

# Contribution à la conception par la simulation en électronique de puissance : application à l'onduleur basse tension

Cyril BUTTAY

CEGELY – VALEO

30 novembre 2004

- 1 Introduction
- 2 Modélisation
- 3 Validation
- 4 Exploitation
- 5 Conclusion

- 1 Introduction
- 2 Modélisation
- 3 Validation
- 4 Exploitation
- 5 Conclusion

# Électronique de puissance & automobile

## Intérêt des actionneurs électriques

- **liberté dans l'architecture;**
  - climatisation,
  - direction « tout électrique »...
- souplesse de commande;
  - allumage,
  - soupapes électriques.



Exemple: hybridation des moteurs  
→ réduction de consommation.

# Électronique de puissance & automobile

## Intérêt des actionneurs électriques

- liberté dans l'architecture;
  - climatisation,
  - direction « tout électrique »...
- **souplesse de commande;**
  - **allumage,**
  - **soupapes électriques.**



Exemple: hybridation des moteurs  
→ réduction de consommation.

# Électronique de puissance & automobile

## Intérêt des actionneurs électriques

- liberté dans l'architecture;
  - climatisation,
  - direction « tout électrique »...
- souplesse de commande;
  - allumage,
  - soupapes électriques.

**Exemple: hybridation des moteurs**  
→ réduction de consommation.



# La simulation en électronique de puissance

## Intérêt

- Limiter les phases de prototypage
- Analyser les phénomènes
- Accéder à des valeurs non mesurables

## Problèmes

- Peu de modèles précis
- Raideur des simulations
- Influence des interconnexions

# La simulation en électronique de puissance

## Intérêt

- Limiter les phases de prototypage
- Analyser les phénomènes
- Accéder à des valeurs non mesurables

## Problèmes

- Peu de modèles précis
- Raideur des simulations
- Influence des interconnexions

# La simulation en électronique de puissance

## Intérêt

- Limiter les phases de prototypage
- Analyser les phénomènes
- **Accéder à des valeurs non mesurables**

## Problèmes

- Peu de modèles précis
- Raideur des simulations
- Influence des interconnexions

# La simulation en électronique de puissance

## Intérêt

- Limiter les phases de prototypage
- Analyser les phénomènes
- Accéder à des valeurs non mesurables

## Problèmes

- **Peu de modèles précis**
- Raideur des simulations
- Influence des interconnexions

# La simulation en électronique de puissance

## Intérêt

- Limiter les phases de prototypage
- Analyser les phénomènes
- Accéder à des valeurs non mesurables

## Problèmes

- Peu de modèles précis
- **Raideur des simulations**
- Influence des interconnexions

# La simulation en électronique de puissance

## Intérêt

- Limiter les phases de prototypage
- Analyser les phénomènes
- Accéder à des valeurs non mesurables

## Problèmes

- Peu de modèles précis
- Raideur des simulations
- **Influence des interconnexions**

# Objectifs du travail

## Proposer un modèle complet de l'onduleur

- Utilisation des modèles de composants du CEGELY;
  - utilisation de *SABER* puis *Pspice*,
  - adaptation aux contraintes *basse tension*,
- Utilisation d'*InCa* (LEG) pour la modélisation du câblage;
- Confronter ces modèles à l'expérience

## Utiliser l'outil de simulation

- mettre en avant ses avantages;
- participer à la construction d'un *prototype virtuel*;

# Objectifs du travail

## Proposer un modèle complet de l'onduleur

- Utilisation des modèles de composants du CEGELY;
  - utilisation de *SABER* puis *Pspice*,
  - adaptation aux contraintes *basse tension*,
- Utilisation d'*InCa* (LEG) pour la modélisation du câblage;
- Confronter ces modèles à l'expérience

## Utiliser l'outil de simulation

- mettre en avant ses avantages;
- participer à la construction d'un *prototype virtuel*;

# Objectifs du travail

## Proposer un modèle complet de l'onduleur

- Utilisation des modèles de composants du CEGELY;
  - utilisation de *SABER* puis *Pspice*,
  - adaptation aux contraintes *basse tension*,
- Utilisation d'*InCa* (LEG) pour la modélisation du câblage;
- **Confronter ces modèles à l'expérience**

## Utiliser l'outil de simulation

- mettre en avant ses avantages;
- participer à la construction d'un *prototype virtuel*;

# Objectifs du travail

## Proposer un modèle complet de l'onduleur

- Utilisation des modèles de composants du CEGELY;
  - utilisation de *SABER* puis *Pspice*,
  - adaptation aux contraintes *basse tension*,
- Utilisation d'*InCa* (LEG) pour la modélisation du câblage;
- Confronter ces modèles à l'expérience

## Utiliser l'outil de simulation

- **mettre en avant ses avantages;**
- participer à la construction d'un *prototype virtuel*;

# Objectifs du travail

## Proposer un modèle complet de l'onduleur

- Utilisation des modèles de composants du CEGELY;
  - utilisation de *SABER* puis *Pspice*,
  - adaptation aux contraintes *basse tension*,
- Utilisation d'*InCa* (LEG) pour la modélisation du câblage;
- Confronter ces modèles à l'expérience

## Utiliser l'outil de simulation

- mettre en avant ses avantages;
- **participer à la construction d'un *prototype virtuel*;**

1 Introduction

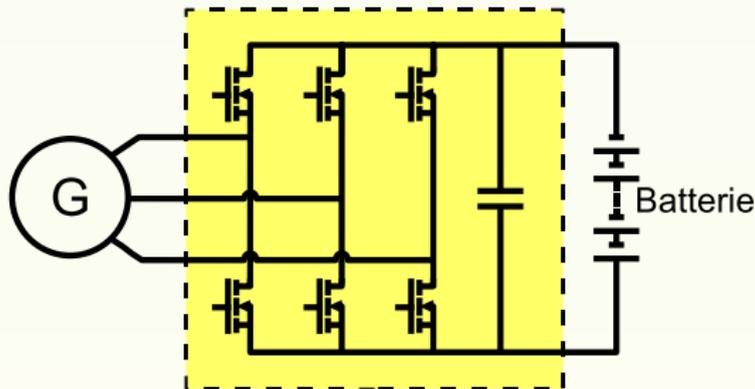
**2 Modélisation**

3 Validation

4 Exploitation

5 Conclusion

## Structure étudiée

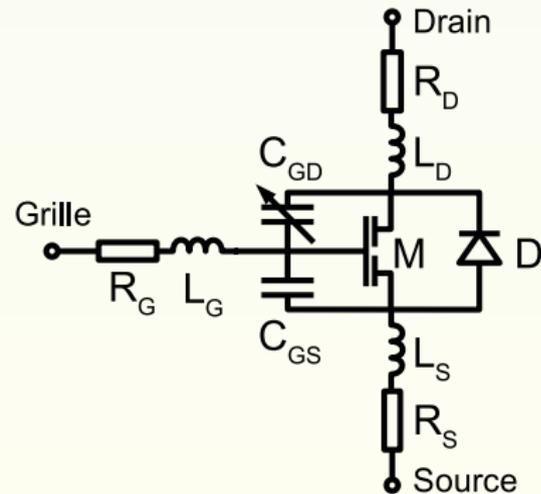
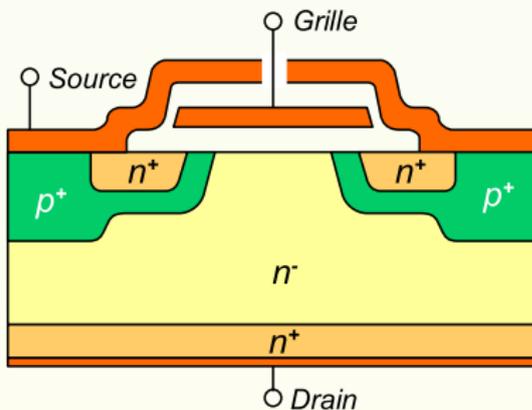


### Les composants

- condensateurs quasi-idéaux (céramiques – CMS)
- MOSFET
- câblage

# MOSFET

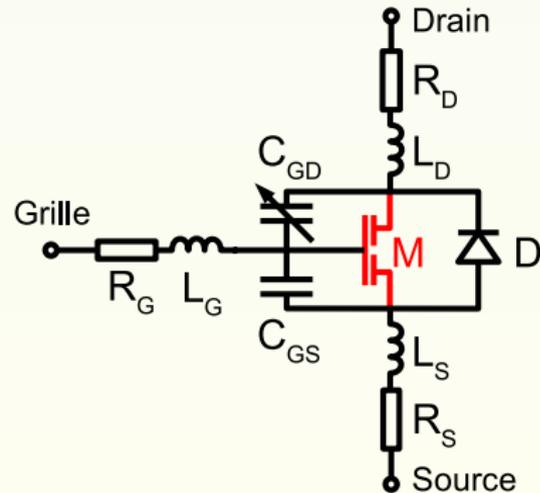
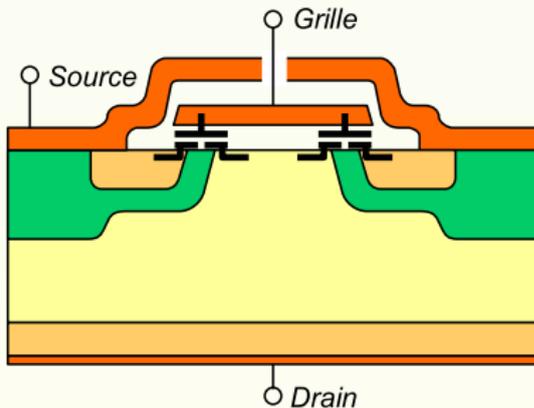
## Modèle proposé



⇒ le MOSFET peut être modélisé par schéma équivalent

# MOSFET

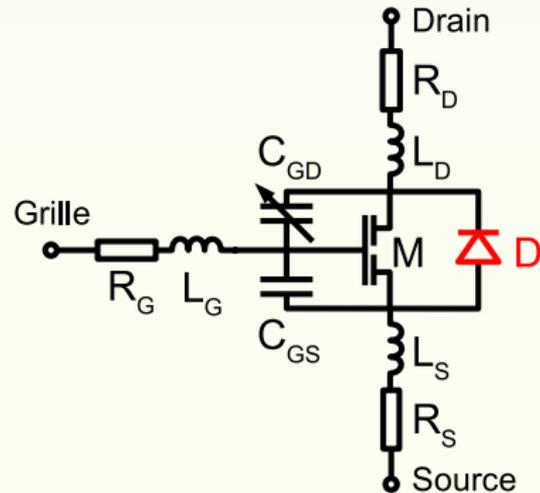
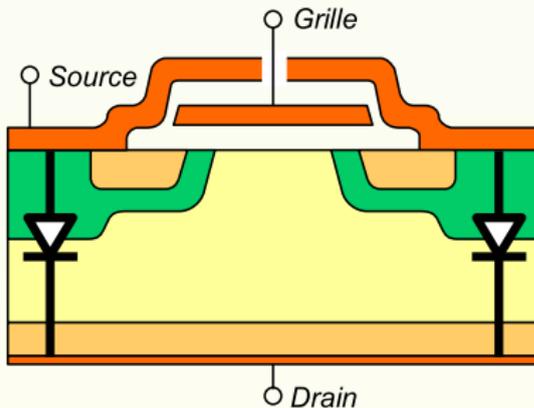
## Modèle proposé



⇒ le MOSFET peut être modélisé par schéma équivalent

# MOSFET

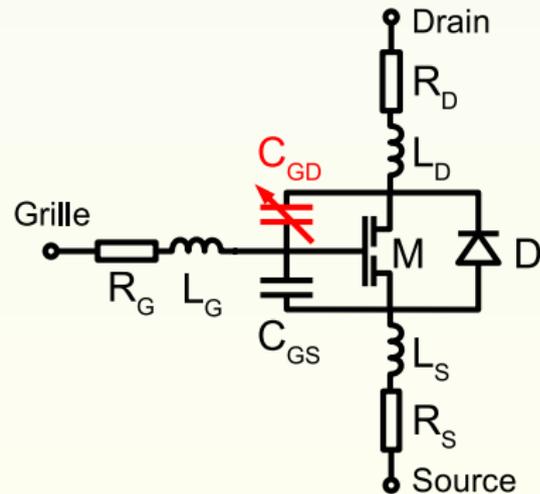
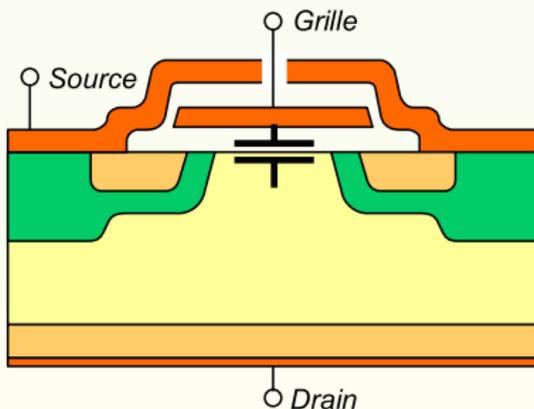
## Modèle proposé



⇒ le MOSFET peut être modélisé par schéma équivalent

# MOSFET

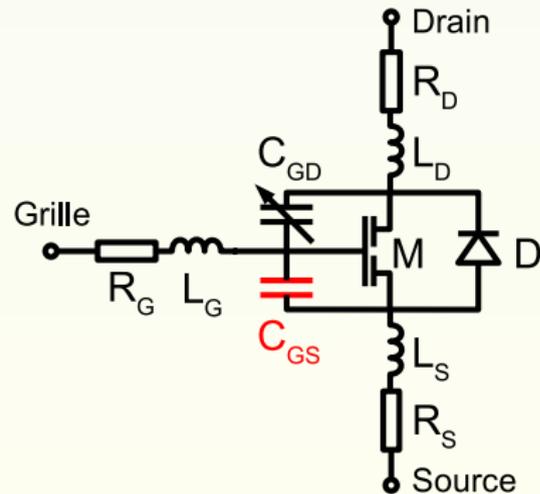
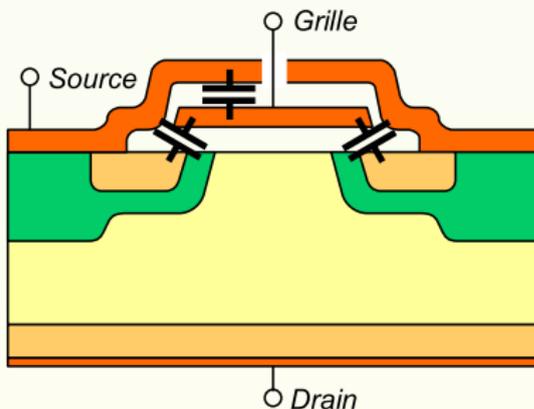
## Modèle proposé



⇒ le MOSFET peut être modélisé par schéma équivalent

# MOSFET

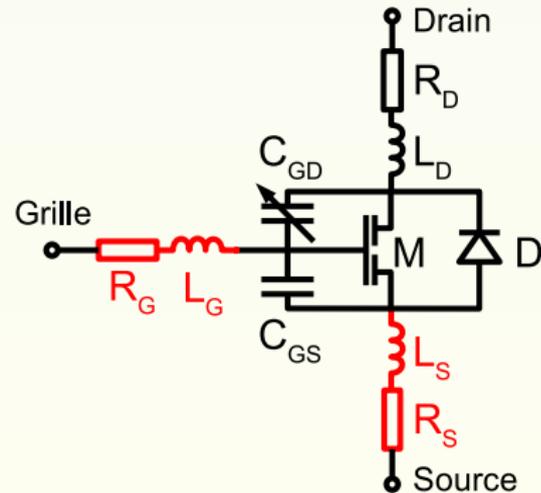
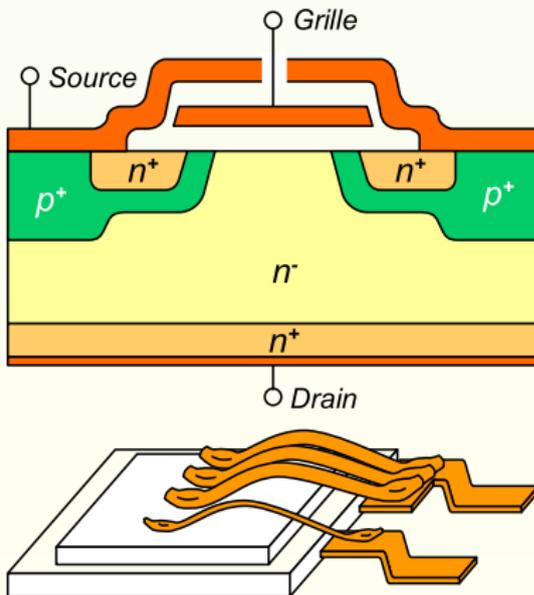
## Modèle proposé



⇒ le MOSFET peut être modélisé par schéma équivalent

# MOSFET

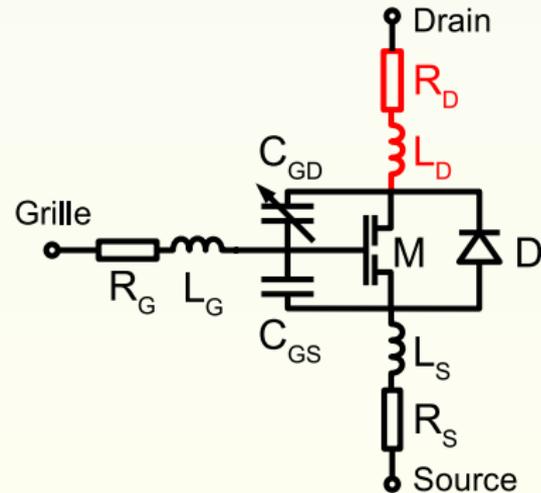
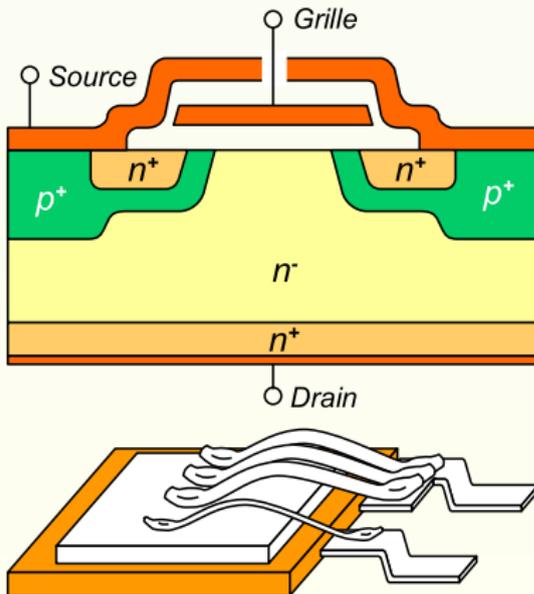
## Modèle proposé



