

Concevoir, mettre en œuvre, former



**Du Watt au kilowatt, comment monter
en puissance un convertisseur ?**

19 avril 2016 – CAPTRONIC

Plan du séminaire

- Tendances prévisibles de la conversion d'énergie (30')
 - Intégration ²
 - Fiabilité, coût, performances
- Éléments clés du convertisseur (30')
- Fonctionnement théorique et réel (120')
 - Composants passifs
 - Composants actifs
 - Comportement thermique
- Synthèse

Séminaire CAPTRONIC



Tendances prévisibles de la conversion
d'énergie

Tendances prévisibles

- Intégration de l'électronique de puissance partout
 - Ferroviaire, Variation de vitesse, Telecom
 - Aéronautique, Marine, Automobile, Informatique embarquée, Énergie



Conversion de l'énergie



Tendances prévisibles

- Augmentation de la densité de puissance
 - Chargeurs d'ordinateurs portables
- Intégration composants actifs/commande/passifs
 - Intelligent Power Module 500kW
<https://www.infineon.com> : MIPAQ
- Amélioration de la Compatibilité EM
 - Amplificateur classe D <1kHz, THD <3 %
<http://www.cedrat-technologies.com> : SA75X



Tendances prévisibles

- Les nouveaux marchés entraînent :
 - Amélioration fiabilité
 - Aéronautique, Automobile
 - Diminution du coût
 - Automobile
 - Augmentation des performances
 - Aéronautique, Énergie, Telecom

Tendances prévisibles

- Les concepteurs répondent :
 - Reproduction de l'intégration sur silicium en électronique
 - Fabrication identique ou compatible
 - Automatisation
 - Miniaturisation
 - Améliorations intrinsèques
 - Augmentation des fréquences de découpage
 - Diminution des contraintes d'environnement
 - Maîtrise de la conception
 - Outils de simulation
 - Outils d'optimisation

Tendances prévisibles

- Les fabricants aussi :
 - Amélioration des composants actifs :
 - Finesse de gravure, procédés, assemblage, boîtiers
 - Changement de matériaux
 - Actifs : SiC, GaN, diamant, graphene, etc.
 - Passifs : nanocristallins, amorphe

Tendances prévisibles

- Par conséquent :
 - Nouveaux marchés, nouvelles opportunités
 - Augmentation de la demande (SMPS, auxiliaires)
- Pour la conception discrète, 2 concurrents :
 - Intégration « monolithique »
 - Solutions « entrée de gamme » à bas coût
- Monter en puissance, augmenter les fonctionnalités
 - Intégration de commande numérique
 - Innovations techniques
 - Communicabilité

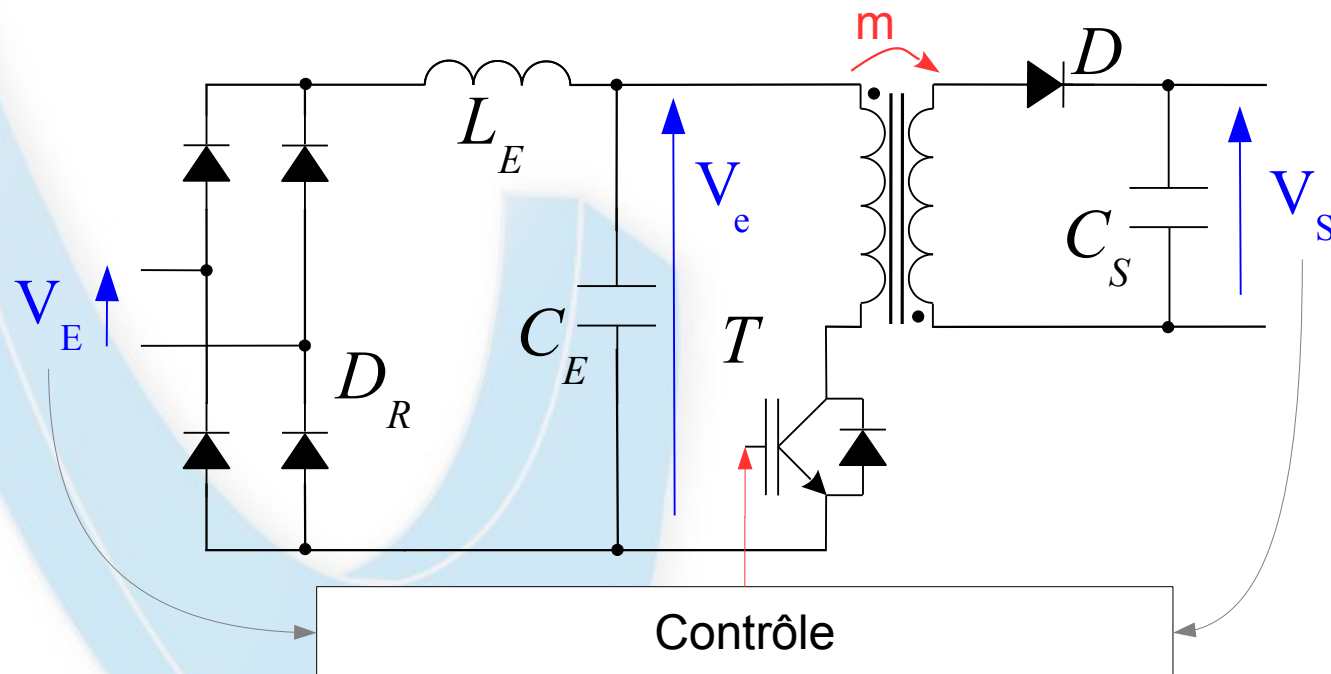
Séminaire CAPTRONIC



Éléments clés du convertisseur

Éléments clé du convertisseur

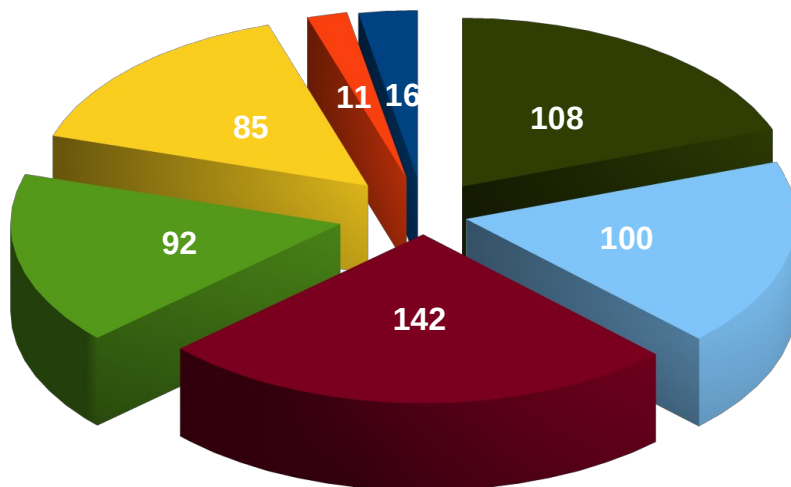
- Exemple type : Conversion AC/DC isolée Flyback



Éléments clé du convertisseur

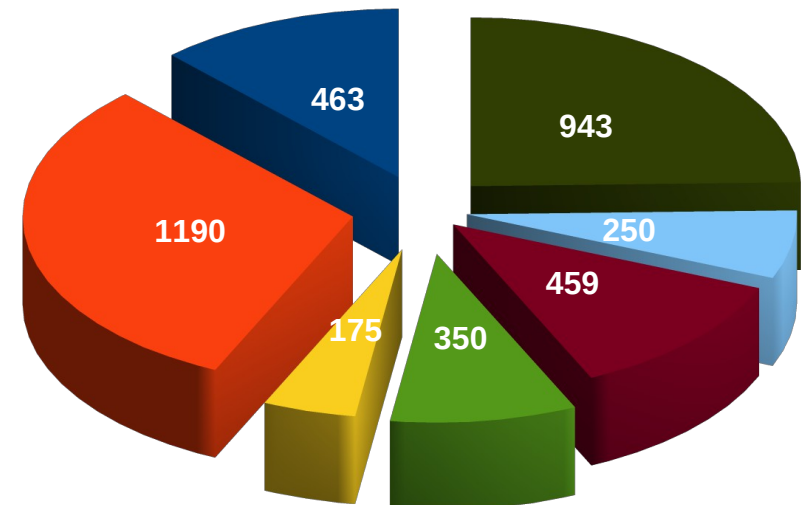
- Exemple type : Conversion AC/DC isolée Flyback
 - 5kW ; 230Vac → 28Vdc ; 25 kHz ; 90 %

