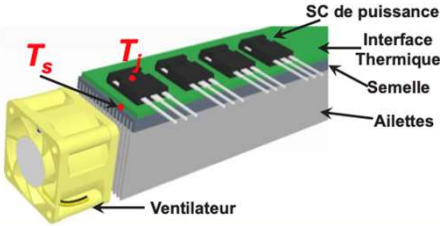
51

FRAMATECH 52/160

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.



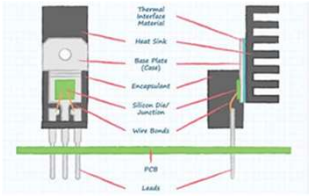
MAGDALA

52

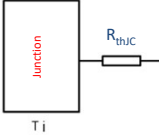

53/160

Exemple de dimensionnement d'un dissipateur

➤ Cas Simple

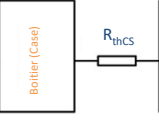


Impédance thermique
Junction-Case

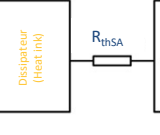


T_j

Impédance thermique
Case-Sink




Impédance thermique
Sink-ambiance




T_a

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

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

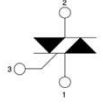


53


54/160

Exemple de dimensionnement d'un dissipateur

Cas simple : contrôle d'une commande avec un triac de type CLA80MT1200NHb,



$P = R_{th}(T_j - T_{amb})$
 $R_{th} = R_{thJC} + R_{thCS} + R_{thSA}$

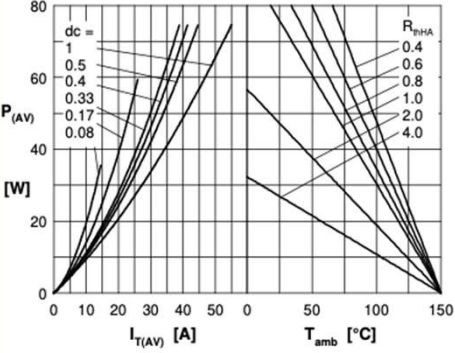


Fig. 7a Power dissipation versus direct output current
Fig. 7b and ambient temperature


Symbol	Definition	Conditions	min.	typ.	max.	Unit
V _{RRM}	max. non-repetitive reverse/forward blocking voltage	T _{vj} = 25°C			1300	V
V _{RRSM}	max. repetitive reverse/forward blocking voltage	T _{vj} = 25°C			1200	V
I _{RM}	reverse current, drain current	V _{RRM} = 1200 V T _{vj} = 25°C			10	µA
I _{SM}	reverse current, drain current	V _{RRM} = 1200 V T _{vj} = 125°C			2	mA
V _F	forward voltage drop	I _F = 40 A T _{vj} = 25°C			1.30	V
		I _F = 80 A T _{vj} = 125°C			1.59	V
		I _F = 80 A T _{vj} = 150°C			1.26	V
I _{FAV}	average forward current	T _C = 120°C T _{vj} = 150°C			40	A
I _{FRMS}	RMS forward current per phase	180° sine			88	A
V _{th}	threshold voltage	T _{vj} = 150°C			0.88	V
r _θ	slope resistance	for power loss calculation only			10	mΩ
R _{thJC}	thermal resistance junction to case				0.4	K/W
R _{thCS}	thermal resistance case to heatsink		0.25			K/W

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

54

(c) Stéphane BIONDO, MAGDALA, 2024

27


55/160

Les systèmes
de
refroidissement

Exemple de dimensionnement d'un dissipateur

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

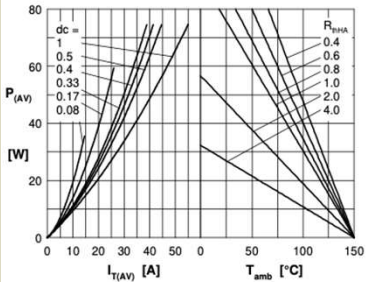




Fig. 7a Power dissipation versus direct output current
Fig. 7b and ambient temperature


- 10A → R_{thSA} = 4°C/W & T_{amb} max = 100°C
- 20A → R_{thSA} = 4°C/W & T_{amb} max = 50°C
- 30A → R_{thSA} = 2°C/W & T_{amb} max = 75°C
- 35A → R_{thSA} = 2°C/W & T_{amb} max = 50°C
- Ou → R_{thSA} = 1°C/W & T_{amb} max = 100°C
- 40A → R_{thSA} < 1°C/W & T_{amb} max = 75°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



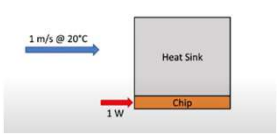
55


56/160

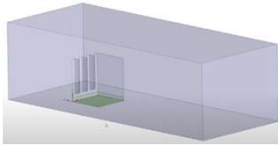
Les systèmes
de
refroidissement

Exemple de dimensionnement d'un dissipateur

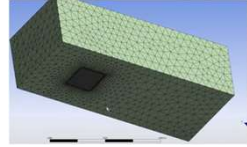
Cas moins simple : Impact d'un mouvement de convection forcé sur un dissipateur, Logiciel de simulation FEM: ANSYS, Comsol, Elmer



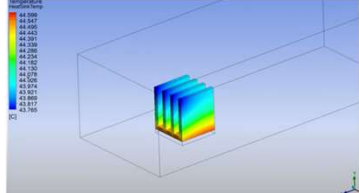
Création du modèle :
paramètre de simulation

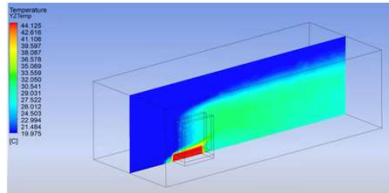


Création de la géométrie




Maillage





Résultats de simulation : Intégration de la thermique et du fluide




56

FRAMATECH **MAGDALA**

ETATS DES LIEUX DES COMPOSANTS

Les composants actifs ; les semi-conducteurs



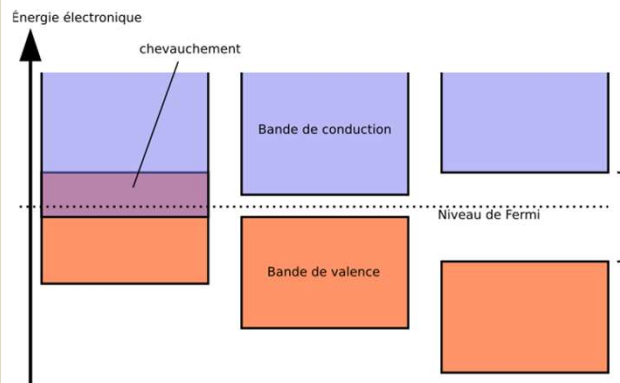
57

FRAMATECH 58/160

Semi-conducteur?

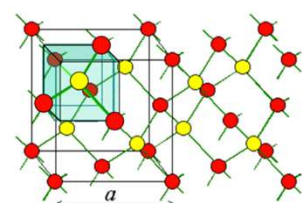
Notions de semi-conducteurs

Energie électronique



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 → Générer un courant

Structure cristalline




GaAs
Cellule élémentaire

Faible résistivité, ↑ avec T°C

La résistivité dépend du dopage, ↓ avec T°

Résistivité élevée, ↑ avec T°

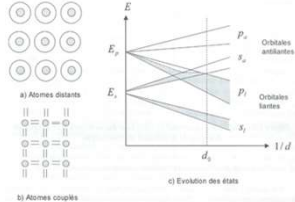
58

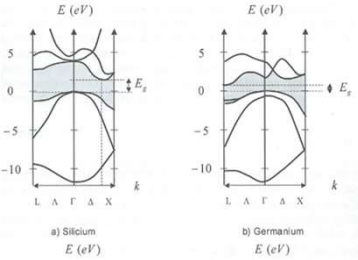


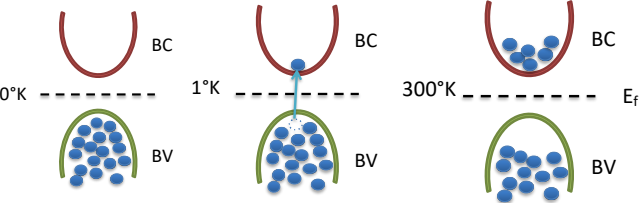
59/160

Semi-conducteur?

Notions de bandes interdites








Concentration de porteurs intrinsèques n_i :

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

	Ge	Si	SiC-4H	GaN
E_g (eV) à 300k	0,67	1,12	3,28	3,44
N_i (cm ⁻³)	$2 \cdot 10^3$	10^{10}	$6,7 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-10}$

59




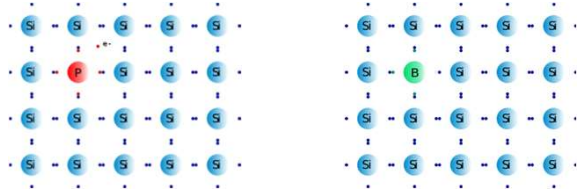


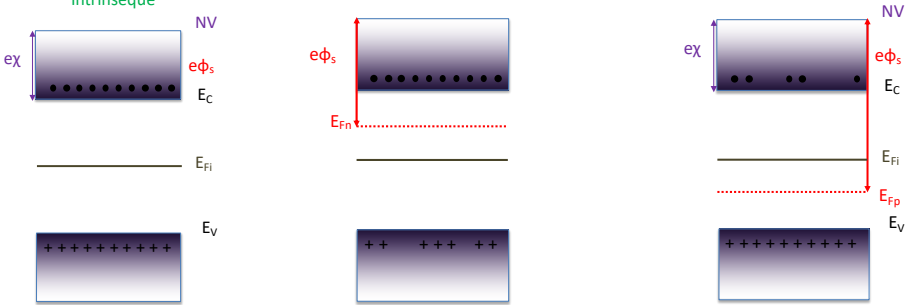
60/160

Semi-conducteur?


Notions Dopages







60

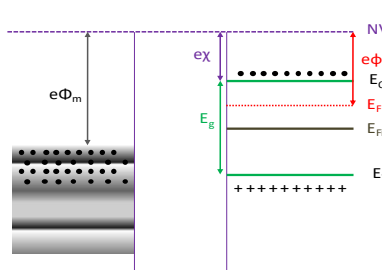

61/160

Semi-conducteur?

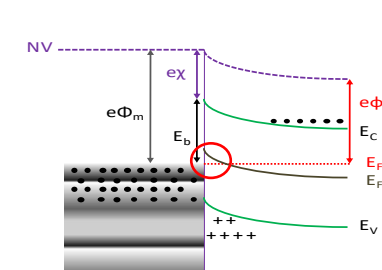
Contact Schottky

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.

Métal




Semi-conducteur




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



61


62/160

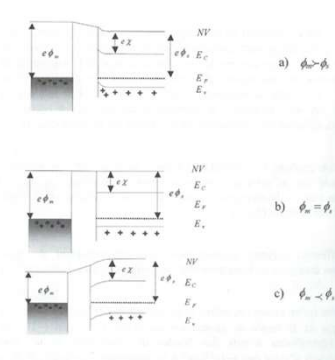
Semi-conducteur?

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



62

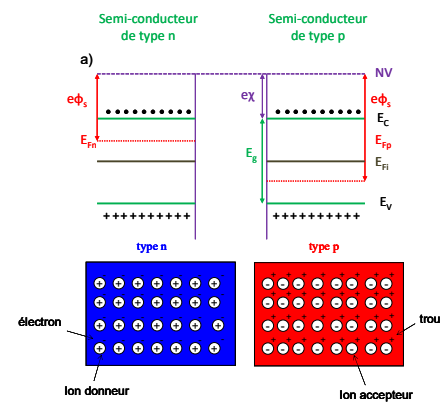

63/160

Semi-conducteur?

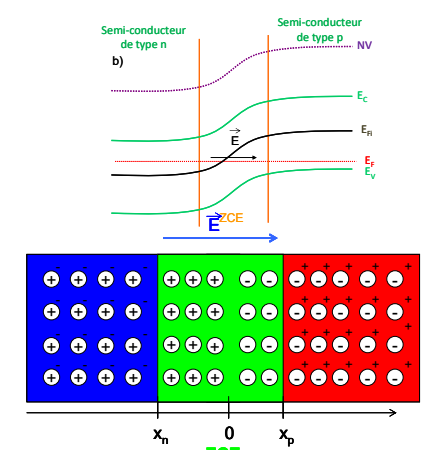
Contact S.C type n/ S.C type p


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

a)




b)

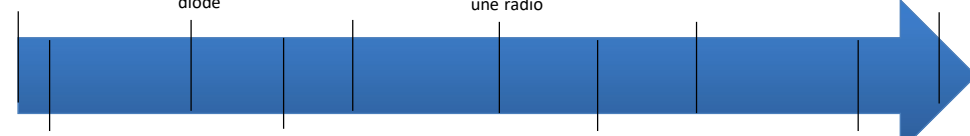




63



64/160

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 intègre la galène pour créer un effet redresseur ancêtre de la diode




Décembre 1947 : Le premier transistor




1937 : l'ordinateur avant le transistor



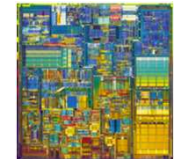
1954 : Premier application du transistor dans une radio



1958 : Premier circuit intégré

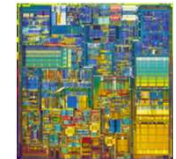



1969 : invention du microprocesseur



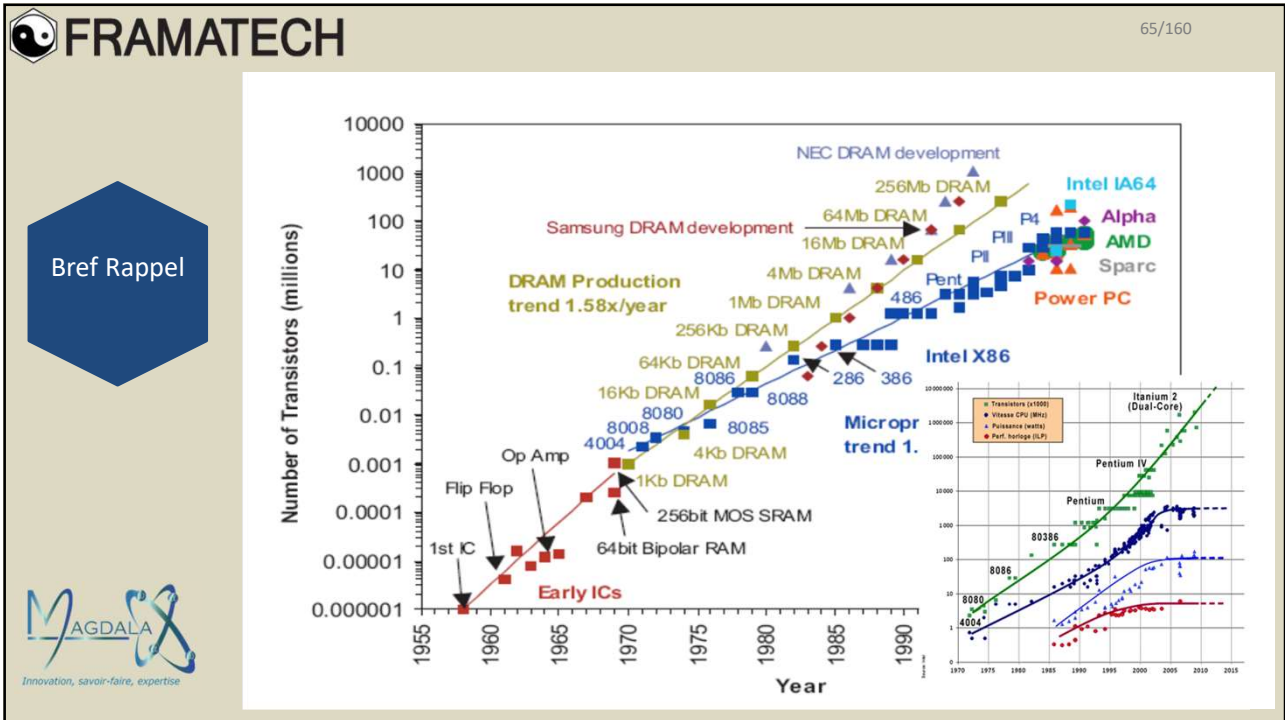
1971 : Intel 4004 intègre 2 250 transistors et exécute 60 000 op/s

2014 : Processeur i7 2,6x10⁹ transistors





64



FRAMATECH 66/160


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.

