

***Réduction de modèle pour le management
thermique d'un module électronique de
puissance aéronautique
(Dans le cadre du projet européen I2mpect)***

Hazem Ben Aissia, Jacques Jay, Shihe Xin, Ronnie Knikker



Funded by the
European Commission
Grant No 636170

Email : hazem.ben-aissia@insa-lyon.fr / hazem_aissia@hotmail.fr

Contexte industriel

Projet européen : I2mpect



Funded by the
European Commission
Grant No 636170

SIEMENS

AIRBUS
GROUP
INNOVATIONS

DYNEX

INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUEES
LYON



SAFRAN
Labinal Power Systems



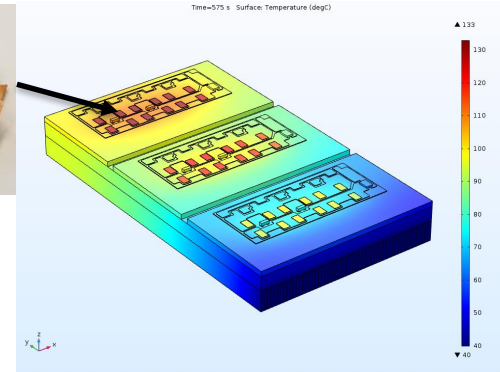
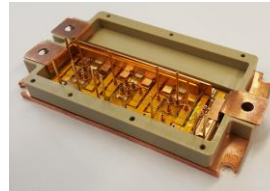
The
University
Of
Sheffield.



ETH zürich

Objectif : Conception et
fabrication d'un convertisseur
DC/AC de puissance 45 kW

$$\eta_{\text{convertisseur}} = 99 \%$$

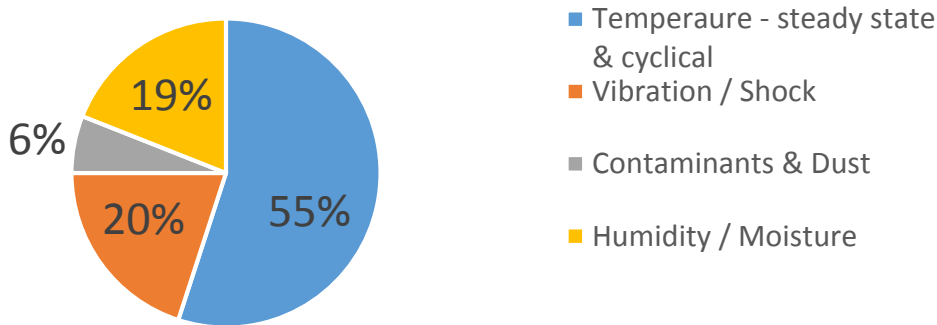


Ce convertisseur alimente les
actionneurs à bords des avions
plus électriques



La fiabilité des composants électroniques dépend de la température

Causes des défaillances dans les modules de puissance
(ref. the handbook of electronic package design)



IL faut surveiller la température des composants électroniques en temps réel



Mesure indirecte de la température via un modèle réduit (MR)

Problématique

Situations pratiques

Puissances et CLs connues :
(mesurée en temps réel)

$$\vec{p}_{in}(t) = (P(t), CLs)$$

MR direct

Puissances et CLs inconnues :
(perturbations EM)

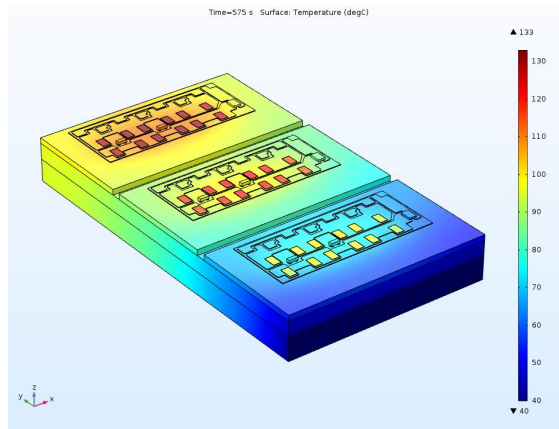
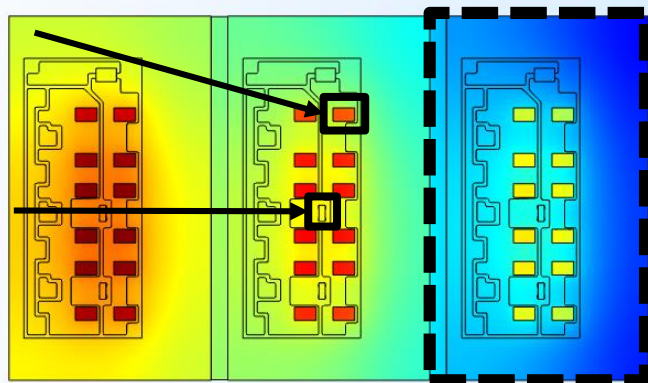
$$\vec{p}_{in}(t) = \vec{T}_{capteurs}$$