⇒ le MOSFET peut être modélisé par schéma équivalent

# MOSFET

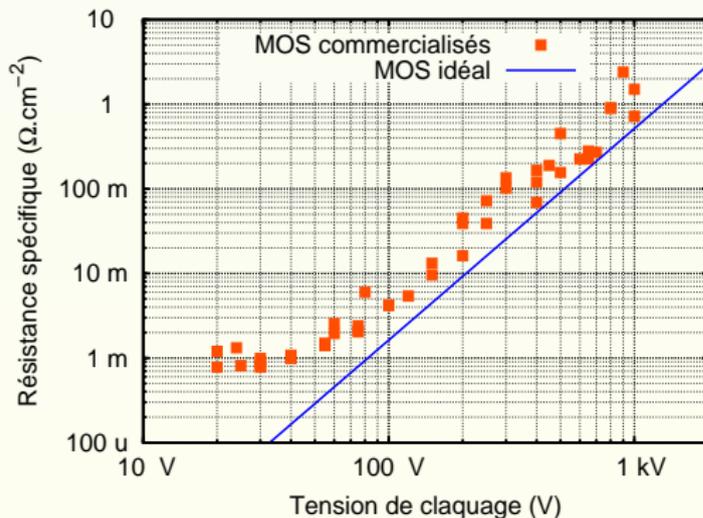
## Modèle proposé



⇒ le MOSFET peut être modélisé par schéma équivalent

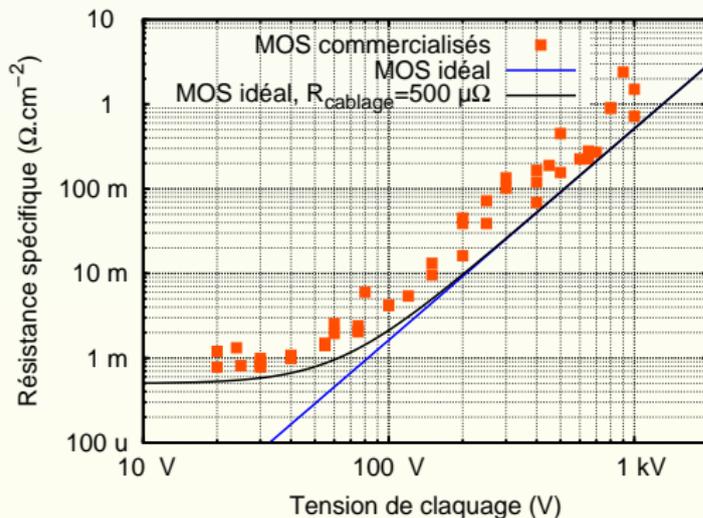
# MOSFET

## Modélisation statique – origine du $R_{DSon}$



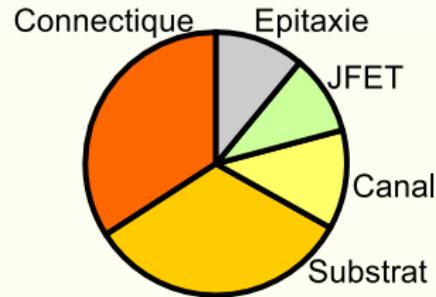
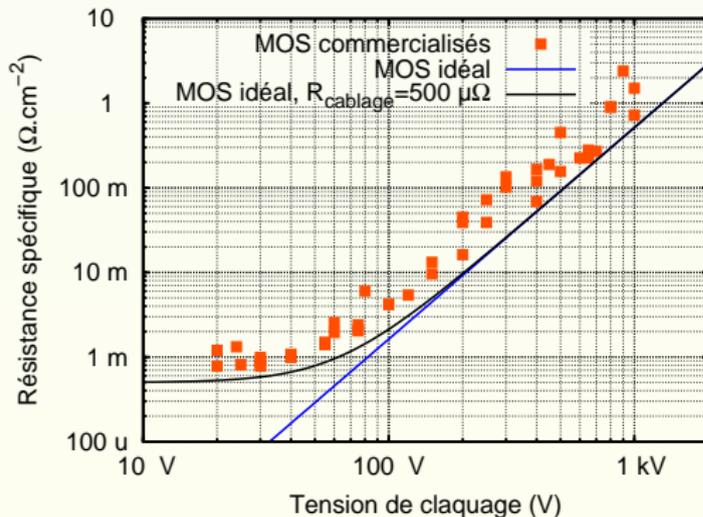
# MOSFET

## Modélisation statique – origine du $R_{DSon}$



# MOSFET

## Modélisation statique – origine du $R_{DSon}$

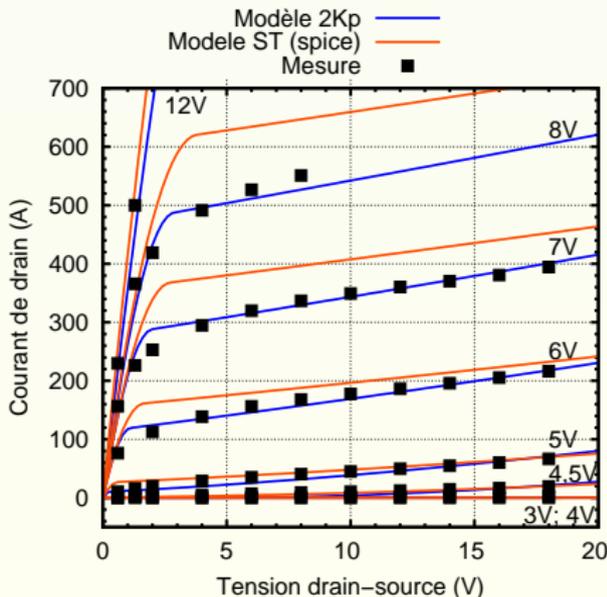


Source: STMicroelectronics

➔ Spécificité MOSFET basse tension : Résistances de boîtier

# MOSFET

## Modélisation statique – modèle

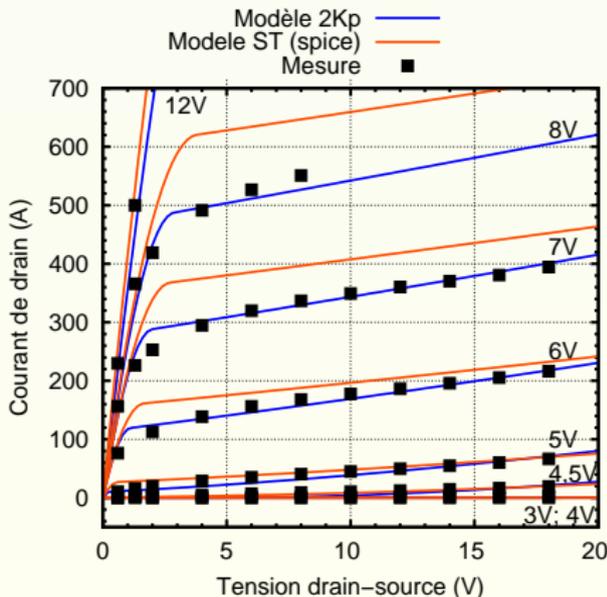


### Modèle à « 2Kp »:

- plus de degrés de liberté que le modèle *spice level 3*;
- peu complexe;
- 5 paramètres :  $Kp_{sat}$ ,  $Kp_{lin}$ ,  $\theta$ ,  $V_{th}$ ,  $\sigma$ .

# MOSFET

## Modélisation statique – modèle

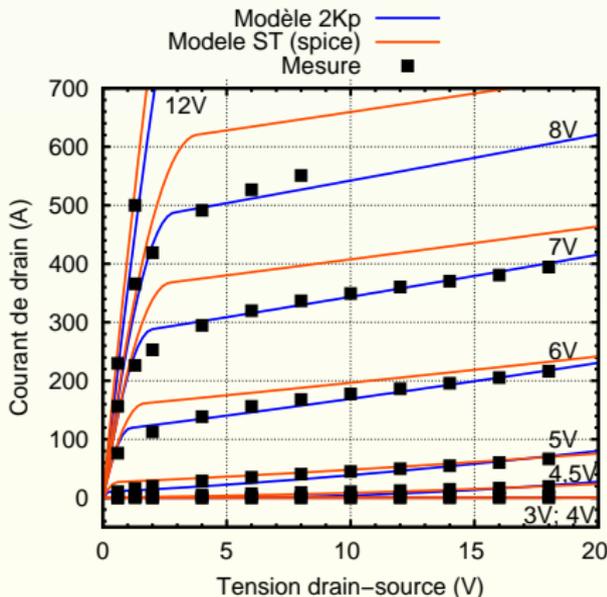


### Modèle à « 2Kp » :

- plus de degrés de liberté que le modèle *spice level 3* ;
- peu complexe ;
- 5 paramètres :  $Kp_{sat}$ ,  $Kp_{lin}$ ,  $\theta$ ,  $V_{th}$ ,  $\sigma$ .

# MOSFET

## Modélisation statique – modèle



### Modèle à « 2Kp »:

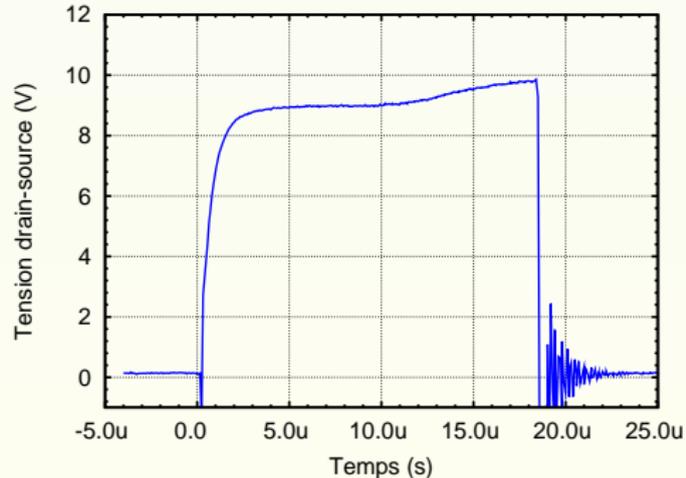
- plus de degrés de liberté que le modèle *spice level 3*;
- peu complexe;
- 5 paramètres :  $Kp_{sat}$ ,  $Kp_{lin}$ ,  $\theta$ ,  $V_{th}$ ,  $\sigma$ .

# MOSFET

## caractérisation statique

### Caractérisation statique

- **Autoéchauffement ;**
  - mesures pulsées  
< 10  $\mu$ s,
  - $\rightarrow$  dispositif de test  
spécifique,
- identification automatisée  
par recuit simulé.

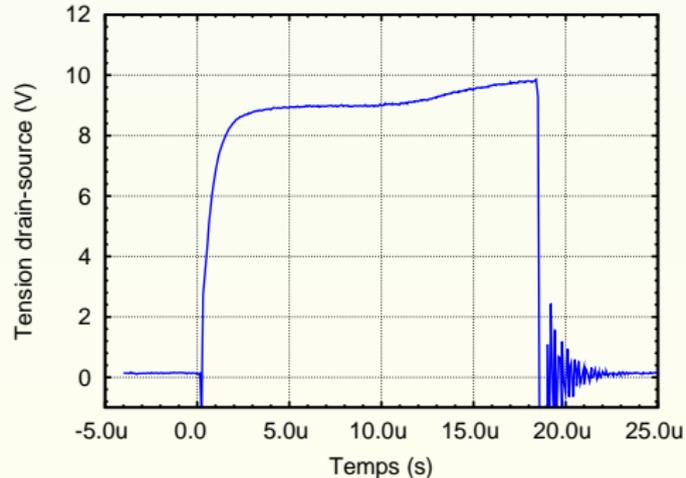


# MOSFET

## caractérisation statique

### Caractérisation statique

- Autoéchauffement ;
  - **mesures pulsées**  
 **$< 10 \mu s$ ,**
  - $\Rightarrow$  dispositif de test spécifique,
- identification automatisée par recuit simulé.

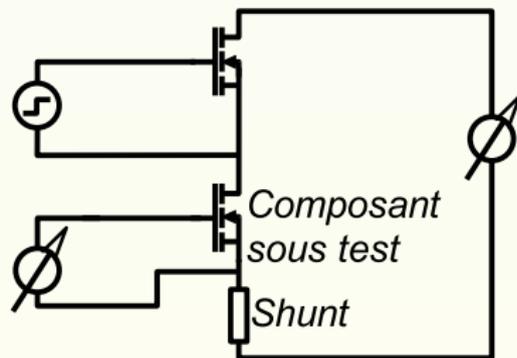


# MOSFET

## caractérisation statique

### Caractérisation statique

- Autoéchauffement ;
  - mesures pulsées  
<  $10 \mu\text{s}$ ,
  - ➡ **dispositif de test spécifique,**
- identification automatisée par recuit simulé.

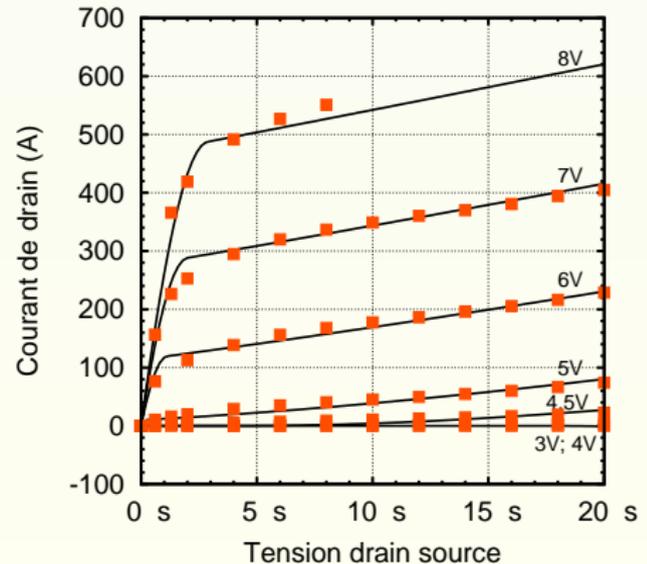


# MOSFET

## caractérisation statique

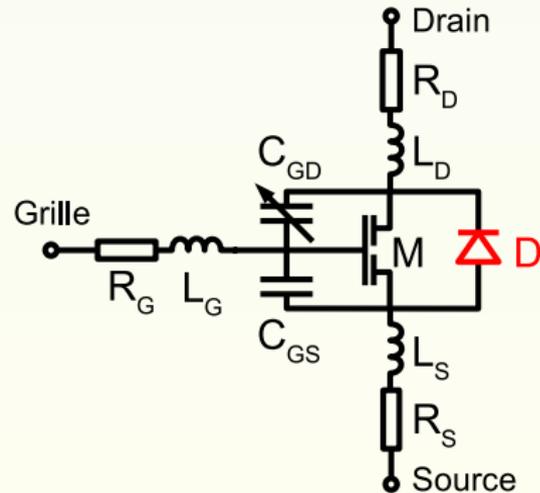
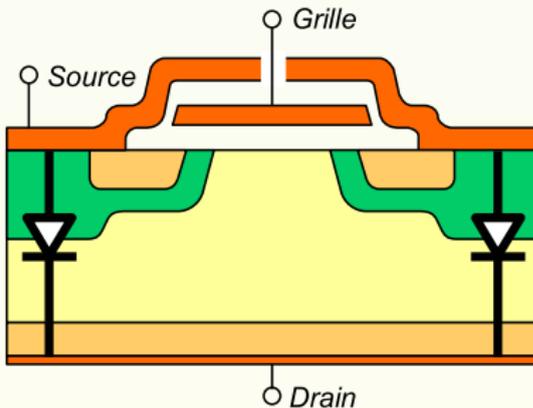
### Caractérisation statique

- Autoéchauffement ;
  - mesures pulsées  
<  $10 \mu\text{s}$ ,
  - $\Rightarrow$  dispositif de test  
spécifique,
- **identification automatisée  
par recuit simulé.**



# MOSFET

## Modèle proposé



⇒ le MOSFET peut être modélisé par schéma équivalent

# MOSFET

## Diode intrinsèque

### Utilisation du modèle de diode PiN du CEGELY

- Paramètres dynamiques :  $A$ ,  $N$ ,  $W$ ,  $\tau_A$ ,  $\tau_D$ ,  $\alpha$ ;
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ .

### Identification des paramètres

- Paramètres dynamiques :
  - estimation de  $A$ ,  $N$ ,  $W$  et  $\tau_A$  *a priori*,
  - identification aux mesures en commutation,
  - identification de  $\tau_D$  et  $\alpha$ ,
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ ;
  - identification avec la caractéristique statique.

# MOSFET

## Diode intrinsèque

### Utilisation du modèle de diode PiN du CEGELY

- Paramètres dynamiques :  $A$ ,  $N$ ,  $W$ ,  $\tau_A$ ,  $\tau_D$ ,  $\alpha$ ;
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ .

### Identification des paramètres

- Paramètres dynamiques :
  - estimation de  $A$ ,  $N$ ,  $W$  et  $\tau_A$  a priori,
  - identification aux mesures en commutation,
  - identification de  $\tau_D$  et  $\alpha$ ,
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ ;
  - identification avec la caractéristique statique

# MOSFET

## Diode intrinsèque

### Utilisation du modèle de diode PiN du CEGELY

- Paramètres dynamiques :  $A$ ,  $N$ ,  $W$ ,  $\tau_A$ ,  $\tau_D$ ,  $\alpha$ ;
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ .

### Identification des paramètres

- **Paramètres dynamiques :**
  - estimation de  $A$ ,  $N$ ,  $W$  et  $\tau_A$  *a priori*,
  - identification aux mesures en commutation,
  - identification de  $\tau_D$  et  $\alpha$ ,
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ ;
  - identification avec la caractéristique statique

# MOSFET

## Diode intrinsèque

### Utilisation du modèle de diode PiN du CEGELY

- Paramètres dynamiques :  $A$ ,  $N$ ,  $W$ ,  $\tau_A$ ,  $\tau_D$ ,  $\alpha$ ;
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ .

### Identification des paramètres

- Paramètres dynamiques :
  - **estimation de  $A$ ,  $N$ ,  $W$  et  $\tau_A$  a priori**,
  - identification aux mesures en commutation,
  - identification de  $\tau_D$  et  $\alpha$ ,
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ ;
  - identification avec la caractéristique statique

# MOSFET

## Diode intrinsèque

### Utilisation du modèle de diode PiN du CEGELY

- Paramètres dynamiques :  $A$ ,  $N$ ,  $W$ ,  $\tau_A$ ,  $\tau_D$ ,  $\alpha$ ;
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ .

### Identification des paramètres

- Paramètres dynamiques :
  - estimation de  $A$ ,  $N$ ,  $W$  et  $\tau_A$  *a priori*,
  - **identification aux mesures en commutation**,
  - identification de  $\tau_D$  et  $\alpha$ ,
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ ;
  - identification avec la caractéristique statique

# MOSFET

## Diode intrinsèque

### Utilisation du modèle de diode PiN du CEGELY

- Paramètres dynamiques :  $A$ ,  $N$ ,  $W$ ,  $\tau_A$ ,  $\tau_D$ ,  $\alpha$ ;
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ .

### Identification des paramètres

- Paramètres dynamiques :
  - estimation de  $A$ ,  $N$ ,  $W$  et  $\tau_A$  *a priori*,
  - identification aux mesures en commutation,
  - **identification de  $\tau_D$  et  $\alpha$ ,**

- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ ;

• identification avec la caractéristique statique

# MOSFET

## Diode intrinsèque

### Utilisation du modèle de diode PiN du CEGELY

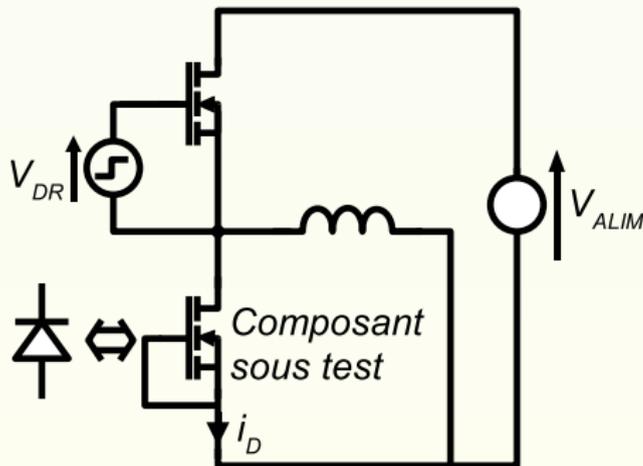
- Paramètres dynamiques :  $A$ ,  $N$ ,  $W$ ,  $\tau_A$ ,  $\tau_D$ ,  $\alpha$ ;
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ .

### Identification des paramètres

- Paramètres dynamiques :
  - estimation de  $A$ ,  $N$ ,  $W$  et  $\tau_A$  *a priori*,
  - identification aux mesures en commutation,
  - identification de  $\tau_D$  et  $\alpha$ ,
- Paramètres statiques :  $V_{bi}$  et  $V_{n0}$ ;
  - identification avec la caractéristique statique.

