

Journée SFT - Groupes METTI et Thermographie IR
Problèmes Inverses de Champs :
Apports et Limitations de la Thermographie Infrarouge

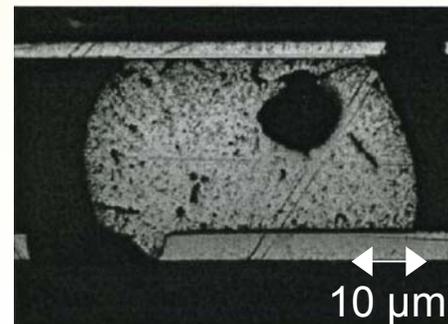
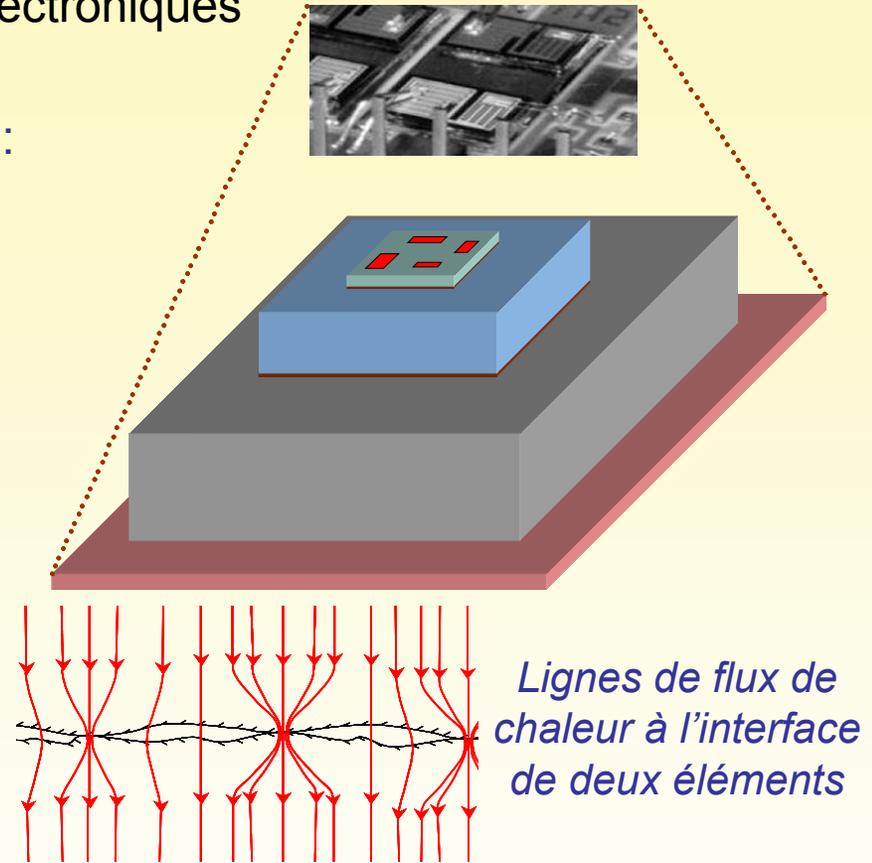
Estimation de distributions de résistance thermique à la liaison d'éléments d'assemblage électronique par thermographie infrarouge

V. Feuillet¹, Y. Jarny¹, Y. Scudeller²

(1) Laboratoire de Thermocinétique, UMR-CNRS 6607

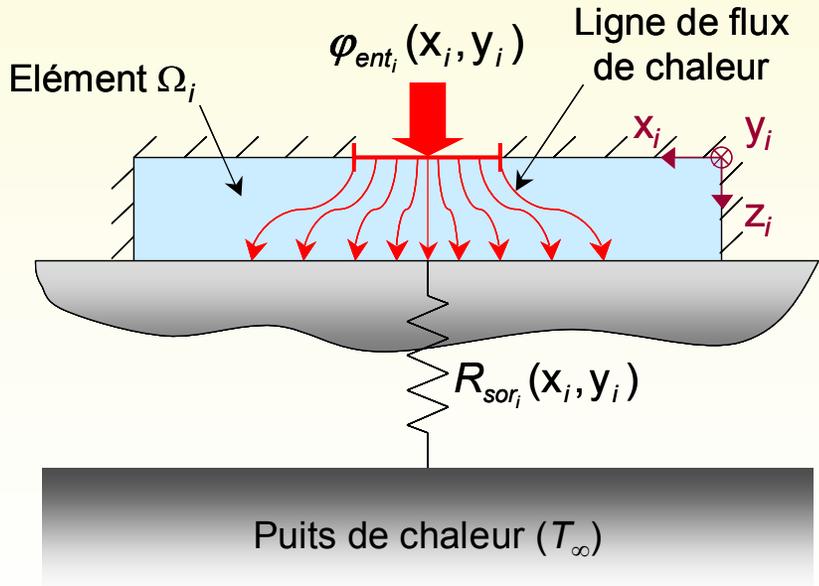
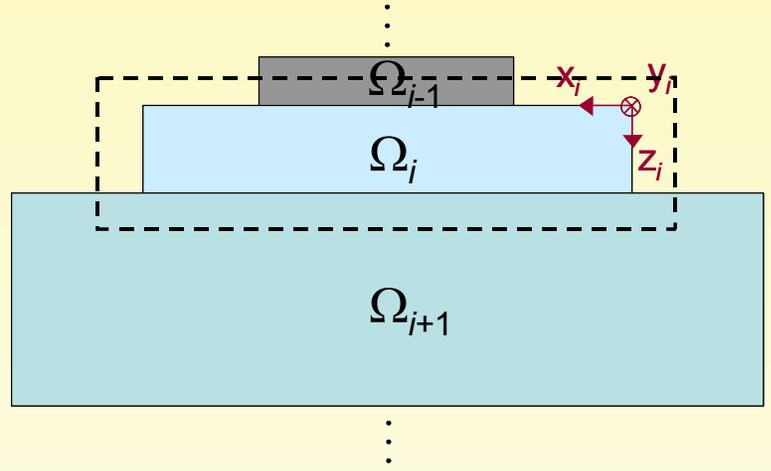
*(2) Laboratoire de Génie des Matériaux et Procédés Associés
Ecole polytechnique de l'université de Nantes*

- **Composant électronique de puissance :** empilement pyramidal d'éléments parallélépipédiques
- **Imperfection des contacts :** constriction des lignes de flux de chaleur
- **Défauts des matériaux d'interface (fissures, vides, décollements) :** dus aux procédés de fabrication ou à des sollicitations thermomécaniques importantes
- **Propriétés thermiques des liaisons liées aux conditions de fabrication et de fonctionnement :** besoin de techniques expérimentales de caractérisation thermique in situ



Vide dans une brasure SnPb

- **Décomposition de la structure pyramidale en éléments simples**
- **Conditions aux frontières :**
distribution de Résistances Discrètes de Frontière (RDF) reliée au puits de chaleur (température de référence)
- **Algorithme itératif :** raccordement thermique à l'aide des solutions de l'équation de la chaleur dans chaque élément (transformations intégrales)
- **Avantages de la méthode RDF :**
 - discrétisation de la face supérieure de l'assemblage non nécessaire pour la résolution
 - temps de calcul réduits