MR inverse

Une phase

MOSFET

Capteur
de T°



Plan de la présentation

*1. Modèle réduit **direct** (MRD)*

1.1. Explication de la méthode

1.2. Application sur le module de puissance I2mpect

*2. Modèle réduit **inverse** (MRI)*

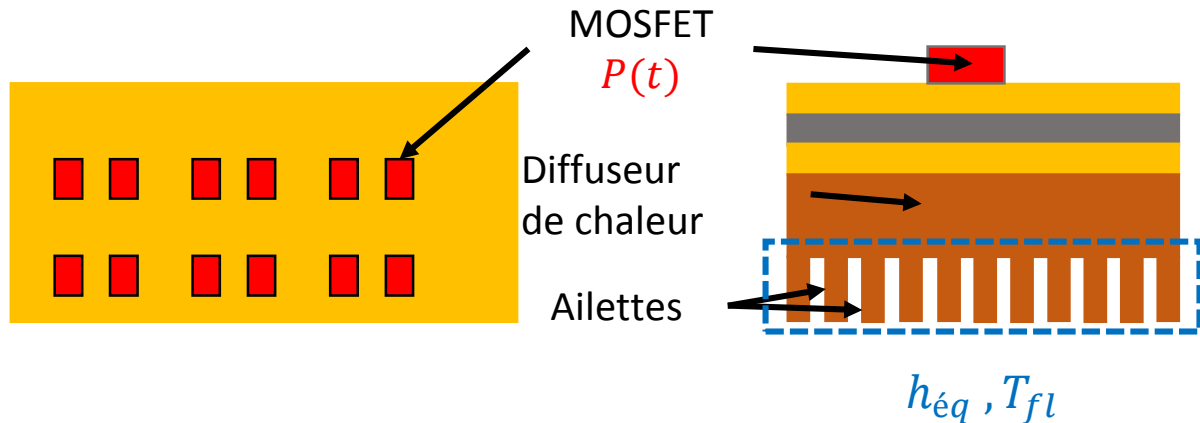
2.1. Explication de la méthode

2.2. Application sur le module de puissance I2mpect

3. Conclusions et perspectives

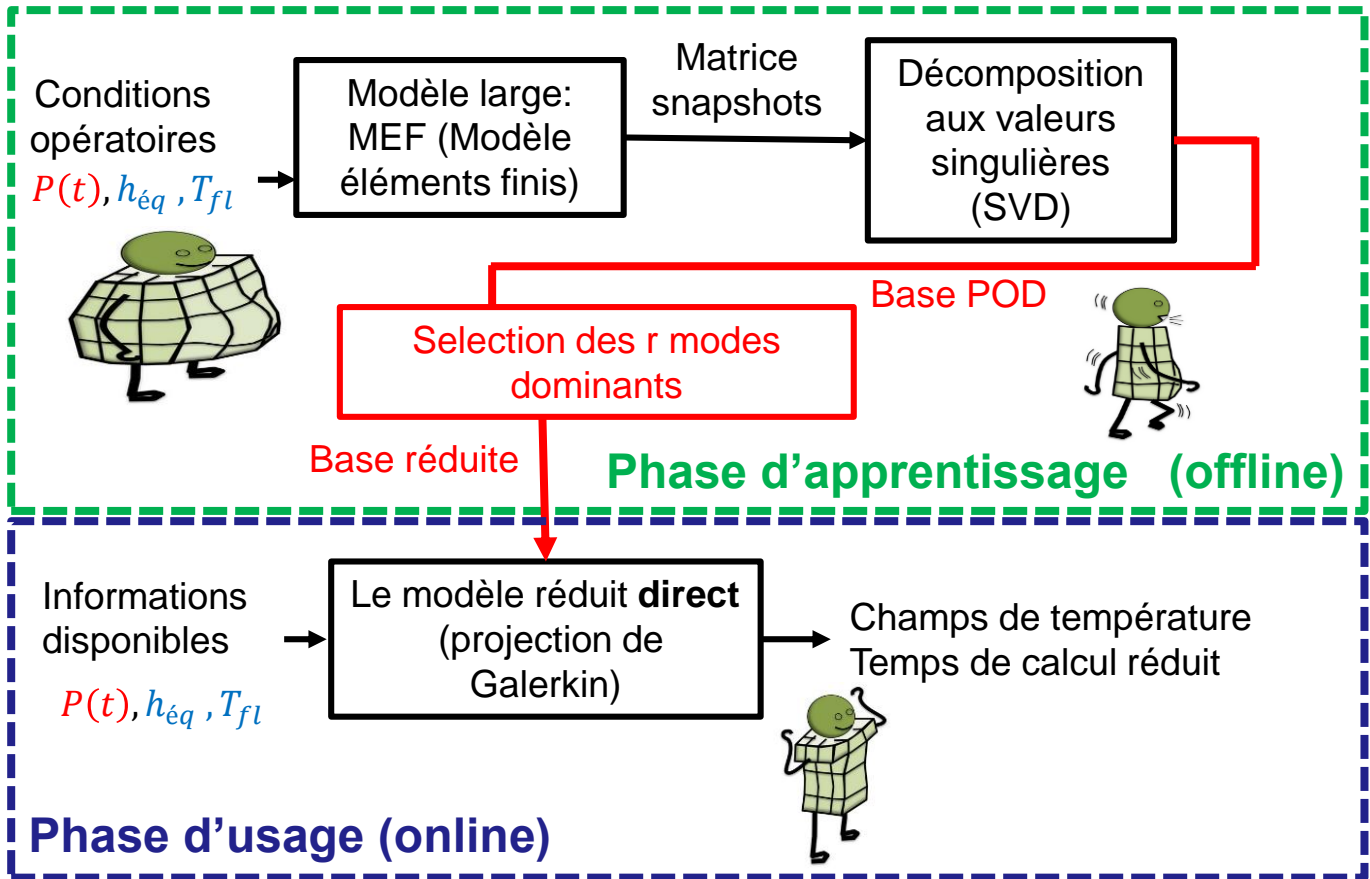
1. Modèle réduit direct (MRD)