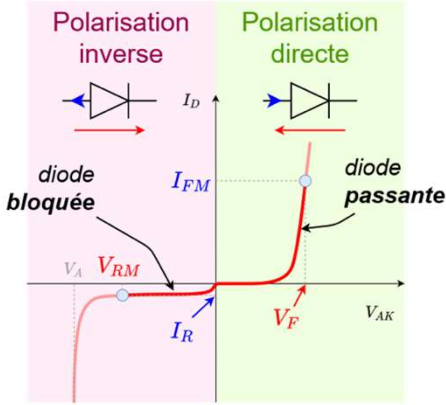
- **Sens direct (passant) :** La diode est conductrice, elle présente une faible chute de tension de l'ordre de quelques volts.
- **Sens inverse (bloqué) :** La diode est non passante, elle présente un très faible courant résiduel de l'ordre de quelques micro-ampères.

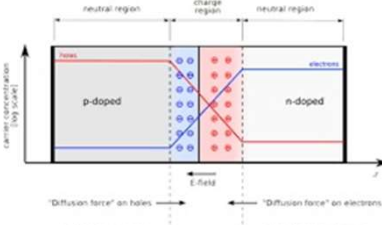
66


67/160

Principe de fonctionnement : cas réel


Diode de puissance






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

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




67


68/160


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



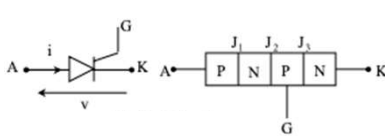
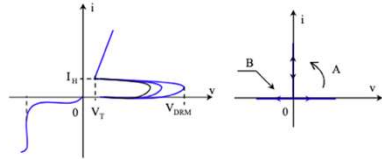
68


69/160

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



69


70/160


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;



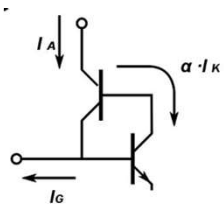
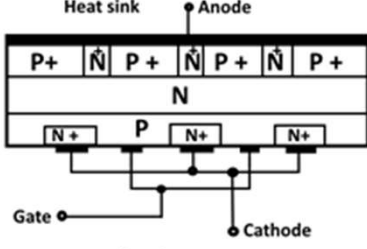
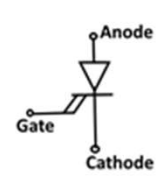
70

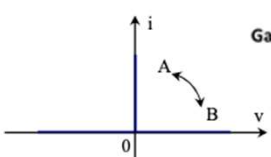

71/160


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


72/160

Transistor
bipolaire de
puissance

Principe de fonctionnement

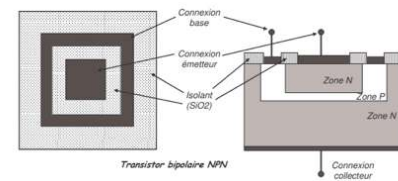
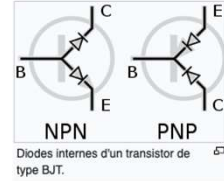
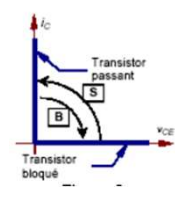
2 types : NPN et PNP, mais principalement NPN car plus rapide en commutation. C'est un composant **totalemment commandé à la fermeture et à l'ouverture**. Il n'est pas réversible en courant, ne laissant passer que des courants de collecteur I_C positifs. Il n'est pas réversible en tension, n'acceptant 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_{CE0}) qui provoquerait de claquage de la jonction ;
- un courant résiduel dû aux porteurs minoritaires circule dans le collecteur (I_{CBO}).



72


73/160

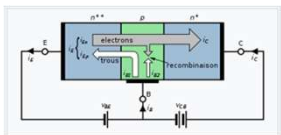
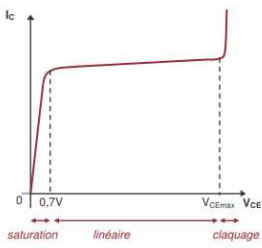
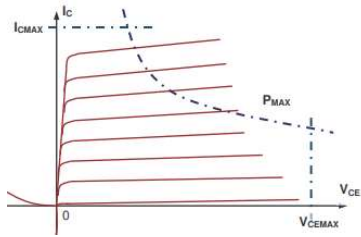
Transistor
bipolaire de
puissance


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.



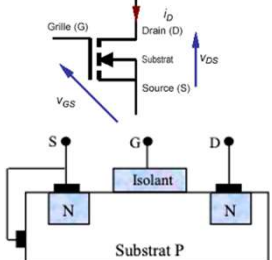
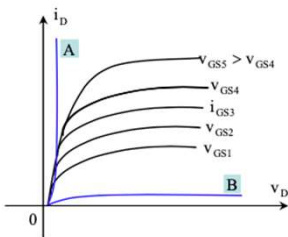
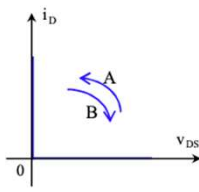
73



74/160

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_{Dson} devient alors très élevée.



74

Transistor
MOS

Caractéristiques essentielles

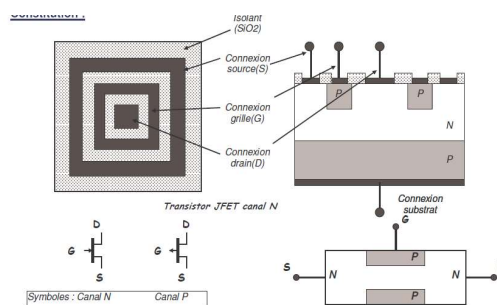
Les données techniques suivantes sont nécessaires pour caractériser un transistor MOS :

- 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.

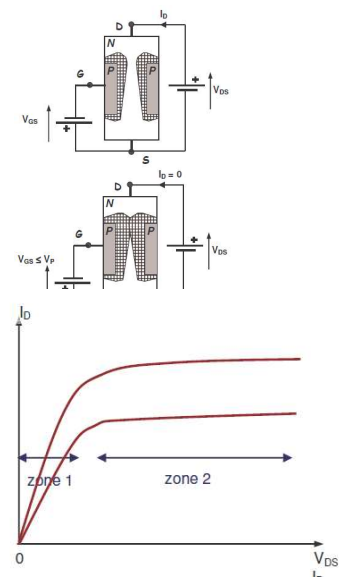



JFET

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





77/160


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} .



77



78/160

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

Symbole



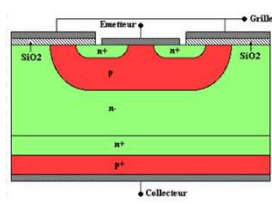
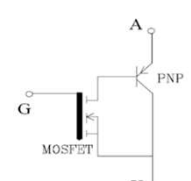
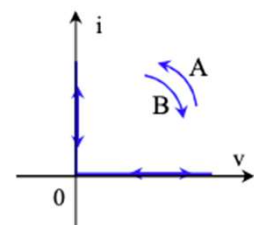



Schéma équivalent




Caractéristique statique





78



79/160

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;
- $t_d(on)$: 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 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.



79


80/160

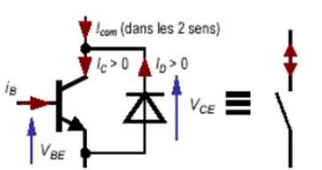
Autres

Et d'autres composants...

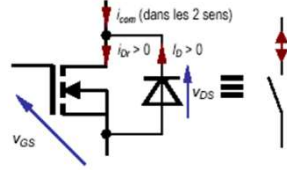
Le triac : interrupteur semi-commandable bidirectionnel. La fermeture de l'interrupteur triac correspond à l'amorçage d'une avalanche, comme dans le thyristor. Il est équivalent à deux thyristors montés en antiparallèle; mais, à la différence du montage à deux thyristors, il ne comporte qu'une seule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

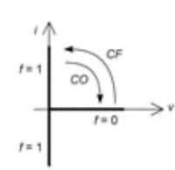
Transistor dual : Il est équivalent à l'association d'un transistor et d'une diode en antiparallèle




Transistor bipolaire réversible en courant



Transistor Mos réversible en courant





80

FRAMATECH 81/160

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

Résumé

```

graph TD
    Root[Composants de puissance] --> P2[2 pins]
    Root --> P3[3 pins]
    P2 --> PIN[PIN diode]
    P2 --> Schottky[Schottky diode]
    P3 --> MOSFET[Power MOSFET]
    P3 --> JFET[JFET]
    P3 --> IGBT[IGBT]
    P3 --> BJT[BJT]
    P3 --> Thyristor[Thyristor]
    P3 --> Bipolaire[Transistor bipolaire]
    
    PIN --- G1[Composants porteurs minoritaires]
    Schottky --- G1
    
    MOSFET --- G2[Composants porteurs majoritaires]
    JFET --- G2
    
    IGBT --- G3[Composants porteurs minoritaires]
    BJT --- G3
    Thyristor --- G3
    
    Bipolaire --- G4[Transistor bipolaire]
            
```

MAGDALA

81

FRAMATECH 82/160


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

Avantages du Si

MAGDALA

82


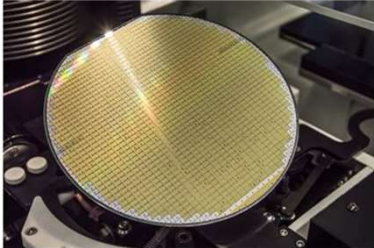
FRAMATECH 83/160




Avantages du Si

Avantages du Silicium


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





83

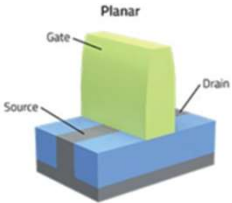
FRAMATECH 84/160



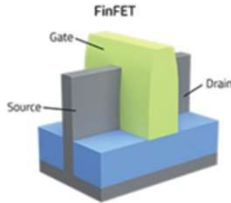
Avantages du Si

Avantages du Silicium

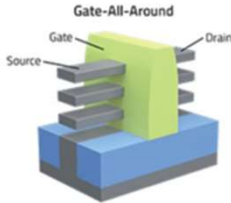
- Technologie maîtrisée gate : 3nm :
- Avancée vers le 2nm :
- Structure 3D



Planar




FinFET



Gate-All-Around

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



84

FRAMATECH 85/160

Inconvénients

Inconvénients du Si

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

Matériau grand gap

Température de jonction (°C)

En 2016, la température moyen de jonction est de 150°C
power modules was around 150°C

Durée Time

Si

85

FRAMATECH 86/160



Aire de sécurité en fonctionnement direct

Inconvénients du Si


- 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.


86

**COMPOSANTS
S.C EN EDP**




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


87

 88/160


**Grand Gap
SiC/GaN**

Notions de Gap ou bande interdite

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



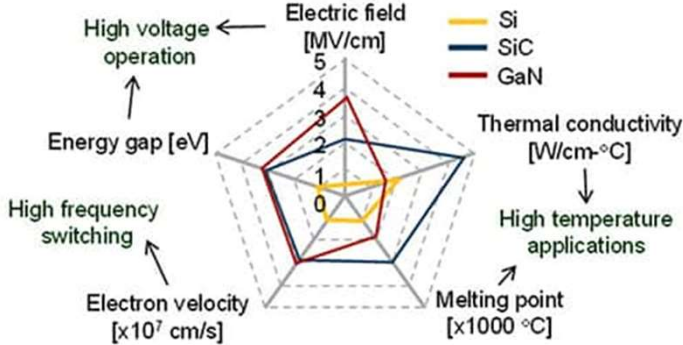
88



89/160

Grand Gap
SiC/GaN


Pourquoi des matériaux à grand gap pour EDP?

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





89


90/160

Grand Gap
SiC/GaN

Impact du grand Gap

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

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


- La formule permettant de calculer la tension de seuil est

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

	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

Valeurs dépendantes de la concentration de dopants

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



90

FRAMATECH 91/160

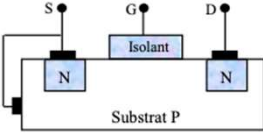
Grand Gap SiC/GaN

Impact de la mobilité des électrons

- La résistivité d'une couche est liée à la mobilité des porteurs
 - Les électrons sont plus mobiles que les trous
 - Les grands gap possèdent des mobilités plus importantes

$$\rho = \frac{1}{nq\mu} \quad \text{Résistance} \quad R_{DSon} = \rho \frac{L}{S}$$

Résistivité *mobilité*



Dans le cas d'un MOSFET à structure égale les grands gap possèdent de meilleures performances.