Répartition des pertes (W) / 554 W



■ Filtre d'entrée
■ Filtre de sortie
■ Redresseur
■ IGBT
■ Diode
■ Ecréteur actif
■ Transformateur

Répartition des masses (g) / 3,8kg



Éléments clé du convertisseur

- Concentration des fonctions => concentrations des contraintes
 - Composants actifs
 - Contraintes thermiques
 - Contraintes électriques
 - Stabilité
 - Composants passifs
 - Matériaux adaptés aux fonctions
 - Stockage / transformation
 - Conception adaptée

Éléments clé du convertisseur

- Interconnexions
 - Un fil/bornier traversé par du courant = inductance + résistance
 - 2 surfaces en regard = capacité
- Forte puissance ou haute fréquence : commutation rapide
 - di/dt et inductance → surtension
 - dv/dt et capacité/terre → courant MC

$$v_L = L \frac{di}{dt}$$

$$i_C = C \frac{dv}{dt}$$

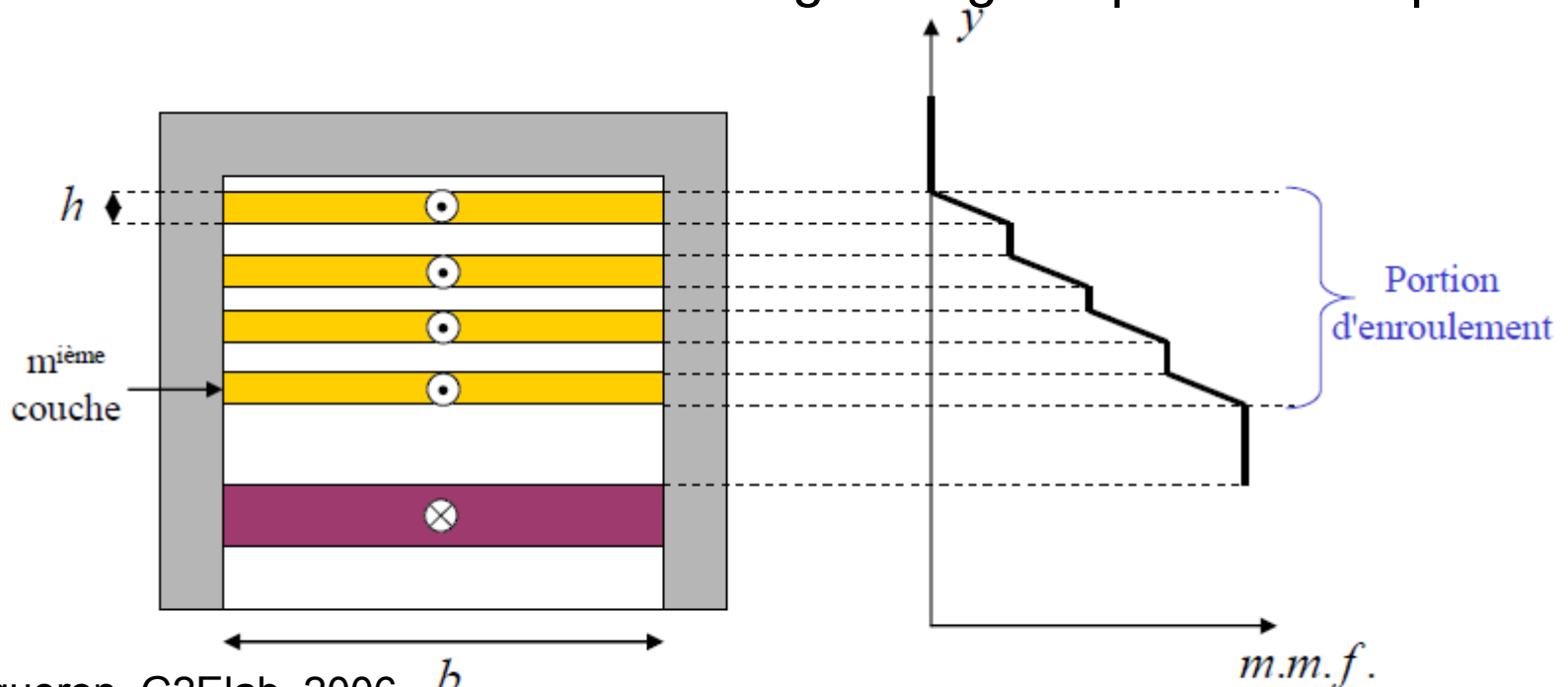
Séminaire CAPTRONIC



Fonctionnement théorique vs réel

Fonctionnement théorique vs réel

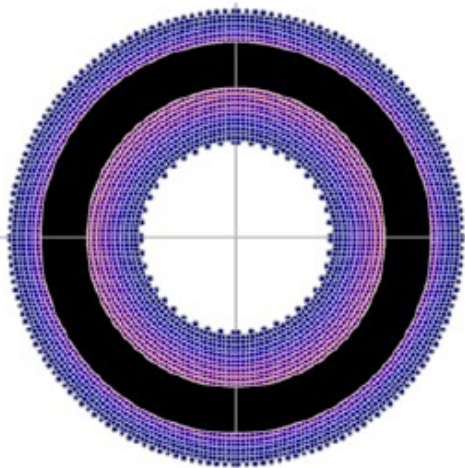
- Transformation de tension
 - Isolation galvanique
 - Distance d'isolation → Énergie magnétique intrinsèque



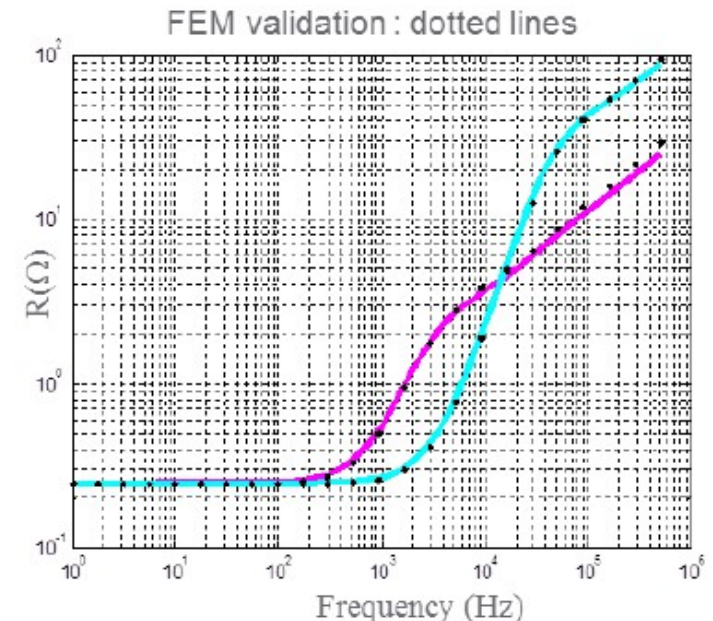
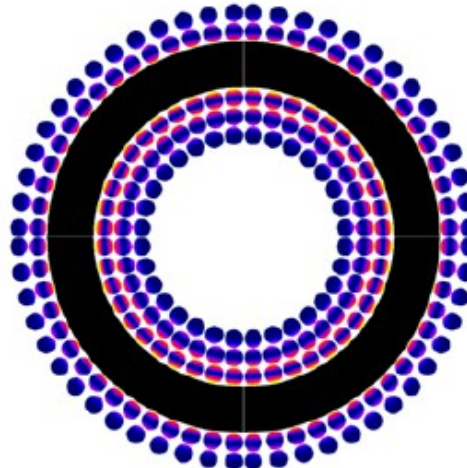
Fonctionnement théorique vs réel