On considère une seule phase du convertisseur de puissance



$h_{\acute{e}q}, T_{fl}$ sont calculés à partir des corrélations de convection forcée et des lois de conduction dans les ailettes

1.1. Explication de la méthode

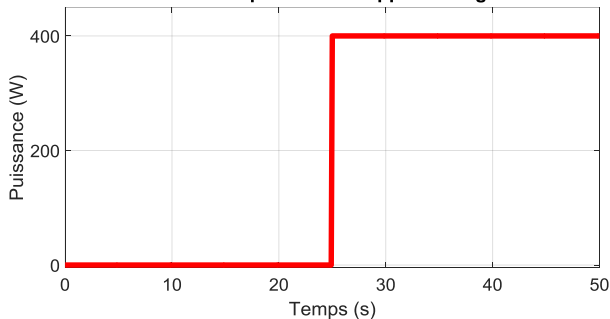


1.1. Etape d'apprentissage

Simulation EF transitoire :

Profil de puissance

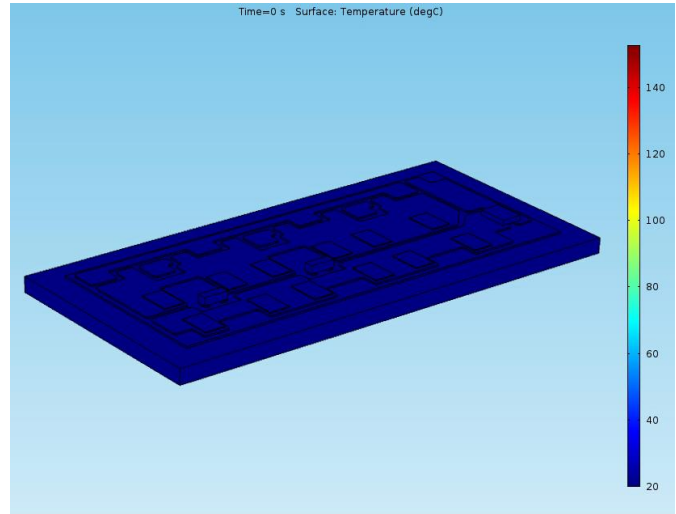
Profil de puissance d'apprentissage



$$h_{\text{éq}} = 4000 \text{ W/m}^2$$

$$T_{fl} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T(t = 0) = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$



Matrice snapshots :

$$U \in \mathbb{R}^{M \times N}$$

$M = 20000$ nombre des nœuds

$N = 501$ nombre des instants

1.1. Etape d'apprentissage

Décomposition aux valeurs singulières (SVD)

$$U = \Phi \Sigma \Psi^T = \sum_{i=1}^{\min(M,N)} \sigma_i \varphi_i \omega_i^T$$

Φ et Ψ sont deux matrices orthogonales

Φ matrice des modes spatiaux

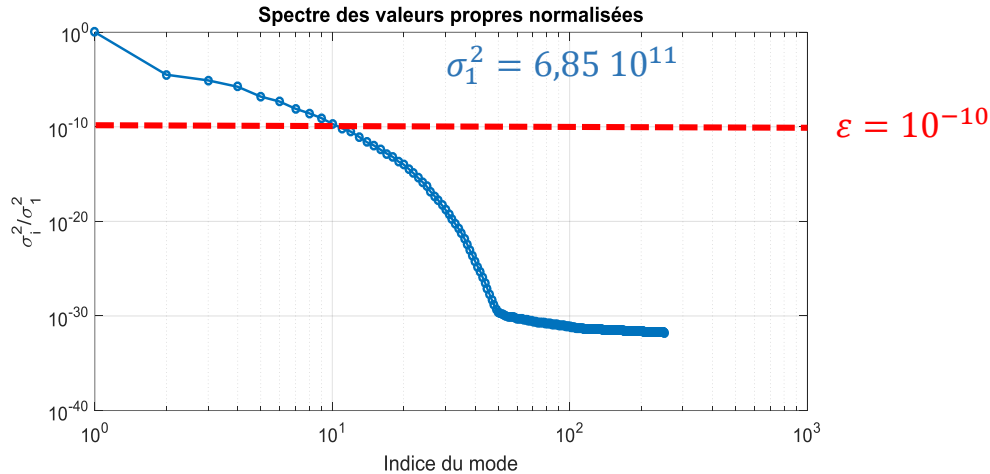
Σ est une matrice rectangulaire dont la diagonale contient les valeurs singulières