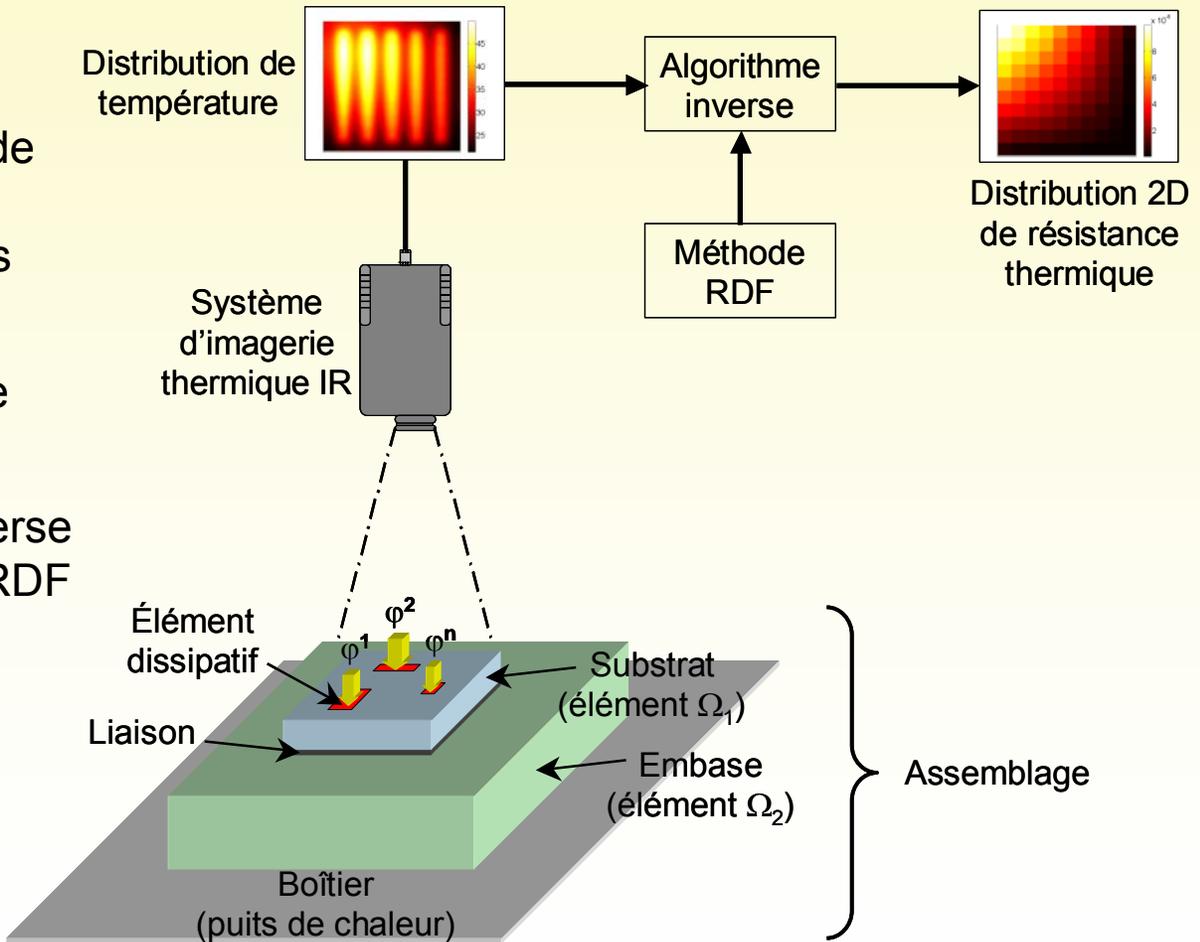


Technique de mesure

➤ **Objectifs** : mesure in situ de distributions de résistance thermique de liaisons collées ou brasées au sein d'assemblages

➤ **Principe de la mesure** :

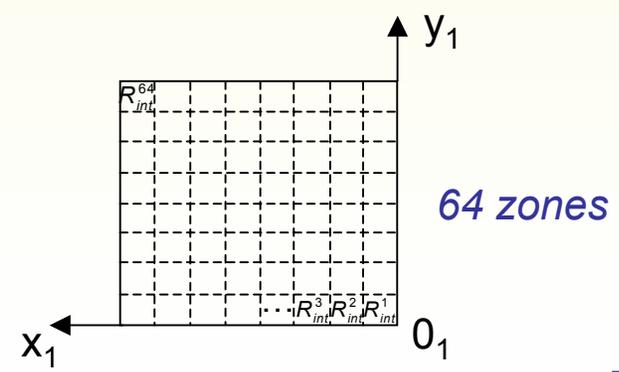
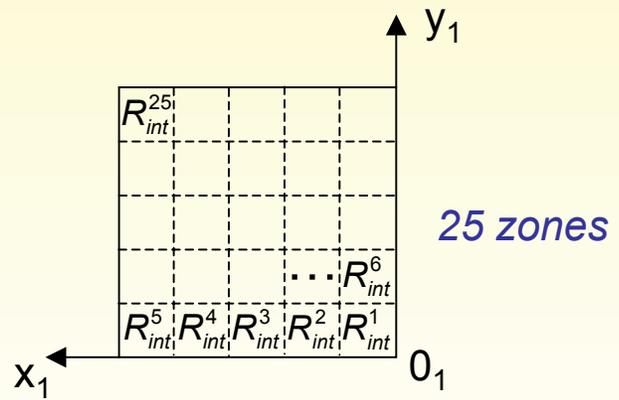
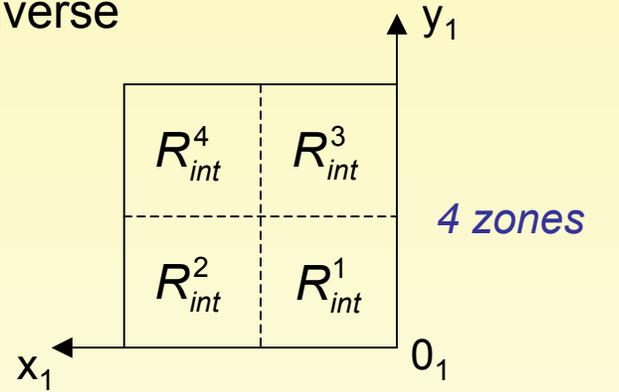
- Analyse de la distribution de température en régime stationnaire dans le plan des éléments dissipatifs
- Métrologie : thermographie infrarouge
- Estimation : technique inverse s'appuyant sur la méthode RDF
- Reconstruction de la distribution de résistance thermique de la liaison à caractériser



Estimation de distributions de résistance thermique

Formulation du problème inverse

- **Paramétrisation** : la résistance thermique de la liaison est posée constante sur un nombre donné de régions définies par une discrétisation en zones carrées
- **Variable recherchée** : vecteur à nb composantes $\beta = [R_{int}^i]_{i=1}^{nb}$
- **Données expérimentales** : mesures de température $Y = [Y_i]_{i=1}^I$ en régime permanent au sommet de l'assemblage