- Inductance de filtrage
 - Stockage d'énergie → Énergie magnétique intrinsèque

116 turns of 16*1mm round wire



116 turns of 4mm round wire



Cf. Thèse Timothé Delaforge, G2Elab, 2016

Figure 56 : Comparison of two coil using Ø1mm and Ø4mm, validation with FEM

Fonctionnement théorique vs réel

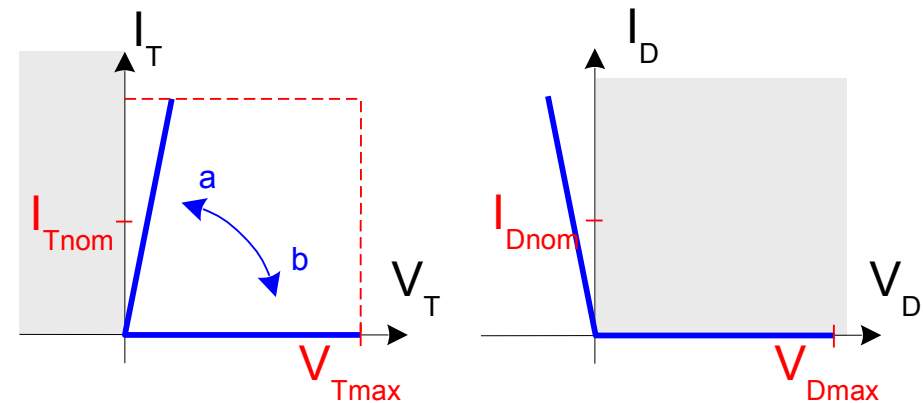
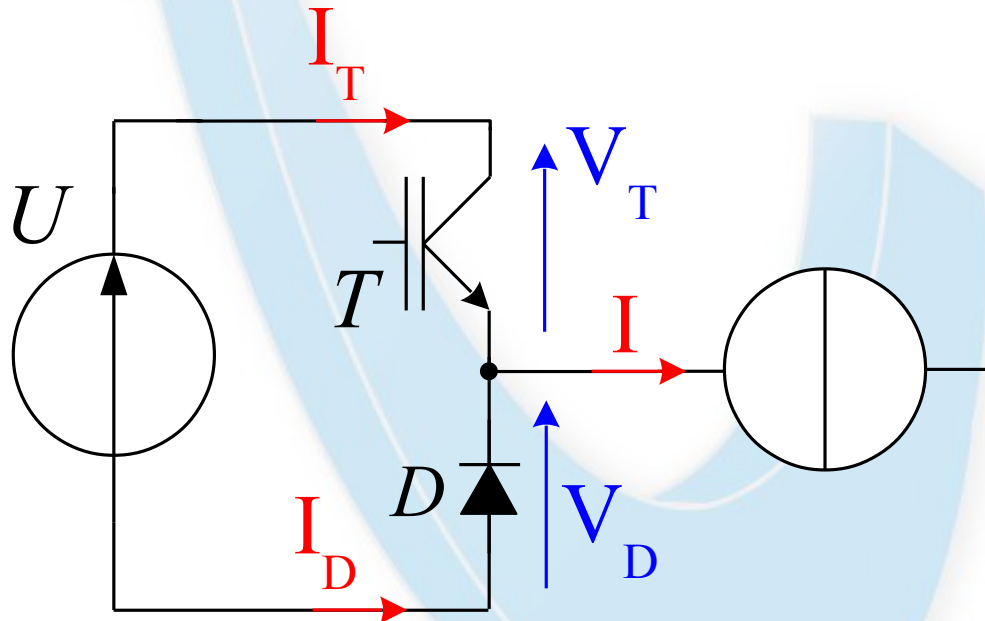
- Champ magnétique H
 - $H \leftrightarrow i$
 - Énergie magnétique \leftrightarrow inductance de fuite
 - En AC, l'effet de peau s'oppose à la pénétration du champ H par la circulation d'un courant interne
$$\text{Pertes} \propto i^2 \leftrightarrow H^2$$
 - Entrelacement des couches \rightarrow minimise le champ H

Fonctionnement théorique vs réel

- Conception des transformateurs
 - Dimensionnement
 - Outils de modélisation analytiques (type Dowell)
 - Prototypage virtuel
 - Outils de simulation EF 2D(3D)
 - Prototypage
 - Outils de qualification petits signaux (analyseur d'impédance)
 - Outils de qualification grands signaux (banc adapté)

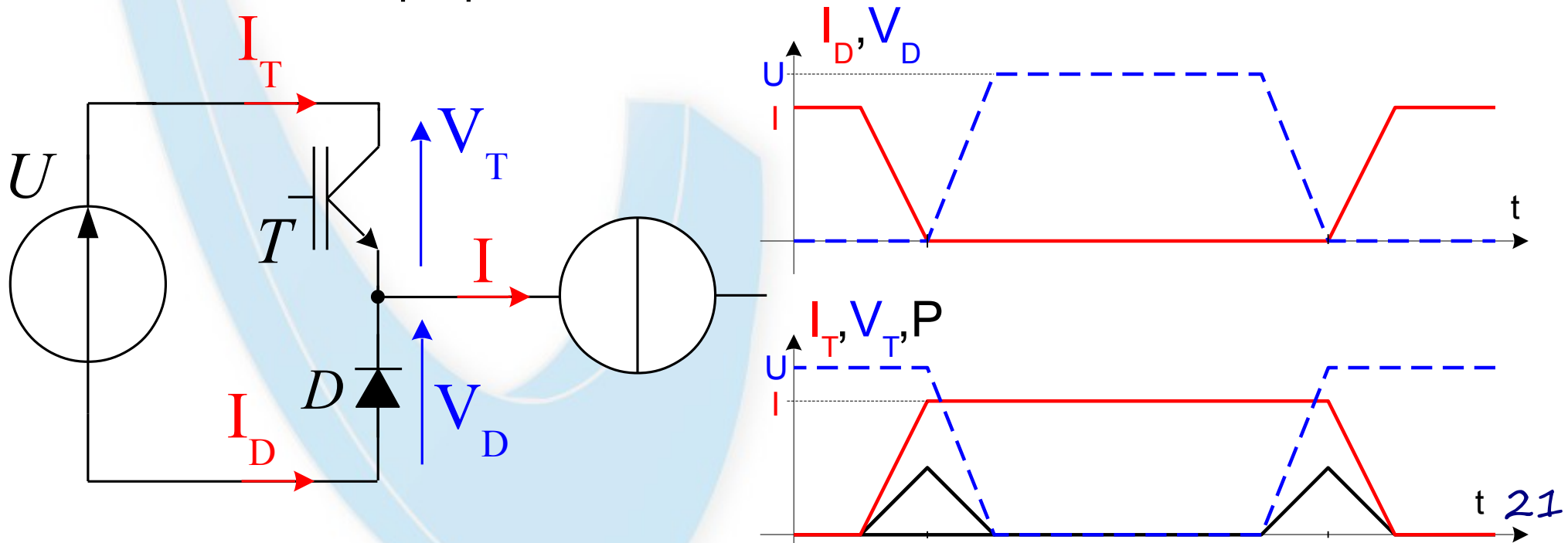
Fonctionnement théorique vs réel

- Cellule de commutation
 - Commuter le potentiel d'une source de courant
 - Composant commandé (T) vers passif (D)



