

Mardi 26 Novembre 2013 :

7^{ième} journées de l'institut FARMAN

Projet ICE-T
(Identification du Courant Electrique
par mesure de Température)

G. Belkacem, M. Berkani, E. Florentin,
P.Y. Joubert, S. Lefebvre, C. Rey



Partenaires et historique

- Forces en présence

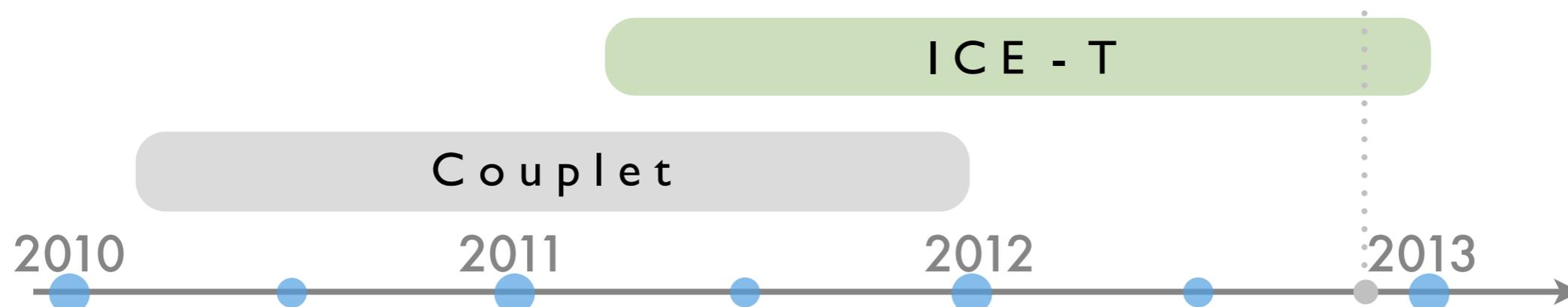
SATIE

- Maîtrise des modèles de composant de puissance
- Mise en oeuvre expérimentale
- Problème inverse magnétique

LMT

- Maîtrise des modèles thermique
- Mise en oeuvre numérique
- Problème inverse mécanique

- Dans la continuité de Couplet : pur produit FARMAN



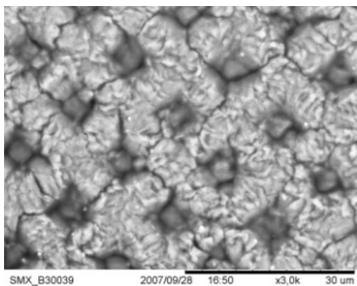
- Réalisation d'un **modèle** électro-thermique **robuste** et **stable** de modules de puissance :
 - Etude et localisation des **sources de puissance**
 - Etude du comportement **dans le temps** des composants de puissance
 - Etude de la **répartition** des différentes **grandeurs physiques** (courant, champs électrique, température...) au sein de composant

Contexte de l'étude

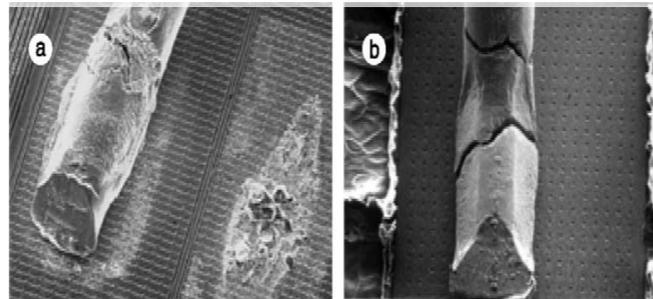
Illustration 1 Etude du vieillissement des modules de puissance

- Structure multicouche
- Cycles de fonctionnement → Variations de température dans l'assemblage
- Différents matériaux (coef. de dilatation différents) → Contraintes thermo-mécanique
Fatigue
Défaillance