- **Critère des moindres carrés** :

$$J(\hat{\beta}) = \frac{1}{2} \| Y - \eta(\hat{\beta}) \|^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I [Y_i - \eta_i(\hat{\beta})]^2$$

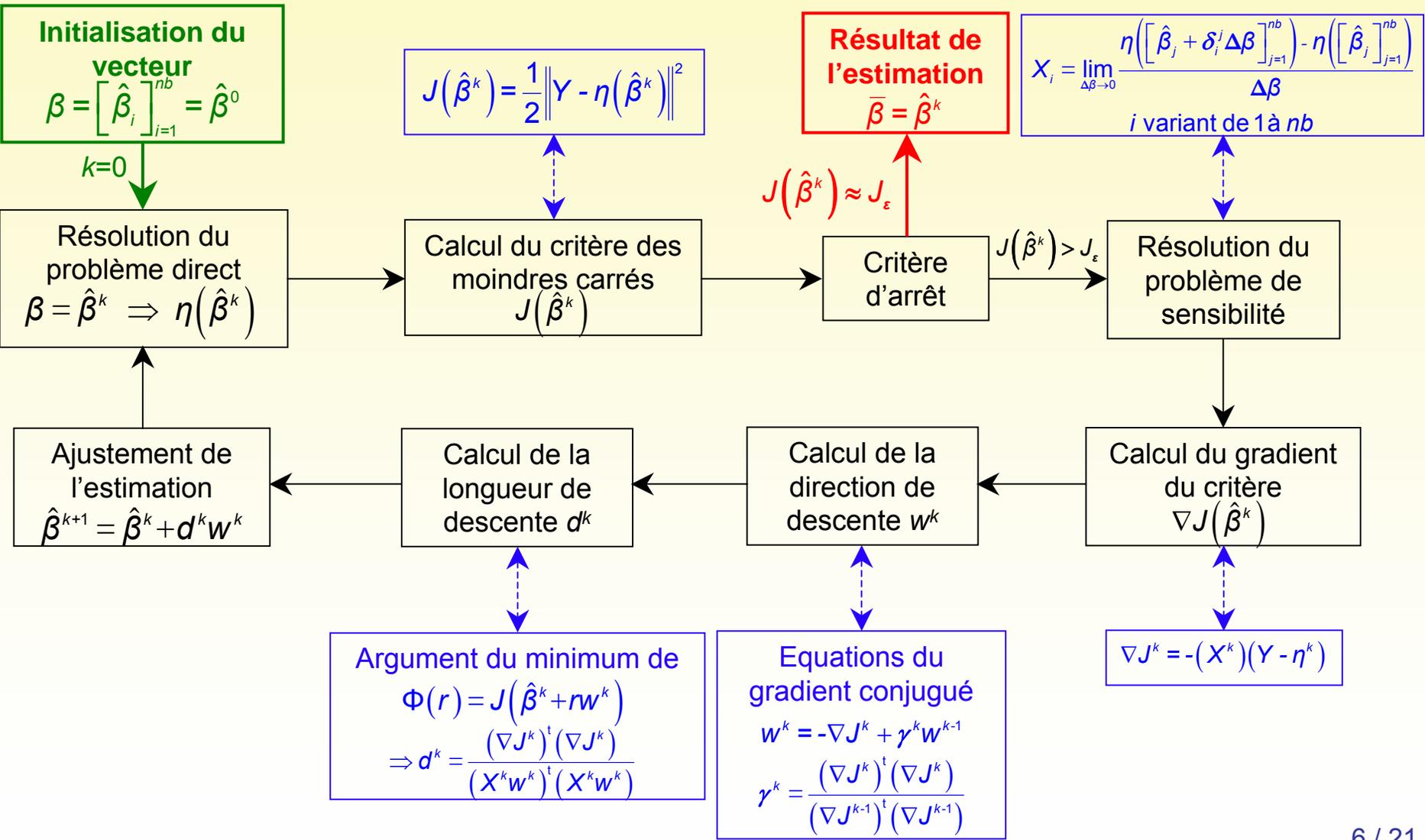
↑
températures estimées

- **Critère d'arrêt** :
- $$Y_i - \eta_i(\hat{\beta}) \approx \sigma \text{ pour } i = 1, \dots, I \Rightarrow J_\epsilon = \frac{1}{2} I \sigma^2$$

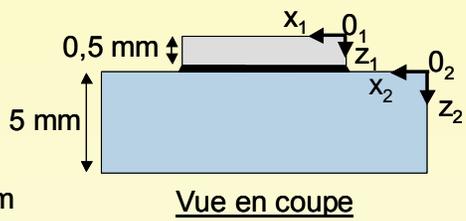
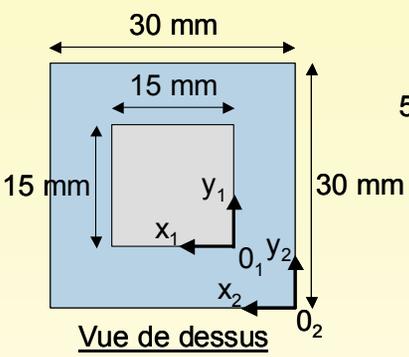
Estimation de distributions de résistance thermique

Méthode du gradient conjugué

➤ Minimisation du critère des moindres carrés : algorithme itératif



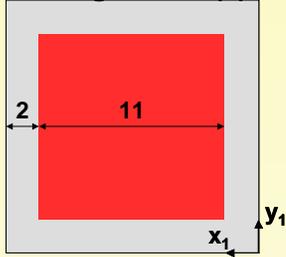
Étude numérique



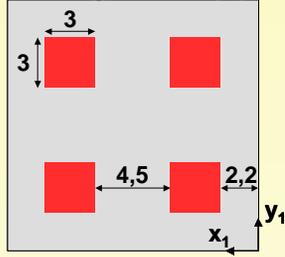
Substrat (élément Ω_1)
 Embase (élément Ω_2)
 Liaison

Assemblage étudié

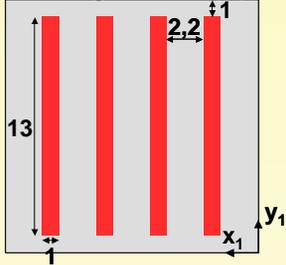
Configuration (a)



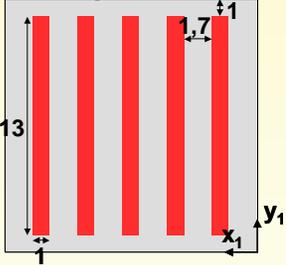
Configuration (b)



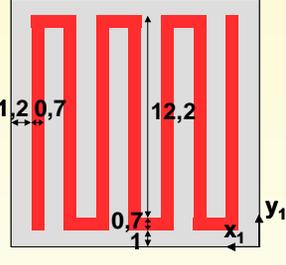
Configuration (c)