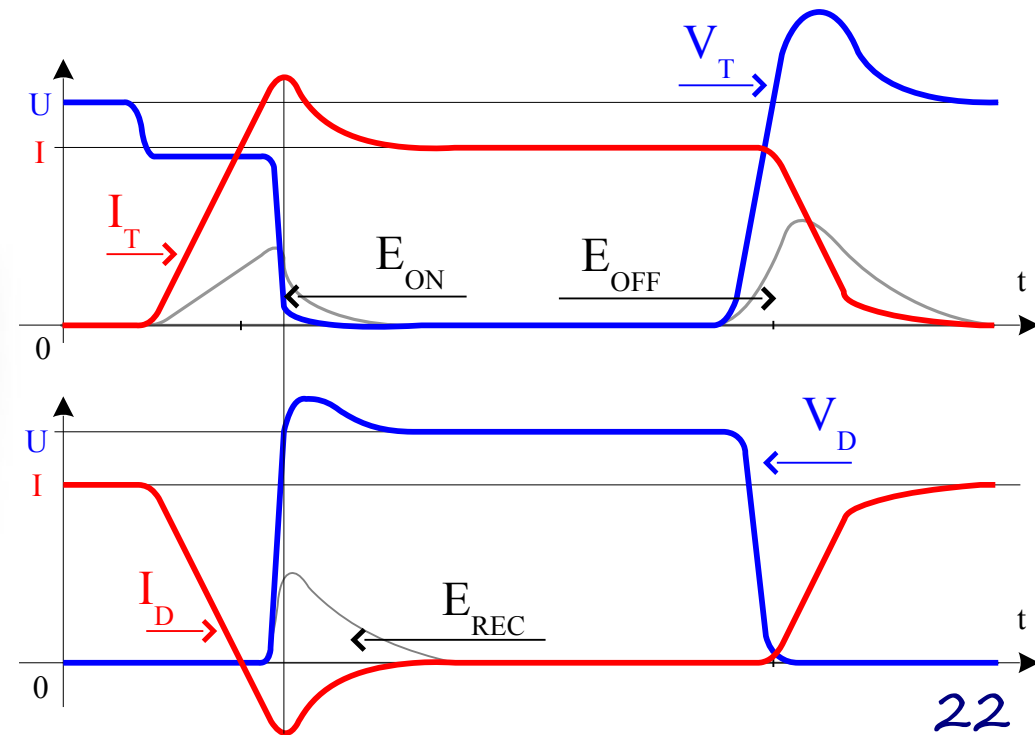
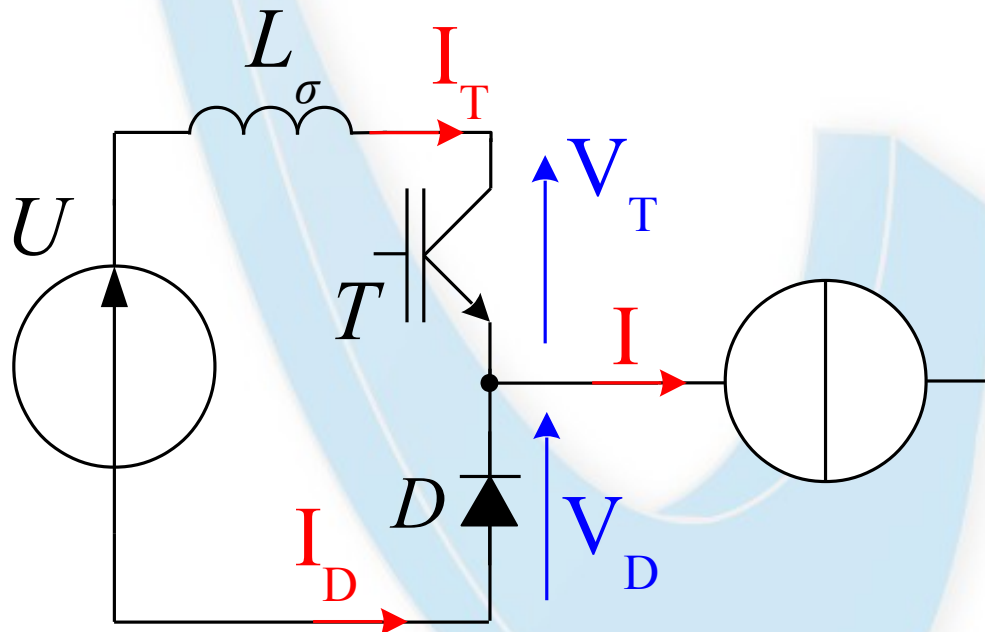
Fonctionnement théorique vs réel

- Cellule de commutation
 - Énergie de commutation → intrinsèque $f(t_{\text{COM}})$
 - Pentes proportionnelles à l'efficacité



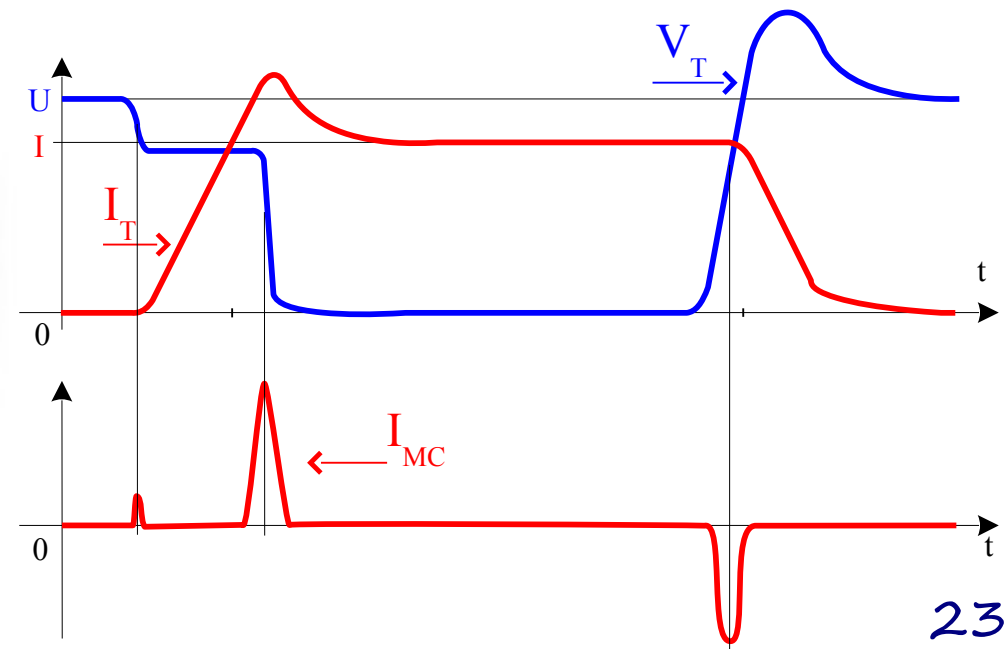
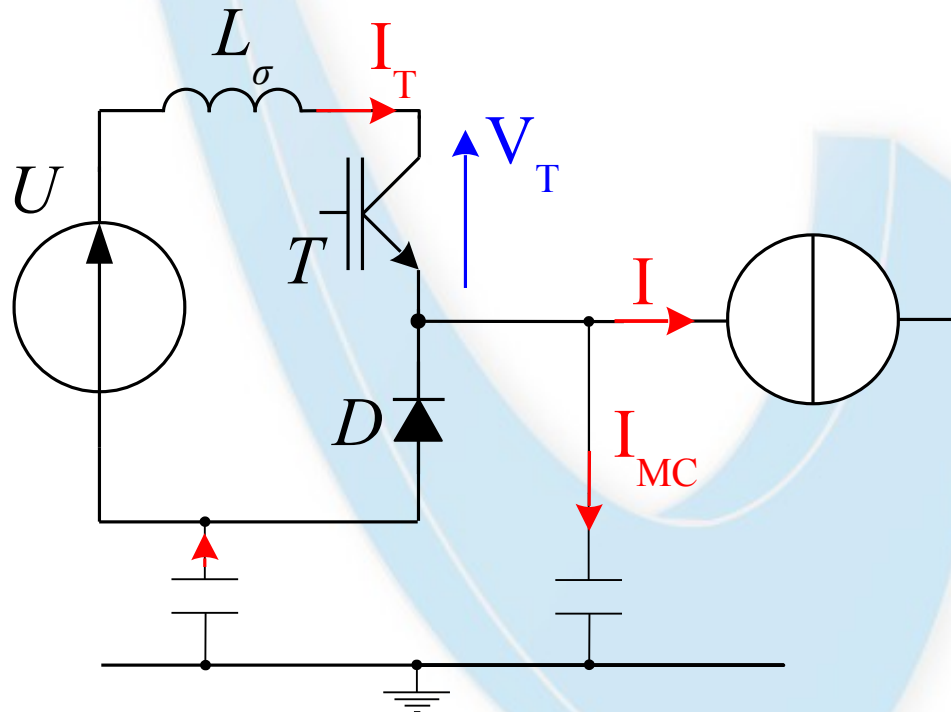
Fonctionnement théorique vs réel

- Cellule de commutation
 - Maille de commutation inductive → surtension au blocage
 - Protection ?