$A = \Sigma \Psi^T$ est une matrice des amplitudes temporelles

$$\rightarrow \forall t_i \quad T(t_i) = \sum_{j=1}^{\min(M,N)} a_j(t_i) \varphi_j$$

1.1. Etape d'apprentissage

Sélection des r modes dominants



10 modes dominants $\longrightarrow \Phi_r$ base réduite de dimension $r = 10$

$\longrightarrow \forall t_i \quad T(t_i) \approx \sum_{j=1}^r a_j(t_i) \varphi_j$

1.1. Idée de la réduction de modèle

Pour des nouvelles conditions opératoires, on cherche une solution de la forme :

$$T_r(t_i) = \sum_{j=1}^r a_j(t_i) \varphi_j$$

$$T_r(t_i) = a_1(t_i) \times \left[\begin{array}{c} \varphi_1 \\ \text{Mode spatial numéro 1} \end{array} \right] + a_2(t_i) \times \left[\begin{array}{c} \varphi_2 \\ \text{Mode spatial numéro 2} \end{array} \right] \\ + a_3(t_i) \times \left[\begin{array}{c} \varphi_3 \\ \text{Mode spatial numéro 3} \end{array} \right] + a_4(t_i) \times \left[\begin{array}{c} \varphi_4 \\ \text{Mode spatial numéro 4} \end{array} \right] + \dots$$

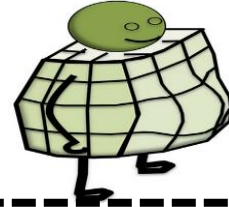
Déjà calculés Nouveaux inconnus

1.1. Etape d'usage

Modèle large (MEF)

dimension : $M = 20\,000$ noeuds

$$\mathbf{D} \cdot \frac{dT(t)}{dt} + \mathbf{K} \cdot T(t) = L(t)$$



Projection de Galerkin

Modèle réduit direct (MRD)