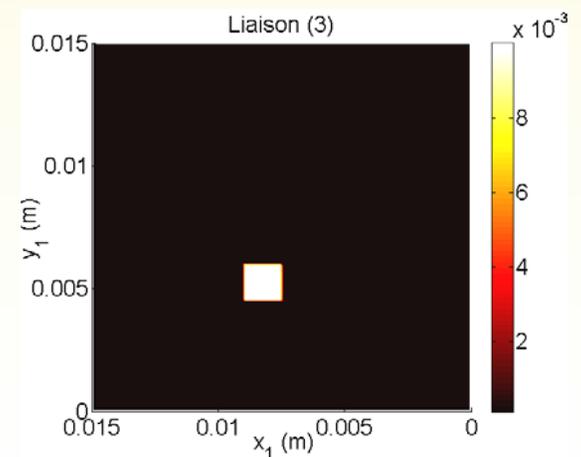
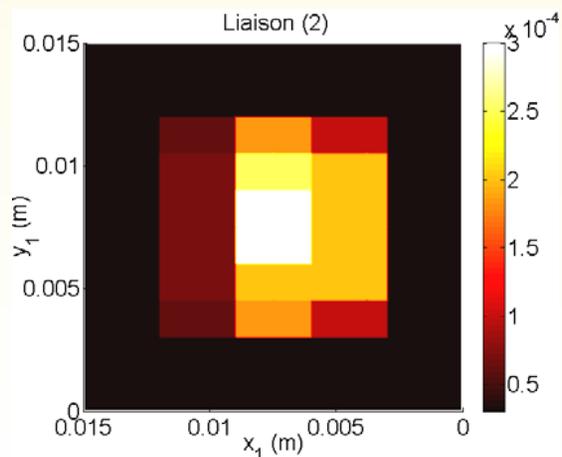
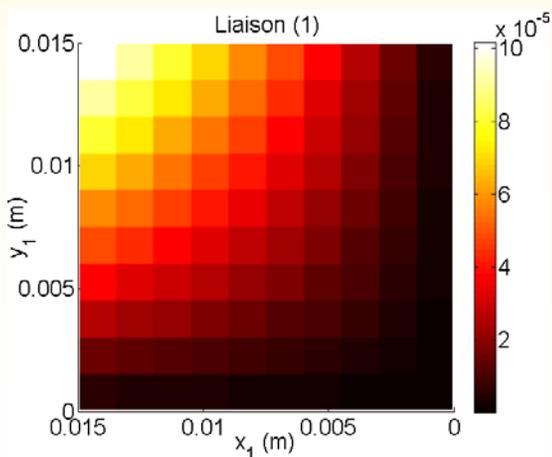
Configuration (d)



Configuration (e)



Configurations d'éléments chauffants



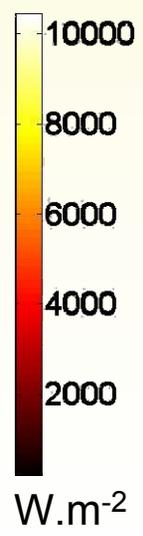
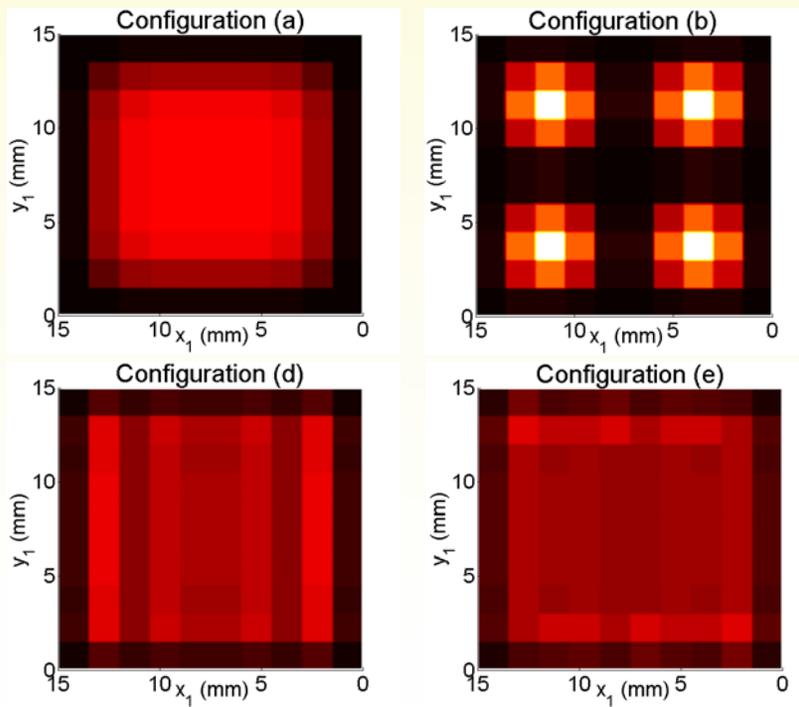
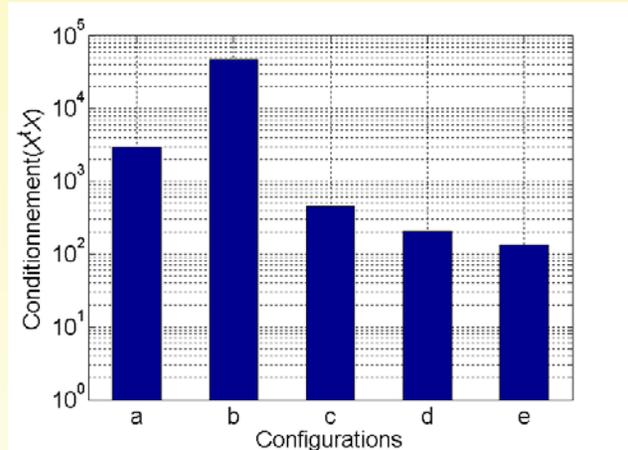
Distributions exactes de résistance thermique ($K.m^2.W^{-1}$)

Estimation de distributions de résistance thermique

Étude de sensibilité

➤ Performances de l'algorithme d'inversion : dépendantes de la configuration d'éléments chauffants

- Nombre de conditionnement de la matrice X^tX :
 - ➔ configurations en bandes parallèles mieux adaptées que les configurations sous forme de plots
- Coefficients de sensibilité : moyennes spatiales de la matrice de sensibilité X