# MOSFET

## Caractérisation de la diode – dynamique



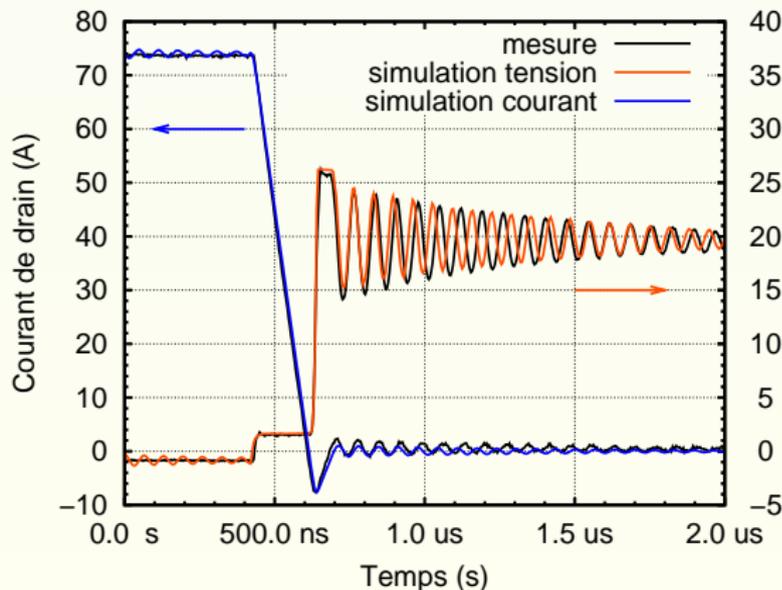
Un transistor en commutation

Grille et source du transistor sous test court-circuitées

Simulation du modèle complet du MOSFET

# MOSFET

## Caractérisation de la diode – dynamique



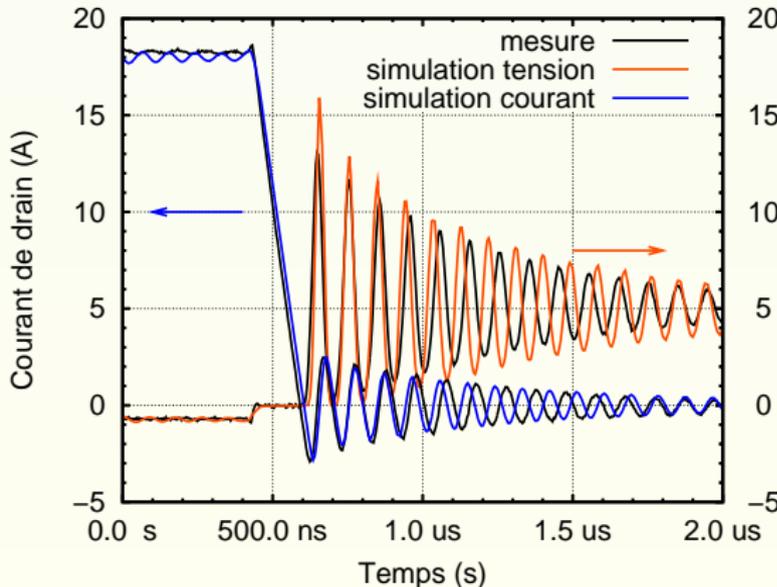
Un transistor en  
commutation

Grille et source du  
transistor sous test  
court-circuitées

Simulation du modèle  
complet du MOSFET

# MOSFET

## Caractérisation de la diode – dynamique



Un transistor en  
commutation

Grille et source du  
transistor sous test  
court-circuitées

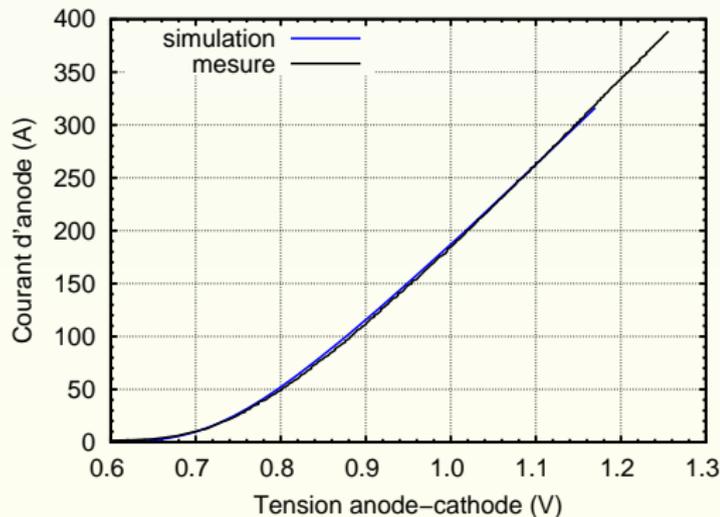
Simulation du modèle  
complet du MOSFET

# MOSFET

## Caractérisation de la diode – statique

Forte influence sur les pertes dans un onduleur

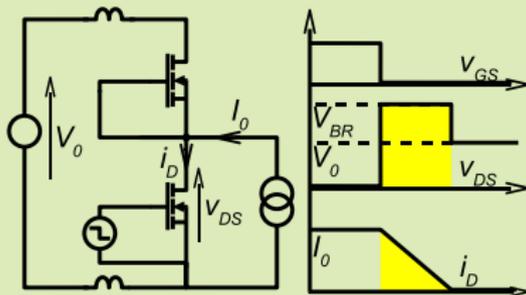
2 paramètres :  
 $V_{bi}$  et  $V_{n0}$



# MOSFET

## Causes du passage en avalanche

### Inductance de maille



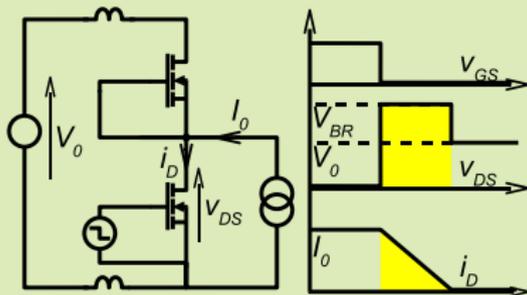
### load dump

Forte dissipation d'énergie → modèle électrothermique

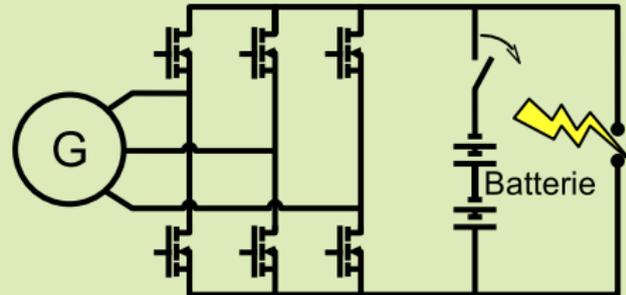
# MOSFET

## Causes du passage en avalanche

### Inductance de maille



### load dump

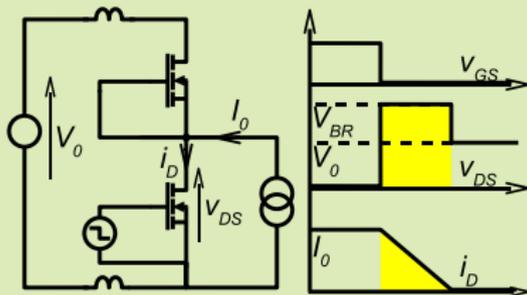


Forte dissipation d'énergie → modèle électrothermique

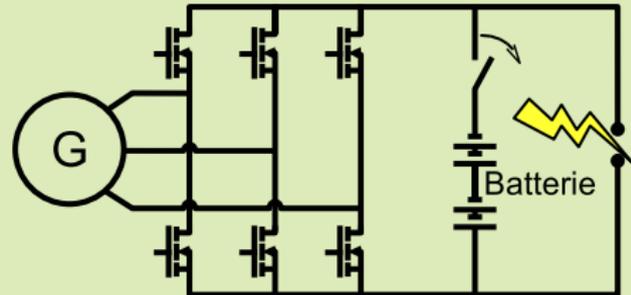
# MOSFET

## Causes du passage en avalanche

### Inductance de maille



### load dump

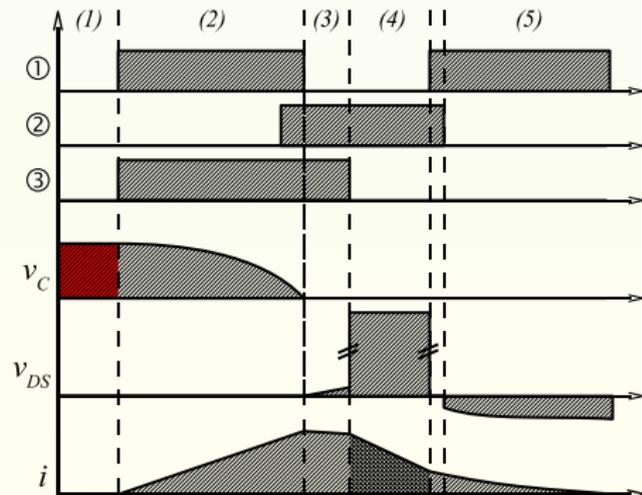
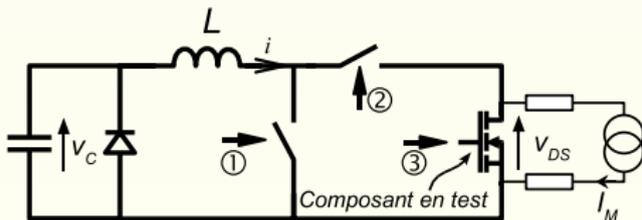


Forte dissipation d'énergie → modèle électrothermique

# MOSFET

## Caractérisation de la diode en avalanche – principe

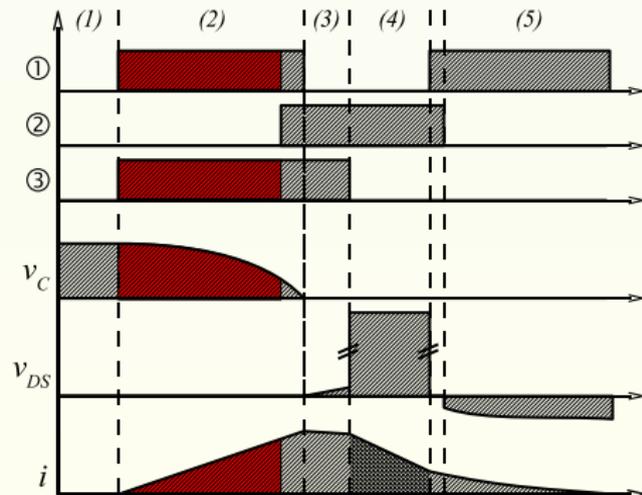
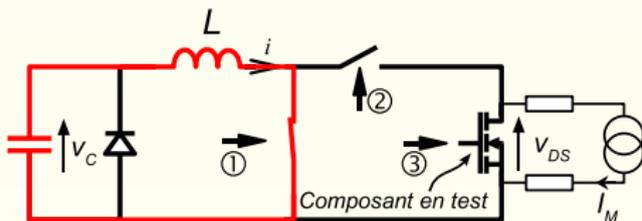
- condensateur chargé à  $v_C$
- fermeture de ①, charge de  $L$
- fermeture de ② et ③
- ouverture de ①
- ouverture de ③ (avalanche)
- fermeture de ①
- ② isolé



# MOSFET

## Caractérisation de la diode en avalanche – principe

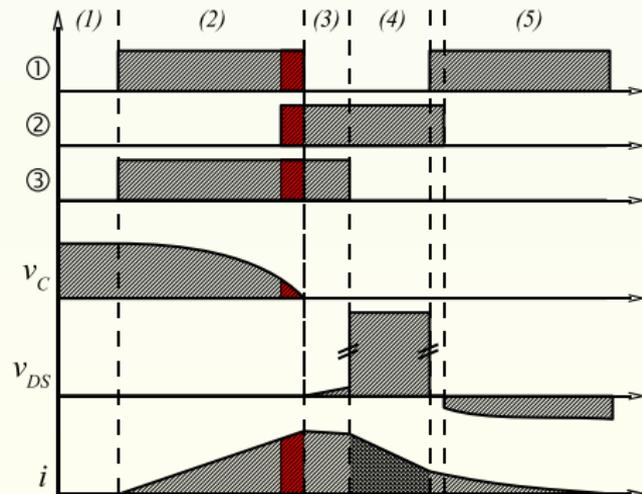
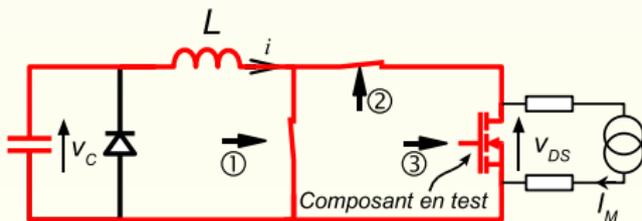
- condensateur chargé à  $v_C$
- fermeture de ①, charge de  $L$
- fermeture de ② et ③
- ouverture de ①
- ouverture de ③ (avalanche)
- fermeture de ①
- ② isolé



# MOSFET

## Caractérisation de la diode en avalanche – principe

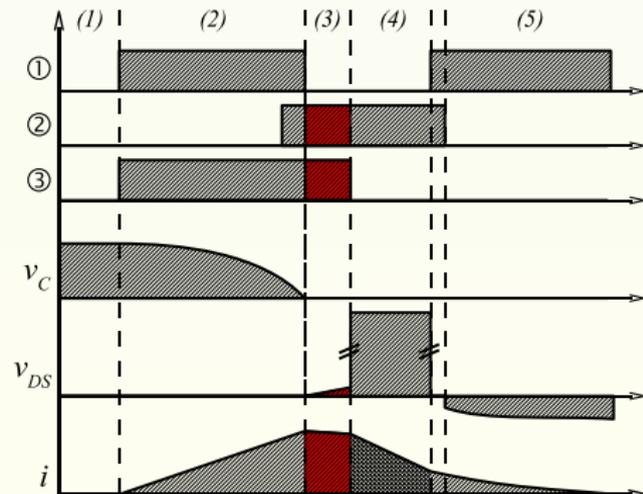
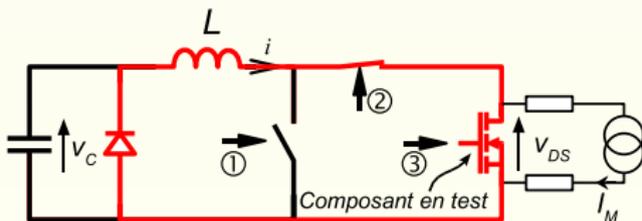
- condensateur chargé à  $v_C$
- fermeture de ①, charge de  $L$
- fermeture de ② et ③
- ouverture de ①
- ouverture de ③ (avalanche)
- fermeture de ①
- ② isolé



# MOSFET

## Caractérisation de la diode en avalanche – principe

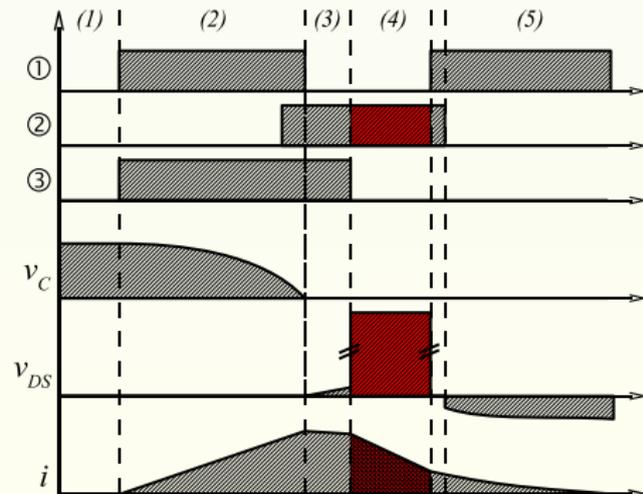
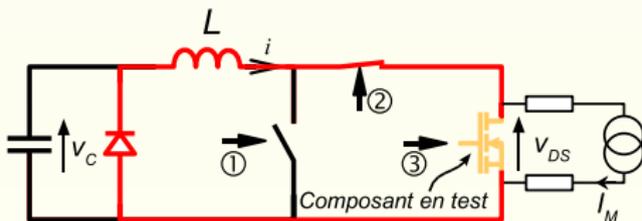
- condensateur chargé à  $v_C$
- fermeture de ①, charge de  $L$
- fermeture de ② et ③
- **ouverture de ①**
- ouverture de ③ (avalanche)
- fermeture de ①
- ② isolé



# MOSFET

## Caractérisation de la diode en avalanche – principe

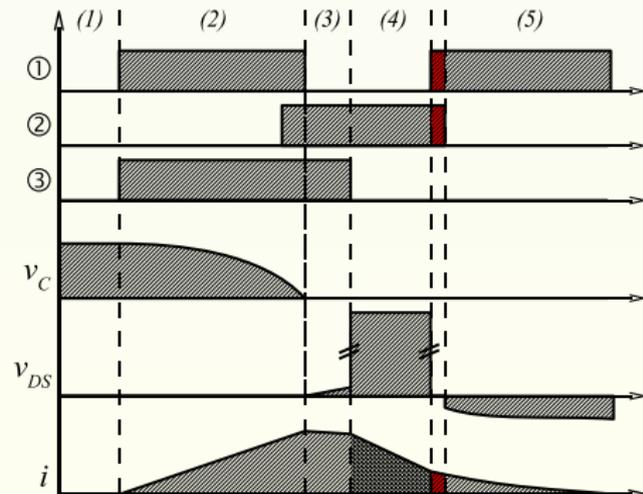
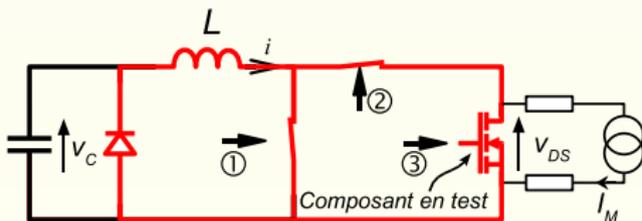
- condensateur chargé à  $v_C$
- fermeture de ①, charge de  $L$
- fermeture de ② et ③
- ouverture de ①
- **ouverture de ③ (avalanche)**
- fermeture de ①
- ② isolé



# MOSFET

## Caractérisation de la diode en avalanche – principe

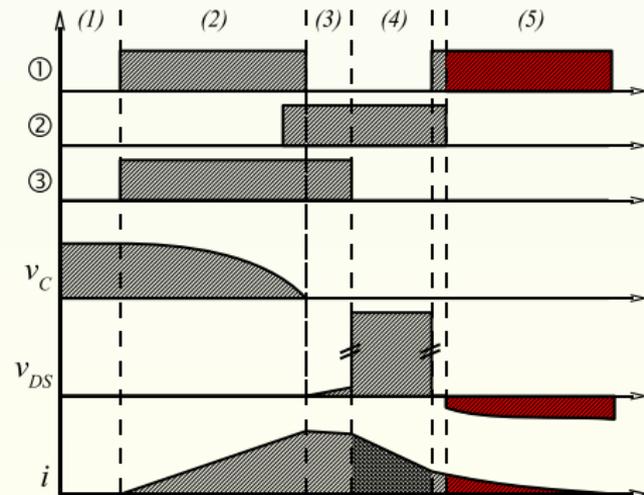
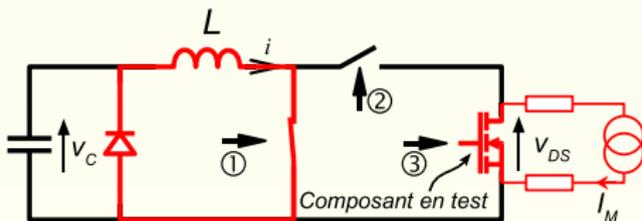
- condensateur chargé à  $v_C$
- fermeture de ①, charge de  $L$
- fermeture de ② et ③
- ouverture de ①
- ouverture de ③ (avalanche)
- fermeture de ①
- ② isolé