Limitation de la taille de composants Si

Taux de recouvrement plus rapide pour le SiC/GaN

MAGDALA

91

FRAMATECH 92/160


Spécificité du SiC

SiC un peu d'histoire

- Découverte en 1924 par accident lors d'une expérience de Berzélius
- 1891 production de poudre de SiC par Acheson
 - Utilisé comme matériau abrasif (dureté proche du diamant)
 - Céramique : freins, embrayages et revêtement pour les milieux corrosifs
- La moissanite ; Le premier fragment de moissanite a été observé en 1893 par Henri Moissan — qui a donné son nom au minéral — dans la météorite de Canyon Diablo, issue du Meteor Crater, en Arizona (États-Unis)
- 1907 découverte de son effet électroluminescent après injection de courant
- 1950 → Volonté de développement du SiC pour des applications militaire & spatial pour HT°, HF, milieu hostile (radiation).
 - Premier acteur du marché l'ex-URSS : IOFFE et LETI
 - Suivi par la NASA et Westinghouse
 - Première société de production de SiC 1990: CREE
- Premier composant en SiC commercialisé : Diodes Schottky en 2001
- Premier transistor de puissance en SiC : JFET S 2008
- Premier transistor MOSFET SiC : 2011

MAGDALA

92

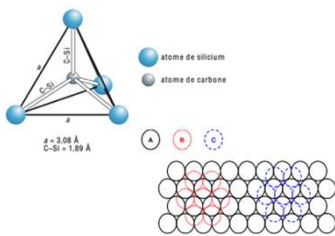

93/160

Spécificité du SiC

Le Carbure de Silicium : croissance

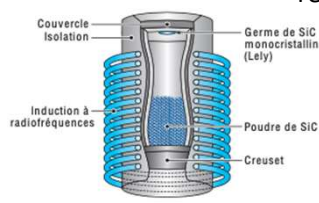
+ plus 200 polytypes : tous bicouches Si-C

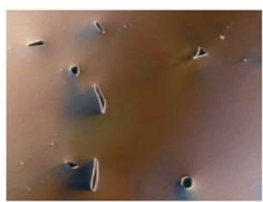
Fabrication de substrat : réacteur de croissance



atome de silicium
atome de carbone

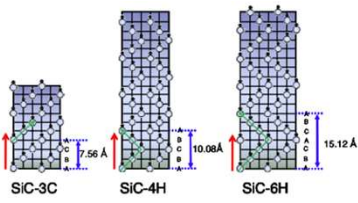
$a = 3.08 \text{ \AA}$
 $c\text{-Si} = 1.99 \text{ \AA}$





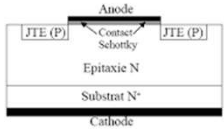
Problème de générations de défauts micropores, dislocations → Amélioration du procédé de fab

Empilement de Bi-couches Si-C




SiC-3C SiC-4H SiC-6H


7.56 Å 10.08 Å 15.12 Å



Croissance par épitaxie → Fautes d'empilement



93


94/160


Spécificité du SiC

Le Carbure de Silicium : le dopage


13 Bore B 10,8135	14 Carbone C 12,0108	15 Azote N 14,006435	16 Oxygène O 15,999401	17 Fluor F 18,9984032	Helium 2 He 4,002602
Aluminium 13 Al 26,9815385	Silicium 14 Si 28,085511	Phosphore 15 P 30,97376208	Soufre 16 S 32,0675	Chlore 17 Cl 35,453	Argon 18 Ar 39,948111
Gallium 31 Ga 69,7231	Germanium 32 Ge 72,630518	Arsenic 33 As 74,921595	Sélénium 34 Se 78,9718	Brome 35 Br 79,9041	Krypton 36 Kr 83,7991
Indium 49 In 114,8181	Étain 50 Sn 118,7101	Antimoine 51 Sb 121,7601	Tellure 52 Te 127,603	Iode 53 I 126,90447	Xénon 54 Xe 131,291
Thallium 81 Tl 204,3833	Plomb 82 Pb 207,2	Bismuth 83 Bi 208,9804	Poivre 84 Po 209	Astato 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

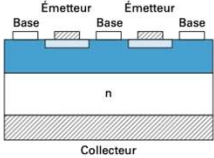


94


95/160

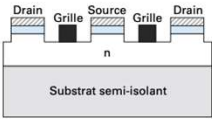
Le Carbure de Silicium : quelques structures

(1) BJT



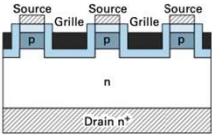
Collecteur

(3) MESFET



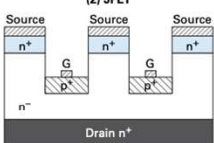
Substrat semi-isolant

(5) U-MOS



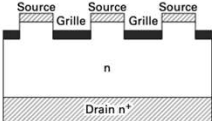
Drain n⁺

(2) JFET



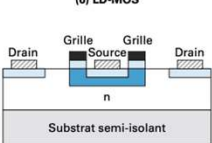
Drain n⁺

(4) SIT






Drain n⁺

(6) LD-MOS




Substrat semi-isolant

Contact ohmique sur type n	Contact ohmique sur type n	Contact ohmique sur type n
Contact ohmique sur type p	Métallisation de grille	Métallisation de grille
Couche n ⁺ (émetteur)	Couche n ⁺	Isolat de grille
Couche p (base)		Couche n ⁺
		Couche p (base)

95


96/160

GaN un peu d'histoire

Spécificité
du GaN


- La famille des III-V : AsGa (1.41eV), InP (1.35eV), GaN (3.43eV) → tous de gap direct
- Première diode bleu en GaN en 1970 mais problématique du substrat et dopage P
- Amélioration des technique de croissance et de dopage du GaN dans les années 80-90 du coté du japon → meilleur substrat pour la croissance du GaN
- Accroissement de la productivité à partir de 93 grâce au blueray et au domaine de l'optoélectronique qui n'a que très peu de concurrent
- Possibilité de création d'hétérostructure : InGaN ou AlGaN

13	14	15	16	17	18
Bor	Carbone	Azote	Oxygène	Fluor	Neon
5	6	7	8	9	10
10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.180
13	14	15	16	17	18
Aluminium	Silicium	Phosphore	Soufre	Chlore	Argon
13	14	15	16	17	18
26.982	28.086	30.974	32.06	35.453	39.948
19	20	21	22	23	24
Kalium	Calcium	Scandium	Titane	Vanadium	Chrome
19	20	21	22	23	24
39.098	40.078	44.956	47.88	50.942	51.996
25	26	27	28	29	30
Vanadium	Chrome	Manganèse	Fer	Cobalt	Nickel
51	52	53	54	55	56
50.942	51.996	54.938	55.845	58.933	58.933
31	32	33	34	35	36
Galium	Germanium	As	Sélénium	Bromure	Krypton
69	72	75	78	80	84
69.723	72.63	74.922	78.96	79.904	83.80
37	38	39	40	41	42
Rubidium	Strontium	Yttrium	Zinc	Gallium	Germanium
85	88	89	90	91	92
85.468	87.62	88.906	90.907	91.224	92.906





96

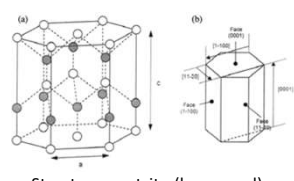

97/160

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%)



Structure wurtzite (hexagonal)



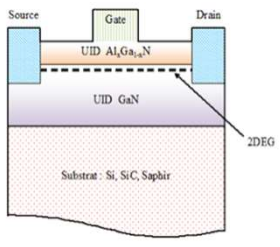
97


98/160

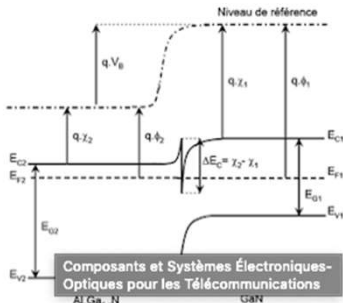
Spécificité
du GaN

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.



98


99/160

Spécificité
du GaN

GaN un composant latéral

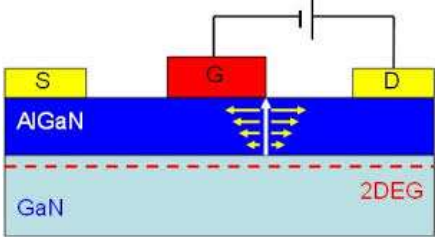
Historique : développement pour les composants et leds à hautes fréquences


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)





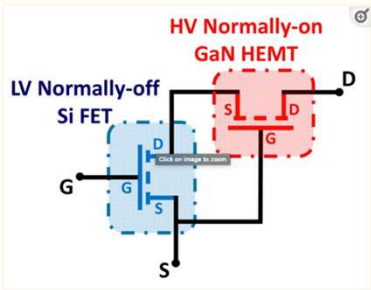
99


100/160

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



101/160

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)



101


102/160

Avantages &
inconvénients

Si

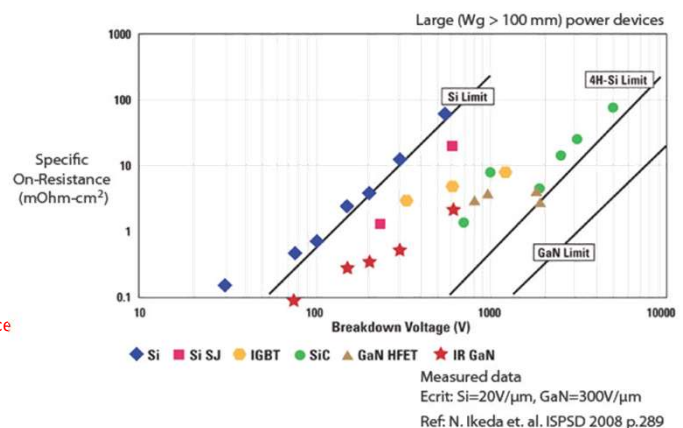
- Faible coût
- Composants mature
- Grande fiabilité
- ⊗ Limitation du matériau
- Maturité du marché

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



Measured data
Ecrit: Si=20V/μm, GaN=300V/μm
Ref: N. Ikeda et. al. ISPSD 2008 p.289



102

FRAMATECH 103/160

Avantages & inconvénients

Résumé des composants de puissance vs matériau

```

graph TD
    Root[Résumé des composants de puissance vs matériau] --> Silicon
    Root --> SiliconCarbide[Silicon carbide]
    Root --> GalliumNitride[Gallium nitride]
    
    Silicon --> SiliconDiodes[Diodes]
    Silicon --> SiliconTransistors[Transistors]
    Silicon --> SiliconThyristors[Thyristors]
    
    SiliconCarbide --> SiliconCarbideDiodes[Diodes]
    SiliconCarbide --> SiliconCarbideTransistors[Transistors]
    SiliconCarbide --> SiliconCarbideThyristors[Thyristors]
    
    GalliumNitride --> GalliumNitrideDiodes[Diodes]
    GalliumNitride --> GalliumNitrideTransistors[Transistors]
    
    SiliconDiodes --- S_Schottky[Schottky]
    SiliconDiodes --- S_Epitaxial[Epitaxial (PIN)]
    SiliconDiodes --- S_DoubleDiffusion[Double diffusion (PIN)]
    
    SiliconTransistors --- ST_BJT[BJT]
    SiliconTransistors --- ST_NPN[NPN]
    SiliconTransistors --- ST_PNP[PNP]
    SiliconTransistors --- ST_MOSFET[MOSFET]
    SiliconTransistors --- ST_Nchannel[N-channel]
    SiliconTransistors --- ST_Conventional[Conventional]
    SiliconTransistors --- ST_SuperJunction[Super junction]
    SiliconTransistors --- ST_CoolMOS[CoolMOS]
    SiliconTransistors --- ST_Pchannel[P-channel]
    SiliconTransistors --- ST_IGBT[IGBT]
    SiliconTransistors --- ST_ConventionalTrench[Conventional Trench]
    SiliconTransistors --- ST_NPT[NPT]
    SiliconTransistors --- ST_PT[PT]
    
    SiliconThyristors --- ST_Fast[Fast thyristors]
    SiliconThyristors --- ST_Symmetric[Symmetric]
    SiliconThyristors --- ST_Asymmetric[Asymmetric]
    SiliconThyristors --- ST_Reverse[Reverse]
    
    SiliconCarbideDiodes --- SC_Schottky[Schottky]
    SiliconCarbideDiodes --- SC_Epitaxial[Epitaxial (PIN)]
    
    SiliconCarbideTransistors --- SCT_NPN[NPN BJT]
    SiliconCarbideTransistors --- SCT_DMOSFET[DMOSFET]
    SiliconCarbideTransistors --- SCT_JFET[JFET]
    SiliconCarbideTransistors --- SCT_IGBT[IGBT]
    
    SiliconCarbideThyristors --- SCT_GTO[GTO]
    SiliconCarbideThyristors --- SCT_Symmetric[Symmetric]
    SiliconCarbideThyristors --- SCT_Asymmetric[Asymmetric]
    SiliconCarbideThyristors --- SCT_Reverse[Reverse]
    
    SiliconCarbideThyristors --- SCT_IGCT[IGCT]
    SiliconCarbideThyristors --- SCT_Asymmetric[Asymmetric]
    SiliconCarbideThyristors --- SCT_Reverse[Reverse]
    
    SiliconCarbideThyristors --- SCT_MCT[MCT]
    SiliconCarbideThyristors --- SCT_Ptype[P-type]
    SiliconCarbideThyristors --- SCT_Ntype[N-type]
    SiliconCarbideThyristors --- SCT_MTO[MTO]
    
    GalliumNitrideDiodes --- GN_Schottky[Schottky]
    GalliumNitrideDiodes --- GN_Epitaxial[Epitaxial (PIN)]
    
    GalliumNitrideTransistors --- GNT_HEMT[HEMT]
    GalliumNitrideTransistors --- GNT_MOSFET[MOSFET]
    GalliumNitrideTransistors --- GNT_JFET[JFET]
    
```