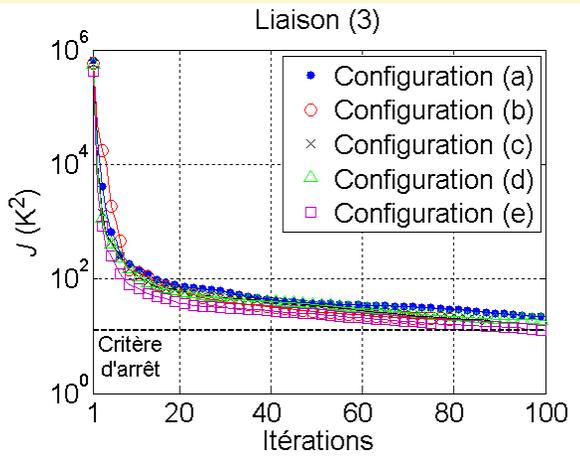
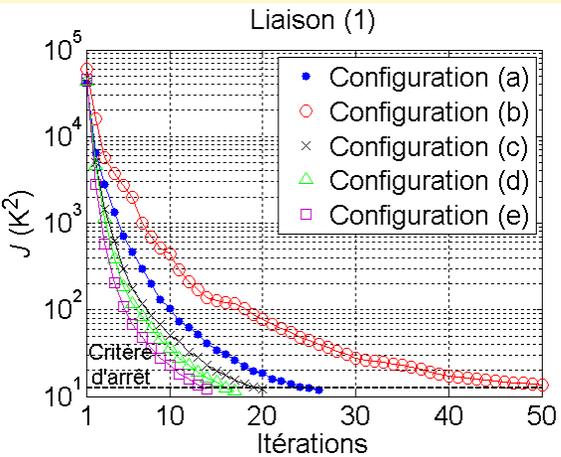


- ➔ sensibilité la plus faible sur le contour de la liaison
- ➔ sensibilité la plus élevée sur les zones surplombées par une source de chaleur
- ➔ configurations en plots : valeurs élevées mais plusieurs zones à très faible sensibilité
- ➔ configurations en bandes : valeurs plus faibles mais distributions homogènes

Simulations d'inversion avec bruit de mesure

Estimations à partir de données bruitées ($\sigma=0,1$ K) :

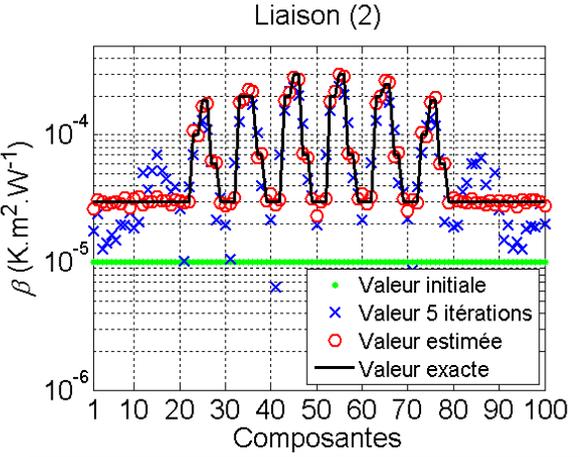
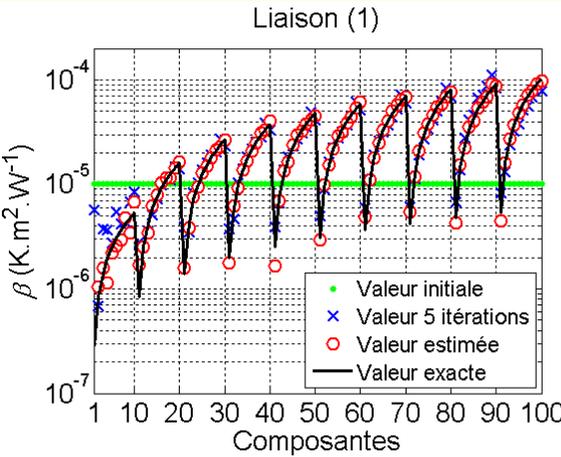
- Minimisation du critère des moindres carrés :



➔ convergence la plus rapide obtenue pour la configuration en serpentin

➔ nombre d'itérations d'autant plus élevé que la distribution présente des discontinuités importantes et localisées

- Distributions estimées (configuration en serpentin) :



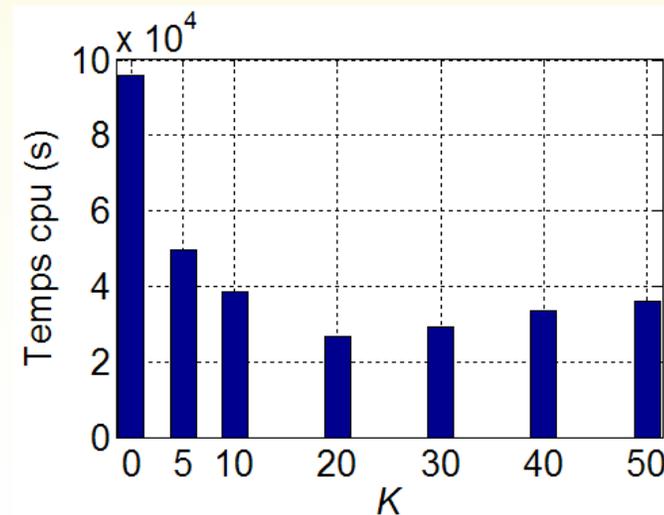
➔ valeurs estimées très proches des valeurs exactes

➔ convergence la moins rapide obtenue sur le contour de la liaison

➔ confirmation des observations issues de l'étude de sensibilité

Actualisation de la matrice de sensibilité

- **Temps de calcul des estimations :**
estimation de la liaison (2) à l'aide de la configuration (d) : 95850 secondes
- **Méthode d'actualisation de la matrice de sensibilité X :**
 - Actualisation de la matrice à des itérations judicieusement choisies
 - Introduction de paramètres de convergence :
 - ➔ bornes inférieure et supérieure τ_J^{inf} , τ_J^{sup} du taux de variation du critère, période d'actualisation K
 - ➔ valeurs de τ_J^{inf} , τ_J^{sup} et K : garantir la convergence la plus rapide possible (en temps) du critère
 - Temps de calcul de l'estimation :
 - ➔ gain de temps de calcul quelque soit la valeur de K
 - ➔ valeur optimale $K=20$ (facteur 3,6 par rapport à l'estimation sans méthode d'actualisation)



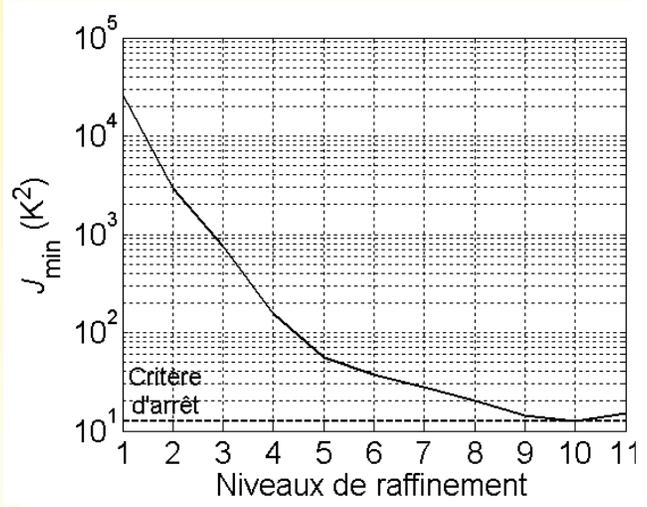
Raffinement progressif de la liaison

➤ Nombre optimal de cellules de la distribution recherchée non disponible dans des conditions expérimentales : méthode de raffinement progressif de la liaison