# MOSFET

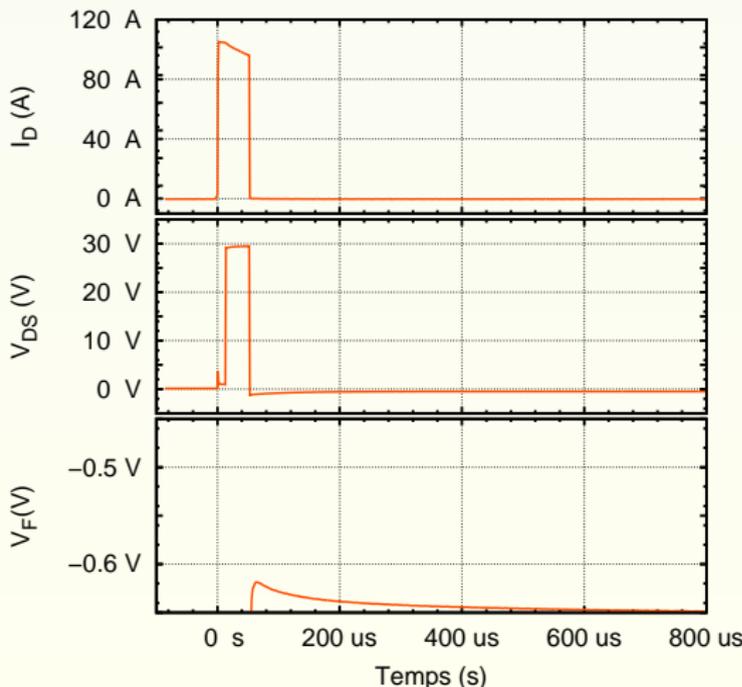
## Caractérisation de la diode en avalanche – principe

- condensateur chargé à  $v_C$
- fermeture de ①, charge de  $L$
- fermeture de ② et ③
- ouverture de ①
- ouverture de ③ (avalanche)
- fermeture de ①
- ② isolé



# MOSFET

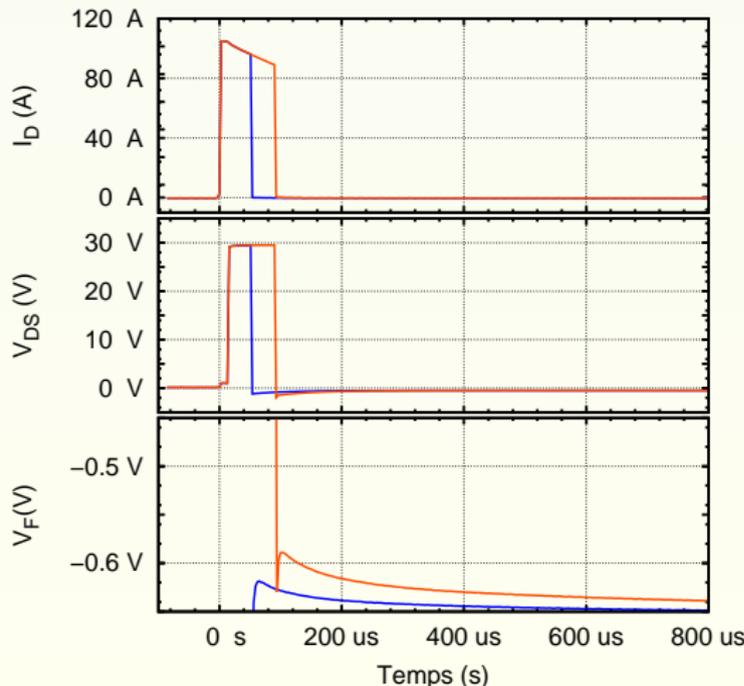
## Caractérisation de la diode en avalanche – mesures



- Mesures :
  - Courant de drain;
  - Tension drain source;
  - Température durant le refroidissement.
- Impulsions de durée croissante
- extraction de  $I_D(t)$ ,  $V_{DS}(t)$  et  $T(t)$ .

# MOSFET

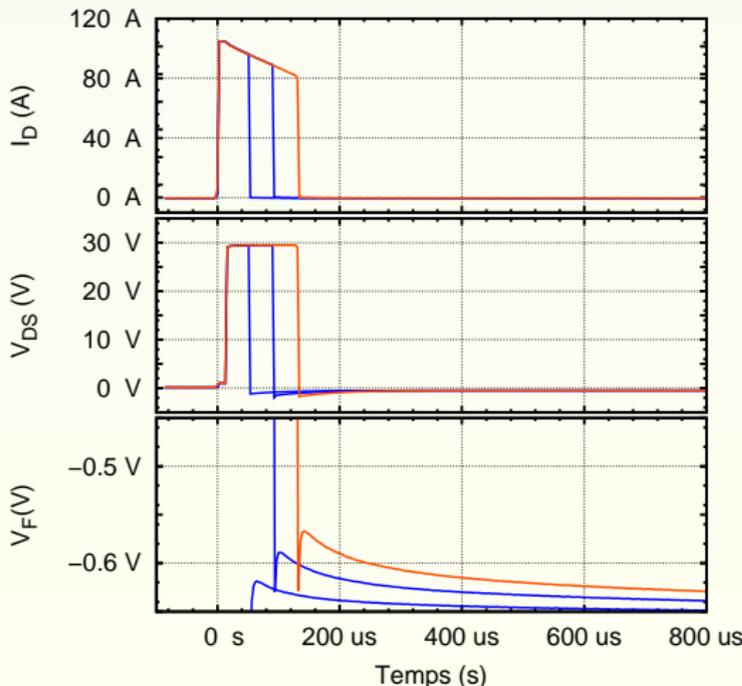
## Caractérisation de la diode en avalanche – mesures



- Mesures :
  - Courant de drain;
  - Tension drain source;
  - Température durant le refroidissement.
- Impulsions de durée croissante
- extraction de  $I_D(t)$ ,  $V_{DS}(t)$  et  $T(t)$ .

# MOSFET

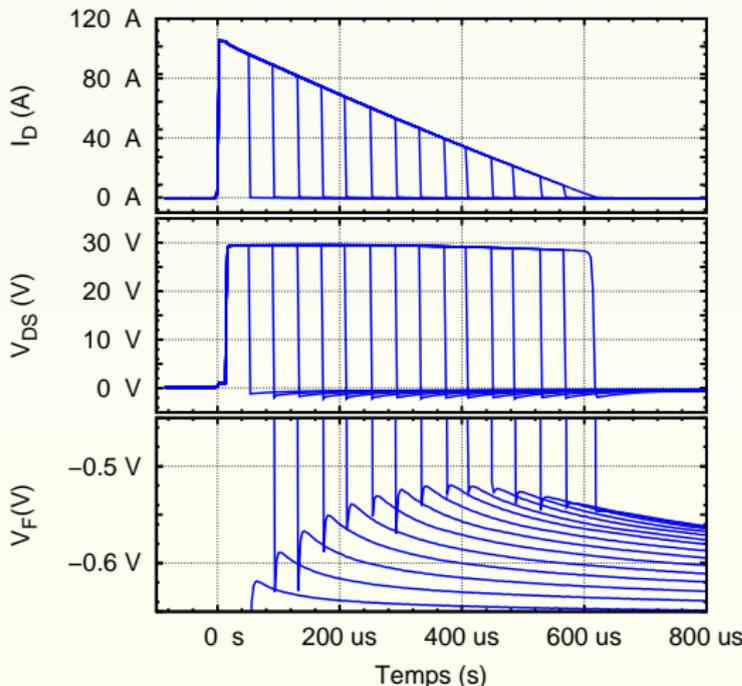
## Caractérisation de la diode en avalanche – mesures



- Mesures :
  - Courant de drain;
  - Tension drain source;
  - Température durant le refroidissement.
- Impulsions de durée croissante
  - extraction de  $I_D(t)$ ,  $V_{DS}(t)$  et  $T(t)$ .

# MOSFET

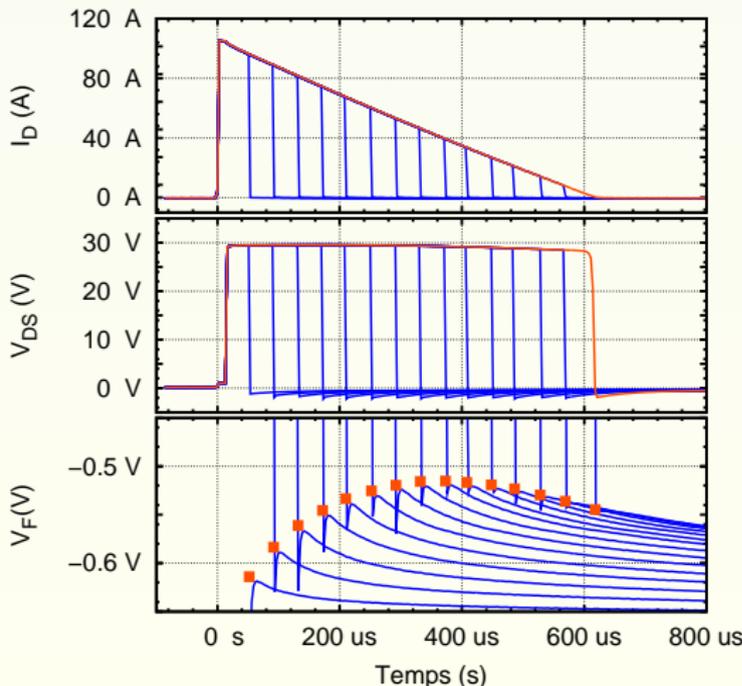
## Caractérisation de la diode en avalanche – mesures



- Mesures :
  - Courant de drain;
  - Tension drain source;
  - Température durant le refroidissement.
- Impulsions de durée croissante
  - extraction de  $I_D(t)$ ,  $V_{DS}(t)$  et  $T(t)$ .

# MOSFET

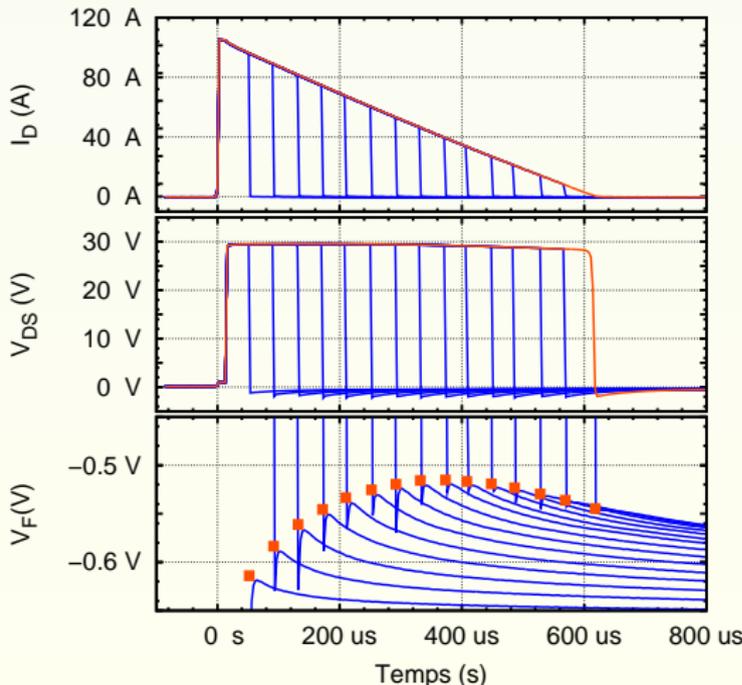
## Caractérisation de la diode en avalanche – mesures



- Mesures :
  - Courant de drain;
  - Tension drain source;
  - Température durant le refroidissement.
- Impulsions de durée croissante
- extraction de  $I_D(t)$ ,  $V_{DS}(t)$  et  $T(t)$ .

# MOSFET

## Caractérisation de la diode en avalanche – mesures



- Mesures :

- Courant de drain;
- Tension drain source;
- Température durant le refroidissement.

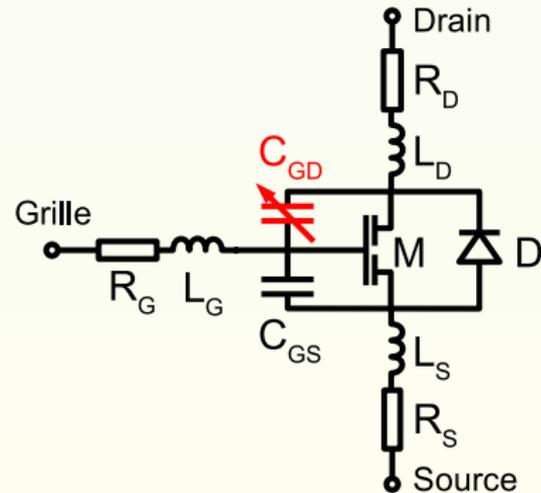
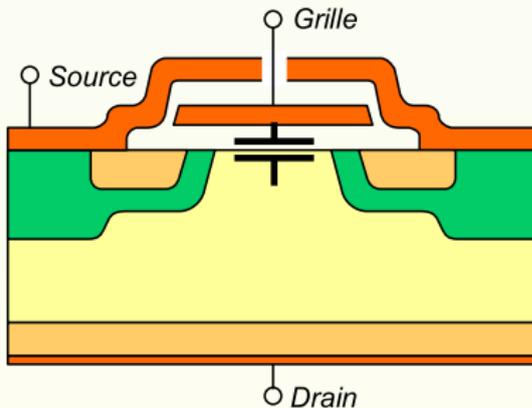
- Impulsions de durée croissante

- extraction de  $I_D(t)$ ,  $V_{DS}(t)$  et  $T(t)$ .

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{BR} + \beta T + R_{BR} I_D$$

# MOSFET

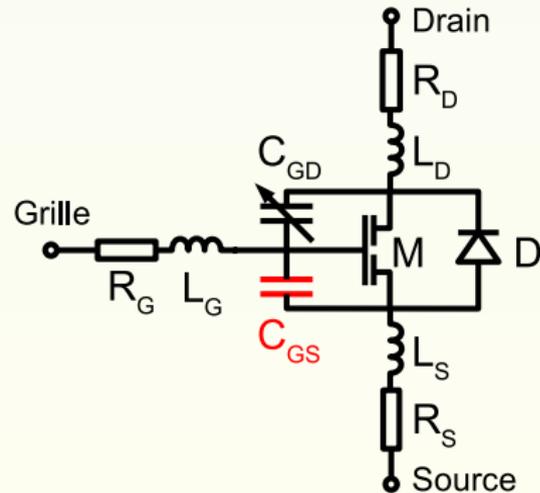
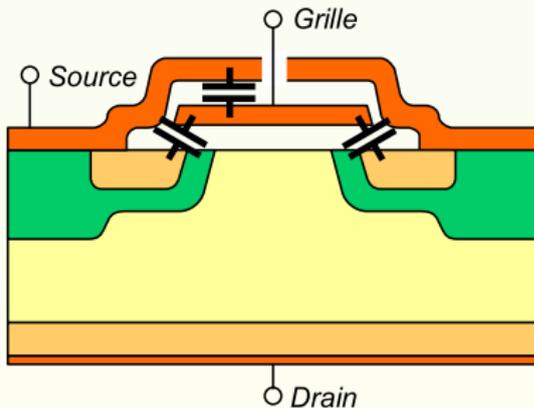
## Modèle proposé



⇒ le MOSFET peut être modélisé par schéma équivalent

# MOSFET

## Modèle proposé



⇒ le MOSFET peut être modélisé par schéma équivalent

# MOSFET

## Capacités

$C_{GS}$

Capacité constante  $\Rightarrow$  un seul paramètre:  $C_{GS}$

$C_{DS}$

Capacité de jonction de la diode interne  $\Rightarrow$  déjà modélisée

$C_{GD}$

Capacité d'oxyde en série avec une capacité de jonction  
 $\Rightarrow$  2 paramètres supplémentaires:  $A_{GD}$  et  $C_{ox}$

$\Rightarrow$  3 paramètres à identifier:  $C_{GS}$ ,  $A_{GD}$  et  $C_{ox}$

# MOSFET

## Capacités

$C_{GS}$

Capacité constante  $\Rightarrow$  un seul paramètre:  $C_{GS}$

$C_{DS}$

Capacité de jonction de la diode interne  $\Rightarrow$  déjà modélisée

$C_{GD}$

Capacité d'oxyde en série avec une capacité de jonction  
 $\Rightarrow$  2 paramètres supplémentaires:  $A_{GD}$  et  $C_{ox}$

$\Rightarrow$  3 paramètres à identifier:  $C_{GS}$ ,  $A_{GD}$  et  $C_{ox}$

# MOSFET

## Capacités

$C_{GS}$

Capacité constante  $\Rightarrow$  un seul paramètre:  $C_{GS}$

$C_{DS}$

Capacité de jonction de la diode interne  $\Rightarrow$  déjà modélisée

$C_{GD}$

Capacité d'oxyde en série avec une capacité de jonction

$\Rightarrow$  2 paramètres supplémentaires:  $A_{GD}$  et  $C_{ox}$

$\Rightarrow$  3 paramètres à identifier:  $C_{GS}$ ,  $A_{GD}$  et  $C_{ox}$

# MOSFET

## Capacités

$C_{GS}$

Capacité constante  $\Rightarrow$  un seul paramètre:  $C_{GS}$

$C_{DS}$

Capacité de jonction de la diode interne  $\Rightarrow$  déjà modélisée

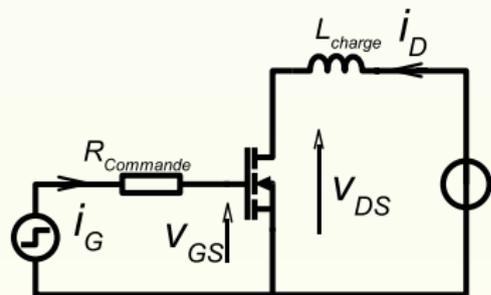
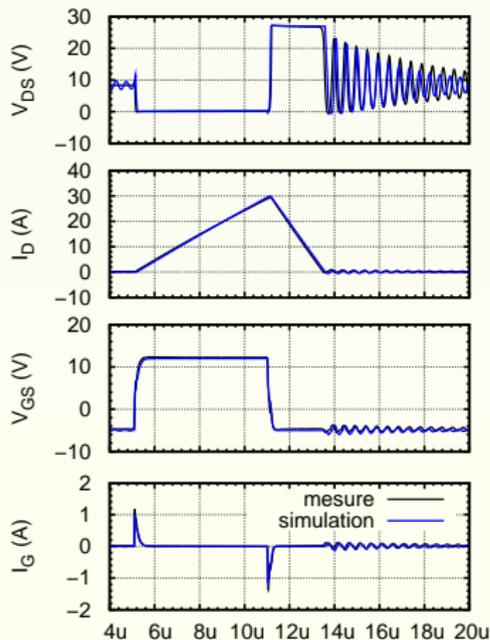
$C_{GD}$

Capacité d'oxyde en série avec une capacité de jonction  
 $\Rightarrow$  2 paramètres supplémentaires:  $A_{GD}$  et  $C_{ox}$