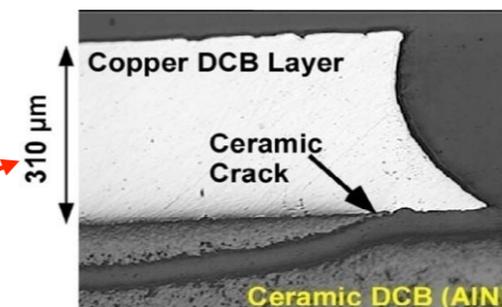
Reconstruction des métallisations



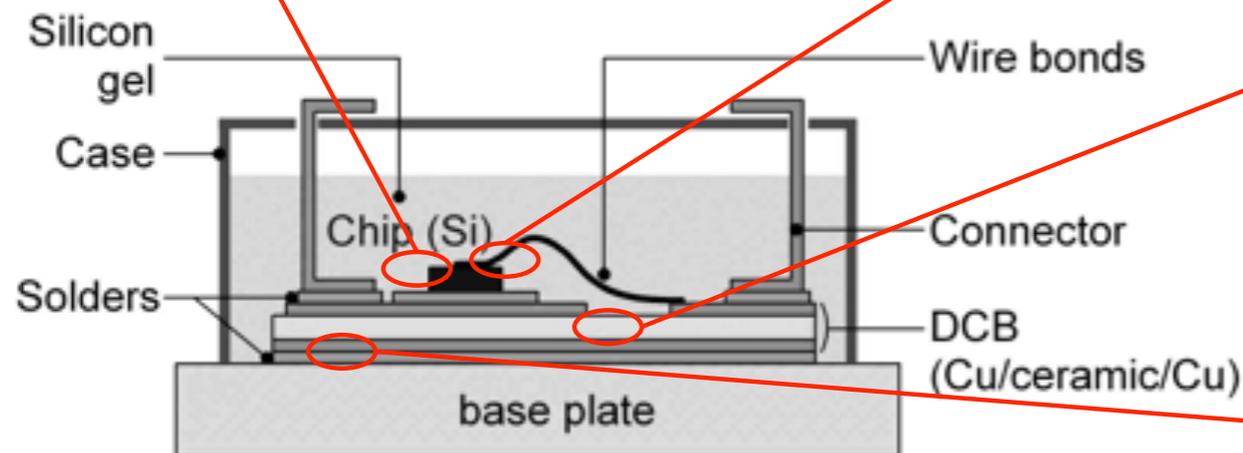
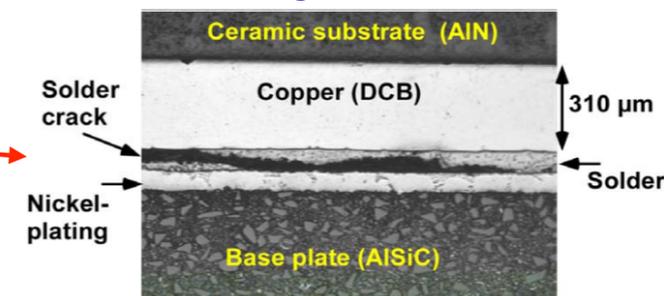
Levée des fils, fissuration dans les pieds de fil



Fracture de la céramique



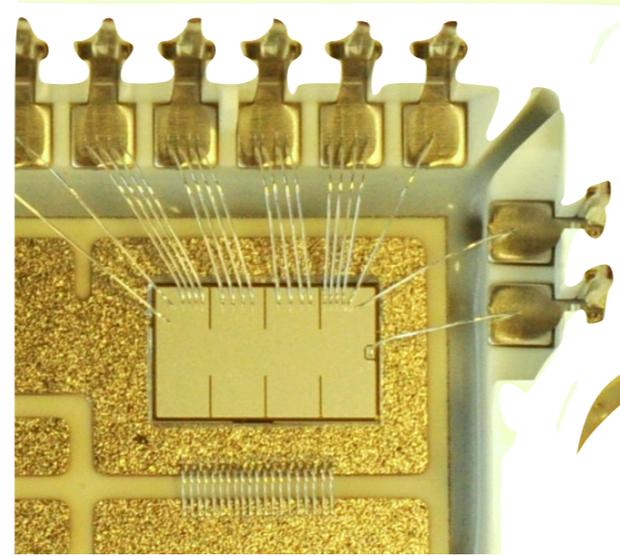
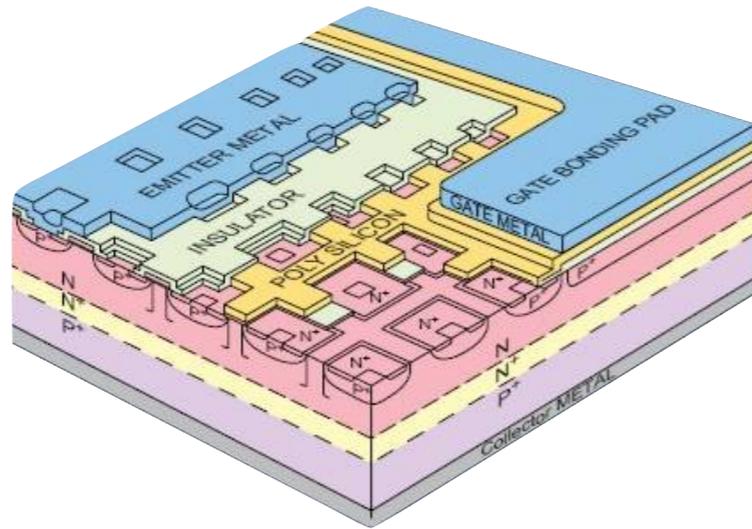
Délaminage des brasures