103

FRAMATECH 104/160

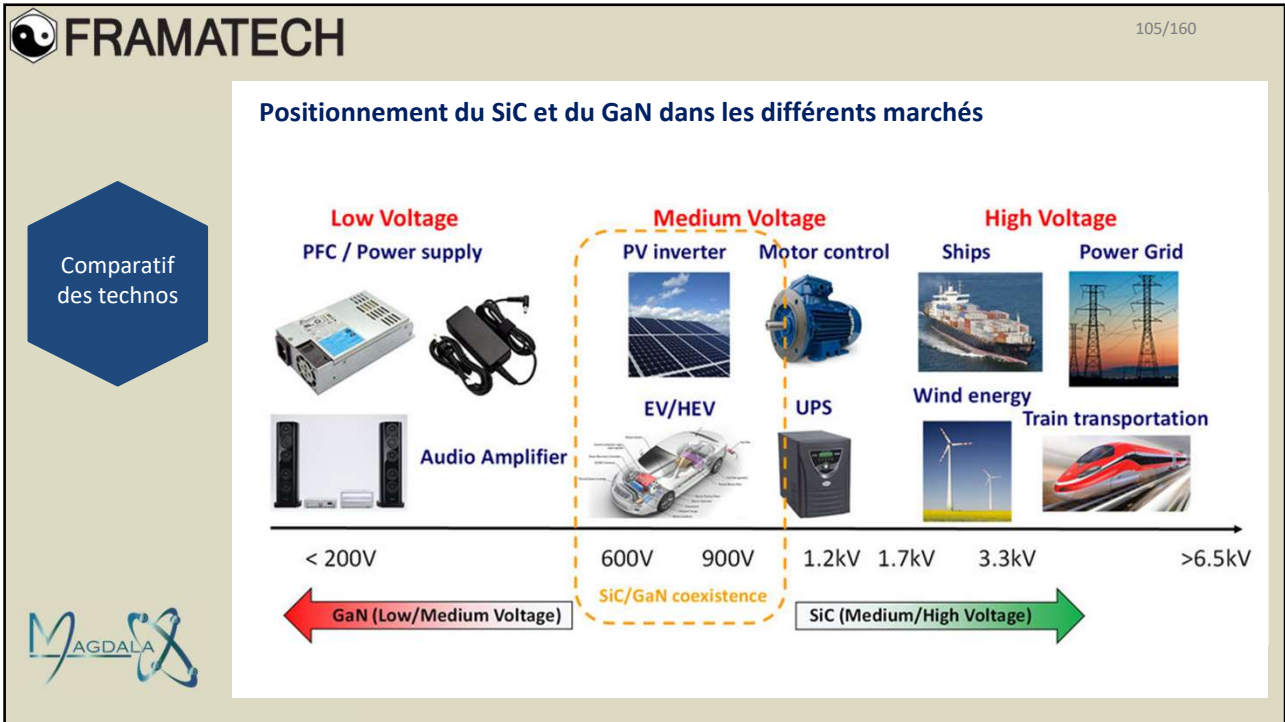
Comparatif des technos

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

104



105

Comparatif Si/SiC diode

ROHM Schottky Barrier Diode RBQ30T65AHZ vs ON Semiconductor FFSP3065B-F085 Silicon Carbide Schottky Diode

	Si	SiC
Vrrm (Peak Repetitive Reverse Voltage)	65V	650V
IF(AV)	30A	30A
IF,max (Non-Repetitive Peak Forward Surge Current)	100A	100A
Tj,Tstg	-40 à 150°C	-55 à 175°C
VF (forward voltage)	0.69V @ 15A	1.38V @ 30A
IR (Reverse current)	450µA @ 65V	40µA @ 650V

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 _{gsmax}	-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

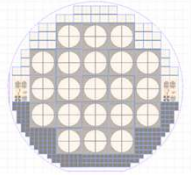
109

FRAMATECH 110/160

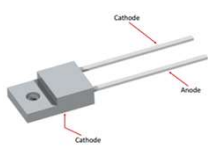
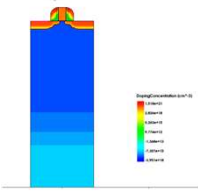
Etapes de fabrication

Fabrication d'un composant S.C


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



Simulation **Conception Masque** **Fabrication**



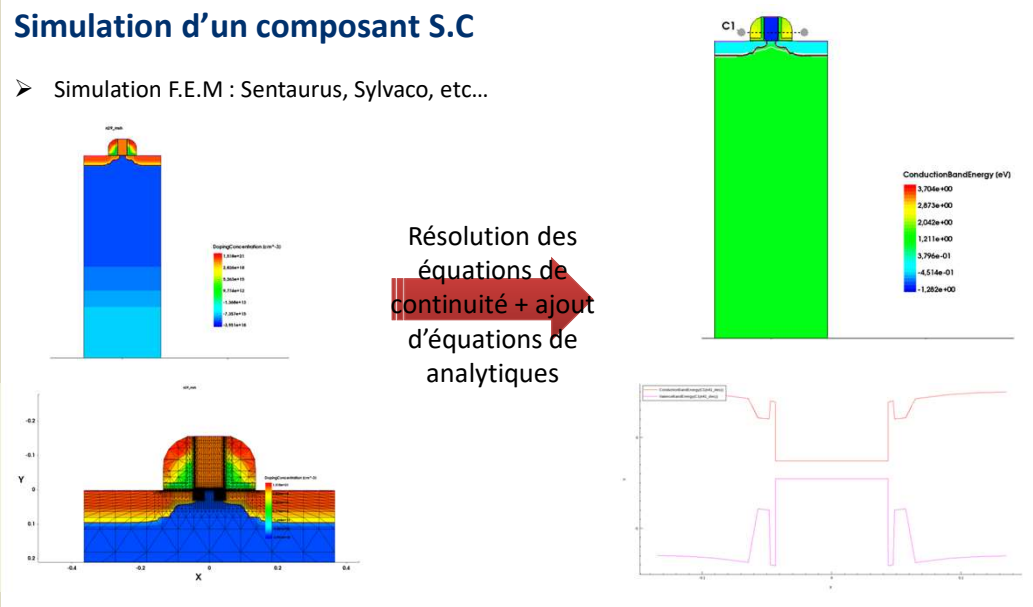
110


111/160


Etapes de fabrication

Simulation d'un composant S.C


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



Résolution des équations de continuité + ajout d'équations analytiques



111


112/160

Etapes de fabrication

Simulation d'un composant S.C

➤ Résolution des équations de continuité + ajout d'équations 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
- G_n et G_p 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
- ε₀ la permittivité du vide
- ε_{sc} la permittivité du S.C



112

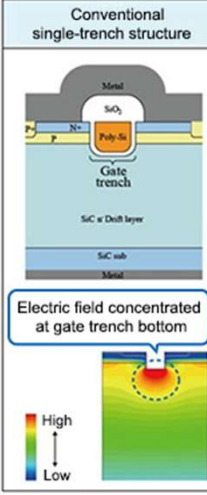

113/160

Etapes de fabrication

Simulation d'un composant S.C

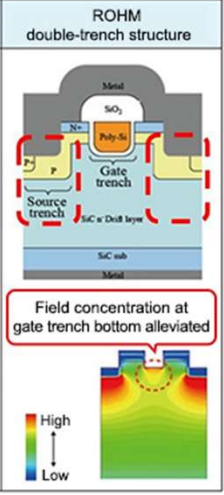
➤ Exemple de simulation FEM pour l'optimisation de composant

Conventional single-trench structure




Electric field concentrated at gate trench bottom


ROHM double-trench structure



Field concentration at gate trench bottom alleviated



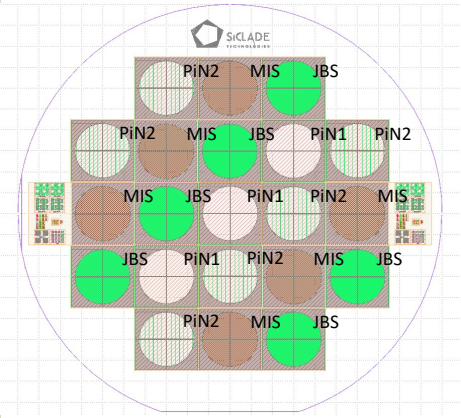
113


114/160

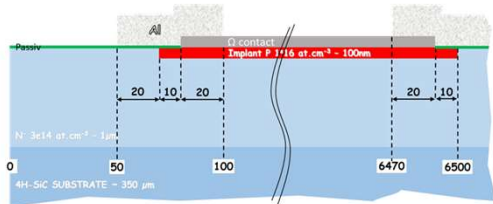
Etapes de fabrication


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_Rech arge	Metallization	Metal layer for wirebonding interconnexion





114


115/160

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



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 de prélèvements et les limites statistiques sur ces faibles concentration 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.

115








116/160


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



<ul style="list-style-type: none">  6 oeufs + 2 blancs  310 g de sucre en poudre  160 g de Poudre d'amande  40 g de farine  150 g de beurre  1 cuillère à soupe d'extrait de café liquide  200 g de crème  200 g de chocolat noir  75 cl d'eau  5 cl de rhum 	<ul style="list-style-type: none"> Etape 1 Préchauffer le four à 180° (thermostat 6). Etape 2 Battre 4 oeufs en omelette avec 160 g sucre et faire cuire 10 minutes au bain-marie. Etape 3 Laisser refroidir et ajouter la poudre d'amandes, la farine, 50 g de beurre fondu et les blancs montés en neige. Etape 4 Beurrer un moule, y verser la préparation et enfourner pendant 40 minutes. Etape 5 Démouler et laisser refroidir le biscuit. Etape 6 Dans une casserole, porter l'eau et 75 g de sucre. 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. Etape 8 Dans une casserole, porter la crème à ébullition et y incorporer le chocolat. Etape 9 Laisser refroidir et mouiller 2 cuillères à soupe 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

116

(c) Stéphane BIONDO, MAGDALA, 2024

58

FRAMATECH 117/160

Enjeux de la conception des composants
➤ Plusieurs types et plusieurs tailles de wafers SiC

Etapes de fabrication



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 $\geq 1E7 \Omega \cdot \text{cm}$

MAGDALA

117

FRAMATECH 118/160

Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

Etapes de fabrication

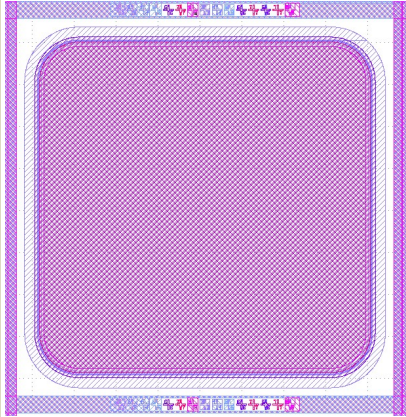

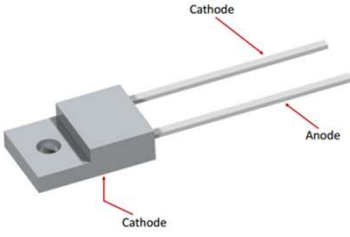


Image du masque d'une diode



Diode Pin 3.3kV/20A IBS packagée

MAGDALA


118

FRAMATECH 119/160


Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

Etape de fabrication


01 - Gravure RIE des croix d'alignement



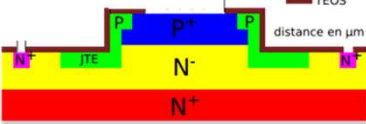
02 - Gravure RIE des zones périphériques



03 - Dopage des zones périphériques



04 - Passivation primaire



MAGDALA

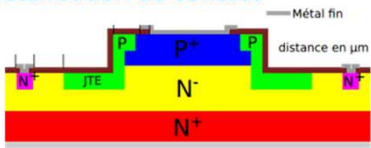
119

FRAMATECH 120/160

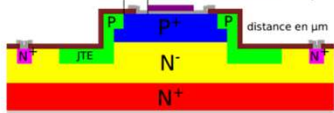
Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

Etape de fabrication

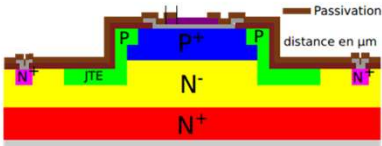
05 - Métallisation de contact



06 - Métallisation épaisse - bonding



07 - Passivation secondaire



MAGDALA

120

FRAMATECH 121/160

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

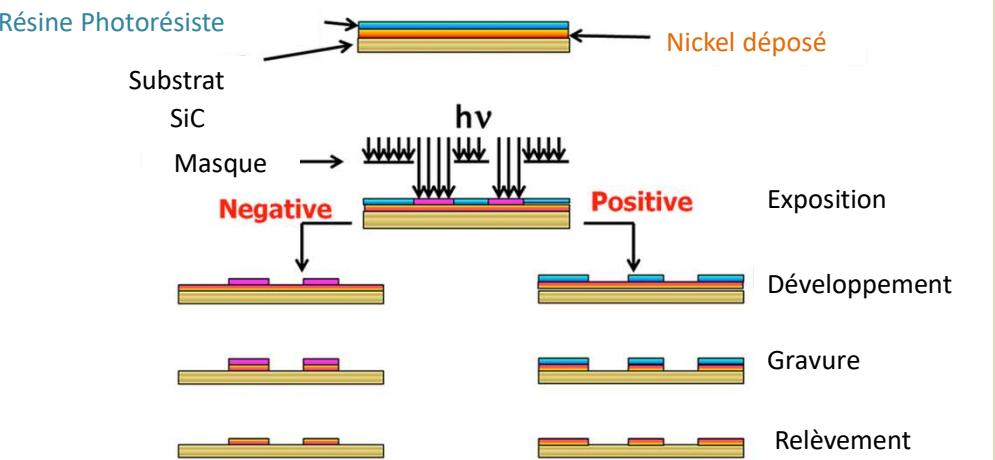
MAGDALA

121

FRAMATECH 122/160

Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC
➔ **Photolithographie**

Etape de fabrication



Résine Photorésiste

Nickel déposé

Substrat SiC

Masque

Exposition

Développement

Gravure

Relèvement

Negative

Positive

$h\nu$

MAGDALA

122

FRAMATECH 123/160

Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

➔ **Gravure RIE (reactive ion Etching)**

Etape de fabrication

123

FRAMATECH 124/160

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

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

Principaux ions utilisés pour le dopage du Si et SiC

Type p	Type n
5 B Bore 10,81	7 N Azote 14,007
13 Al Aluminium 26,982	15 P Phosphore 30,974
	33 As Arsenic 74,922
	51 Sb Antimoine 121,76

Schéma de principe d'un implanteur

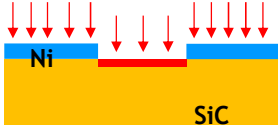
124


125/160

Etape de fabrication

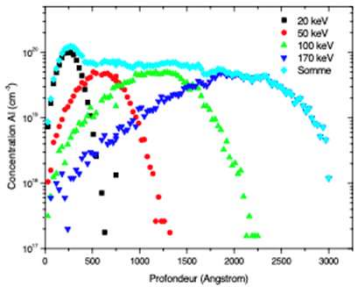
Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