dimension : $r = 10$

$$\mathbf{D}_r \cdot \frac{da_r(t)}{dt} + \mathbf{K}_r \cdot a_r(t) = L_r(t)$$

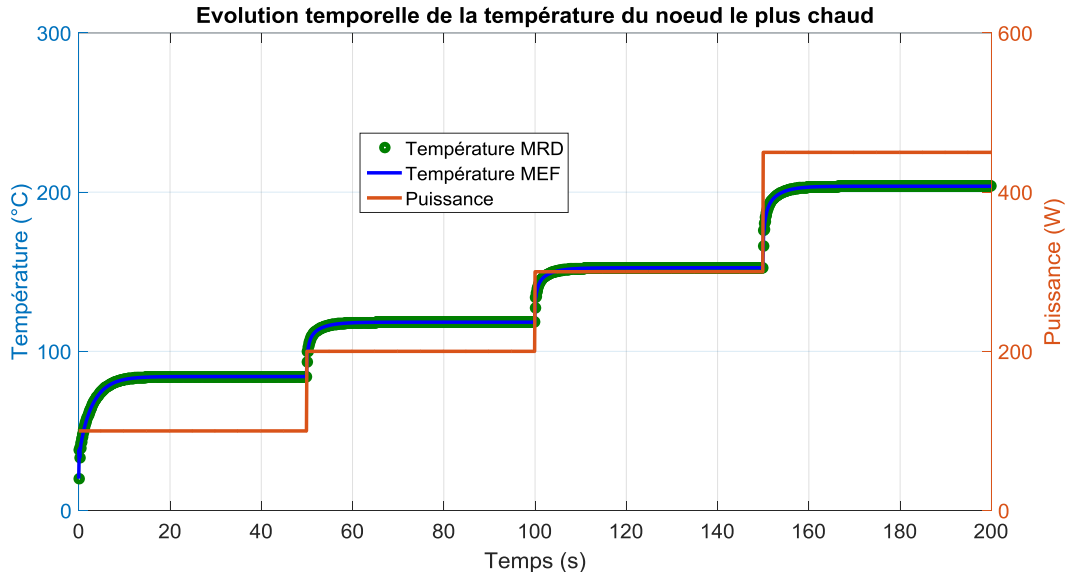
$r \ll M$



$$T_r(t) = \Phi_r \cdot a_r(t)$$

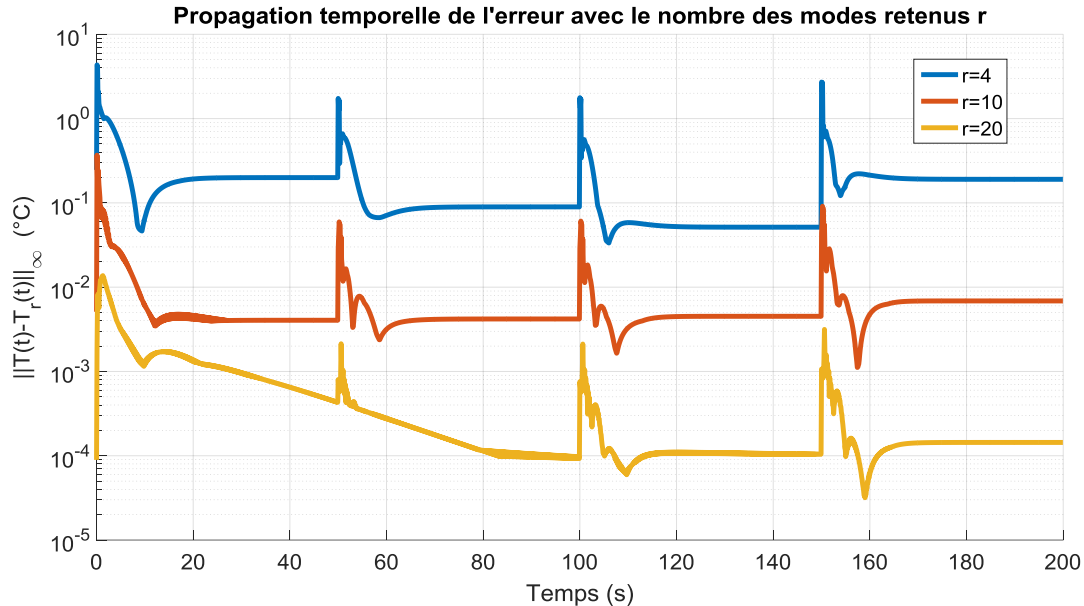
Avec $\mathbf{D}_r = \Phi_r^T \mathbf{D} \Phi_r$ $\mathbf{K}_r = \Phi_r^T \mathbf{K} \Phi_r$ $L_r(t) = \Phi_r^T L(t)$

1.2. Application : Puissance variable



Bonne concordance MEF /MRD (ordre 10) pour différentes valeurs des puissances

1.2. Précision du MRD



Le modèle réduit d'ordre 10 : $\max_{\text{noeuds}} \max_{\text{temps}} |T_r(t) - T(t)| = 0,36 \text{ } ^\circ\text{C}$

1.2. Temps de calcul du MRD

	Modèle large (FEM)	MRD ($r=10$)	Gain
Temps CPU	11 h	4 s	9900

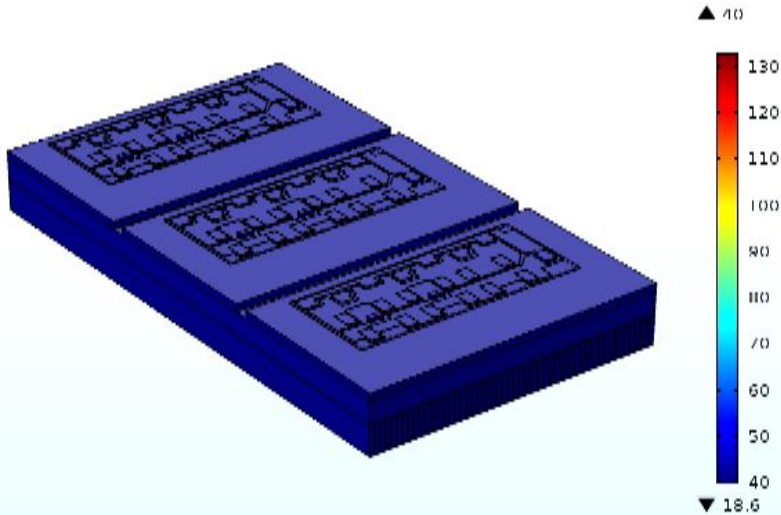
La structure compacte du modèle réduit : 10 équations



Un outil adéquat pour la surveillance en temps réel de la température dans le module de puissance

2. Modèle réduit inverse (MRI)

Time=0 s Surface: Temperature (degC)