Contexte de l'étude

Illustration 1

- Puce : composant multicellulaire

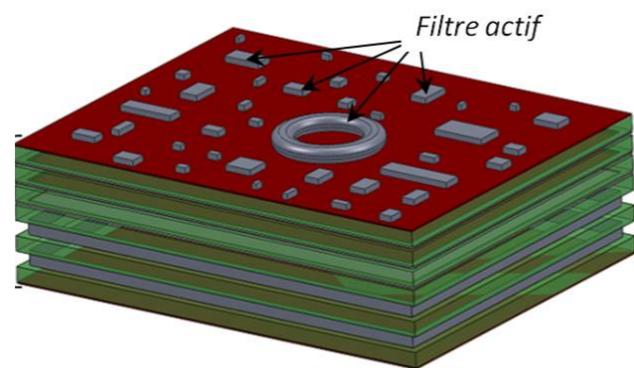


1 puce : 10^6 transistors /cm²

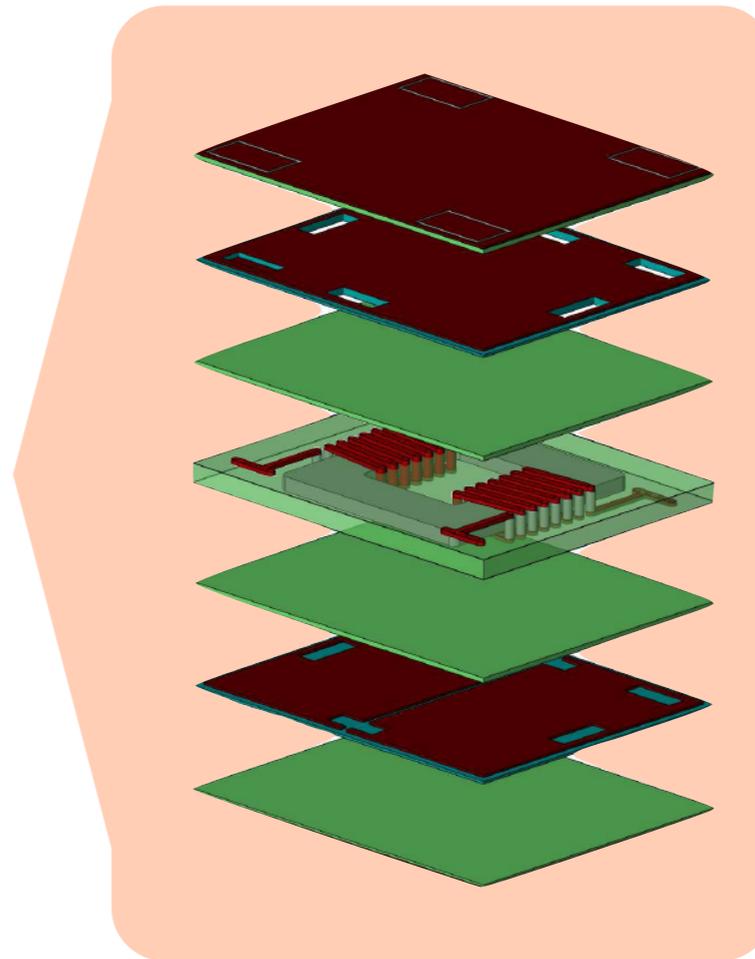
- ▶ Origine physique de la défaillance ? Point chaud ? Densité locale très élevée dans certaines cellules ?
- ▶ A partir de **mesures thermiques** externes au composant et d'une procédure **d'identification** :
 - remonter à la **distribution** de **courant** (source de pertes locales)
 - l'utiliser pour **comprendre** l'origine des **défaillances**

Cas d'application 2 Etudes des pertes au sein de composants

- Filtre LC fortement intégré:



Filtre passif multicouche



conducteur

diélectrique

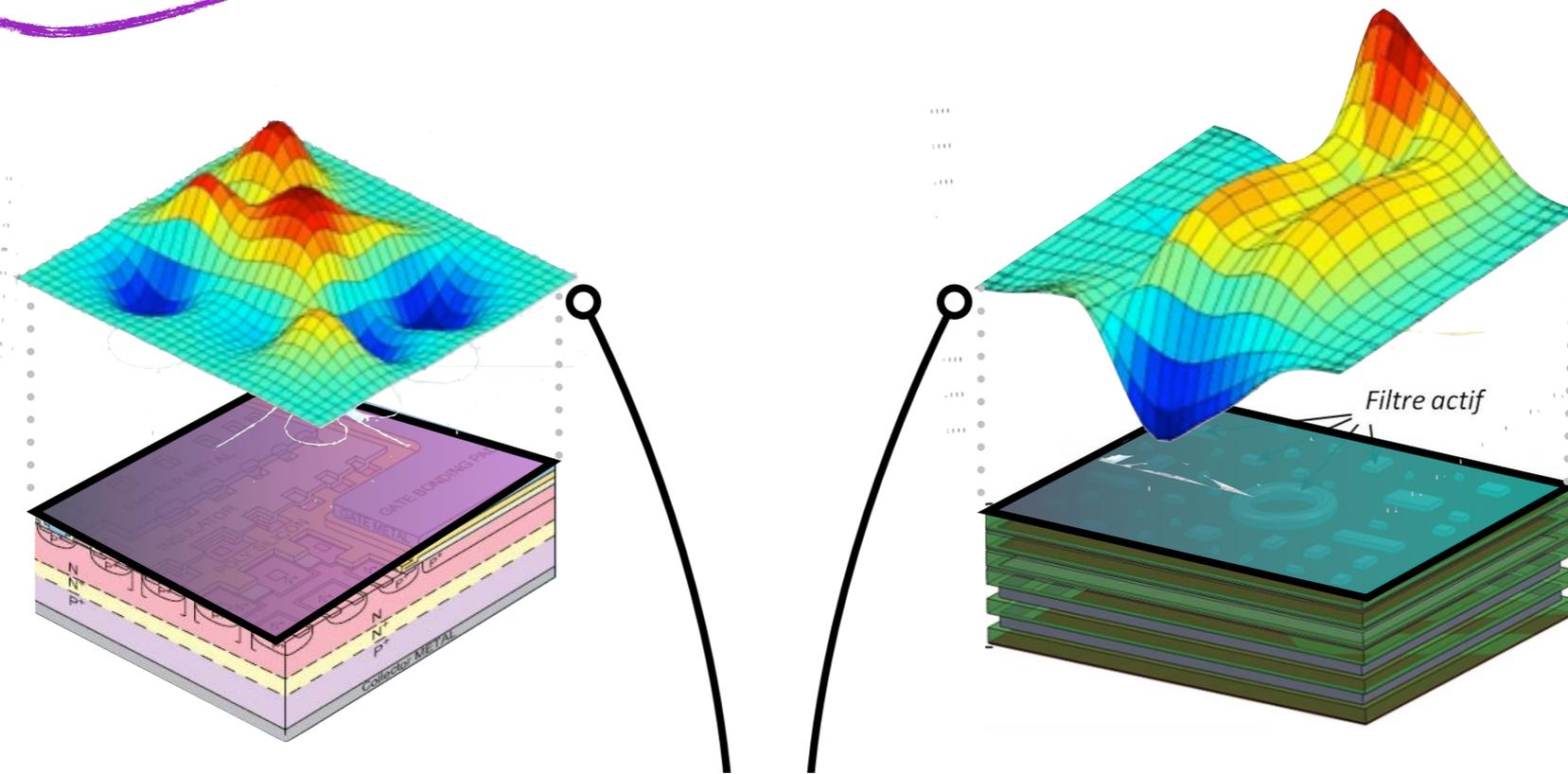
magnétique

isolant

- ▶ Comment mesurer et où se font les pertes (accès difficile) ?
(Bobinage ? Matériaux magnétique ? Vias traversants? ...)
- ▶ A partir de **mesures thermiques** externes au composant et d'une procédure **d'identification** :
 - Estimer et de **localiser** les **pertes**
 - Améliorer la **modélisation**

Au bilan: Mesure + Identification

A partir de mesures de températures :



Procédure
d'identification

Répartition
du courant
sources de chaleur

Répartition
des pertes
sources de chaleur

Introduction

Mise en situation

Identification

Présentation

Méthodes retenues

Mesures expérimentales

Conclusion

Identification

- Problème direct :



- Problème inverse :



- Problème difficile : unicité de la solution, disponibilité des mesures ...

- Ici :

Modèle : équation de la chaleur

Paramètres identifiés : sources de chaleur

Paramètres connus : géométrie, conditions limites, matériaux...

Résultat mesurés : température sur tout ou partie du bord

- Spécificités liées au composant (ex: géométrie)

Equations constitutives

- Etude et localisation des sources de puissance

- Dans le domaine Ω , $T \in \mathcal{V}_T$

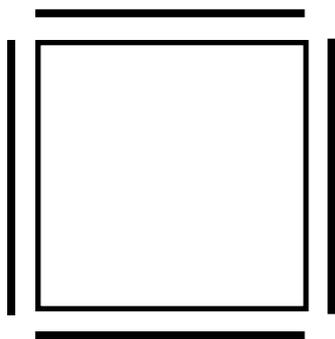
$$\forall \underline{x} \in \Omega : \lambda \Delta T + r = \rho c_p \partial_t T$$

- Sur le bord $\partial\Omega$, $T \in \mathcal{V}_T$

$$\begin{array}{l} \forall \underline{x} \in \partial_1 \Omega : T = T_d \quad \text{et} \quad \partial_n T = \phi_{mes} \\ \forall \underline{x} \in \partial_2 \Omega : \partial_n T = \phi_d \quad \text{et} \quad T = T_{mes} \end{array}$$

données surabondantes
(éventuelles)

- données surabondantes sur les bords,
deux cas de figures :



données complètes



données partielles

nécessité
d'ajouter
de l'info

Différentes familles de méthodes

Idée : $\min_{K \in \mathbb{K}} \mathcal{F}(K)$

fonction éventuellement **régularisée** (Tikhonov)

dépend de : données, observations, modèle et **choix de pondérations**

Ecart direct
à la mesure

[Pagnacco et al. 06] [Mahnken 04]
[Cottin et al. 84] [Giton et al. 06] ...

$$\mathcal{F}(K) = \|u_K - u_{mes}\|$$

Erreur en relation de
comportement

[Constantinescu 95] [Geymonat et al.
02] [Geymonat and Pagano 03]
[Latourte et al. 08] ...

comportement
mis doute dans F

Saut à l'équilibre

[Claire et al 04][Hild et al. 00-09] ...

équilibre
mis en doute dans F

Ecart à la réciprocité

[Bui 95][Ikehata 90][Andrieux et al. 97]
[Auffray et al 13]

Champs virtuels

[Grediac 89] [Grediac et al. 98...09] [Kim
et al. 07]...

[Grediac et Hild 2011]
[Avril et al 2008]

Ecart réciprocity

- Choix de représentation des sources

- ▶ détermination des sources

exemple

sources ponctuelles :

$$\forall k \in \mathbb{N},$$

$$\sum_{j=1}^N r_j \mathbf{X}_j^k = \mathbf{a}_k$$

Annotations:
 - N : nombre
 - r_j : intensité
 - \mathbf{X}_j^k : position

- Propriétés : [El Badia 2000], [Aufray et al 2013] ...