➔ Possibilité de diffusions de dopants




1150 °C/30min

1800 °C/30min




Recuit




Si
SiC

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



125

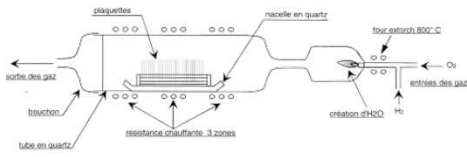

126/160


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





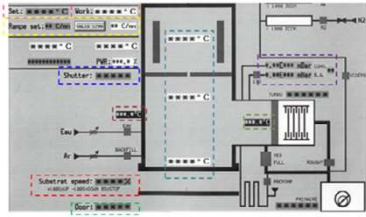
Four GaN JETFIRST


Tempes de chauffe

- 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





126

FRAMATECH 127/160

Etape de fabrication

Différentes étapes de fabrications : ex diode PiN SiC

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

MAGDALA

127

FRAMATECH 128/160

Etape de fabrication

Autre exemple : détecteur d'électron pour le médical

4 Diodes PIN en SiC fabriquées sur un même wafer

MAGDALA

128

FRAMATECH

MAGDALA

MÉTHODE DE FABRICATION POUR GRAND GAP

Les acteurs du marché SiC & GaN

129

FRAMATECH

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%

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

- Wolfspeed
- STMicroelectronics
- Showa Denko
- IIVI
- Pan-Industry

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

Source : Mordor Intelligence

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

MAGDALA

130

FRAMATECH 131/160

Acteurs du SiC

Innovation of SiC wafer technology as of 2022*

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

*Non-exhaustive list of companies

© 2022 | www.yole.fr - www.i-micronews.com

MAGDALA

131

FRAMATECH 132/160

Acteurs du SiC

Silicon Carbide Patent Landscape

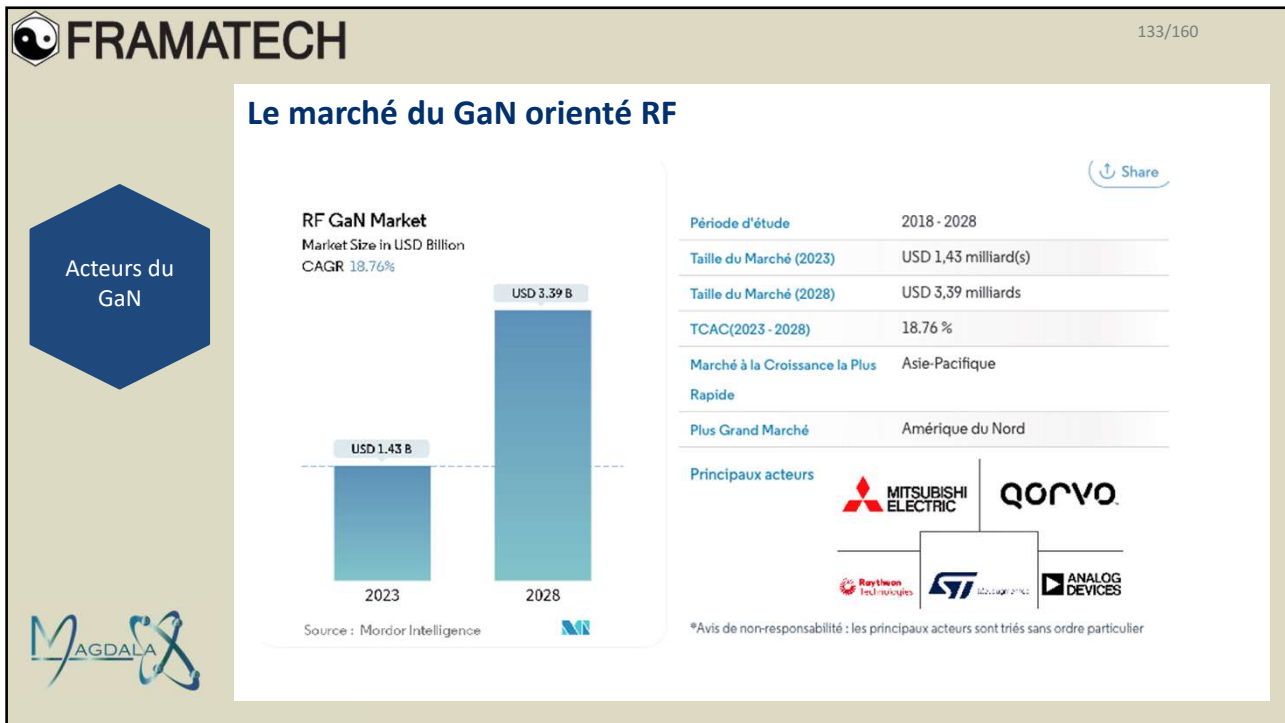
Main patent assignees along the power SiC supply chain

Note: Non exhaustive list of IP players (IP players with more than 3 inventions in the segment)