$\Rightarrow$  3 paramètres à identifier:  $C_{GS}$ ,  $A_{GD}$  et  $C_{ox}$

# MOSFET

## Caractérisation du comportement dynamique

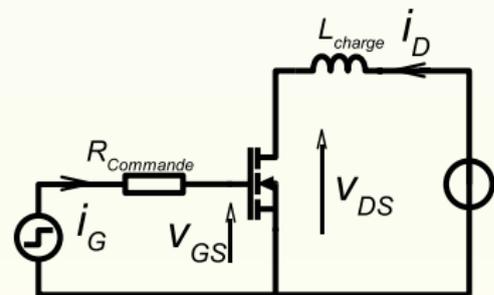
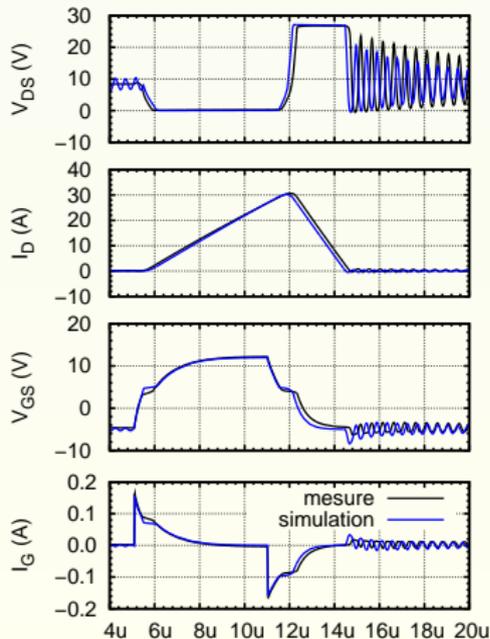


Interactions câblage/capacités  
MOSFET

Commutations rapide et lente

# MOSFET

## Caractérisation du comportement dynamique

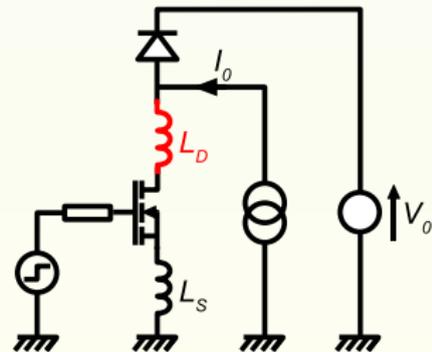
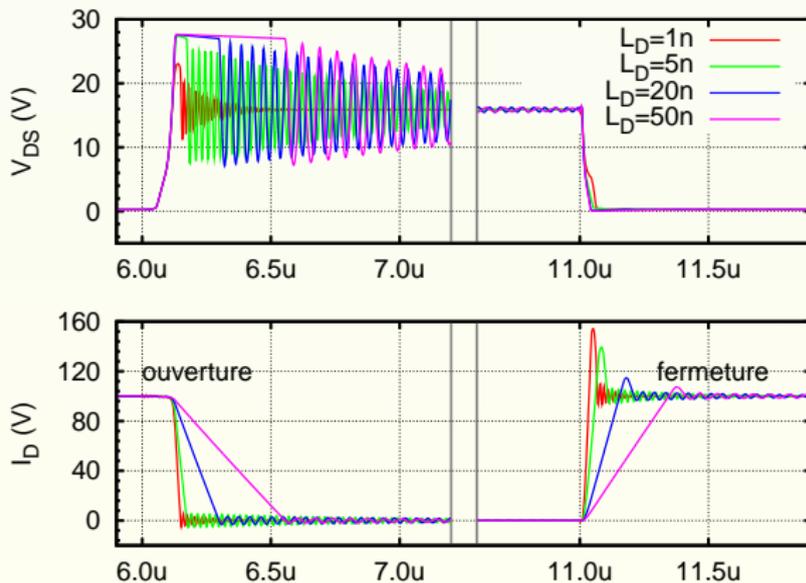


Interactions câblage/capacités  
MOSFET

Commutations rapide et lente

# Câblage

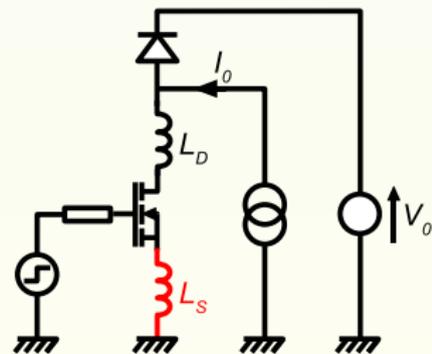
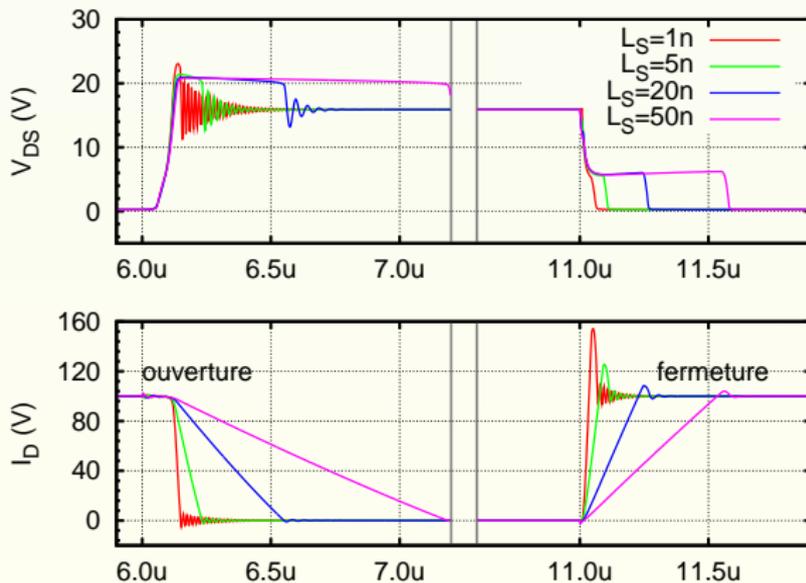
## Influence sur la commutation



Influence de  $L_D$

# Câblage

## Influence sur la commutation



Influence de  $L_S$

# Câblage

## Modèles

### Capacités parasites

- utilisation de SMI : **fortes capacités des pistes;**
- basse tension : faible impact des capacités parasites;

### Inductances et résistances parasites

- utilisation de SMI : faible inductance des pistes ;
- fort courant : prédominance des inductances et résistances parasites;

# Câblage

## Modèles

### Capacités parasites

- utilisation de SMI : fortes capacités des pistes;
- basse tension : **faible impact des capacités parasites;**

### Inductances et résistances parasites

- utilisation de SMI : faible inductance des pistes;
- fort courant : prédominance des inductances et résistances parasites;

# Câblage

## Modèles

### Capacités parasites

- utilisation de SMI : fortes capacités des pistes;
- basse tension : faible impact des capacités parasites;

→ une formulation simple suffit :  $C = C_{\text{surfacique}} \times S_{\text{piste}}$

### Inductances et résistances parasites

• utilisation de SMI : faible inductance des pistes ;  
• fort courant : prédominance des inductances et résistances parasites;

# Câblage

## Modèles

### Capacités parasites

- utilisation de SMI : fortes capacités des pistes;
- basse tension : faible impact des capacités parasites;

→ une formulation simple suffit :  $C = C_{\text{surfacique}} \times S_{\text{piste}}$

### Inductances et résistances parasites

- utilisation de SMI : **faible inductance des pistes** ;
- fort courant : prédominance des inductances et résistances parasites;

# Câblage

## Modèles

### Capacités parasites

- utilisation de SMI : fortes capacités des pistes;
- basse tension : faible impact des capacités parasites;

→ une formulation simple suffit :  $C = C_{\text{surfacique}} \times S_{\text{piste}}$

### Inductances et résistances parasites

- utilisation de SMI : faible inductance des pistes ;
- fort courant : **prédominance des inductances et résistances parasites;**

# Câblage

## Modèles

### Capacités parasites

- utilisation de SMI : fortes capacités des pistes;
- basse tension : faible impact des capacités parasites;

→ une formulation simple suffit :  $C = C_{\text{surfacique}} \times S_{\text{piste}}$

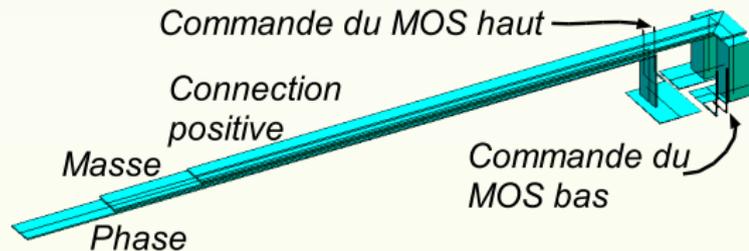
### Inductances et résistances parasites

- utilisation de SMI : faible inductance des pistes ;
- fort courant : prédominance des inductances et résistances parasites;

→ pas de formulation simple, emploi de logiciel spécifique

# Câblage

## Méthodes de modélisation



Description  
de la géométrie

Calcul des  
paramètres

Conversion  
modèle Pspice

# Câblage

## Méthodes de modélisation



Description  
de la géométrie

Calcul des  
paramètres

Conversion  
modèle Pspice

$$\begin{pmatrix} L_1 & M_{12} & \dots & M_{1n} \\ & L_2 & \dots & M_{2n} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & L_n \end{pmatrix}$$

# Câblage

## Méthodes de modélisation

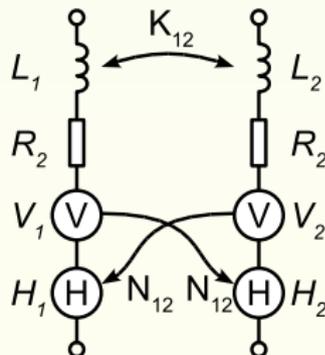


$$\begin{pmatrix} L_1 & M_{12} & \dots & M_{1n} \\ & L_2 & \dots & M_{2n} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & L_n \end{pmatrix}$$

Description de la géométrie

Calcul des paramètres

Conversion modèle Pspice



1 Introduction

2 Modélisation

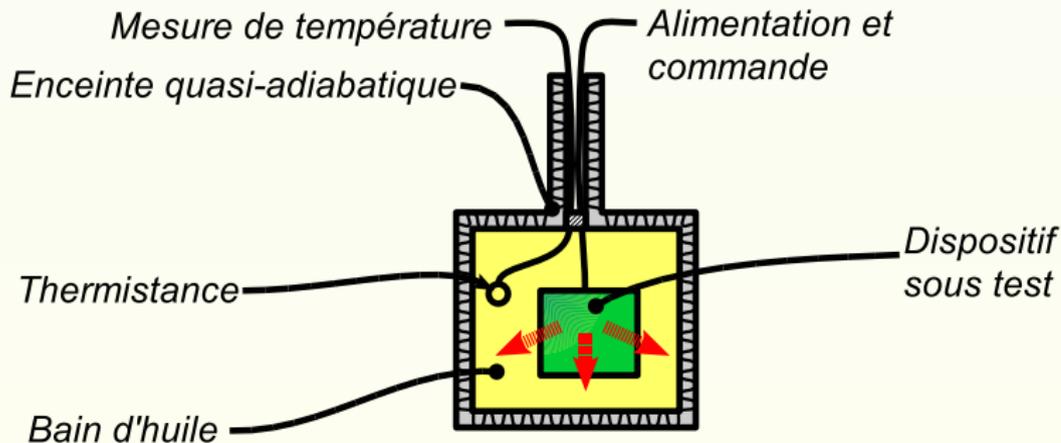
**3 Validation**

4 Exploitation

5 Conclusion

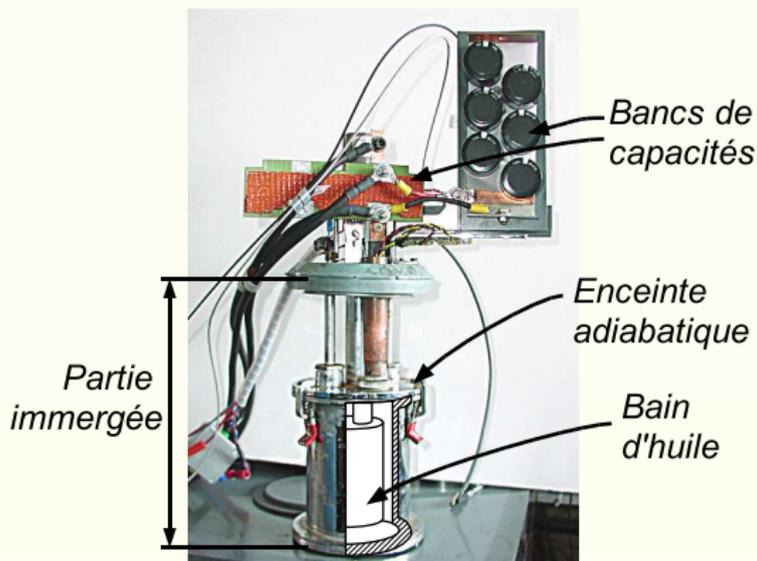
# Méthodologie

## Principe du calorimètre



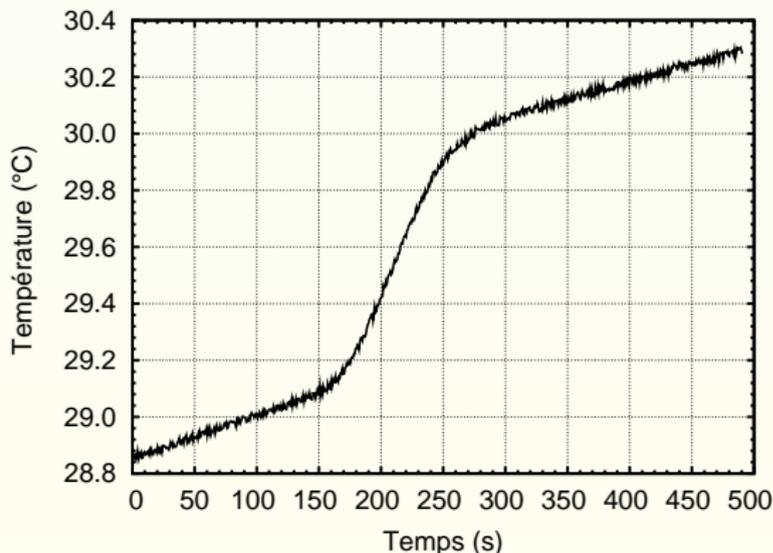
# Méthodologie

## Principe du calorimètre



# Méthodologie

## Principe du calorimètre



## Mesure de température du fluide caloporteur

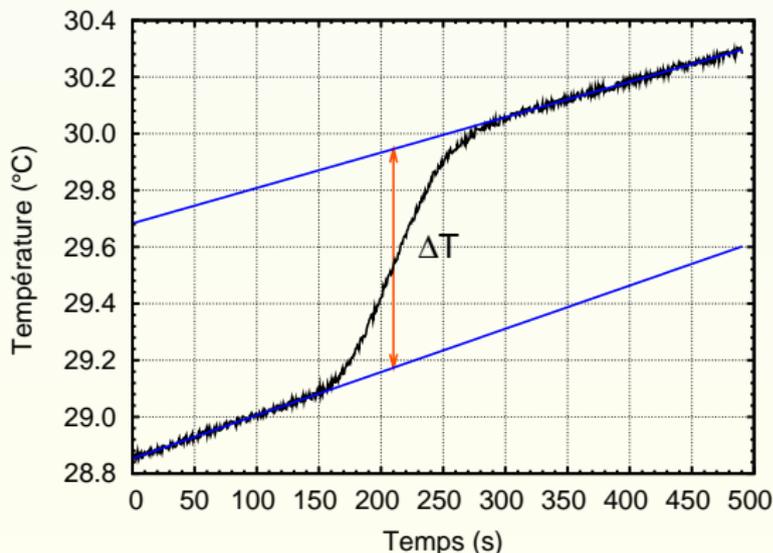
- avant;
- pendant;
- après fonctionnement du convertisseur.

Calcul de  $\Delta T$

Calcul de  $E = C \times \Delta T$ .

# Méthodologie

## Principe du calorimètre



## Mesure de température du fluide caloporteur

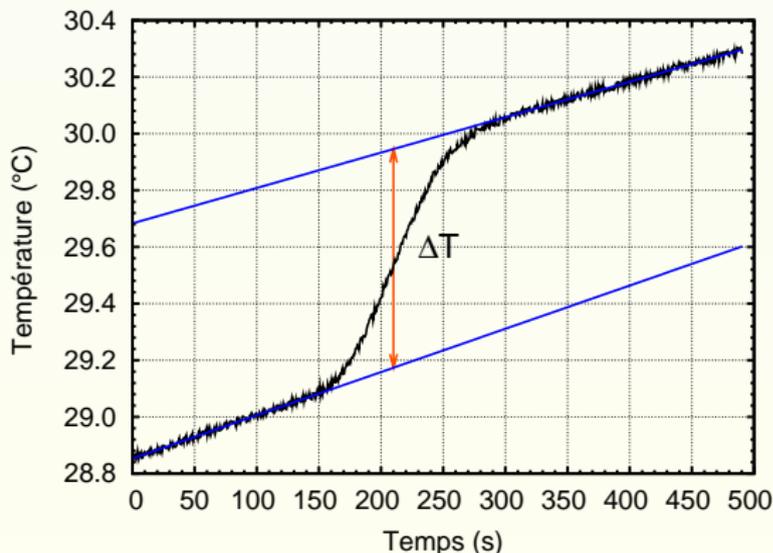
- avant;
- pendant;
- après fonctionnement du convertisseur.

Calcul de  $\Delta T$

Calcul de  $E = C \times \Delta T$ .

# Méthodologie

## Principe du calorimètre



Mesure de température du fluide caloporteur

- avant;
- pendant;
- après fonctionnement du convertisseur.

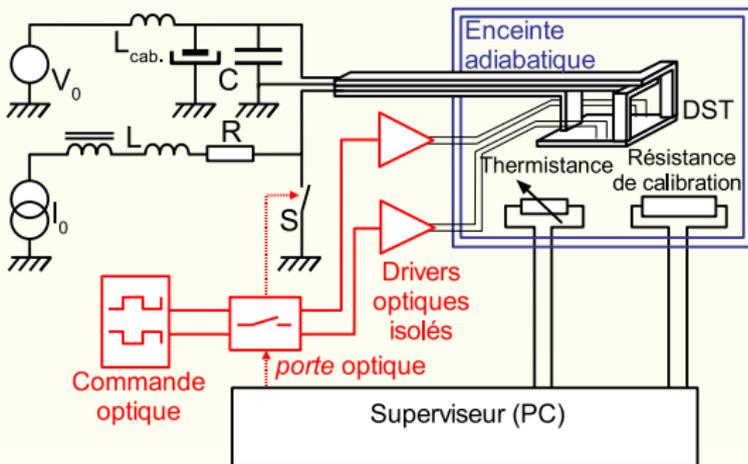
Calcul de  $\Delta T$

Calcul de  $E = C \times \Delta T$ .