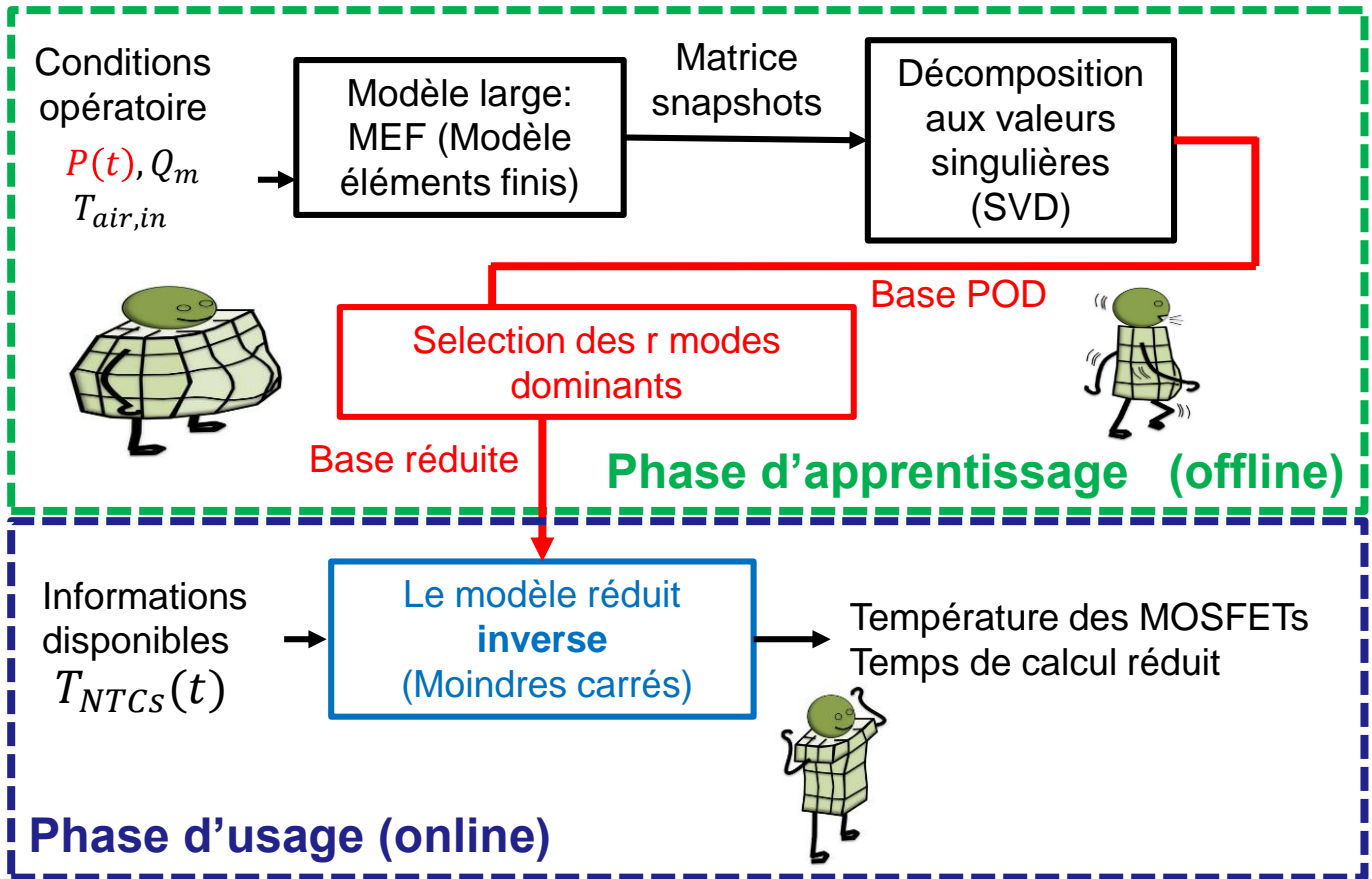


Informations disponible

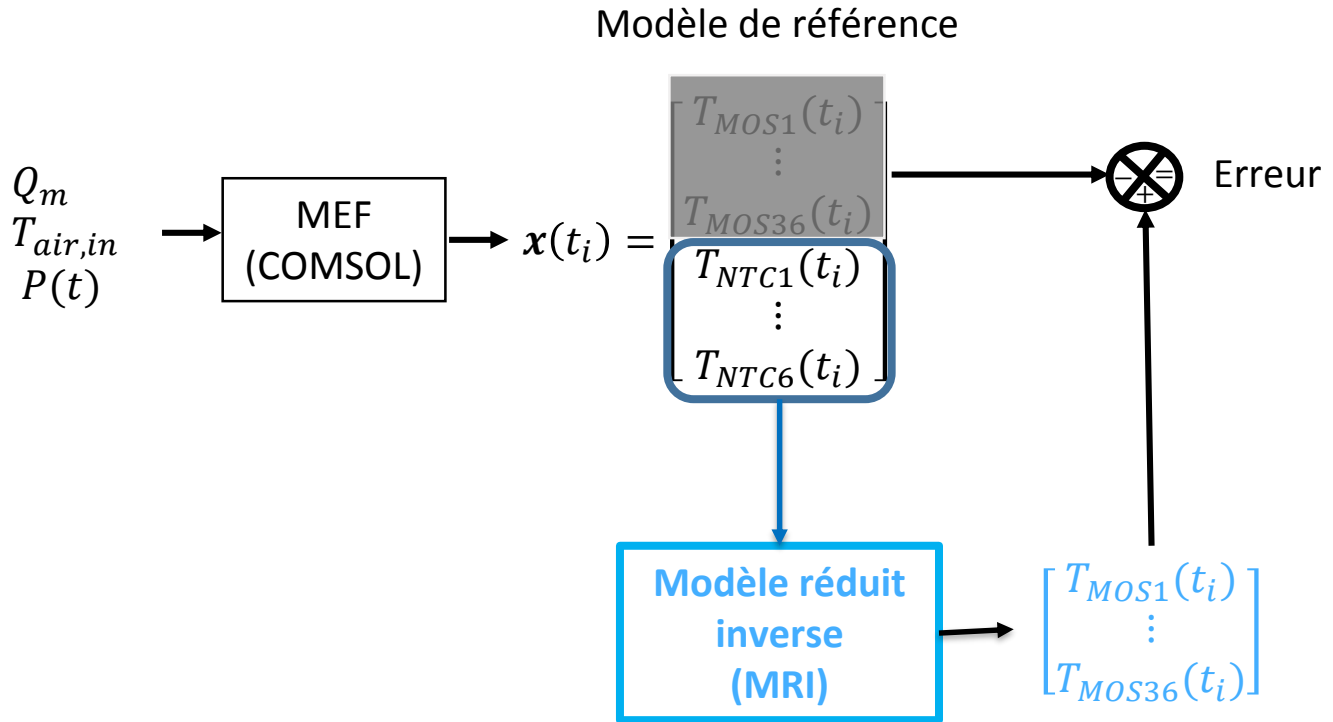
6 capteurs de
température
(NTC)