Knowmade, May 2022

MAGDALA

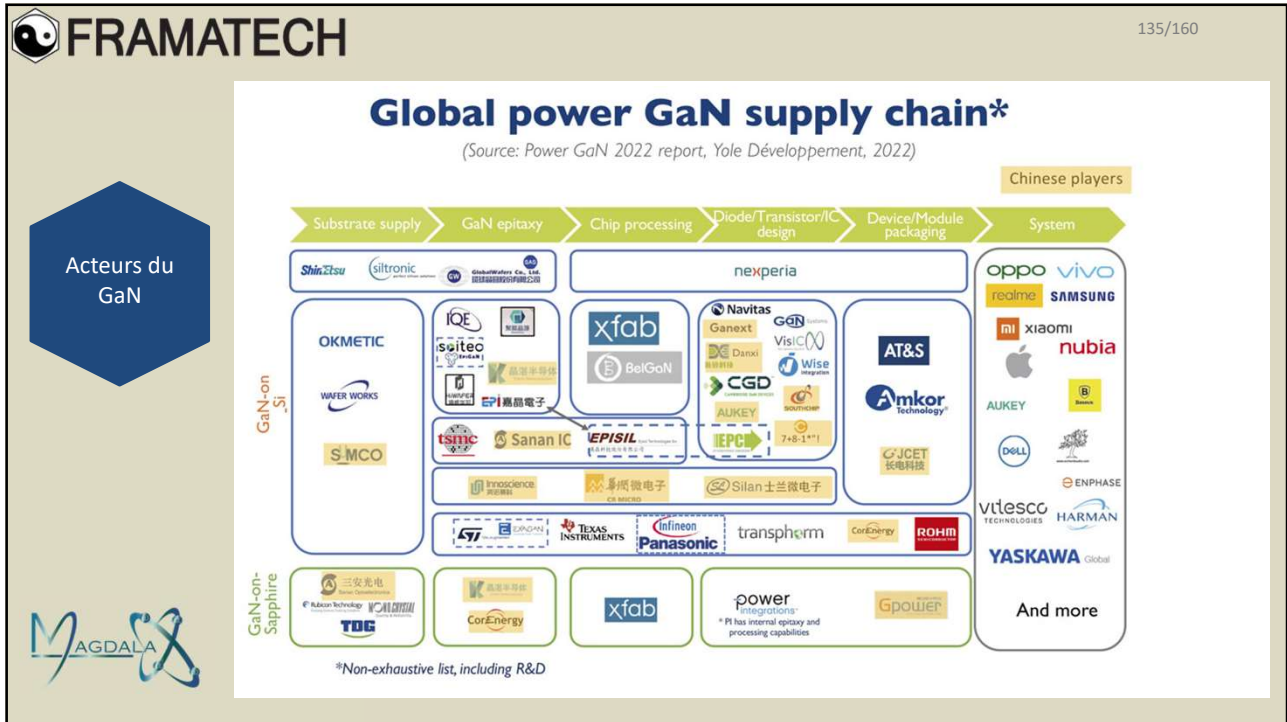
132



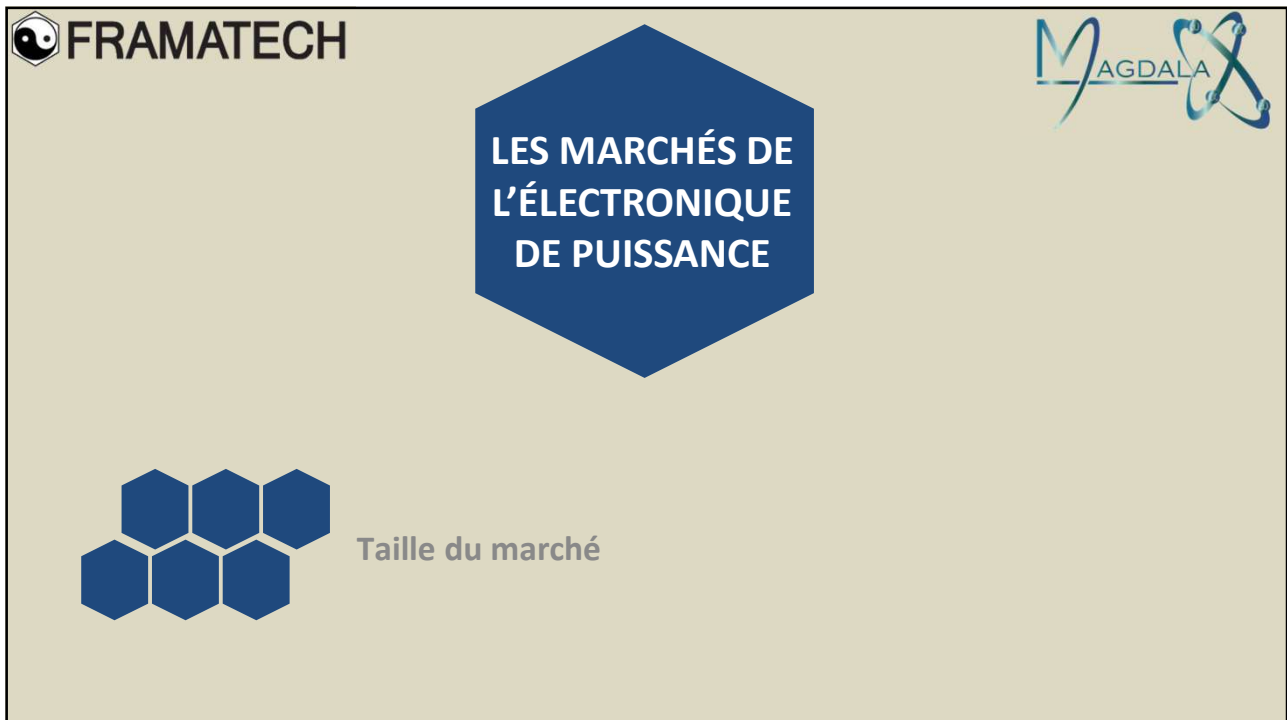
133



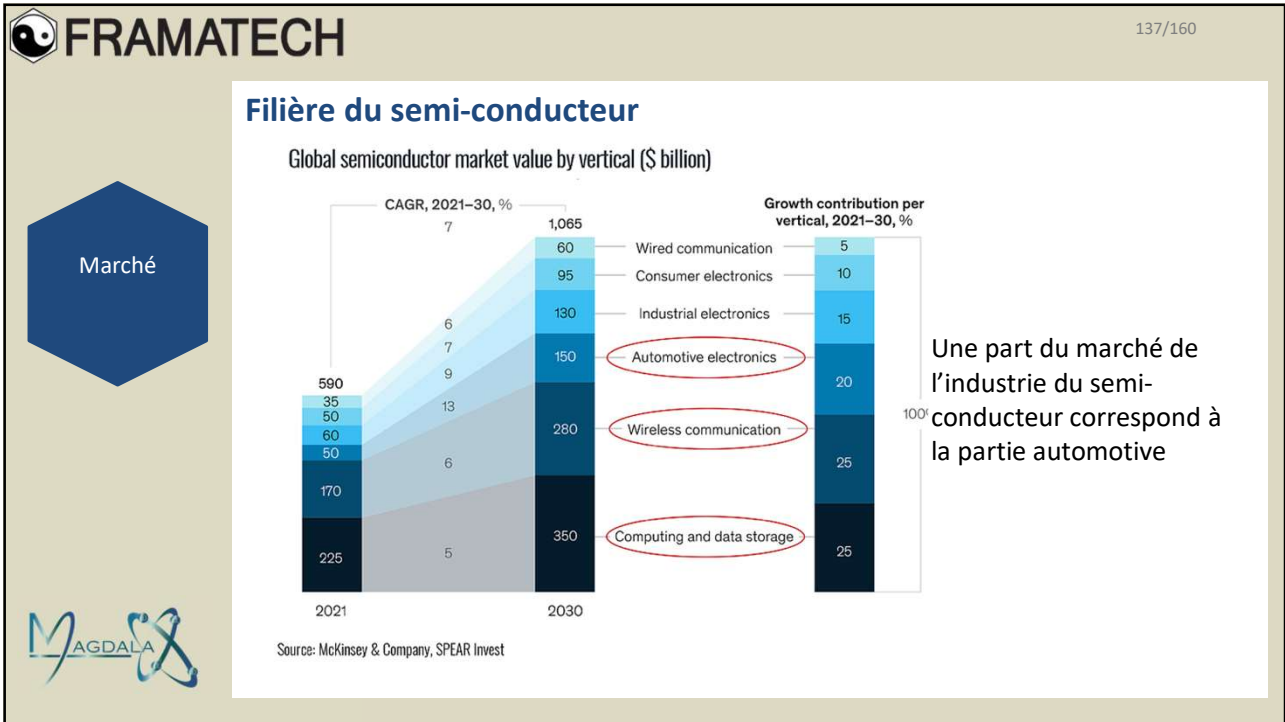
134



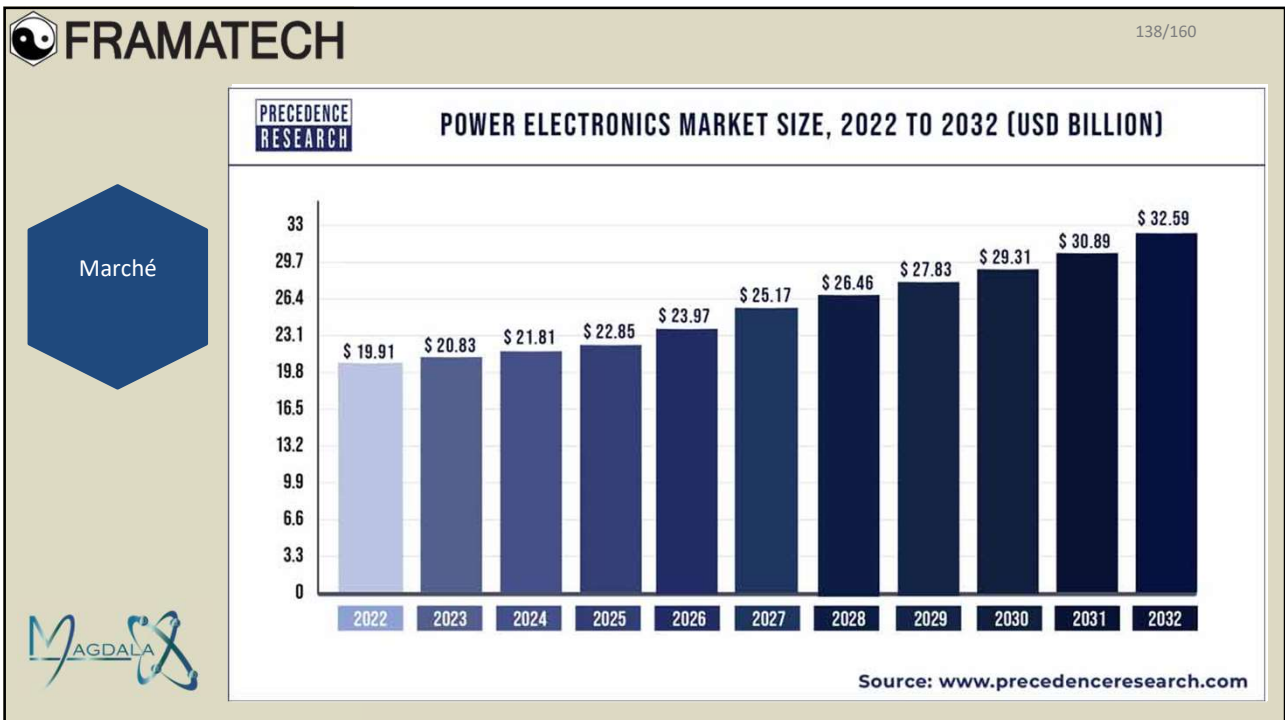
135



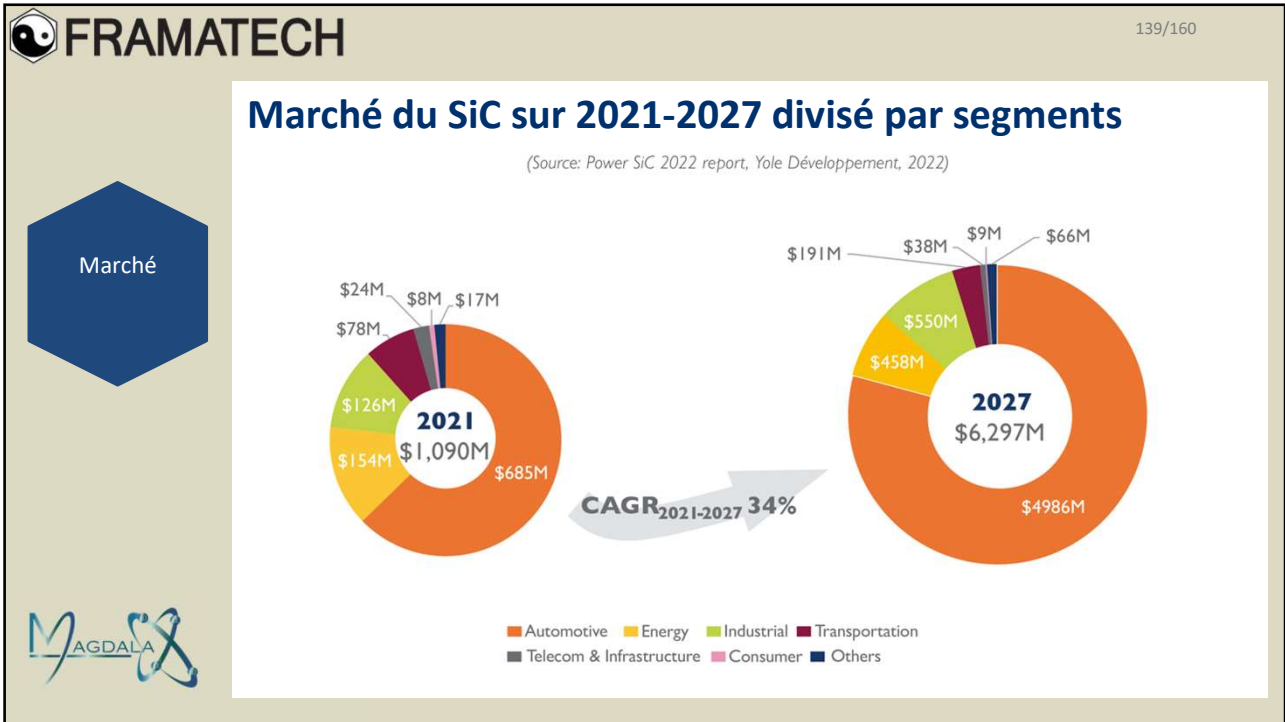
136



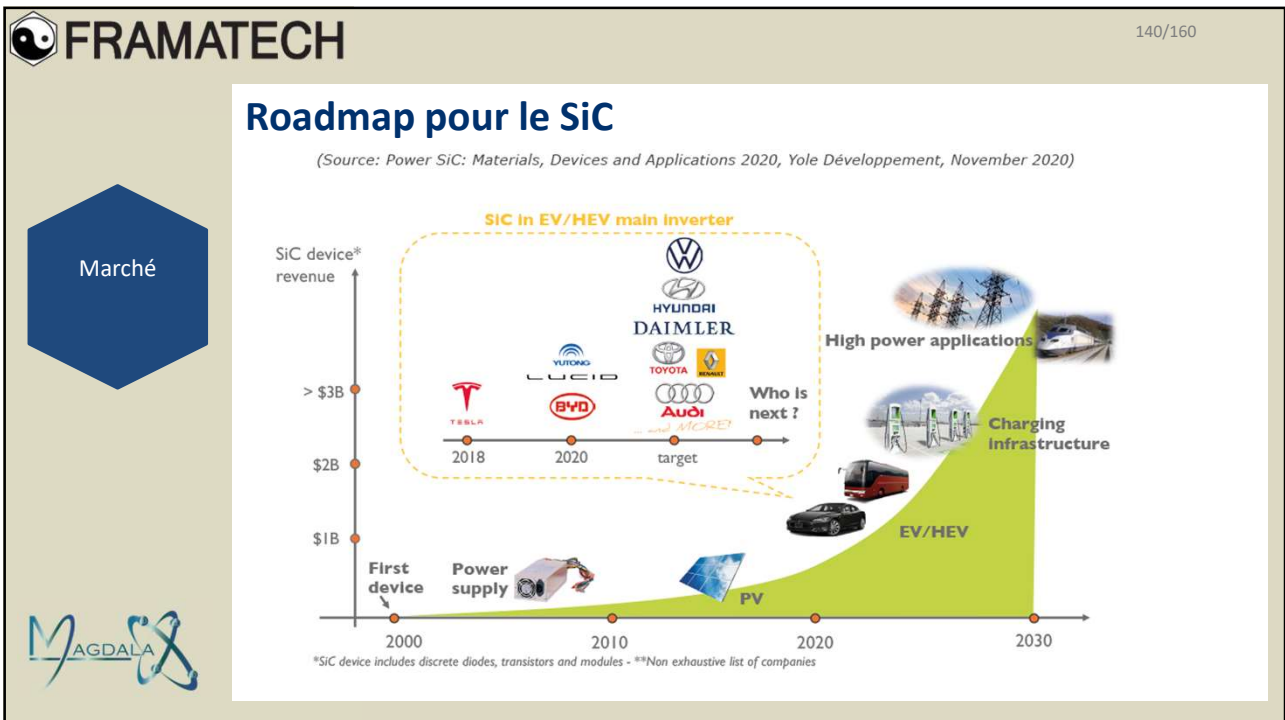
137



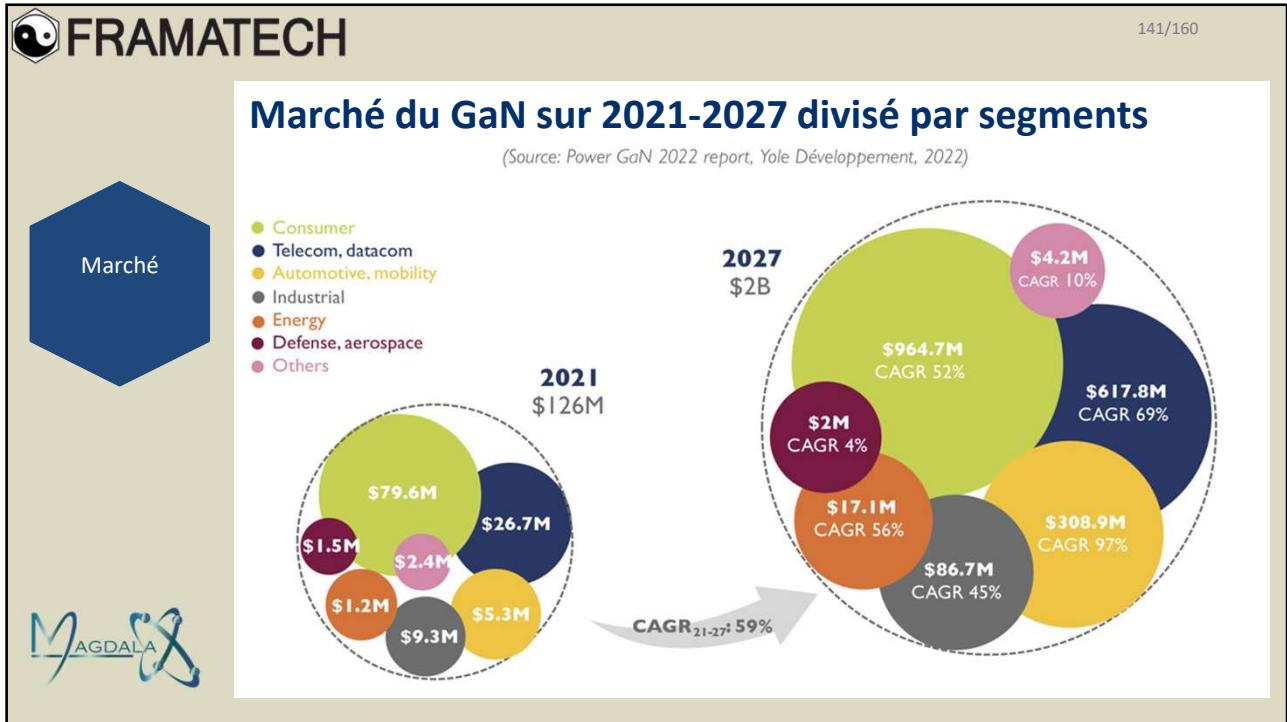
138



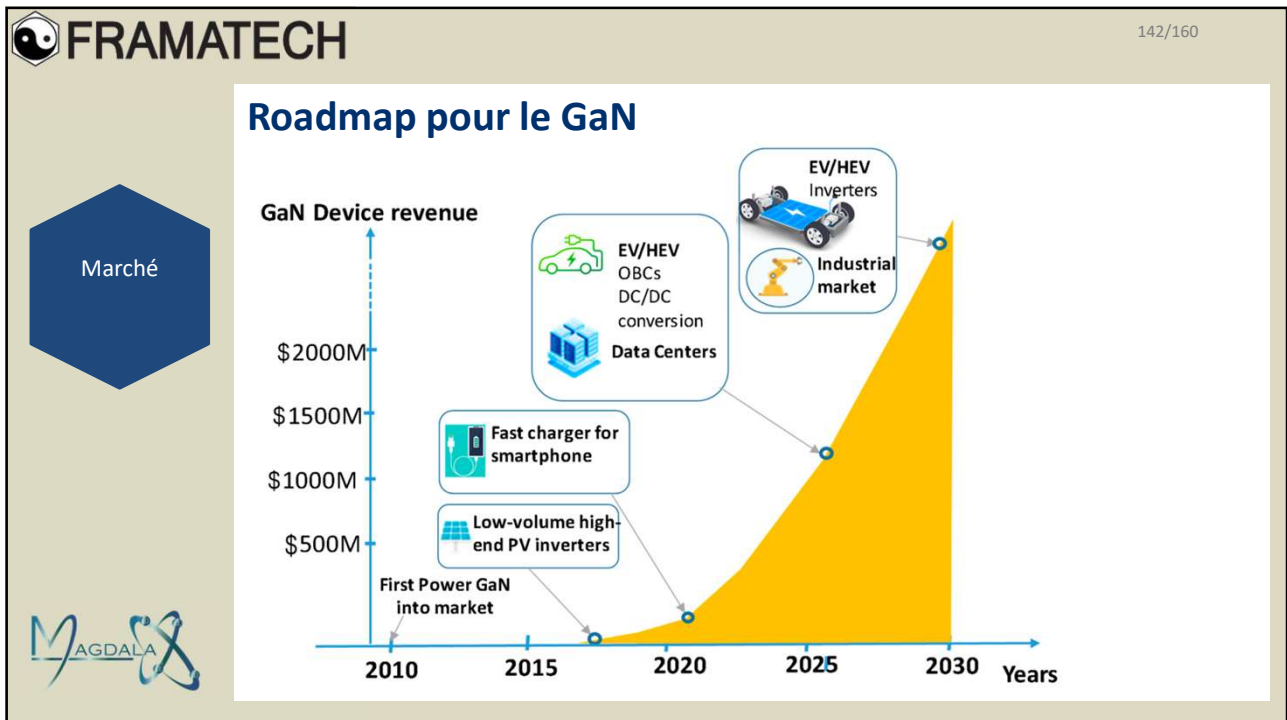
139



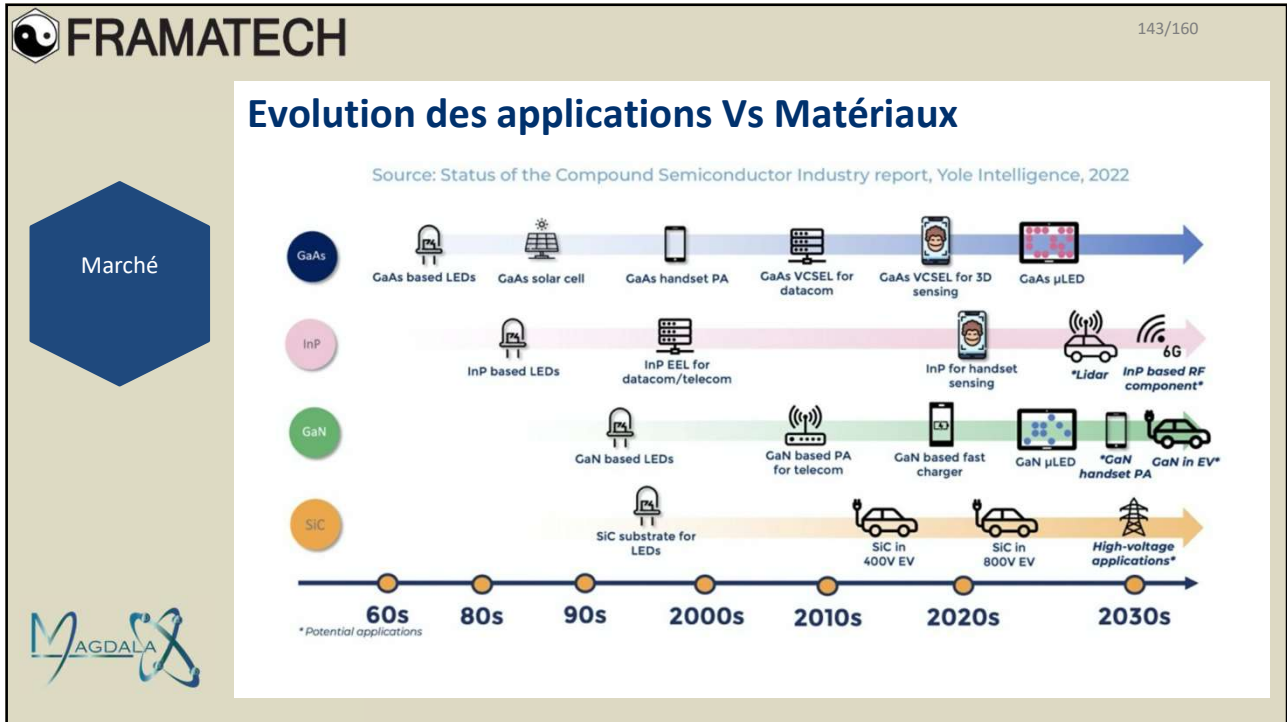
140



141



142



143

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

MAGDALA

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
 - Prévision sur le Boeing 787, la puissance installée est aujourd'hui de 1MVA.