# Méthodologie

## Dispositif expérimental

## Banc de mesure calorimétrique

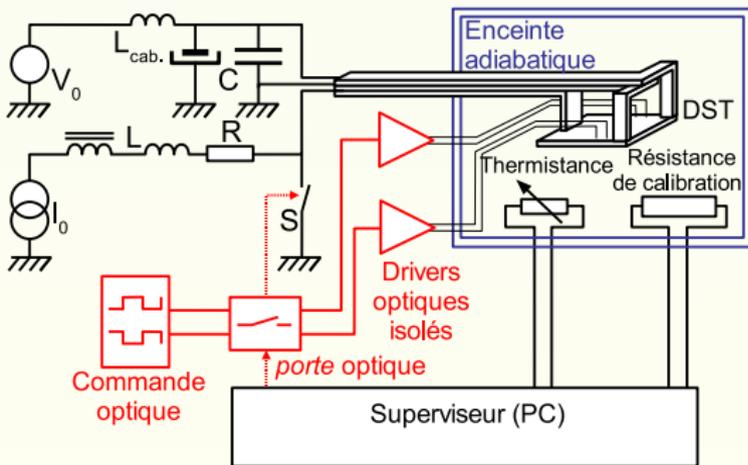


- circuit de puissance;
  - source de tension,
  - source de courant,
- pilotage
  - PC,
  - capteurs
  - calibration
  - commande optique;

# Méthodologie

## Dispositif expérimental

## Banc de mesure calorimétrique

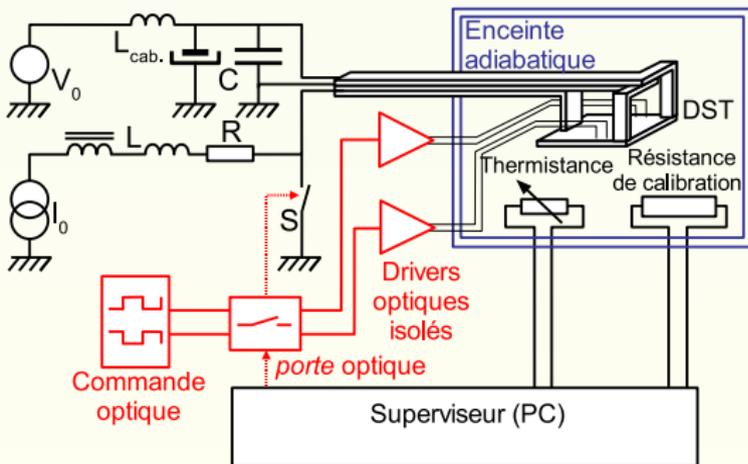


- circuit de puissance;
  - source de tension,
  - source de courant,
- pilotage
  - PC,
  - capteurs
  - calibration
  - commande optique;

# Méthodologie

## Dispositif expérimental

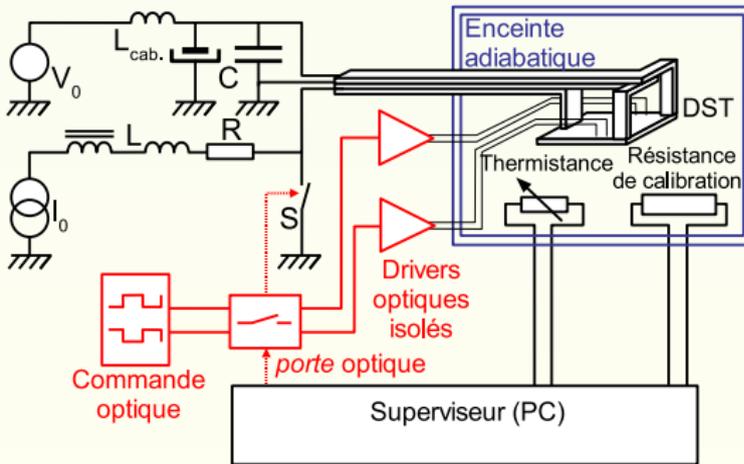
## Banc de mesure calorimétrique



- circuit de puissance;
  - source de tension,
  - source de courant,
- pilotage
  - PC,
  - capteurs
  - calibration
  - commande optique;

# Méthodologie

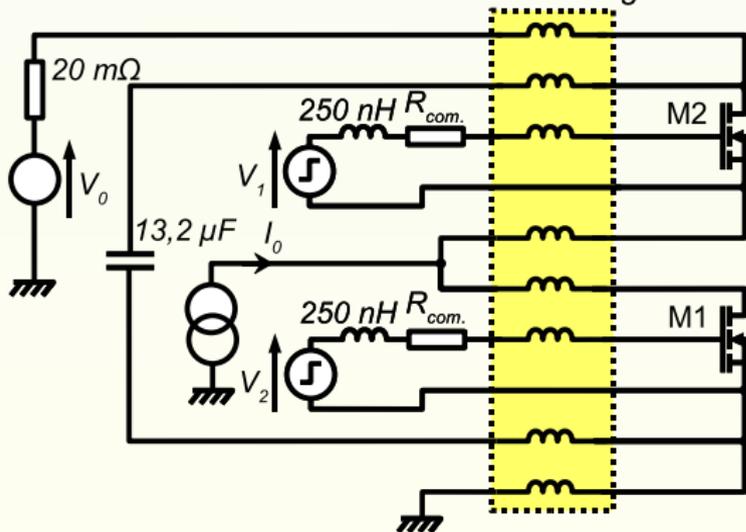
## Dispositif expérimental



# Méthodologie

## Dispositif de simulation

Modèle de câblage InCa



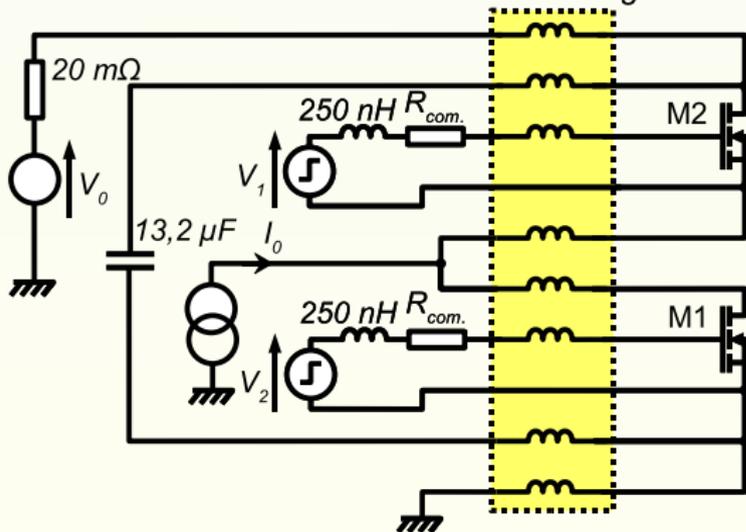
Calcul des pertes par  
intégration sur une  
période:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (u_e i_e - u_s i_s) dt$$

# Méthodologie

## Dispositif de simulation

Modèle de câblage InCa

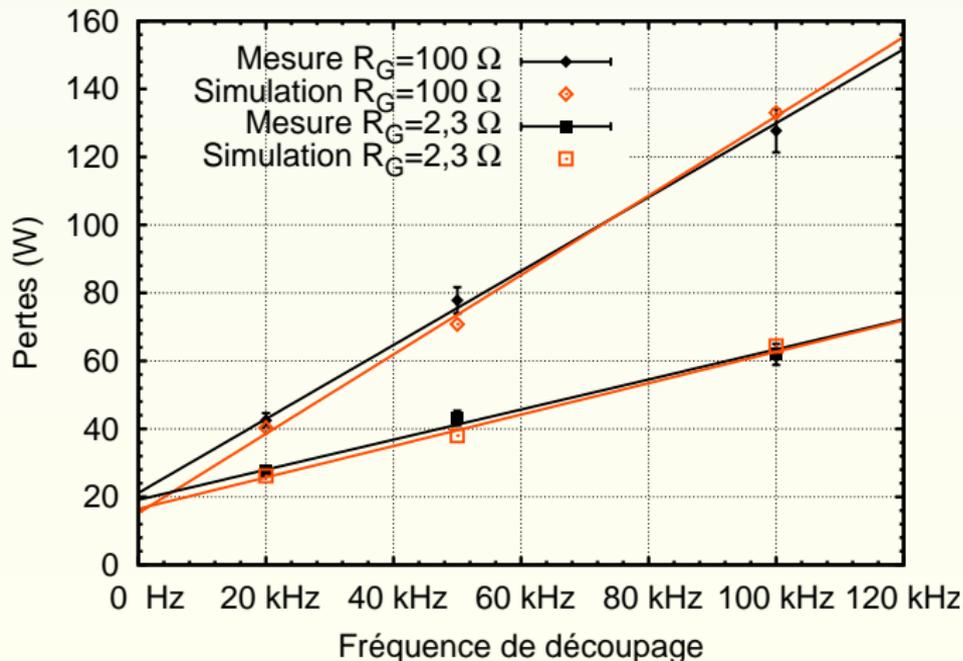


Calcul des pertes par  
 intégration sur une  
 période:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (u_e i_e - u_s i_s) dt$$

# Calorimétrie

## Résultats



$I_0 = 70 \text{ A}$ ,  
 $V_0 = 20 \text{ V}$ ,  
 temps mort  
 $\gamma = 2 \mu\text{s}$

# Calorimétrie

## Résultats

N°	$I_0$
1	30 A
2	30 A
3	30 A
4	30 A
5	70 A
6	70 A
7	70 A
8	70 A
9	70 A
10	70 A
11	70 A
12	70 A

# Calorimétrie

## Résultats

N°	$I_0$	$U_0$
1	30 A	10 V
2	30 A	10 V
3	30 A	10 V
4	30 A	10 V
5	70 A	10 V
6	70 A	10 V
7	70 A	10 V
8	70 A	10 V
9	70 A	20 V
10	70 A	20 V
11	70 A	20 V
12	70 A	20 V

# Calorimétrie

## Résultats

N°	$I_0$	$U_0$	$R_G$
1	30 A	10 V	2,3 $\Omega$
2	30 A	10 V	100 $\Omega$
3	30 A	10 V	2,3 $\Omega$
4	30 A	10 V	100 $\Omega$
5	70 A	10 V	2,3 $\Omega$
6	70 A	10 V	100 $\Omega$
7	70 A	10 V	2,3 $\Omega$
8	70 A	10 V	100 $\Omega$
9	70 A	20 V	2,3 $\Omega$
10	70 A	20 V	100 $\Omega$
11	70 A	20 V	2,3 $\Omega$
12	70 A	20 V	100 $\Omega$

# Calorimétrie

## Résultats

N°	$I_0$	$U_0$	$R_G$	$\gamma$
1	30 A	10 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$
2	30 A	10 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$
3	30 A	10 V	2,3 $\Omega$	400 ns
4	30 A	10 V	100 $\Omega$	400 ns
5	70 A	10 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$
6	70 A	10 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$
7	70 A	10 V	2,3 $\Omega$	400 ns
8	70 A	10 V	100 $\Omega$	400 ns
9	70 A	20 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$
10	70 A	20 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$
11	70 A	20 V	2,3 $\Omega$	400 ns
12	70 A	20 V	100 $\Omega$	400 ns

# Calorimétrie

## Résultats

N°	$I_0$	$U_0$	$R_G$	$\gamma$	$E_{commut.}$	$P_{cond.}$
1	30 A	10 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$	5 %	18 %
2	30 A	10 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$	10 %	24 %
3	30 A	10 V	2,3 $\Omega$	400 ns	41 %	0 %
4	30 A	10 V	100 $\Omega$	400 ns	1 %	0 %
5	70 A	10 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$	7 %	9 %
6	70 A	10 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$	4 %	21 %
7	70 A	10 V	2,3 $\Omega$	400 ns	55 %	7 %
8	70 A	10 V	100 $\Omega$	400 ns	9 %	10 %
9	70 A	20 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$	4 %	13 %
10	70 A	20 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$	7 %	29 %
11	70 A	20 V	2,3 $\Omega$	400 ns	23 %	10 %
12	70 A	20 V	100 $\Omega$	400 ns	7 %	2 %

# Calorimétrie

## Résultats

N°	$I_0$	$U_0$	$R_G$	$\gamma$	$E_{commut.}$	$P_{cond.}$
1	30 A	10 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$	5 %	18 %
2	30 A	10 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$	10 %	24 %
3	30 A	10 V	2,3 $\Omega$	400 ns	41 %	0 %
4	30 A	10 V	100 $\Omega$	400 ns	1 %	0 %
5	70 A	10 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$	7 %	9 %
6	70 A	10 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$	4 %	21 %
7	70 A	10 V	2,3 $\Omega$	400 ns	55 %	7 %
8	70 A	10 V	100 $\Omega$	400 ns	9 %	10 %
9	70 A	20 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$	4 %	13 %
10	70 A	20 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$	7 %	29 %
11	70 A	20 V	2,3 $\Omega$	400 ns	23 %	10 %
12	70 A	20 V	100 $\Omega$	400 ns	7 %	2 %

### Sources d'erreur:

- délai de commutation;
- modélisation du câblage incomplète

# Calorimétrie

## Résultats

N°	$I_0$	$U_0$	$R_G$	$\gamma$	$E_{commut.}$	$P_{cond.}$
1	30 A	10 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$	5 %	18 %
2	30 A	10 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$	10 %	24 %
3	30 A	10 V	2,3 $\Omega$	400 ns	41 %	0 %
4	30 A	10 V	100 $\Omega$	400 ns	1 %	0 %
5	70 A	10 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$	7 %	9 %
6	70 A	10 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$	4 %	21 %
7	70 A	10 V	2,3 $\Omega$	400 ns	55 %	7 %
8	70 A	10 V	100 $\Omega$	400 ns	9 %	10 %
9	70 A	20 V	2,3 $\Omega$	2 $\mu s$	4 %	13 %
10	70 A	20 V	100 $\Omega$	2 $\mu s$	7 %	29 %
11	70 A	20 V	2,3 $\Omega$	400 ns	23 %	10 %
12	70 A	20 V	100 $\Omega$	400 ns	7 %	2 %

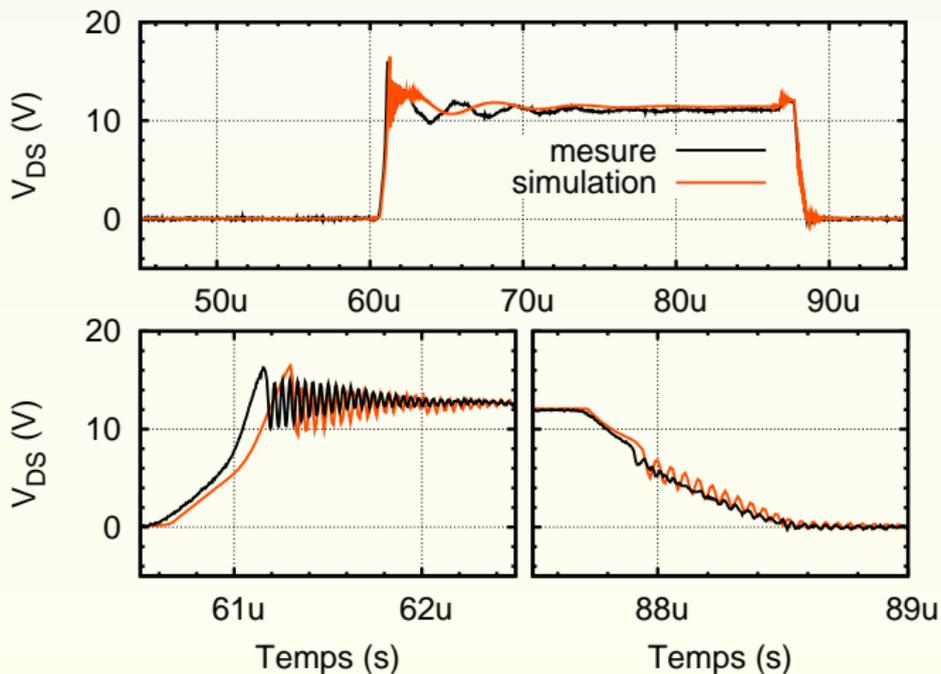
### Sources d'erreur:

- délai de commutation;
- modélisation du câblage incomplète

➔ **Bons résultats en général.**

# Mesures temporelles

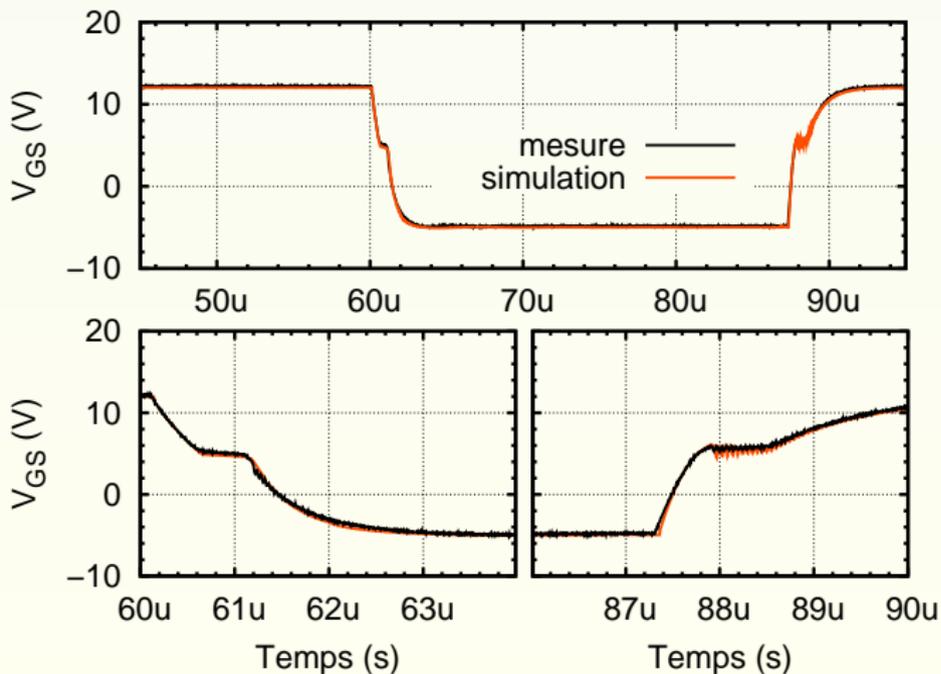
## Résultats



Résistance de grille 100  $\Omega$

# Mesures temporelles

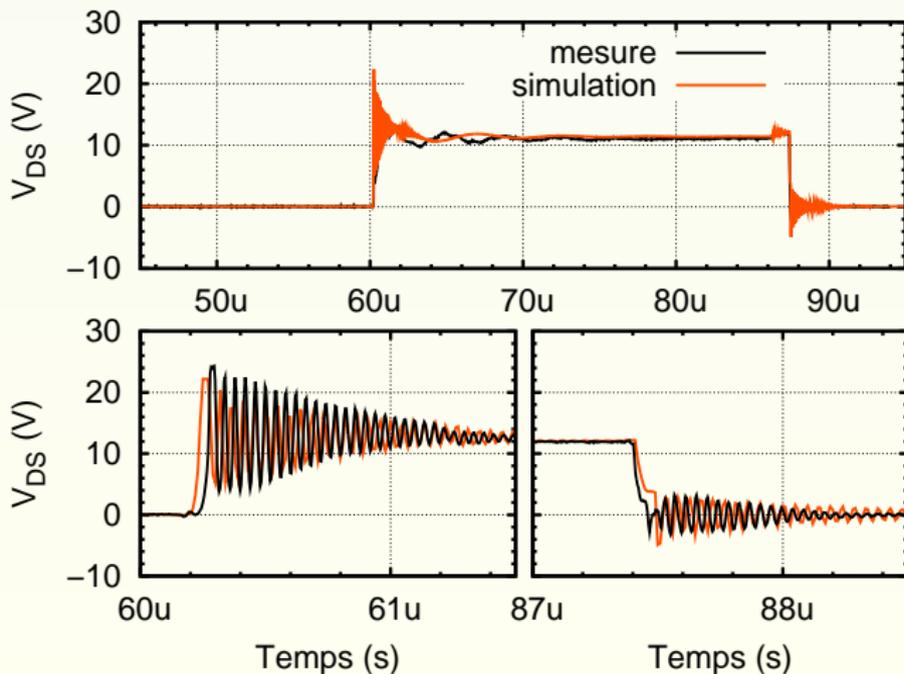
## Résultats



Résistance de grille 100  $\Omega$

# Mesures temporelles

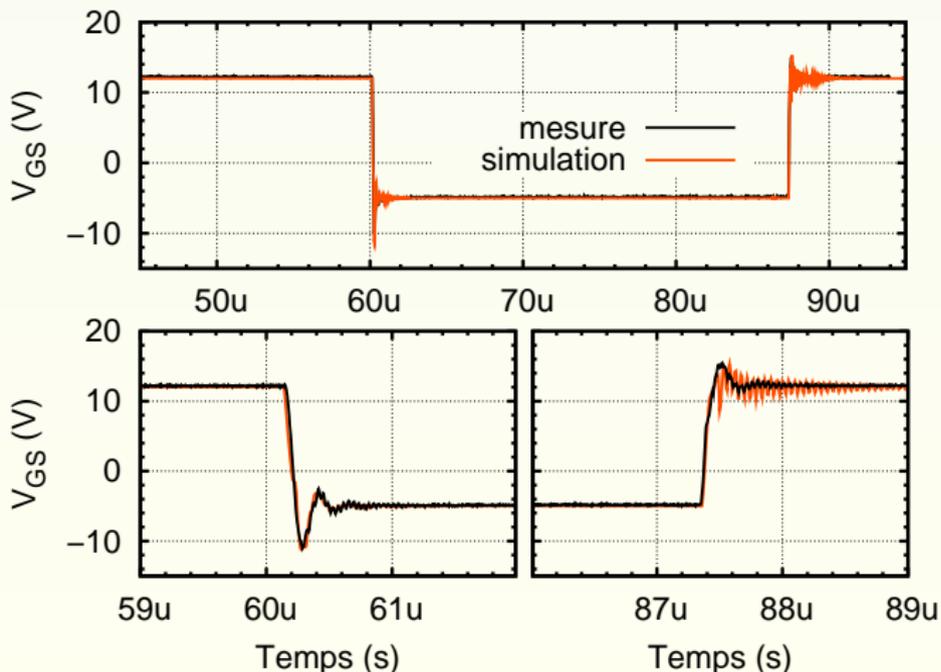
## Résultats



Résistance de grille 2,3  $\Omega$

# Mesures temporelles

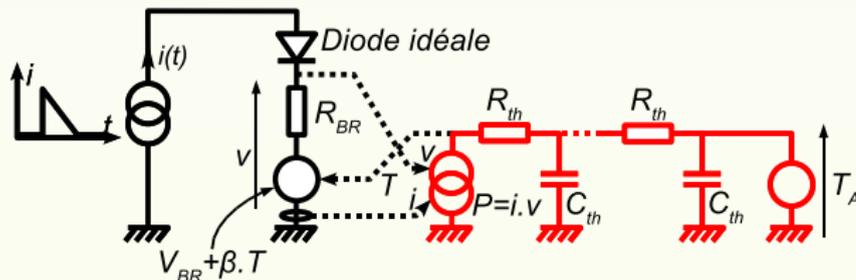
## Résultats



Résistance de grille  $2,3 \Omega$

# MOSFET

## Validation du modèle électrothermique de l'avalanche – simulation



Modèle thermique:

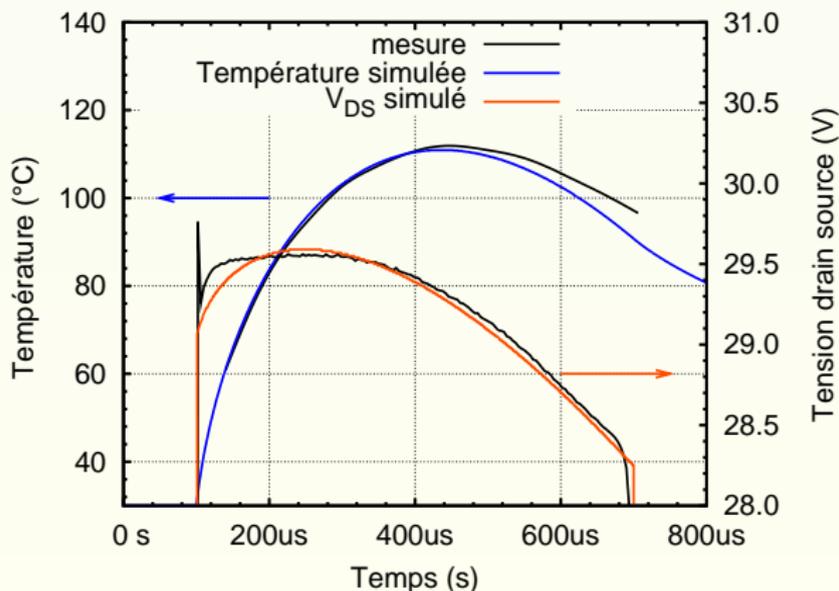
- 100 cellules RC pour la puce;
- 30 cellules pour le cuivre;
- une capacité représentant la métallisation de source et les bondings.

# MOSFET

## Validation du modèle électrothermique de l'avalanche – résultats

Modèle 1D  
« corrigé »

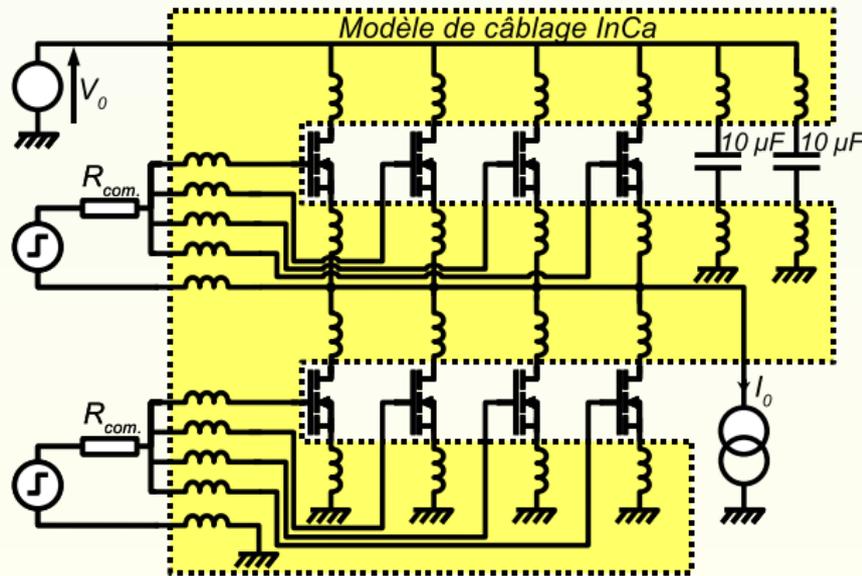
Bons résultats



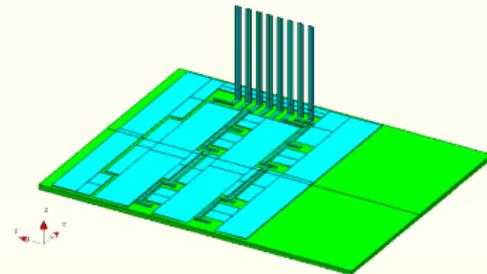
- 1 Introduction
- 2 Modélisation
- 3 Validation
- 4 Exploitation**
- 5 Conclusion

# Mise en parallèle

## Dispositif de simulation



- onduleur 14 V;
- 4 MOSFET par interrupteur;
- modélisation du câblage inductif, résistif et capacitif.



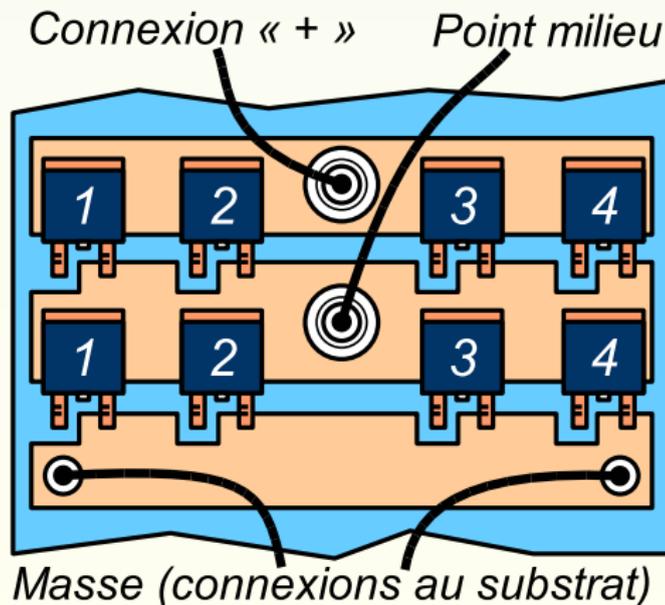
# Mise en parallèle

## Equilibre statique

### Sources de déséquilibre

- **variation de  $R_{DSon}$  entre transistors;**
  - min 2 m $\Omega$ ,
  - max 3.2 m $\Omega$ ,
- Résistances d'accès (pistes) différentes.

Jusqu'à 60 % d'écart en  
« pire cas »



Forte influence des résistances parasites (boîtier + pistes)

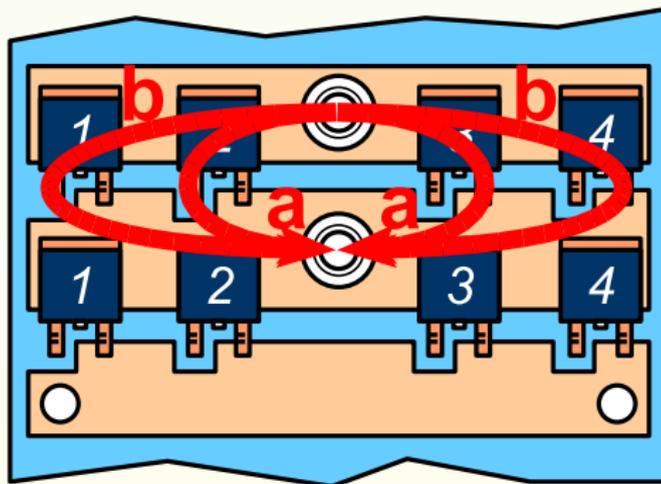
# Mise en parallèle

## Equilibre statique

### Sources de déséquilibre

- variation de  $R_{DSon}$  entre transistors;
  - min 2 m $\Omega$ ,
  - max 3.2 m $\Omega$ ,
- Résistances d'accès (pistes) différentes.

Jusqu'à 60 % d'écart en  
« pire cas »



Forte influence des résistances parasites (boîtier + pistes)

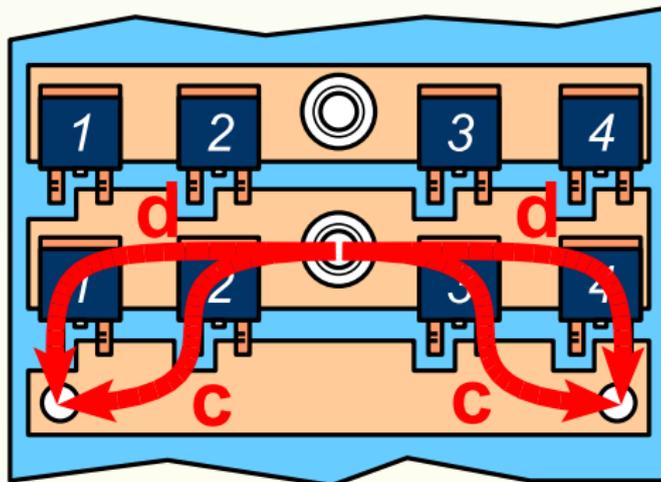
# Mise en parallèle

## Equilibre statique

### Sources de déséquilibre

- variation de  $R_{DSon}$  entre transistors;
  - min 2 m $\Omega$ ,
  - max 3.2 m $\Omega$ ,
- Résistances d'accès (pistes) différentes.

Jusqu'à 60 % d'écart en  
« pire cas »



Forte influence des résistances parasites (boîtier + pistes)

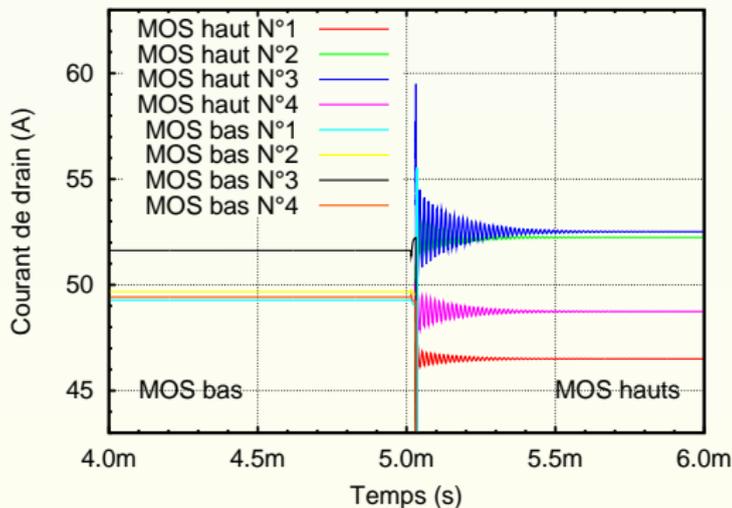
# Mise en parallèle

## Equilibre statique

### Sources de déséquilibre

- variation de  $R_{DS(on)}$  entre transistors;
  - min 2 m $\Omega$ ,
  - max 3.2 m $\Omega$ ,
- Résistances d'accès (pistes) différentes.

Jusqu'à 60 % d'écart en  
« pire cas »



Forte influence des résistances parasites (boîtier + pistes)

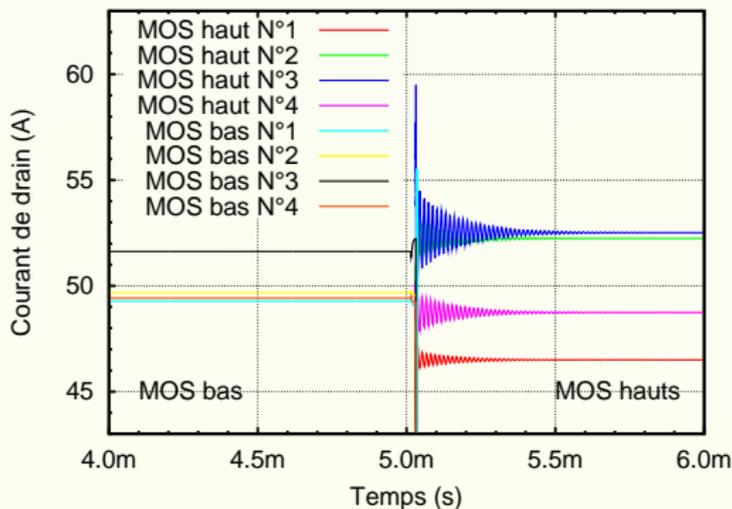
# Mise en parallèle

## Equilibre statique

### Sources de déséquilibre

- variation de  $R_{DSon}$  entre transistors;
  - min 2 m $\Omega$ ,
  - max 3.2 m $\Omega$ ,
- Résistances d'accès (pistes) différentes.

Jusqu'à 60 % d'écart en  
« pire cas »



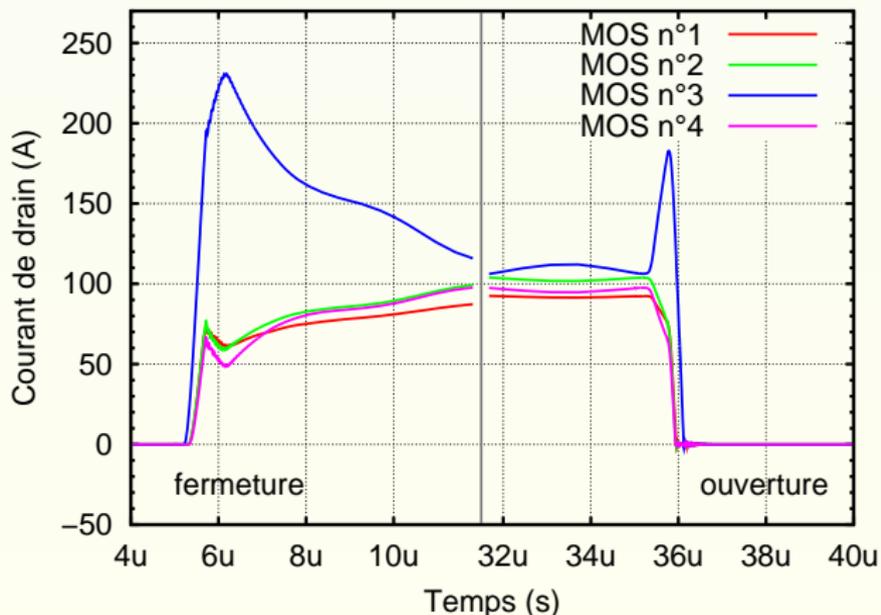
**Forte influence des résistances parasites (boîtier + pistes)**

# Mise en parallèle

Dispersion sur  $V_{TH}$

Un MOSFET à  
 $V_{TH} = 3,5 \text{ V}$

trois MOSFET à  
 $V_{TH} = 5,5 \text{ V}$

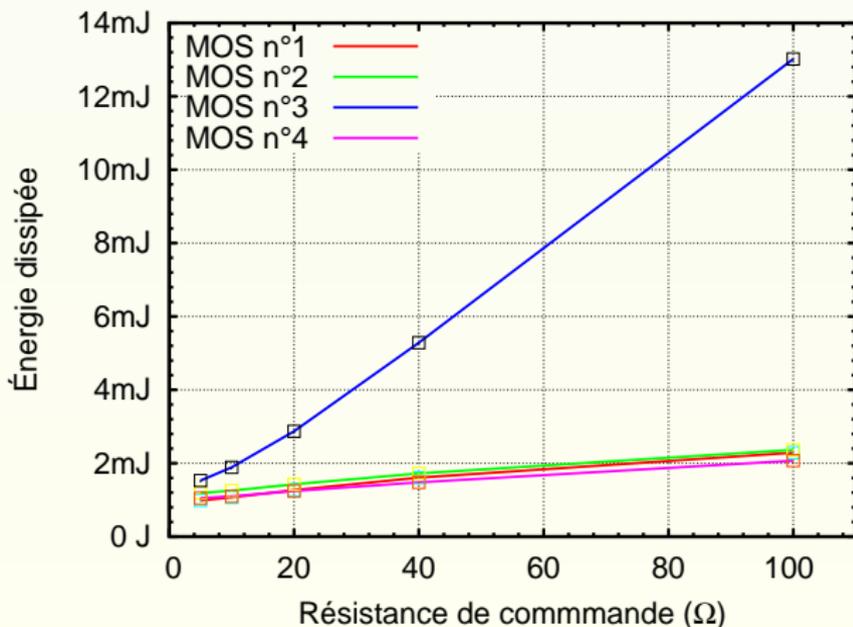


# Mise en parallèle

Dispersion sur  $V_{TH}$

Un MOSFET à  
 $V_{TH} = 3,5 \text{ V}$

trois MOSFET à  
 $V_{TH} = 5,5 \text{ V}$

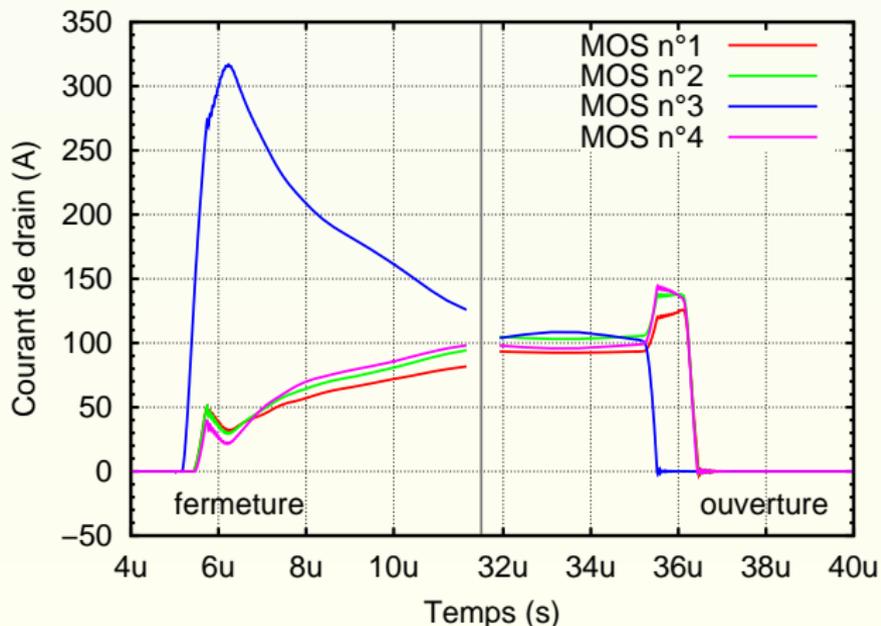


# Mise en parallèle

Dispersion sur  $C_{ISS}$

Un MOSFET à  
 $C_{ISS} = 60\%$  du  
nominal

trois MOSFET à  
 $C_{ISS} = 140\%$  du  
nominal

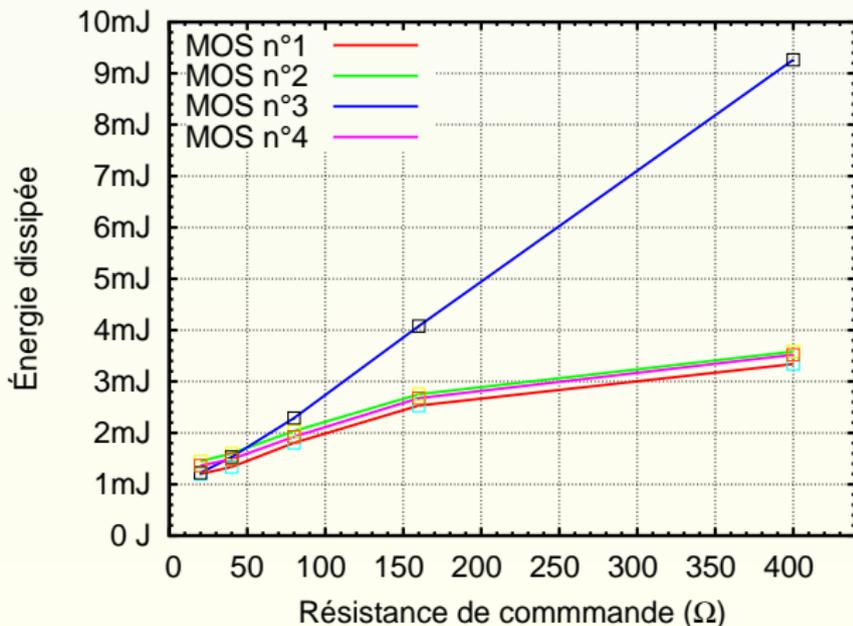


# Mise en parallèle

Dispersion sur  $C_{ISS}$

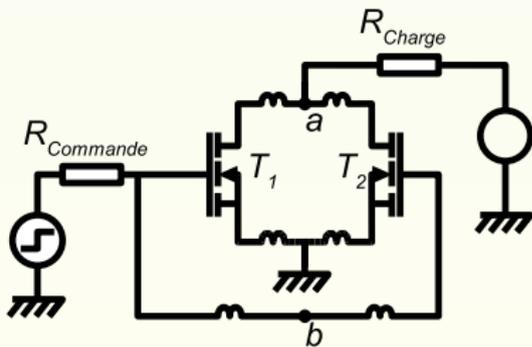
Un MOSFET à  
 $C_{ISS} = 60\%$  du  
nominal