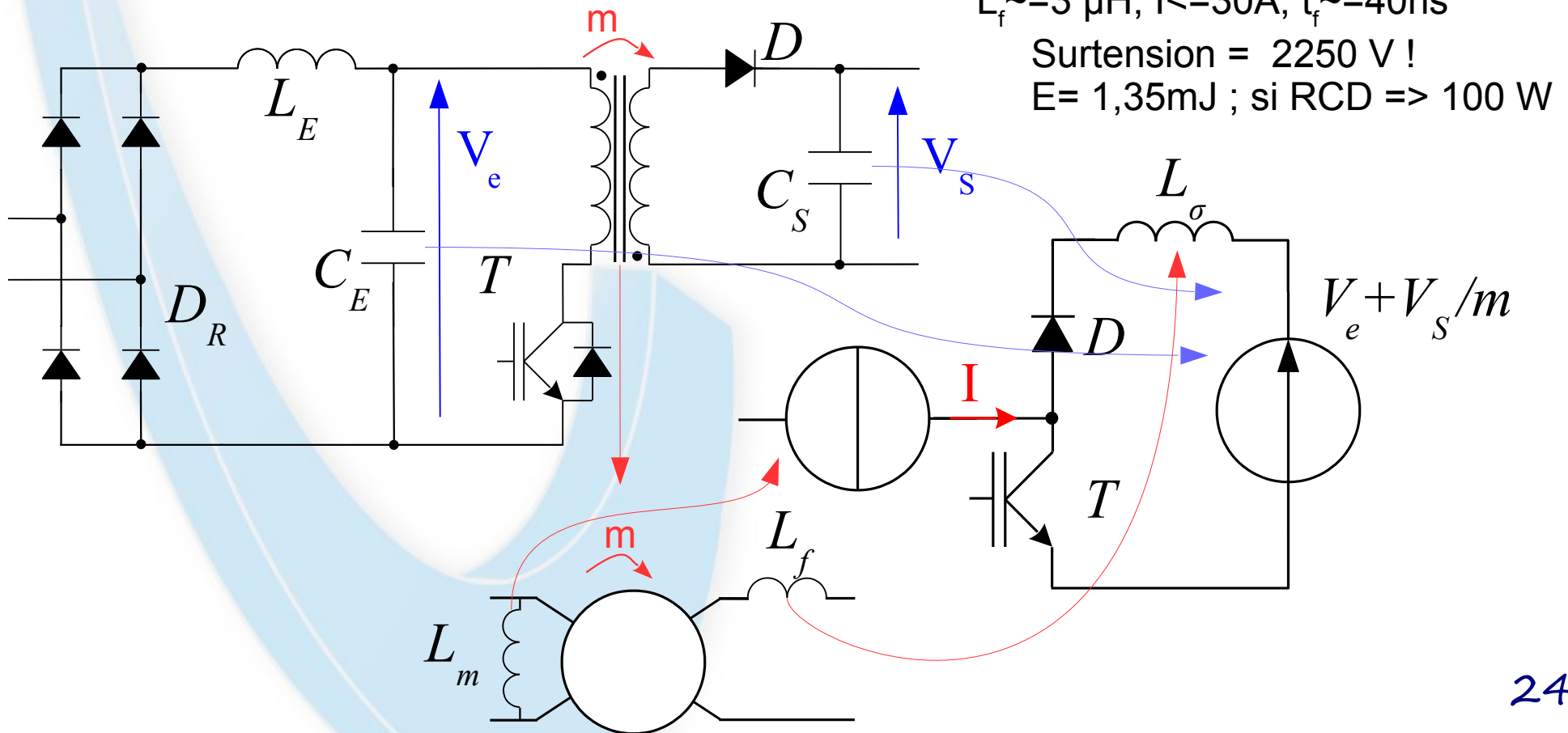
Fonctionnement théorique vs réel

- Cellule de commutation
 - Capacité parasite / terre → courant MC
 - Protection ?



Fonctionnement théorique vs réel

- Cellule de commutation du Flyback



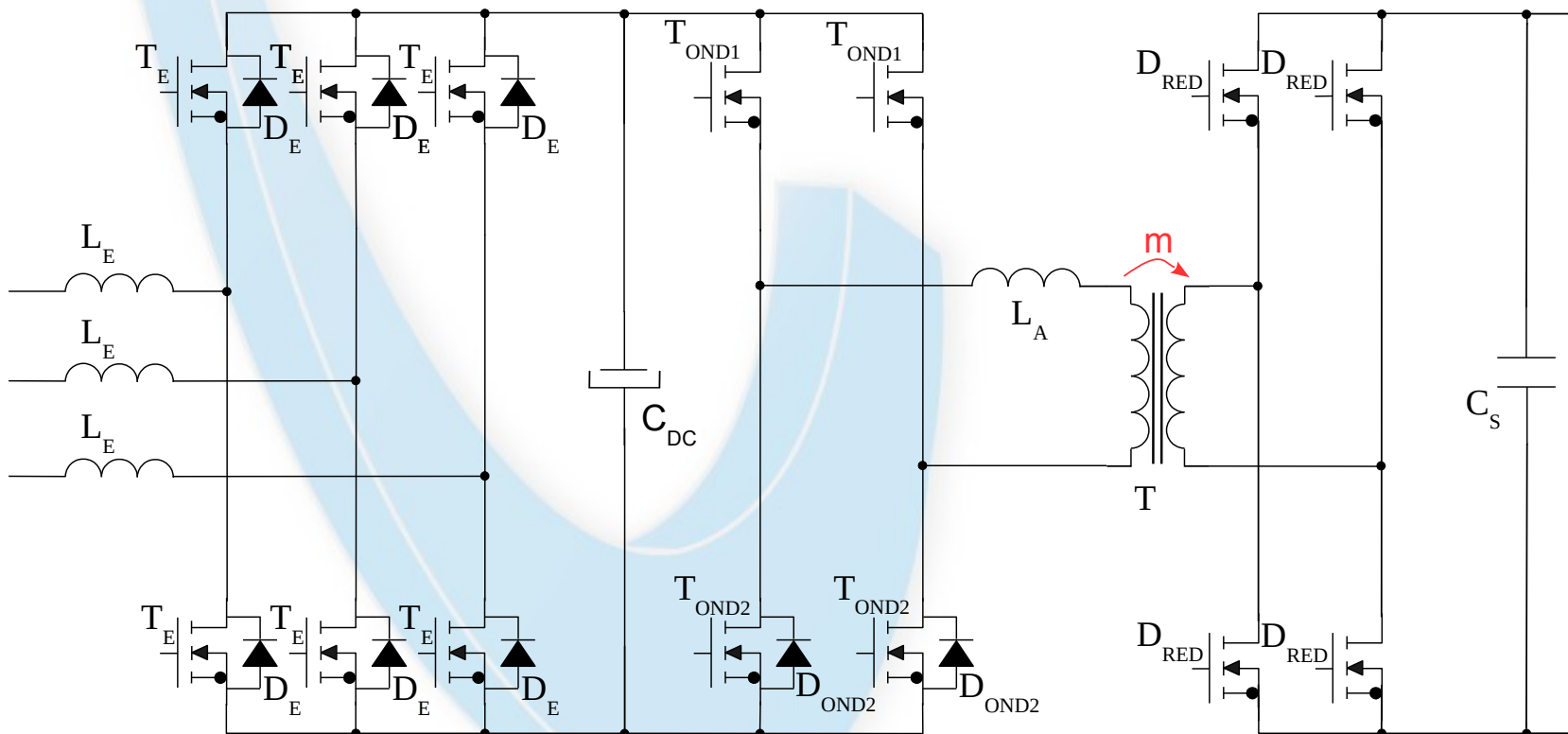
Fonctionnement théorique vs réel

- Alternative : PFC tri + DAB

$L_f \sim 30 \text{ nH}$; $I \leq 20 \text{ A}$; $t_f \sim 10 \text{ ns}$

Surtension = 60 V

$E = 3,3 \mu\text{J}$



Fonctionnement théorique vs réel

- Conception des cellules de commutation
 - Couplage fort entre condensateurs / composants actifs
 - Plans, mailles courtes, symétrisation des cellules //
 - Compromis efficacité/CEM/refroidissement
- Prototypage virtuel
 - Outils de simulation PEEC 2D (3D)
- Prototypage
 - Outils de mesure grands signaux large bande (>10 MHz)
 - Tests en monocoup
 - CEM (analyseur de spectre, labo spécifique)

Fonctionnement théorique vs réel

- Circuit de commande
 - Impact de l'inductance parasite émetteur

www.infineon.com : AN « TRENCHSTOP™ 5 in TO-247 4pin Package »