soit

$$\mathbf{H}_{m,n}^0 = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_0 & \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 & \dots & \mathbf{a}_{n-1} \\ \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_3 & \dots & \mathbf{a}_n \\ \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_3 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \mathbf{a}_{m-1} & \mathbf{a}_m & \mathbf{a}_{m+1} & \dots & \mathbf{a}_{m+n-2} \end{pmatrix} \quad \mathbf{H}_{m,n}^1 = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_3 & \dots & \mathbf{a}_n \\ \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_3 & \mathbf{a}_4 & \dots & \mathbf{a}_{n+1} \\ \mathbf{a}_3 & \mathbf{a}_4 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \mathbf{a}_m & \mathbf{a}_{m+1} & \mathbf{a}_{m+2} & \dots & \mathbf{a}_{m+n-1} \end{pmatrix}$$

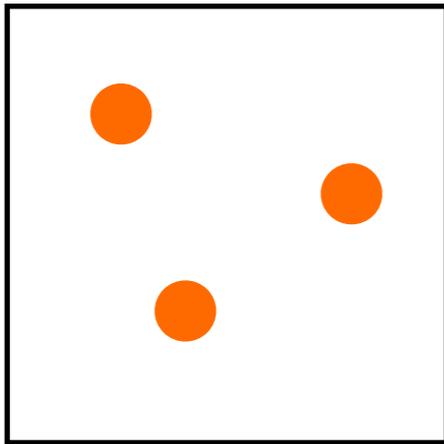
- ▶ $\forall M > N \quad \text{rank}(\mathbf{H}_{M,M}^0) = N \longrightarrow \mathbf{N}$

- ▶ Vecteurs propres de $(\mathbf{H}_{N,N}^1 \cdot (\mathbf{H}_{N,N}^0)^{-1}) \longrightarrow \mathbf{X}_j$

- ▶ Système linéaire $\longrightarrow r_j$

Ecart à la réciprocity

Illustration (essai numérique)

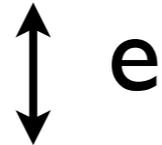


	exact	identifié
N	3	3
\mathbf{X}_1	$0.6 + 0.2i$	$0.5998 + 0.2001i$
r_1	1	1.0028
\mathbf{X}_2	$0.3 + 0.8i$	$0.3002 + 0.7996i$
r_2	1	0.995
\mathbf{X}_3	$0.7 + 0.4i$	$0.7002 + 0.4005i$
r_3	1	1.0004

Méthode mal adaptée à notre étude

épaisseur très faible

Mesures inaccessibles



Mesures difficile sur la tranche

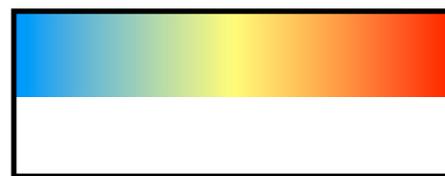
Mesures difficile sous le composant

robustesse

OK si

- ▶ Faible nombre de sources
- ▶ sources distances

Ici

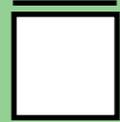


- ▶ densité surfacique de sources
- ▶ répartie dans la partie supérieure du composant

▶ méthode mal adaptée à notre situation

Ecart direct à la mesure

données partielles



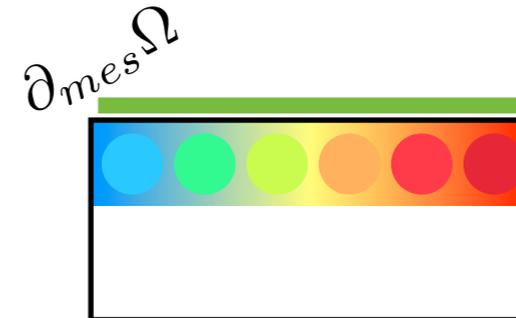
+

stationnaire

$$f(g) = \|T(g) - T_{mes}\|_{\partial_{mes}\Omega}$$

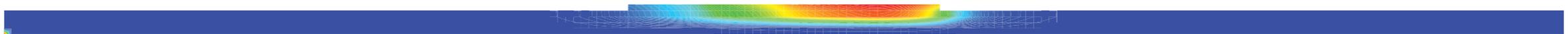
Minimisation :

$$\min_{g \in G} f(g)$$



- Evaluation de $T(g)$

- simulation numérique (Castem)



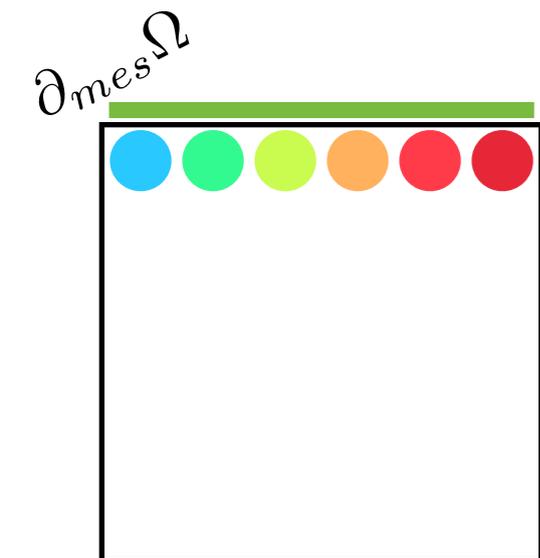
- sources localisées + représ. Eléments Finis : G dimension finie
(connaissance composant) (constant par élément)

$$T(g) = \sum_{i=1}^{\dim(G)} q_i T_i \xrightarrow{\text{minimisation}} \mathbb{K} \underline{q} = \underline{f}$$