trois MOSFET à  
 $C_{ISS} = 140\%$  du  
nominal



# Mise en parallèle

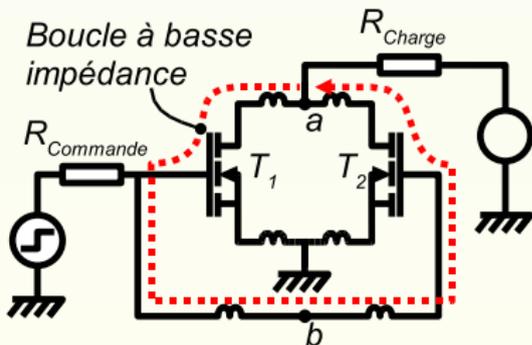
Stabilité de l'association – problématique



- Oscillations mode différentiel entre deux transistors;
- Ne peut se produire qu'en régime saturé;
- Remède classique : une résistance de grille par transistor.

# Mise en parallèle

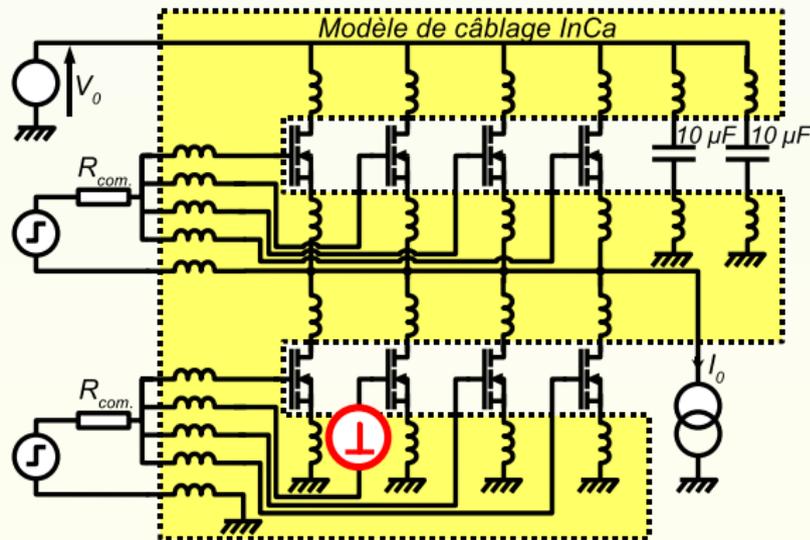
Stabilité de l'association – problématique



- Oscillations mode différentiel entre deux transistors;
- Ne peut se produire qu'en régime saturé;
- Remède classique : une résistance de grille par transistor.

# Mise en parallèle

Stabilité de l'association – dispositif de simulation



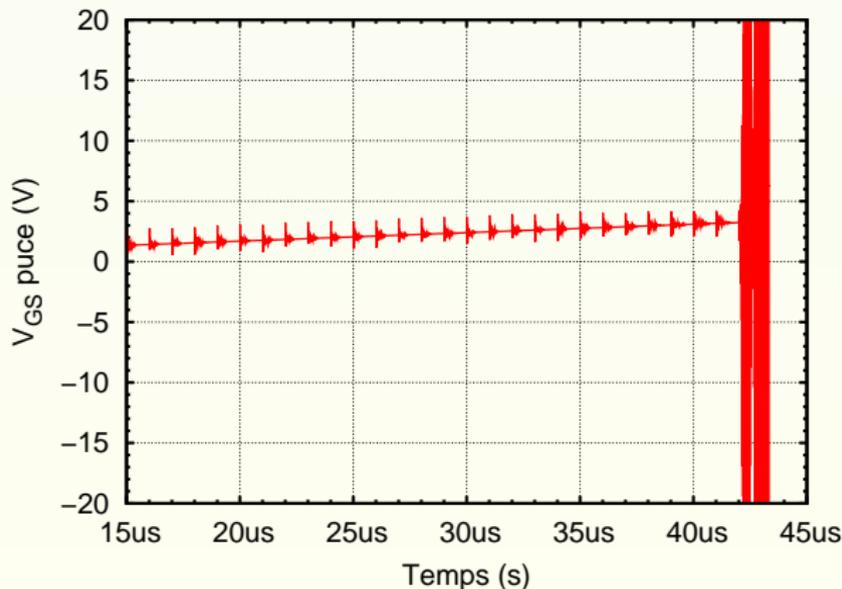
- Simulations temporelles;
- excitation d'un MOSFET;
- commutation très lente.

# Mise en parallèle

## Stabilité de l'association – résultats

Modèle de transistor  
modifié pour être  
instable

Capas/10, Rg nulle  
STB210NF02 stable

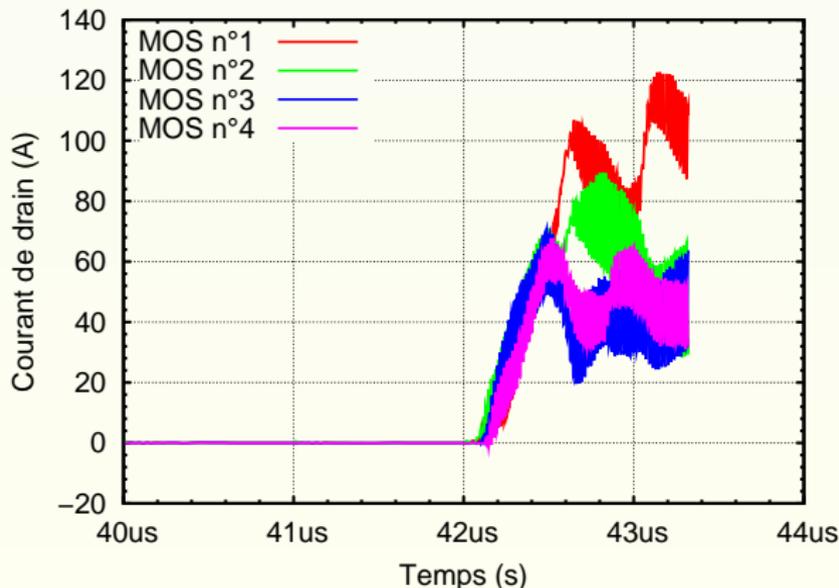


# Mise en parallèle

## Stabilité de l'association – résultats

Modèle de transistor  
modifié pour être  
instable

Capas/10, Rg nulle  
STB210NF02 stable



# Mise en parallèle

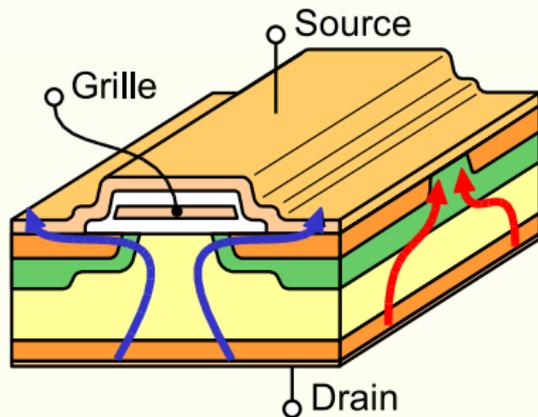
## Comportement en régime d'avalanche – problématique

- Tenue en tension : paramètre mal maîtrisé en fabrication;
- L'autoéchauffement réduit les déséquilibres en courant (lent);
- Effet bénéfique de la résistance de chemin d'avalanche (rapide);

# Mise en parallèle

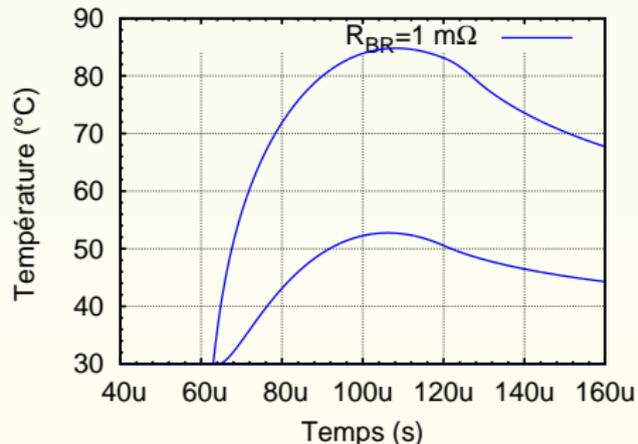
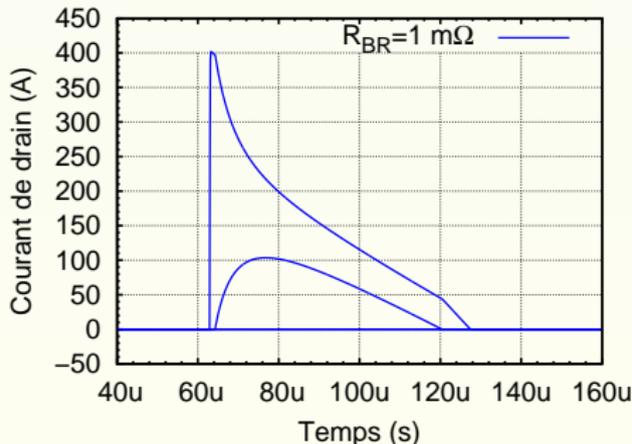
## Comportement en régime d'avalanche – problématique

- Tenue en tension : paramètre mal maîtrisé en fabrication;
- L'autoéchauffement réduit les déséquilibres en courant (lent);
- Effet bénéfique de la résistance de chemin d'avalanche (rapide);



# Mise en parallèle

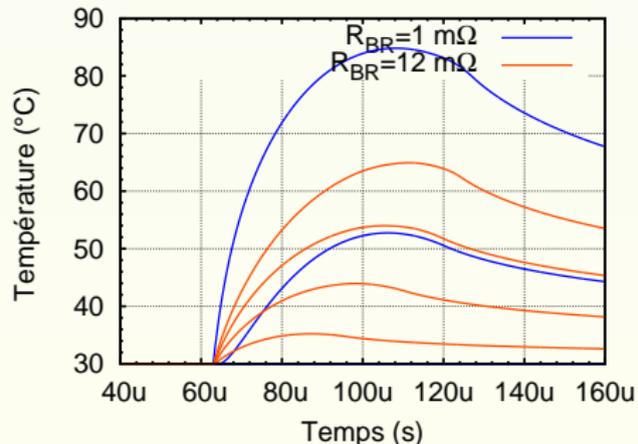
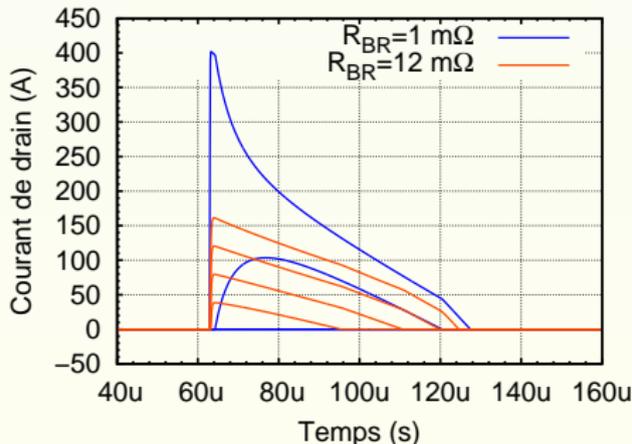
## Comportement en régime d'avalanche – résultats



Comparaison avec et sans prise en compte de la résistance de chemin d'avalanche

# Mise en parallèle

## Comportement en régime d'avalanche – résultats



Comparaison avec et sans prise en compte de la résistance de chemin d'avalanche

1 Introduction

2 Modélisation

3 Validation

4 Exploitation

**5 Conclusion**

# Conclusion

## bilan

### Modélisation de l'onduleur

- adaptée aux applications d'onduleurs basse tension;
  - modélisation inductive et résistive du câblage,
  - modélisation de la diode interne du MOSFET,
- utilisant des méthodes d'identification simples ;
- méthodologie de validation exigeante ;

### Utilisation de l'outil de simulation

- donne accès à des grandeurs difficilement mesurables;
- permet d'évaluer l'impact des dispersions de fabrication ;

# Conclusion

bilan

## Modélisation de l'onduleur

- adaptée aux applications d'onduleurs basse tension;
- **utilisant des méthodes d'identification simples ;**
  - **identification avec des mesures temporelles,**
  - **utilisation de circuits élémentaires,**
- méthodologie de validation exigeante ;

## Utilisation de l'outil de simulation

- donne accès à des grandeurs difficilement mesurables;
- permet d'évaluer l'impact des dispersions de fabrication ;

# Conclusion

bilan

## Modélisation de l'onduleur

- adaptée aux applications d'onduleurs basse tension;
- utilisant des méthodes d'identification simples ;
- **méthodologie de validation exigeante ;**
  - **validation sur un convertisseur complet,**
  - **utilisation du critère de pertes,**

## Utilisation de l'outil de simulation

- donne accès à des grandeurs difficilement mesurables;
- permet d'évaluer l'impact des dispersions de fabrication ;

# Conclusion

bilan

## Modélisation de l'onduleur

- adaptée aux applications d'onduleurs basse tension;
- utilisant des méthodes d'identification simples ;
- méthodologie de validation exigeante ;

## Utilisation de l'outil de simulation

- **donne accès à des grandeurs difficilement mesurables;**
  - **répartition du courant lors de mise en parallèle,**
  - **élévation de température durant l'avalanche,**
- permet d'évaluer l'impact des dispersions de fabrication ;

# Conclusion

bilan

## Modélisation de l'onduleur

- adaptée aux applications d'onduleurs basse tension;
- utilisant des méthodes d'identification simples ;
- méthodologie de validation exigeante ;

## Utilisation de l'outil de simulation

- donne accès à des grandeurs difficilement mesurables;
- permet d'évaluer l'impact des dispersions de fabrication ;
  - simulations « pire cas »,
  - aide au dimensionnement,

# Conclusion

## perspectives

### Amélioration de la modélisation

- **modélisation thermique du convertisseur;**
  - **nécessité d'un modèle thermique complet,**
  - **validation du modèle électrothermique du MOSFET,**
- amélioration du modèle électrique du MOSFET ;
- accélération de la modélisation du câblage ;

### Utilisation de l'outil de simulation en conception

- prévisions de performances sur un onduleur intégré;
- nécessité de connaître les effets des sur-contraintes sur la fiabilité  $\Rightarrow$  *fiabilité prédictive*.

# Conclusion

## perspectives

### Amélioration de la modélisation

- modélisation thermique du convertisseur;
- **amélioration du modèle électrique du MOSFET ;**
  - **prise en compte des couplages avec le circuit,**
- accélération de la modélisation du câblage ;

### Utilisation de l'outil de simulation en conception

- prévisions de performances sur un onduleur intégré;
- nécessité de connaître les effets des sur-contraintes sur la fiabilité  $\Rightarrow$  *fiabilité prédictive*.

# Conclusion

## perspectives

### Amélioration de la modélisation

- modélisation thermique du convertisseur;
- amélioration du modèle électrique du MOSFET ;
- **accélération de la modélisation du câblage ;**
  - **intégration de la modélisation dans la CAO mécanique,**

### Utilisation de l'outil de simulation en conception

- prévisions de performances sur un onduleur intégré;
- nécessité de connaître les effets des sur-contraintes sur la fiabilité ⇒ *fiabilité prédictive*.

# Conclusion

## perspectives

### Amélioration de la modélisation

- modélisation thermique du convertisseur;
- amélioration du modèle électrique du MOSFET ;
- accélération de la modélisation du câblage ;

### Utilisation de l'outil de simulation en conception

- prévisions de performances sur un onduleur intégré;
  - étude du couplage puissance – commande,
  - dimensionnement des composants de l'onduleur,
- nécessité de connaître les effets des sur-contraintes sur la fiabilité  $\Rightarrow$  *fiabilité prédictive*.

# Conclusion

## perspectives

### Amélioration de la modélisation

- modélisation thermique du convertisseur;
- amélioration du modèle électrique du MOSFET ;
- accélération de la modélisation du câblage ;

### Utilisation de l'outil de simulation en conception

- prévisions de performances sur un onduleur intégré;
- **nécessité de connaître les effets des sur-contraintes sur la fiabilité** ⇒ *fiabilité prédictive*.

# Remerciements

Ce travail n'aurait pas été possible sans...

## Valeo



- Cédric PLASSE
- Philippe MASSON, Gaël BLONDEL
- Toute l'équipe R&D électronique et Valeo Systèmes Electriques

## CEGELY

- Hervé MOREL et Jean-Pierre CHANTE
- Dominique BERGOGNE, Bruno ALLARD
- Le thème D, et tout le laboratoire.

# Remerciements

Ce travail n'aurait pas été possible sans...

## Valeo



- Cédric PLASSE
- Philippe MASSON, Gaël BLONDEL
- Toute l'équipe R&D électronique et Valeo Systèmes Electriques

## CEGELY

- Hervé MOREL et Jean-Pierre CHANTE
- Dominique BERGOGNE, Bruno ALLARD
- Le thème D, et tout le laboratoire.



# Contribution à la conception par la simulation en électronique de puissance : application à l'onduleur basse tension

Cyril BUTTAY

CEGELY – VALEO

30 novembre 2004

# Comparaisons

obtenues avec le modèle constructeur ou sans câblage