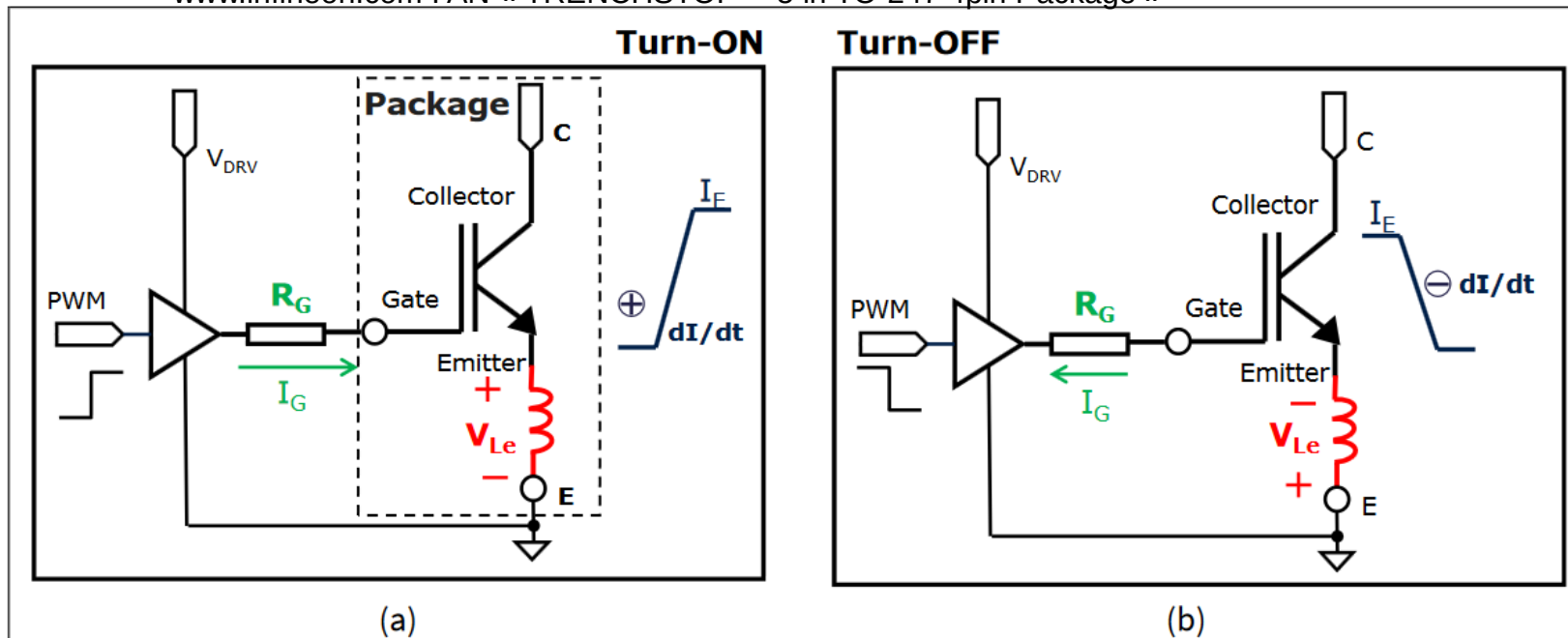


Figure 2 Emitter current variation and induced voltage over the emitter stray inductance during (a) turn-on and (b) turn-off of the IGBT

Fonctionnement théorique vs réel

- Circuit de commande
 - Boîtier discret avec émetteur de commande séparé (TO-247-4)

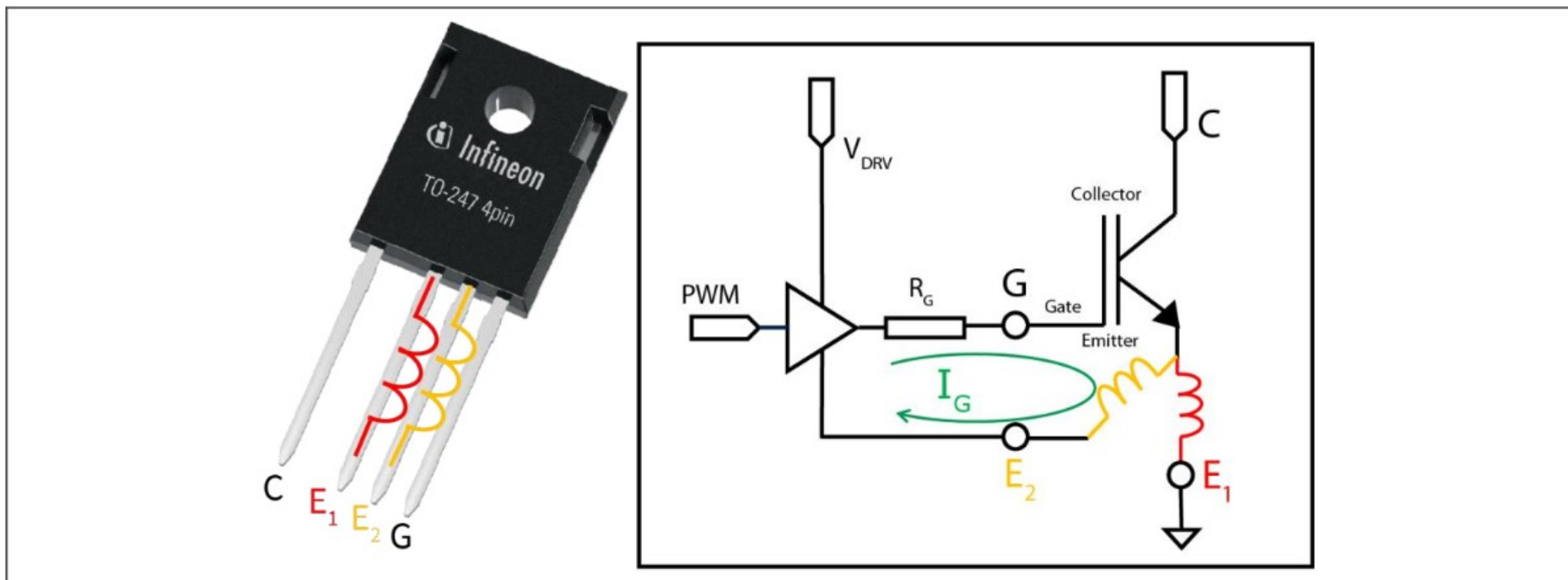


Figure 3 IGBT connection in Kelvin emitter configuration

Fonctionnement théorique vs réel

- Circuit de commande
 - Réduction des pertes en commutation ↔ CEM !

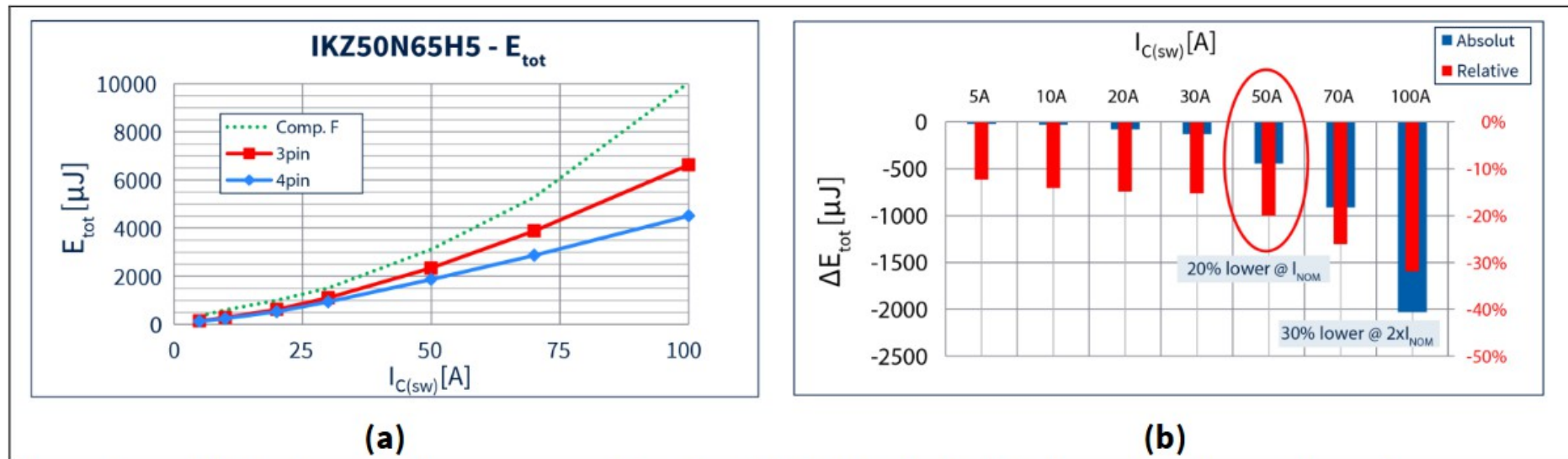


Figure 9 (a) Total switching energy of an IKZ50N65EH5, in both 3pin and 4pin configurations
(b) Switching energy reduction from 4pin configuration in both absolute and relative values