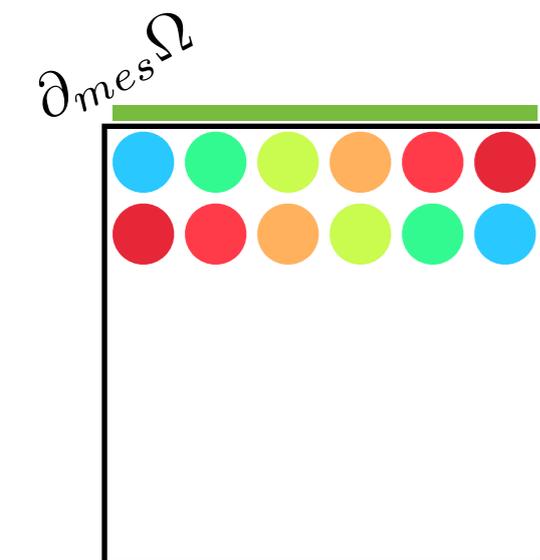
Ecart direct à la mesure

Problème d'unicité

$$\mathbb{K} \underline{q} = \underline{f}$$



\mathbb{K} inversible \longrightarrow une solution
suffisamment d'information pour déterminer le courant
test numériques ok (sans bruit)



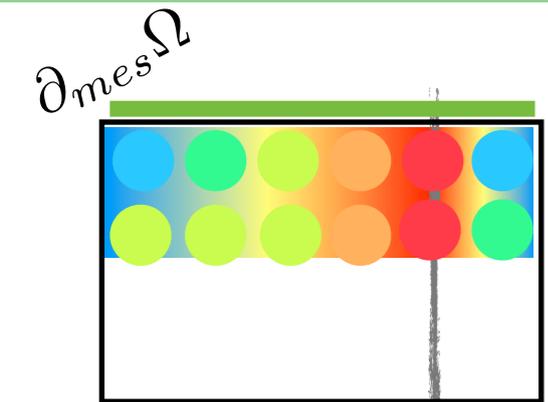
\mathbb{K} non inversible
noyau \longrightarrow infinité de solution
test numériques ok (sans bruit)

\blacktriangleright pas assez d'information pour déterminer les sources

problématique car c'est ce qui se passe en Y et pas en X qui nous intéresse

Ajouter de l'information

Ajout d'information



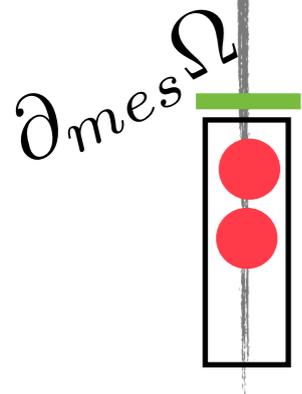
On ne s'intéresse qu'au point chaud



facilement localisable



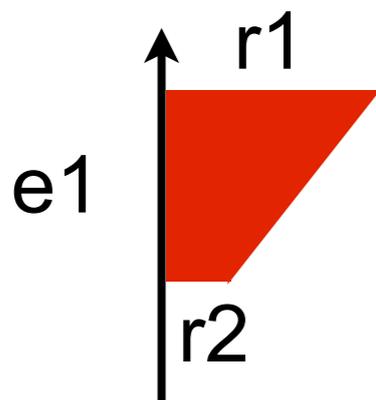
simplification de la méthode (ID)