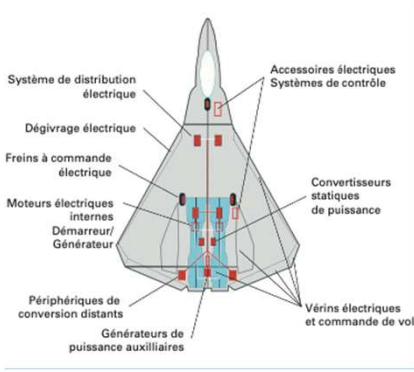
MAGDALA

146

FRAMATECH 147/160

Présentation des enjeux pour l'aéronautique

Marché de l'Aéronautique



Concept d'un avion plus électrique

MAGDALA

147

FRAMATECH 148/160

Présentation des enjeux pour l'aéronautique

Avion hybride nouveaux constructeurs Français

Marché de l'Aéronautique



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

MAGDALA

148


149/160

Marché de l'Aéronautique

Présentation des enjeux pour l'aéronautique

Avion hybride Airbus




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.



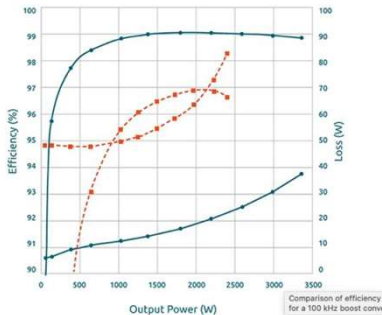
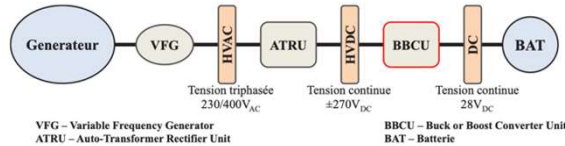
149


150/160


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

VFG – Variable Frequency Generator
 ATRU – Auto-Transformer Rectifier Unit
 BBCU – Buck or Boost Converter Unit
 BAT – Batterie

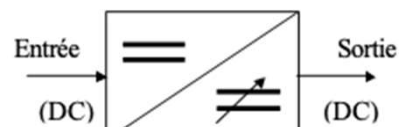


150

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.



Convertisseur Continu (DC) - Continu (DC)

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).

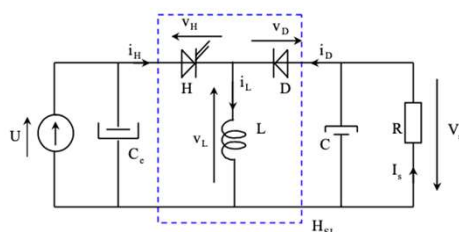


151

Marché de l'Aéronautique

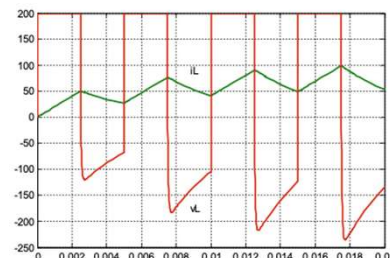
Hacheur à accumulation d'énergie : Les hacheurs à accumulation d'énergie permettent le transfert d'énergie entre deux sources dynamiques de même nature. L'énergie est dans un premier temps transférée de la source vers l'élément de stockage (condensateur ou inductance), et qui la restitue à la charge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



152

FRAMATECH **MAGDALA**

**ENJEUX DES CDP
DANS LES
MARCHÉS**



Cas des voitures hybride et électrique

153

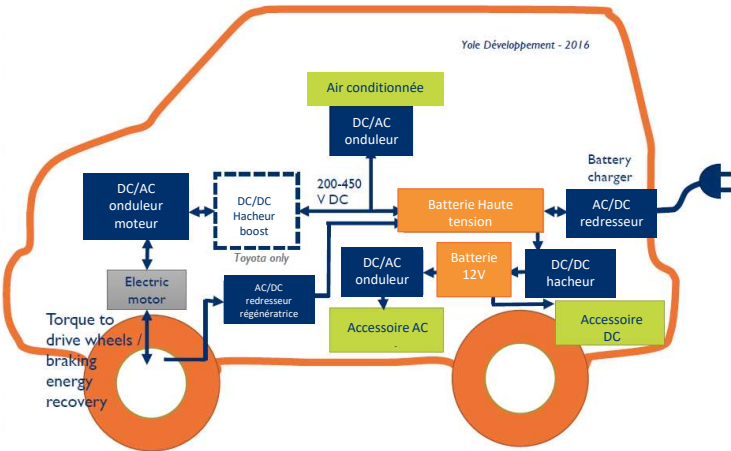
FRAMATECH 154/160

Marché HEV

EDP dans le secteur de l'automobile


- Le GaN et le SiC sont les candidats pour les futurs onduleurs et redresseurs dans le EV/HEV
- Technologiquement parlant le SiC est utilisé pour les onduleurs de puissance et le GaN est mieux adapté 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 faibles puissances dû à un manque de maturation technologique

Yole Développement - 2016



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

154


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
(filière automobile seule)

155



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

FRAMATECH 157/160

Marché HEV

Onduleur pour les moteurs brushless

MAGDALA

157

FRAMATECH 158/160

Marché HEV


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

MAGDALA


158


159/160


Marché HEV

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




159


160/160

Marché HEV


Onduleur pour les moteurs électrique : SiC vs Si




Source de l'image : ROHM Semiconductor

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

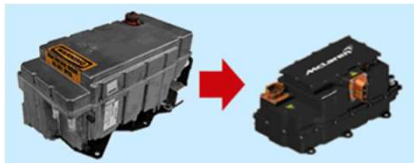


160


161/160

Marché HEV

Onduleur pour les moteurs électrique : SiC vs Si



200 kW Inverter Si-Based → 200 kW Inverter Utilizing SiC SBDs


- Efficiency **1,7% higher**
- Weight **2 kg lower**
- Volume **30% smaller size of cooling system**

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

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
On-Board Charging	SiC SBD + Si MOS / IGBT		SiC MOS + SiC SBD				
Inductive Charging			SiC MOS + SiC SBD				
Fast DC Charging			SiC MOS + SiC SBD				
Powertrain Inverter	Si IGBT + Si FRD		SiC MOS				
DC/DC	Si MOS		SiC MOS				


	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)



161

ENJEUX DES CDP DANS LES MARCHÉS



Cas du consommateur : les alimentations à découpage

162

FRAMATECH 163/160

Marché grand public

Alimentation linéaire

MAUVAIS RENDREMENT DE L'ORDRE DE 25% à 50%
(50% à 75% de la puissance dissipée en chaleur)

Schéma simplifié

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.

MAGDALA

163

FRAMATECH 164/160

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

MAGDALA

164


165/160


Marché grand public

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



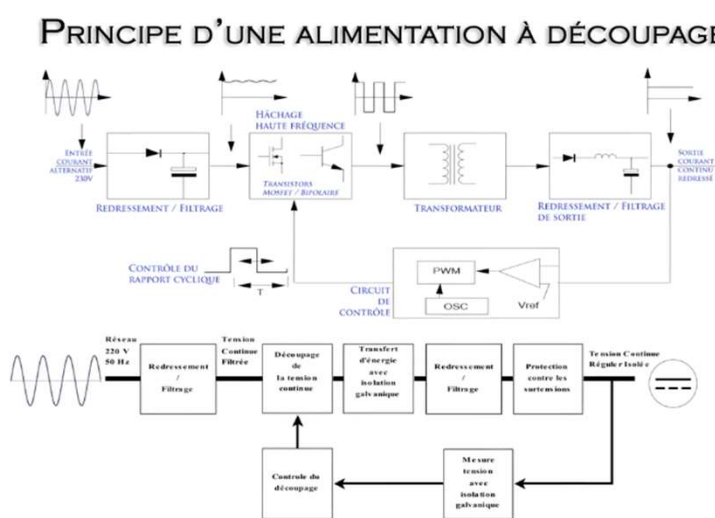
165



166/160

Marché grand public


Alimentation à découpage : Synoptique

PRINCIPE D'UNE ALIMENTATION À DÉCOUPAGE



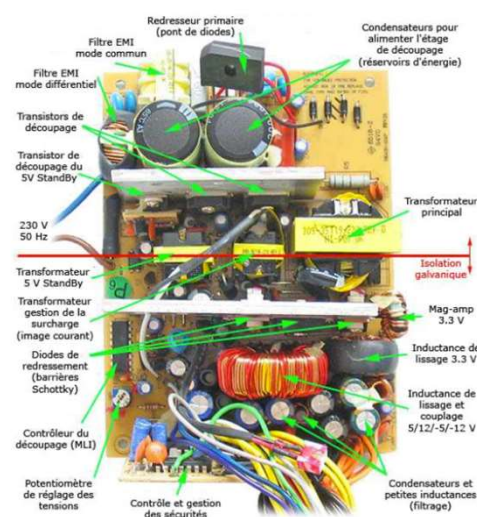


166



167/160


Marché grand public

Alimentation à découpage : LC Power 550 W



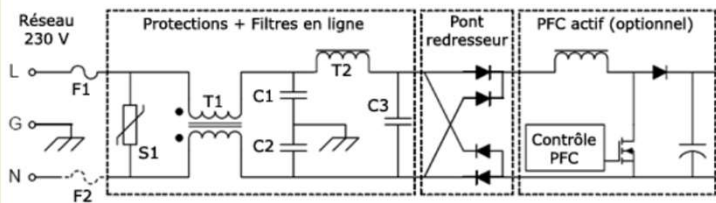
Séparation entre les 2 niveaux du circuits norme IEC60950, séparation galvanique
 → Séparation grâce aux transfo
 → Aux optocoupleurs

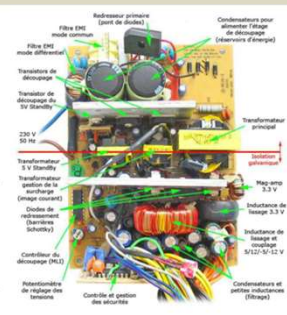

167


168/160

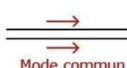
Marché grand public

Alimentation à découpage : 1^{er} étage

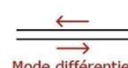





- Premier élément : le fusible → Protection du réseau
- Deuxième élément : Varistor S1 → Protection des surtensions
- Troisième élément : le filtre → Blocage des parasites HF; 2 filtres T1 mode commun & T2 mode différentiel.
- Quatrième étage : Pont redresseur → 325V continue non lissé (230V RMS)
- Cinquième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




Mode commun



Mode différentiel


168


169/160

Marché grand public

Alimentation à découpage : PFC

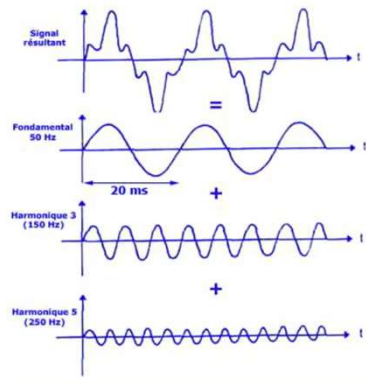
Rappel sur les harmoniques :


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

Tout signal périodique peut être décomposé en Harmonique → 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





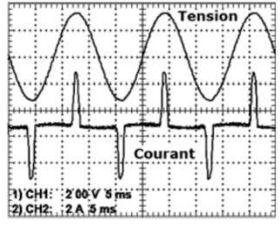
169


170/160

Marché grand public

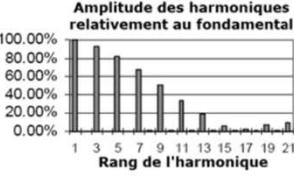
Alimentation à découpage : PFC

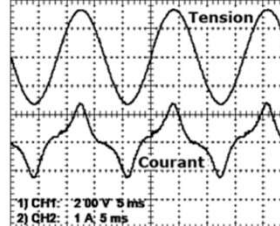
Exemple avec et sans PFC sur une alimentation



1) CH1: 200V 5ms
2) CH2: 2A 5ms

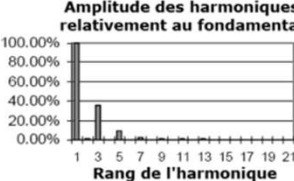
Amplitude des harmoniques relativement au fondamental