Inconnus
Température
des 36 MOSFETs

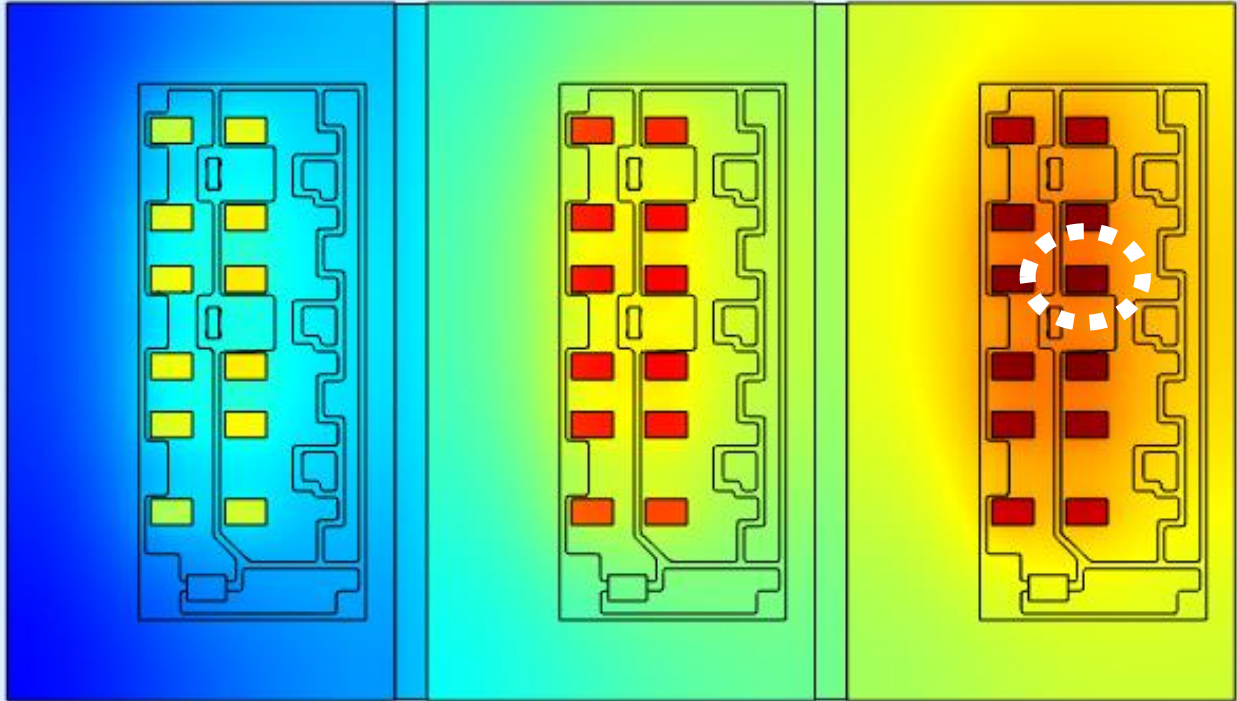
2.1. Explication de la méthode



2.2. Procédure d'évaluation du MRI

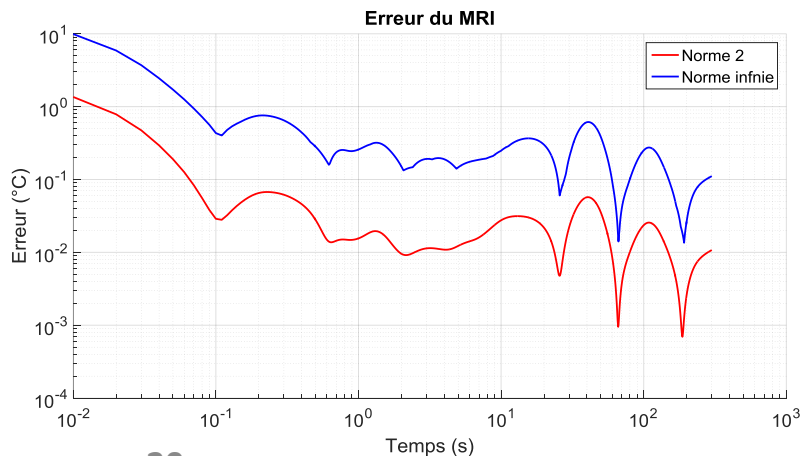
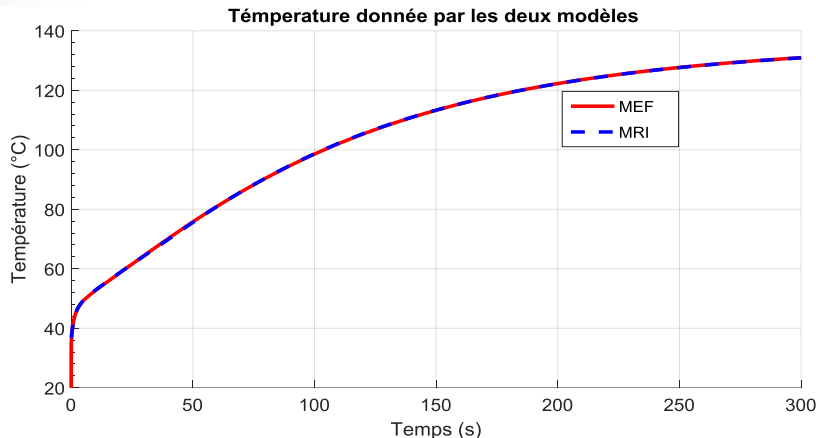