On se place en instationnaire



aide à différencier les couches



On modélise la distribution des sources



Loi en trapèze

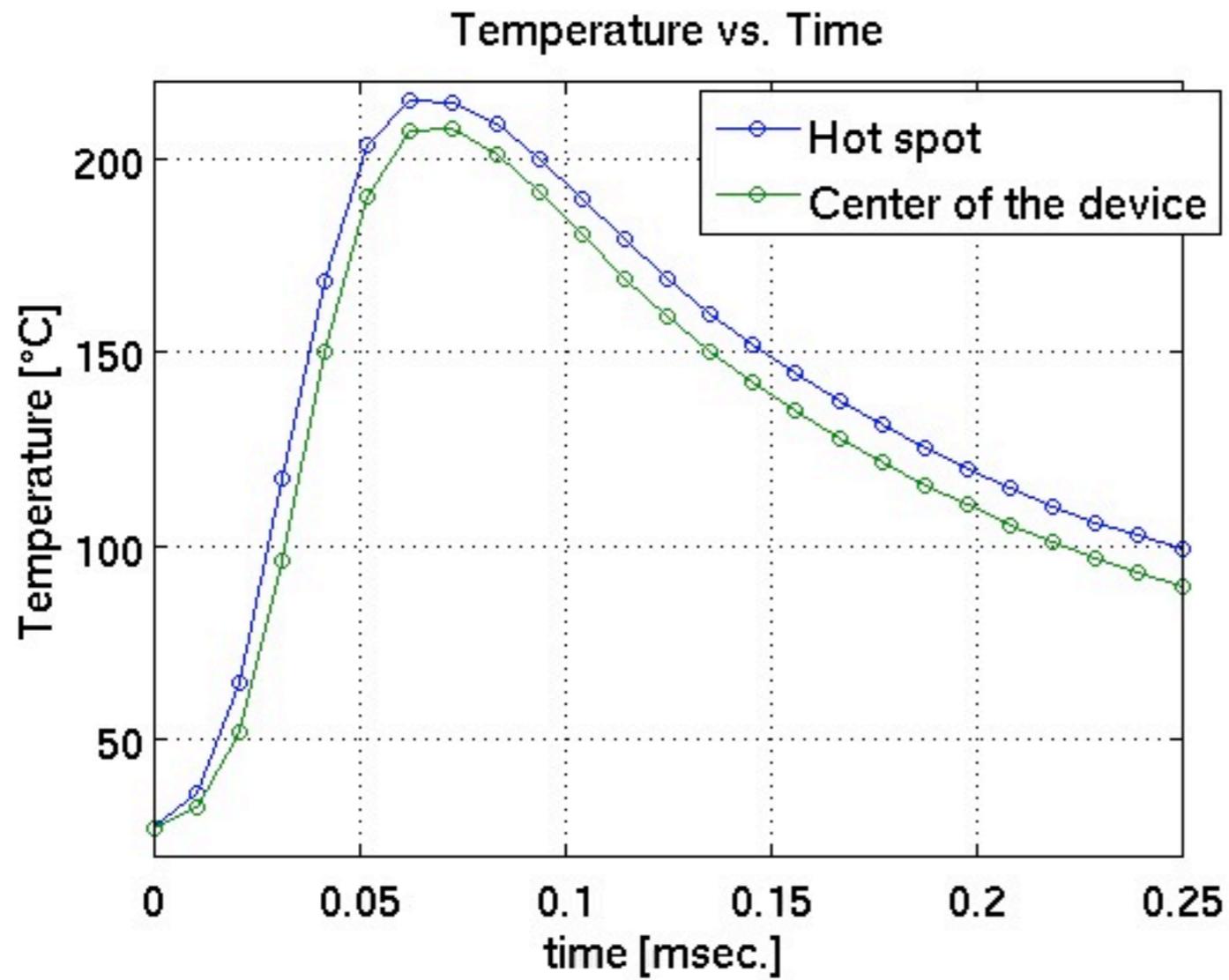


Espace d'optimisation discret
(dimension très faible)