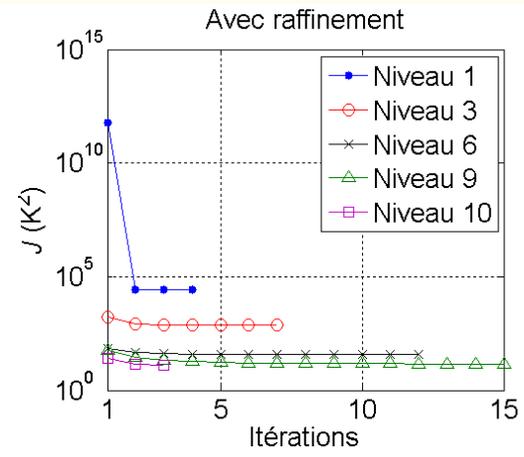
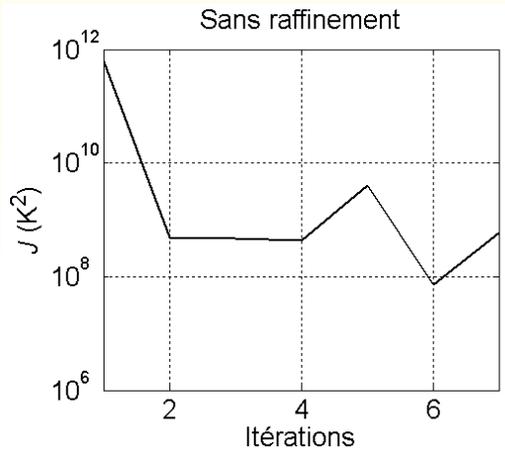
- Application : estimation de la liaison (1) à l'aide de la configuration (e)

➡ méthode d'actualisation de la matrice X également mise en oeuvre

➡ augmentation du critère lors du passage du niveau 10 au niveau 11



- Minimisation du critère pour le cas d'une mauvaise initialisation :



➡ sans raffinement : la minimisation n'a pas lieu

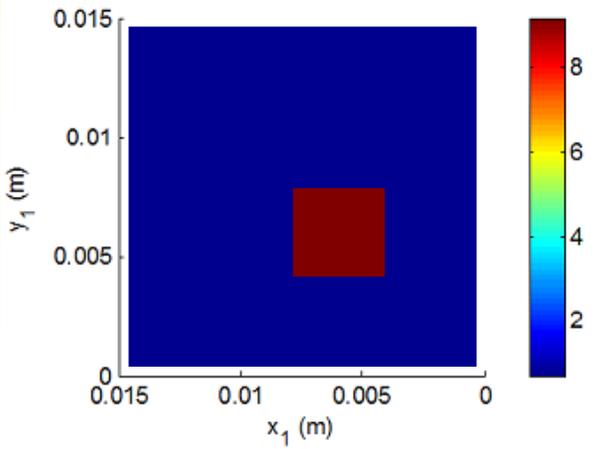
➡ avec raffinement : la minimisation au 1^{er} niveau est réalisée, l'initialisation des niveaux suivants est optimisée

Raffinement associé à une partition non régulière de la liaison

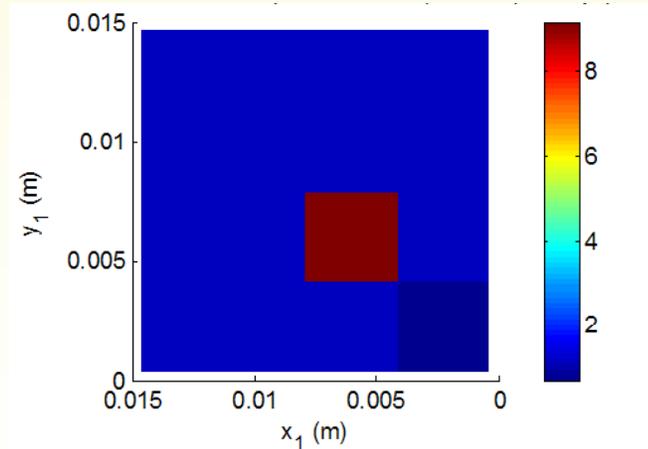
➤ Identification de la forme des zones de la liaison où la résistance est constante et de la valeur de la résistance sur chaque zone :

- Indicateurs de raffinement [H. B. Amour, G. Chavent, *Inverse Problems*, 2002] : multiplicateurs de Lagrange donnant la sensibilité du critère à la perturbation occasionnée par une nouvelle partition
- Intérêts : recherche de discontinuités très localisées, diminue le nombre de paramètres à estimer

➤ Première simulation sur un cas simple (configuration de sources (b)):



Distribution exacte de résistance ($10^6 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$)



Distribution estimée de résistance ($10^6 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$)

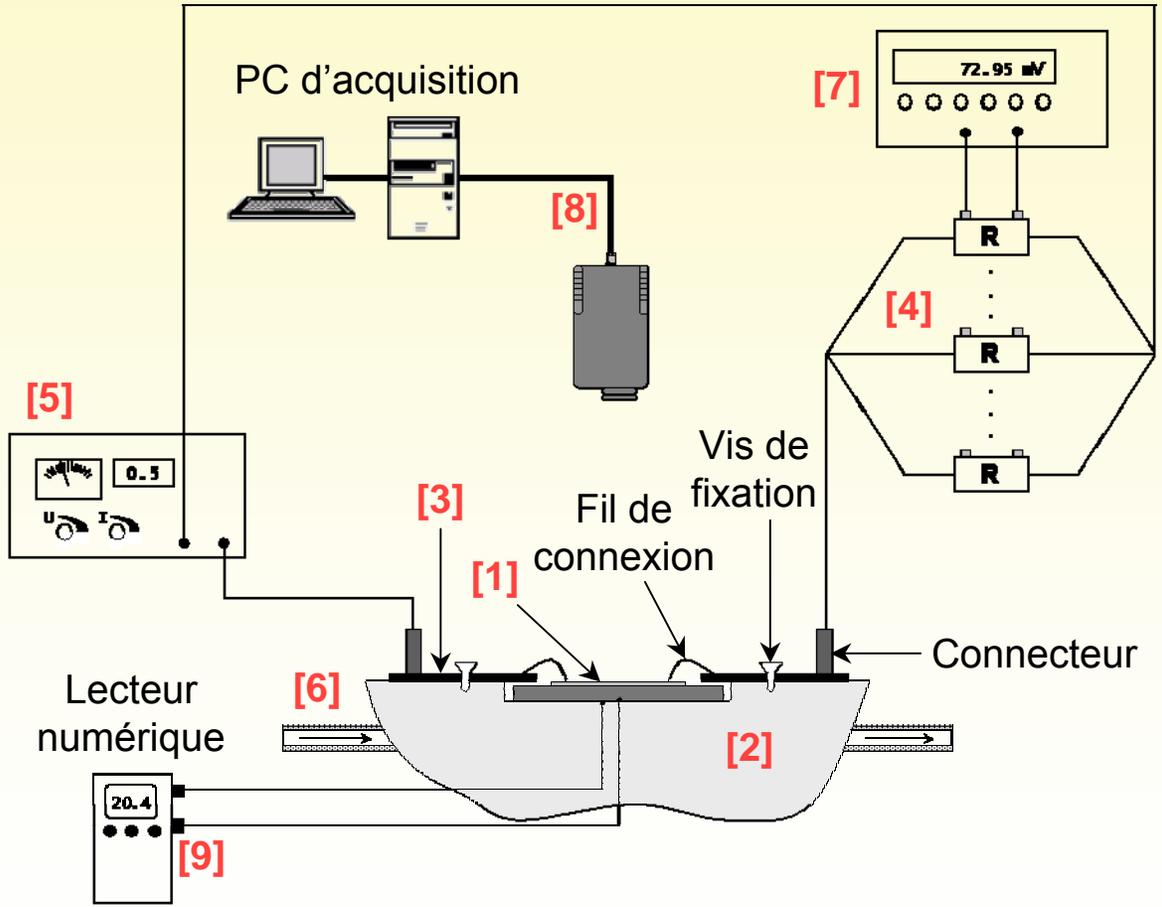
➔ *distribution exacte : 2 valeurs de résistance sur une grille régulière de 16 zones*