2.2. MOSFET d'intérêt



2.2. Usage = apprentissage

Conditions opératoires	Apprentissage	Usage
Q_m (g/s)	5	5
$T_{air,in}$ (°C)	40	40
P (W)	450	450



$$\|T_{MEF}(t) - T_{MRI}(t)\|_{\infty}$$

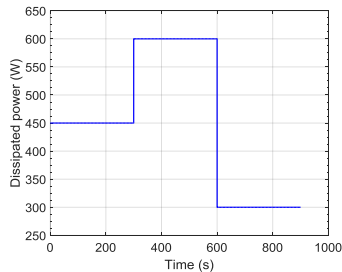
$$\frac{1}{M} \|T_{MEF}(t) - T_{MRI}(t)\|_2$$

$$M = 42$$

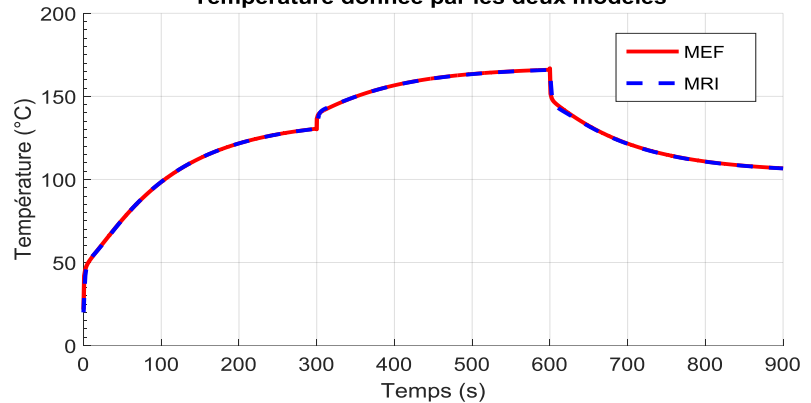
2.2. Usage ≠ apprentissage

On change les 3 paramètres des conditions opératoires

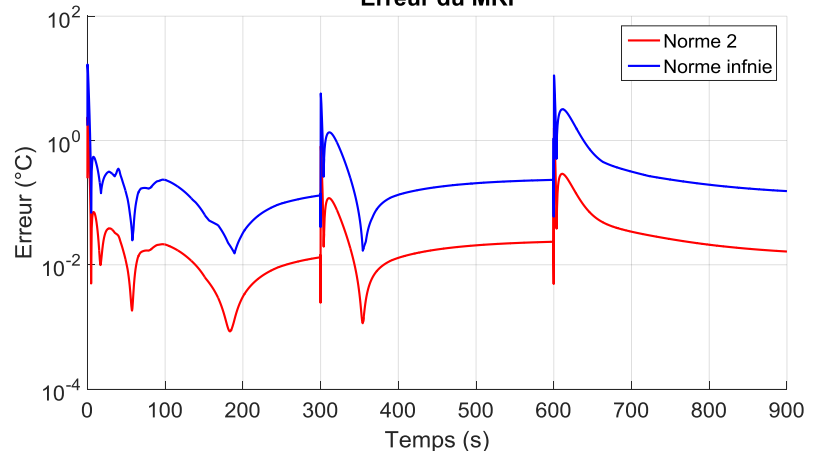
Conditions opératoires	Apprentissage	Usage
Q_m (g/s)	5	10
$T_{air,in}$ (°C)	40	50
P (W)	450	$P(t)$



Témpérature donnée par les deux modèles



Erreur du MRI



Conclusions et perspectives

- ✓ Le **MRD** est précis pour une large gamme de puissance
- ✓ Bon rapport précision, temps de calcul pour le **MRD**
- ✓ Le **MRI** est capable de calculer la température des MOSFETs sachant uniquement les températures des NTCs
- ✓ Les **MRI** et **MRD** sont des bons candidats pour surveiller la température des MOSFETs en temps réel.



- Amélioration de la qualité de la base réduite
- Positions optimales des capteurs de température pour le modèle réduit inverse

**Merci pour votre
attention**