Essai

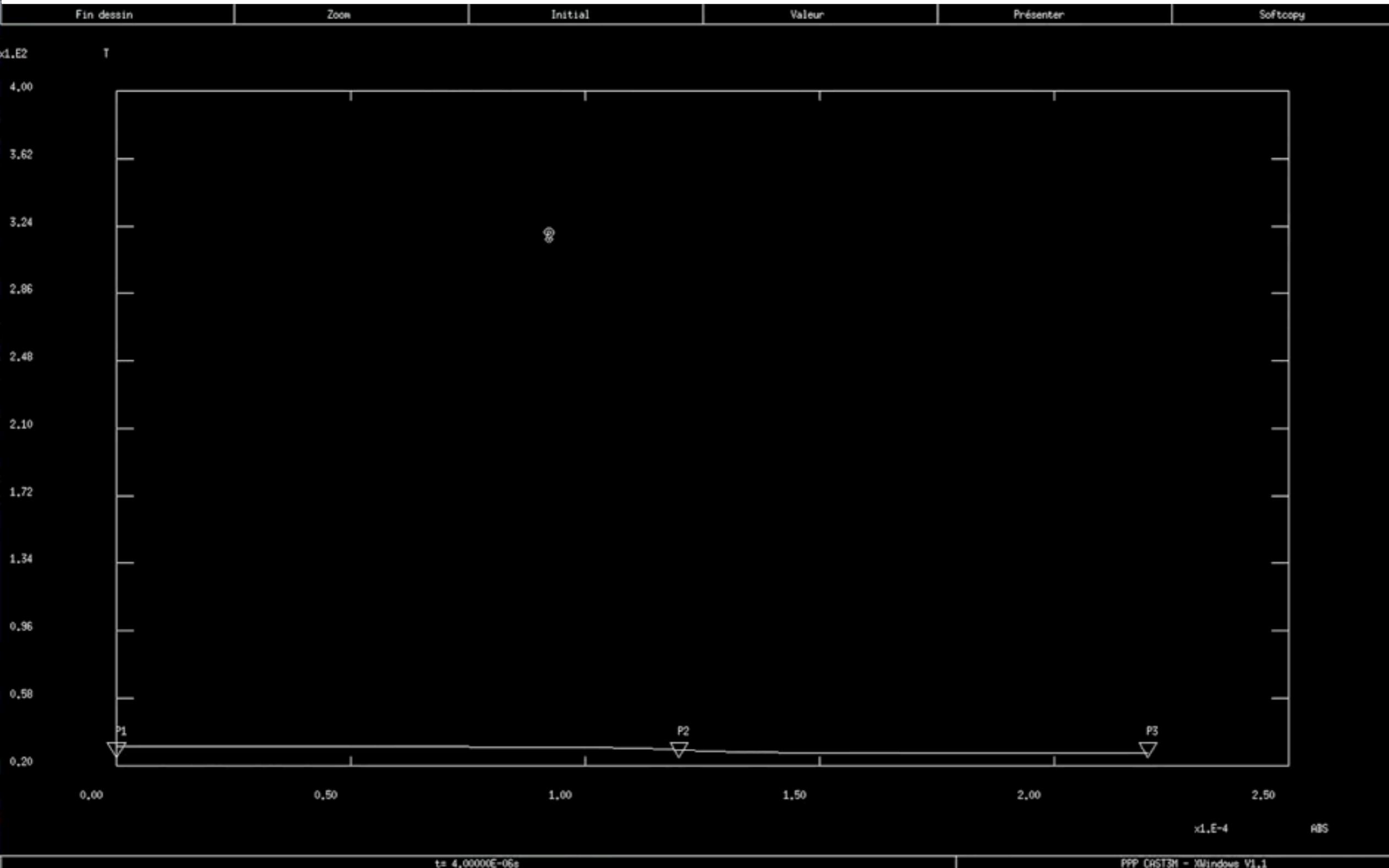
mesure de la température en surface





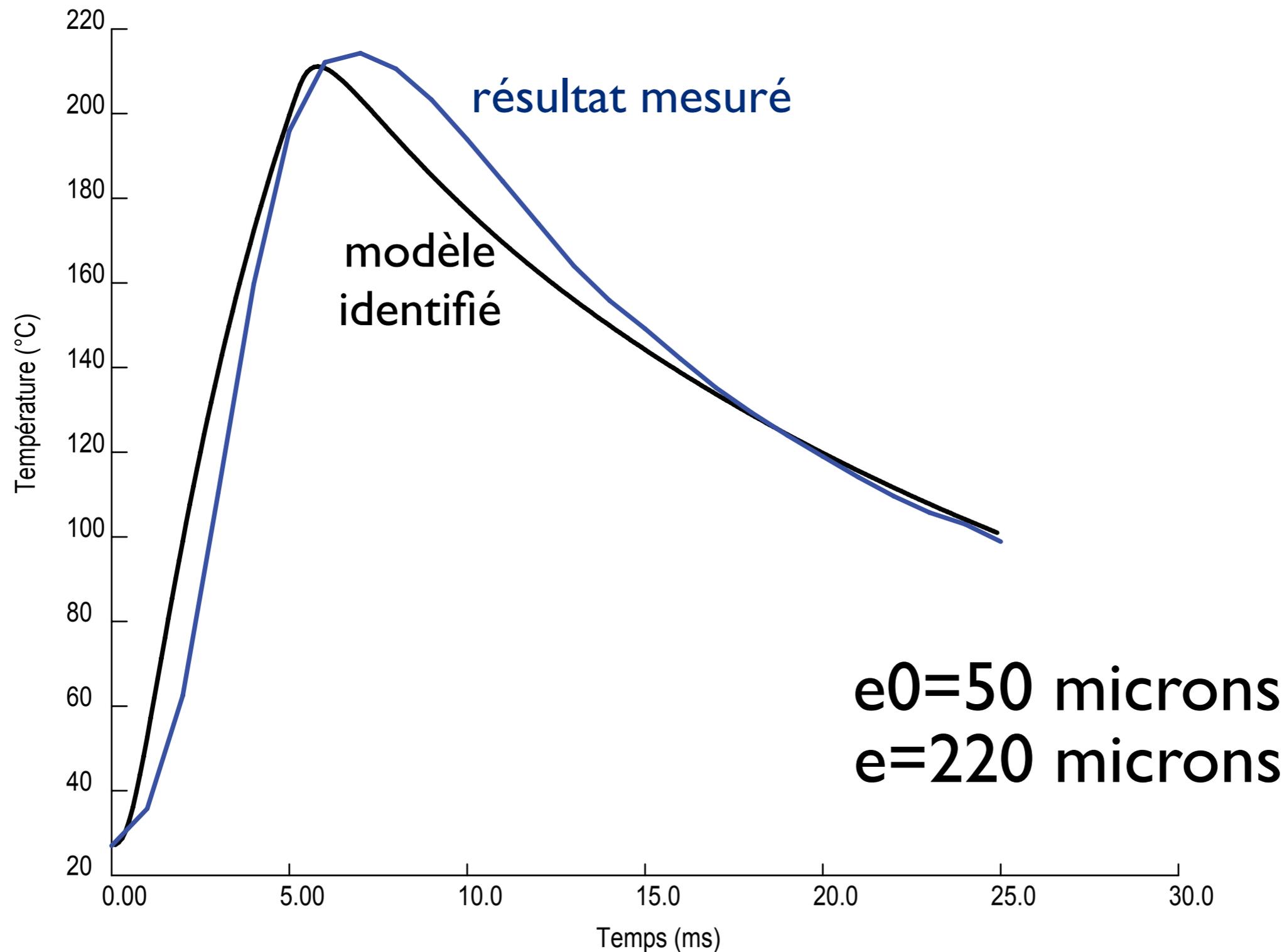
Evolution de la température en temps et espace

Modèle (CAST3M)



Comparaison Modèle identifié/essai

Température sur un point chaud



Introduction

Mise en situation

Identification

Présentation

Méthodes retenues

Mesures expérimentales

Conclusions et Perspectives

- Différentes méthodes testées
 - Ecart à la réciprocité
 - développements pas directement utiles dans ICE-T
 - mais intérêt dans d'autres contextes (Etude de robustesse)
 - Ecart direct à la mesure
 - Méthode développée dédiée ICE-T : réponse OK
 - Encore des possibilités de développements à faire utilisation dans un contexte plus général (résolution / optimisation)
- Projet exploratoire : ouverture de pistes
 - identification : maîtrise de nouvelles stratégies
 - expérimental : nouvelles données numériques

merci de votre attention