1) CH1: 200V 5ms
2) CH2: 1A 5ms

Amplitude des harmoniques relativement au fondamental



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

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



170

FRAMATECH 171/160

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

Marché grand public

MAGDALA

171

FRAMATECH 172/160

Alimentation à découpage : PFC

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

Marché grand public


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

MAGDALA

172

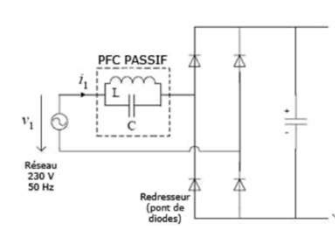
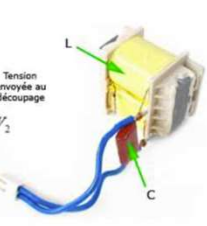

173/160

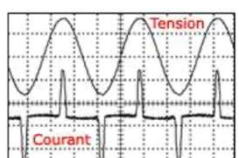
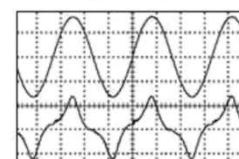
Marché grand public

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





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



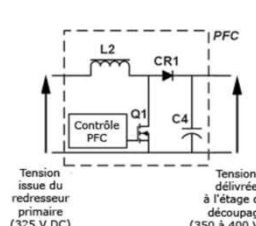
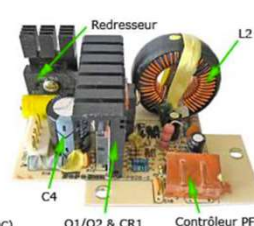
173


174/160


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

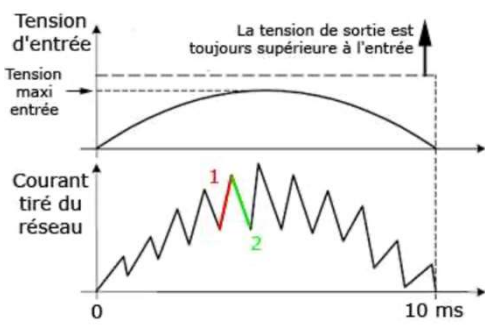

175/160

Marché grand public

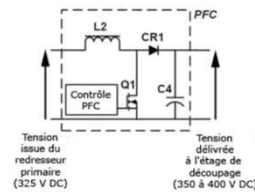
Alimentation à découpage : PFC actif


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


176/160


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

(c) Stéphane BIONDO, MAGDALA, 2024

88

FRAMATECH 177/160

Alimentation à découpage : GaN vs Si





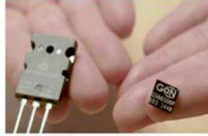
Les coûts restent élevés
Car changement de la chaîne de production

Marché grand public

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

Acteurs de la filière chargeur GaN :

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




177


FRAMATECH MAGDALA

LES NOUVELLES PERSPECTIVES

ZCS & ZVS

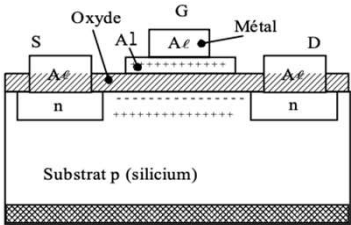


178


179/160

Inconvénients
du Si

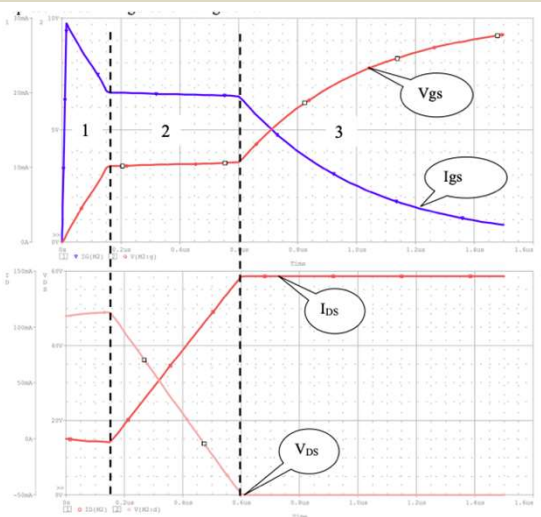
Retour sur le MOSFET




Substrat p (silicium)


Commutation à la fermeture :

- Phase 1 : $t=0$ Application d'une tension sur la grille
 - t_{js} 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



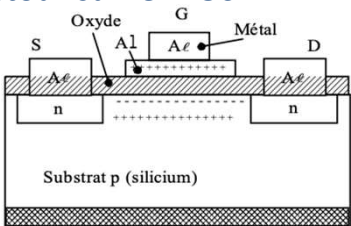


179


180/160

Inconvénients
du Si

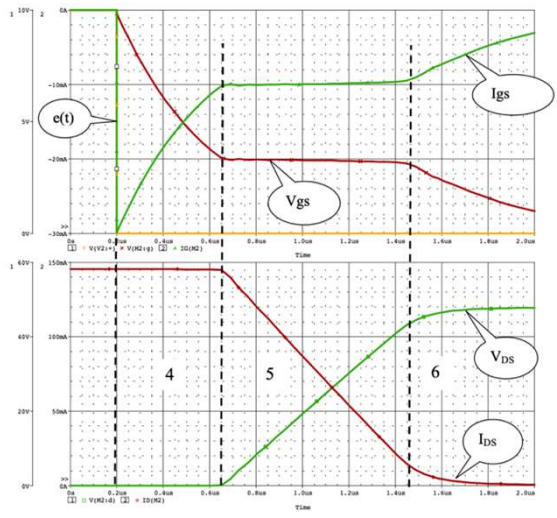
Retour sur le MOSFET




Substrat p (silicium)

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})
 - $R_{ds} = R_{dsoff}$





180

FRAMATECH 181/160

Pertes Joules en commutations

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

Commutation dure

ZVS, ZCS

Vitesse de commutation pour MOSFET

Commutation dure → Diminution de l'efficacité

MAGDALA

181

FRAMATECH 182/160

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

ZVS, ZCS

ZVS ZCS

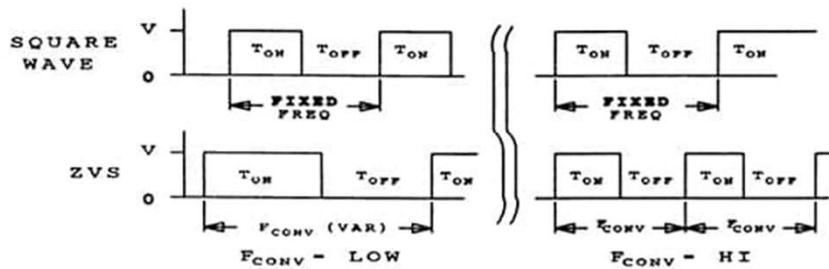
MAGDALA

182

ZVS, ZCS

Commutation ZVS & ZCS

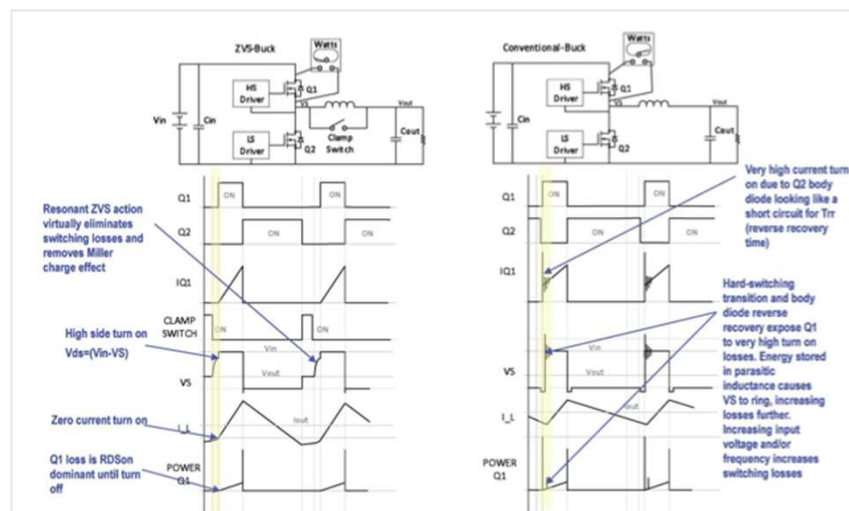
La régulation de la tension de sortie repose sur l'ajustement du rapport cyclique effectif. Lors du délai de désactivation du commutateur ZVS, le circuit L-C du régulateur résonne en faisant circuler la tension dans le commutateur de zéro à la valeur maximale, puis à nouveau à zéro lorsque le commutateur 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




183


ZVS, ZCS

Commutation ZVS & ZCS



184


 **FRAMATECH** 185/160

 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

 **FRAMATECH** 

 **LES NOUVELLES PERSPECTIVES**

 Les futurs composants

186

FRAMATECH
187/160

SiC

Les orientations de recherches :

- Substrats HPSI
- Diminution des coûts de production du substrat
- Nouvelle structure de composants ex : Toshiba

187

FRAMATECH
188/160

GaN


GaN vertical

Attributes	GaN-on-Si	Vertical GaN™
Defect Density, cm ⁻²	10 ⁹	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

188


189/160

GaN un composant latéral

Avancé pour le GaN : normally off

P-GaN/AlGaN/GaN

Spécificité
du GaN

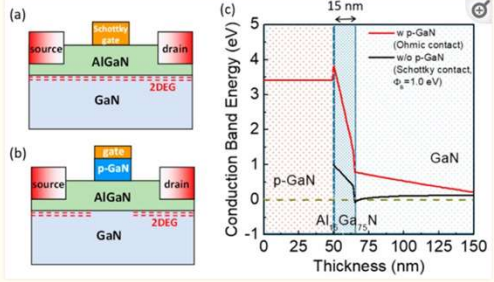




Table 2
Survey of literature data on normally-off HEMTs with p-GaN gates obtained using different Schottky contacts.

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



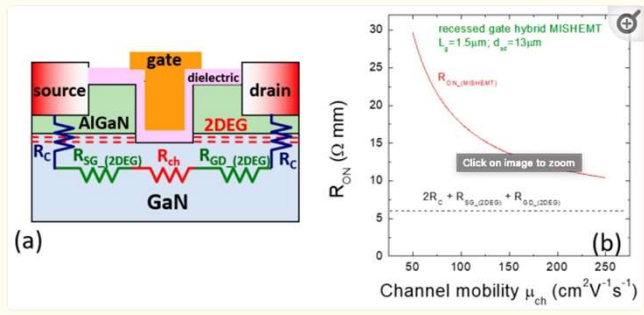
189


190/160

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 $d_{id} = 13 \mu\text{m}$.

190

Le diamant

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 ($cm^2/V \cdot s$)	μ_P ($cm^2/V \cdot s$)	V_{sat} (cm/s)	E_C (V/cm)	λ (W/cm 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	5.6×10^7	20	5.7

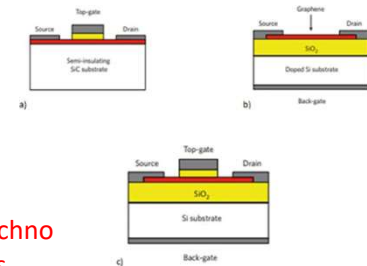
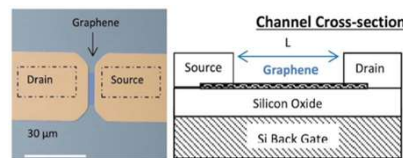
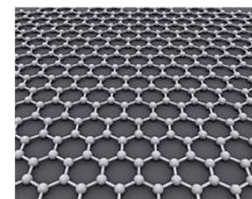
E_g largeur de bande interdite. μ_N et μ_P mobilités des porteurs N et P. V_{sat} vitesse de saturation des porteurs. E_C champ de claquage. λ conductivité thermique. (d) gap direct. (i) gap indirect. ϵ_r permittivité relative.

- 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

Le graphène

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 $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
 - Très grande dureté
 - Flexibilité
 - Matériau chimiquement inerte
- Transistor de graphène à effet de champs GFET



- Processus de fabrications
- Maturité techno
- Coût
- Applications

FRAMATECH 193/160

Matériau miracle : exemple de procédé de fabrication sur du SiC

Le graphène

a) Croissance sous ultravide
 $P \approx 10^{-9}$ Torr

Si sublimation
 Marche atomique
 Défauts Structurel

FLG 1 ML

b) Croissance sous flux de Si et Ar
 $P \approx 5.10^{-5}$ Torr

Si sublimation
 Si flux
 Flux Ar et Si

Couche d'interface 1 ML

↓

Couche d'interface 1 ML

MAGDALA

193

FRAMATECH 194/160

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.

MAGDALA

194

 **FRAMATECH** 195/160

Pour conclure


C'est la fin!!



En vous remerciant de votre écoute




195

 **FRAMATECH**

Electronique
de puissance

Merci



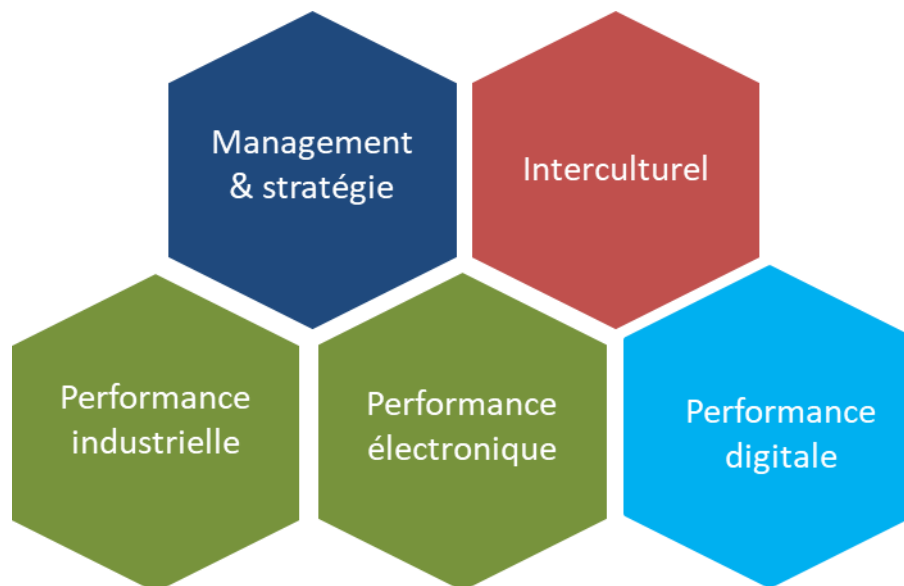
Stéphane Biondo

196



FRAMATECH

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



Contact

Alain BARONI – Président, Directeur Général

Tél. 04 91 95 55 70

Mail : contact@framatech.fr