Fonctionnement théorique vs réel

- Conception des commandes rapprochées
 - Couplage fort entre condensateurs / composants actifs
 - Plans, mailles courtes, symétrisation des cellules //
 - Compromis efficacité/CEM/refroidissement
- Prototypage virtuel
 - Outils de simulation PEEC 2D (3D)
 - Outils de simulation circuits
- Prototypage
 - Outils de mesure grands signaux large bande (>10 MHz)
 - Tests en monocoup
 - CEM (analyseur de spectre, labo spécifique)

Fonctionnement théorique vs réel

- Contraintes thermiques :
 - Augmentation des flux de chaleur
 - Résistance thermique de contact
 - Contraintes thermo-mécaniques
 - Augmentation de la densité
 - Maîtrise de la température ambiante
 - Refroidissement des composants CMS (quantifier R_{th})
 - Vieillissement des condensateurs

Fonctionnement théorique vs réel

- Modélisation « électrique » du comportement thermique
 - Écart de température proportionnel au flux de chaleur

Cf. Thèse B. Thollin, G2Elab, 2013

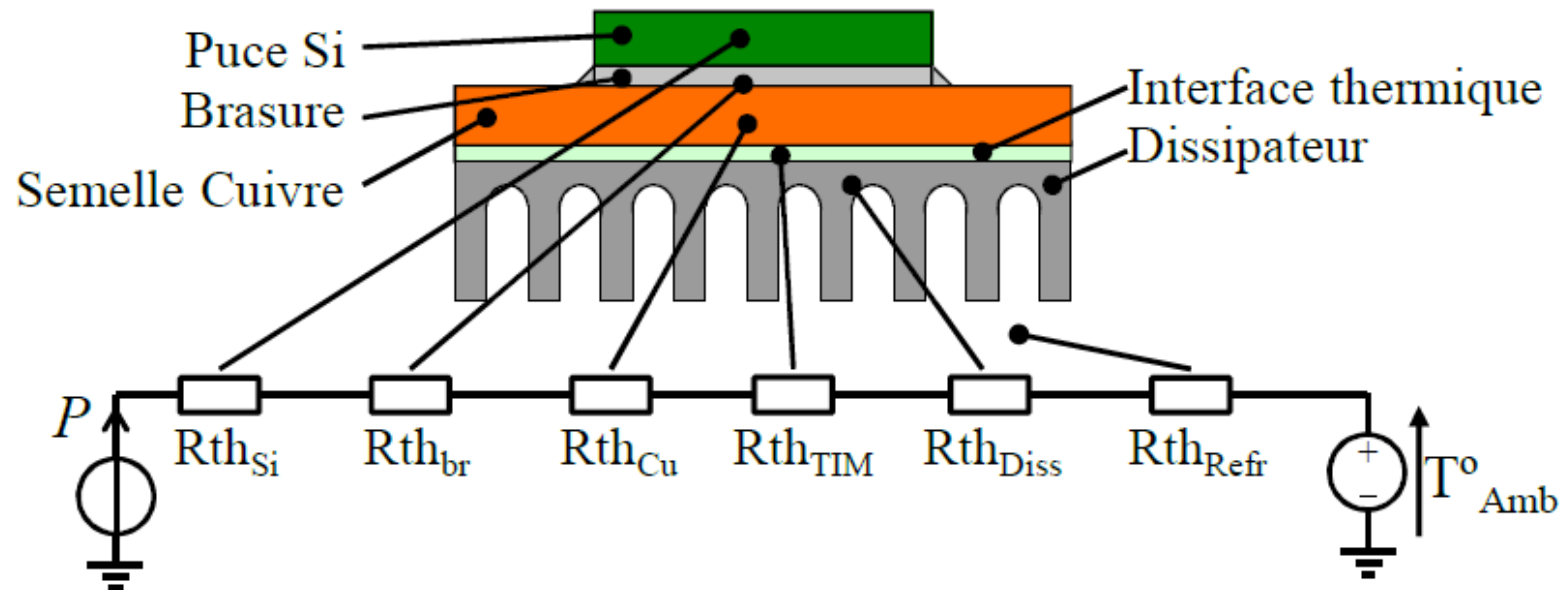
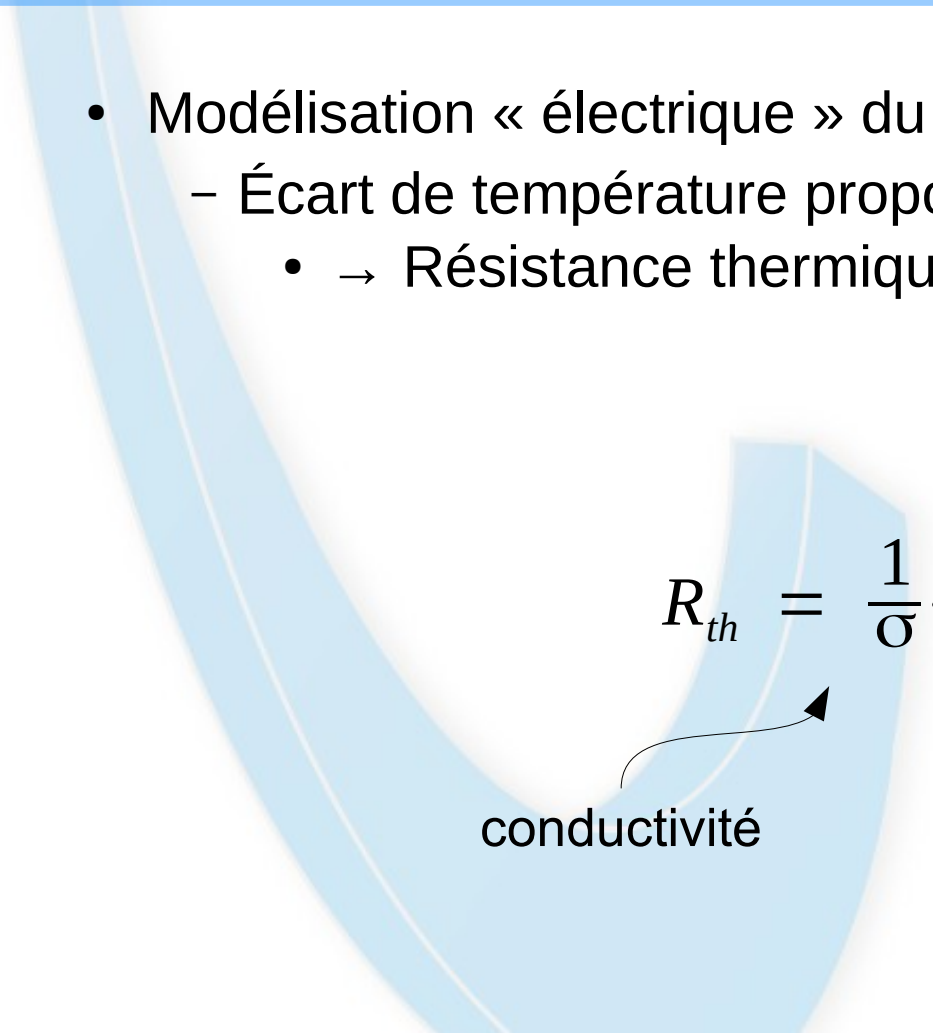


Figure 27 : Représentation schématique d'un module non isolé et son schéma électrique thermique statique

Fonctionnement théorique vs réel

- Modélisation « électrique » du comportement thermique
 - Écart de température proportionnel au flux de chaleur
 - → Résistance thermique