➔ *distribution estimée : 3 valeurs de résistance*

➔ *la «sur-paramétrisation» est largement atténuée*

Dispositif expérimental

➤ **Objectif du dispositif :** détection de défauts ou d'hétérogénéités à la liaison de deux éléments d'assemblage



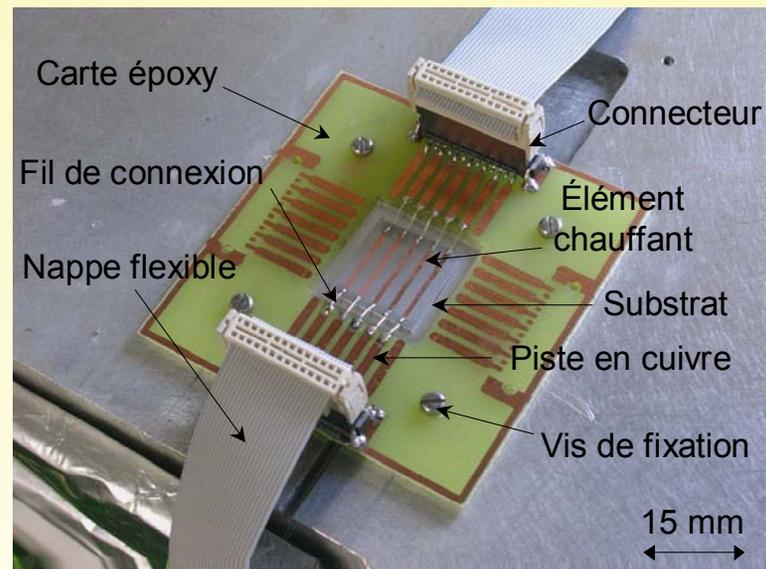
- [1] : Assemblage à caractériser
- [2] : Boîtier thermostaté
- [3] : Circuit imprimé d'interconnexion
- [4] : Résistances électriques étalon
- [5] : Alimentation électrique
- [6] : Alimentation fluide
- [7] : Multimètre numérique
- [8] : Dispositif de thermographie IR
- [9] : Thermocouples type K

Représentation schématique du dispositif expérimental

Éléments du dispositif de mesure

➤ Circuit imprimé d'interconnexion :

- Rôle : assurer la distribution du courant dans les éléments chauffants
- Pistes en cuivre sur carte époxy, connecteurs et nappes flexibles
- Élément chauffant placé en série avec une résistance électrique étalon



➤ Système de thermographie IR :

- Caméra ThermoVision[®] 320M : microbolomètres 320×240 pixels (400 à 100 μm de côtés), 7,5-13 μm
- Résolution thermique : 0,1°C à 30°C pour une précision de $\pm 2\%$ de la gamme de température étudiée
- Prise en compte de l'émissivité de l'objet visualisé, de la distance de visée, de la température et de l'humidité de l'air ambiant

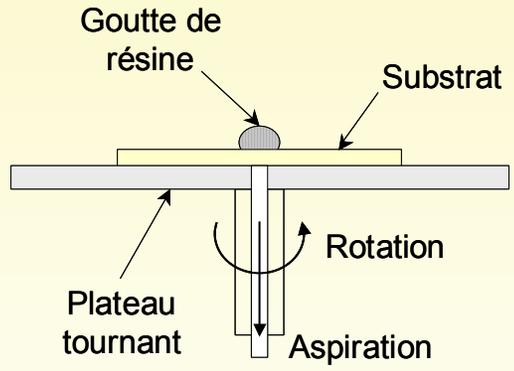


Caractérisation thermique de défauts d'assemblage

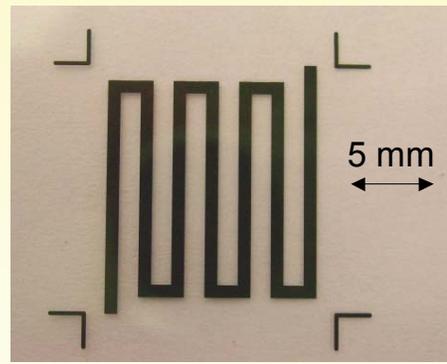
Élaboration des éléments chauffants

➤ **Principe** : réaliser les éléments chauffants par l'intermédiaire d'une résine photosensible à l'aide du procédé de photolithographie

➤ **Étapes du procédé** :