A diagram showing a light blue curved layer representing a thermal contact. An arrow points from the word "conductivité" to the layer. Another arrow points from the word "épaisseur" to the variable 'e' in the equation. A third arrow points from the words "Surface de contact" to the variable 'S' in the equation.
$$R_{th} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{e}{S}$$

conductivité

épaisseur

Surface de contact

Fonctionnement théorique vs réel

- Particularités :
 - Contact solide / solide

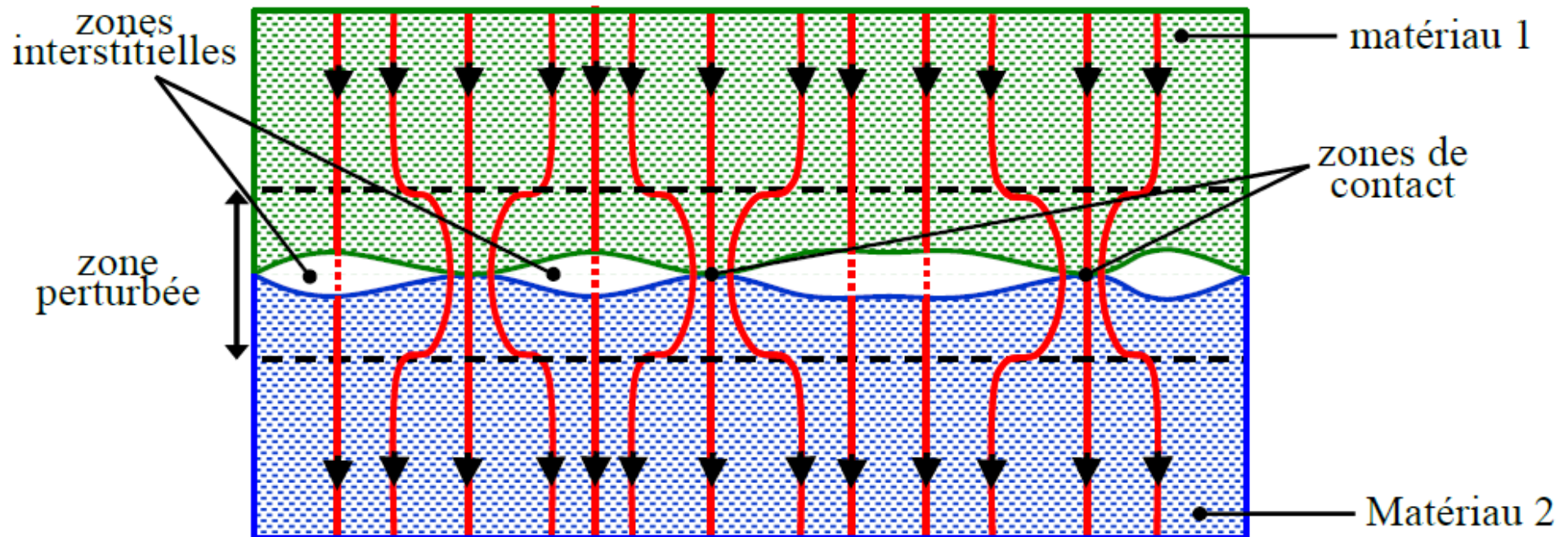


Figure 28 : Vue en coupe schématique à l'échelle microscopique d'un contact pressé entre deux matériaux

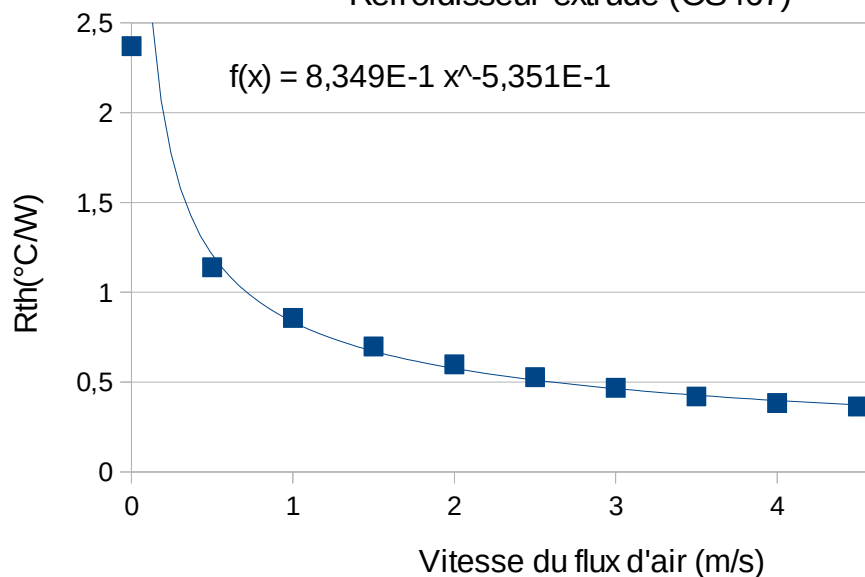
Fonctionnement théorique vs réel

- Particularités :
 - Contact solide / solide
 - Campagne d'essais sur TO220
 - Contact sans graisse/graisse/surplus
 - ~10 / 1 / 1,5

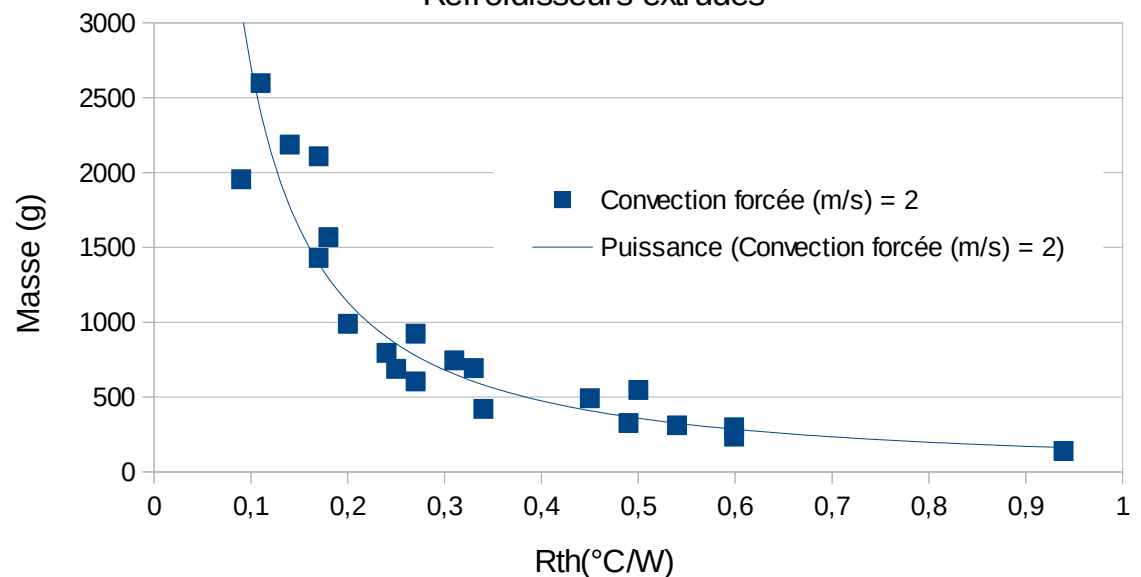
Fonctionnement théorique vs réel

- Particularités :
 - Convection naturelle / forcée → conditions !
 - Fort effet de la densité de puissance

Refroidisseur extrudé (OS467)



Refroidisseurs extrudés



Fonctionnement théorique vs réel

- Conception du refroidissement
 - Diminuer les densités de puissances !
 - Maîtriser l'évacuation de la chaleur
 - Outil de modélisation analytique ou par discrétisation
- Prototypage virtuel
 - Outils de simulation MFN 3D
- Prototypage
 - Caractérisation DC
 - Visualisation Thermique

Séminaire CAPTRONIC



Synthèse

Synthèse

- Pour augmenter la puissance :
 - Maîtriser les éléments parasites
 - Flux de fuite des transformateurs
 - Effet de peau
 - Cellule de commutation
 - Circuit de commande
 - Maîtriser les flux de chaleur
 - Répartir les flux
 - Températures maximales
 - Vieillissement

Contacts



Nous sommes à votre service

Siège social

SIREPE SAS

540 route de la Tour

73460 MONTAILLEUR

Centre technique

GeenER / SIREPE

21 avenue des martyrs

38000 GRENOBLE

Corentin Rizet

corentin.rizet@sirepe.fr

06 17 29 57 87

Stéphane Vighetti

stephane.vighetti@sirepe.fr

06 77 50 83 12