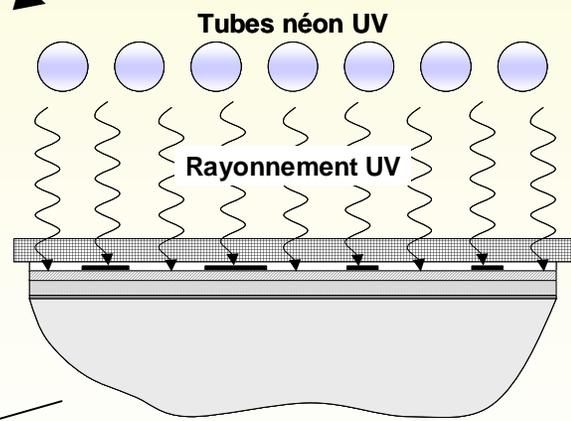


Dépôt de résine sur le substrat à l'aide d'une tournette

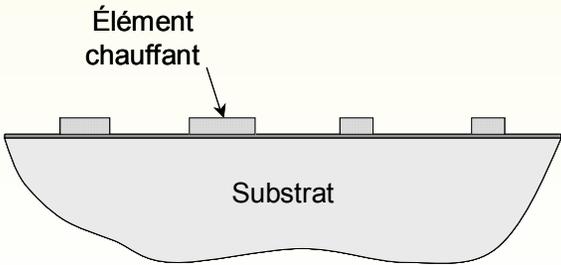


Impression des motifs d'éléments chauffants

Alumine	Typon
Chrome	Motif
Cuivre	Film
Résine	



Insolation du substrat



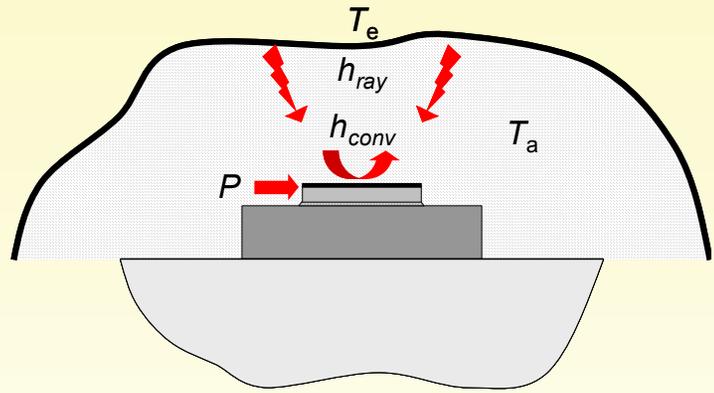
Gravure chimique

Révélation du substrat

Caractérisation thermique de défauts d'assemblage

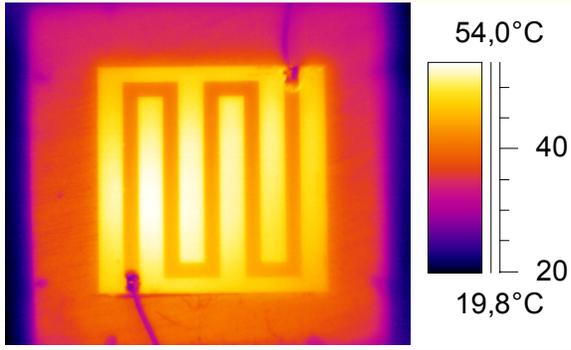
Utilisation d'un revêtement émissif

- **Objectif** : revêtir l'assemblage d'un revêtement d'émissivité élevée dont la valeur est connue dans la bande spectrale de la caméra (0,89 dans l'IR moyen)
- **Vérification numérique** : l'influence du revêtement sur le champ de température au sein de l'assemblage est négligeable
- **Champs de température apparents mesurés** : les niveaux et les gradients de température au sommet de l'assemblage sont cohérents

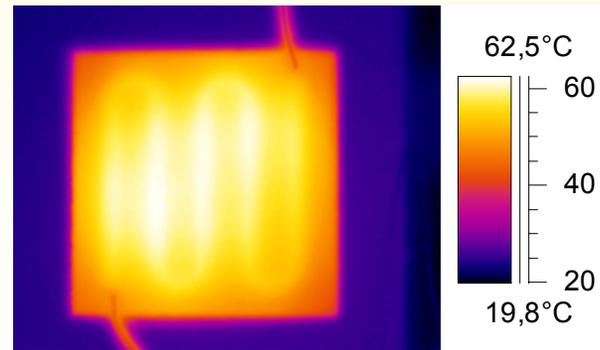


Calcul thermique effectué

(a)



(b)

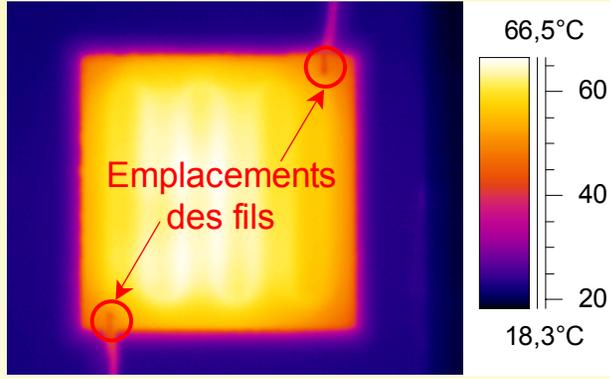


*Excitation thermique d'un assemblage :
(a) sans revêtement, (b) avec revêtement*

Caractérisation thermique de défauts d'assemblage

Influence des fils de connexion électrique

➤ **Présence des fils de connexion :** perturbation locale du champ de température mesuré due aux fuites ou apports thermiques par les fils



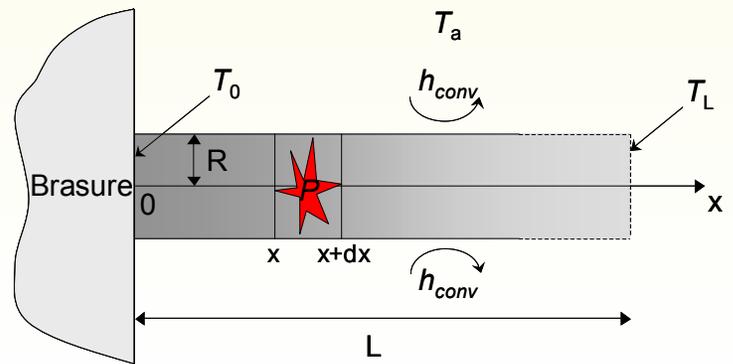
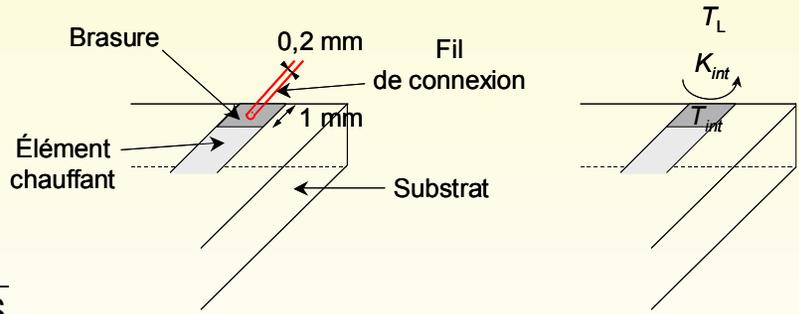
➤ **Modélisation de l'échange thermique entre le substrat et le fil :**

- Condition de troisième espèce sur la surface de contact entre l'élément chauffant et la brasure :

$$\phi_{int} = K_{int}(T_{int} - T_L) \text{ avec } K_{int} = \frac{\sqrt{\lambda h_{conv} \rho S}}{S_{int}} \text{ et } T_L = T_a + \frac{\rho I^2}{h_{conv} \rho S}$$

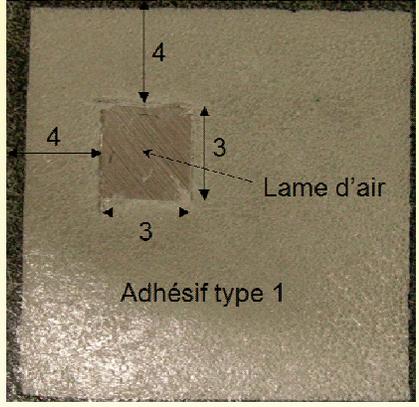
- Corrélation de convection naturelle pour l'échange entre le fil et l'air ambiant (cylindre horizontal) :

$$Nu_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0,559/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \text{ pour } Ra_D < 10^{12}$$

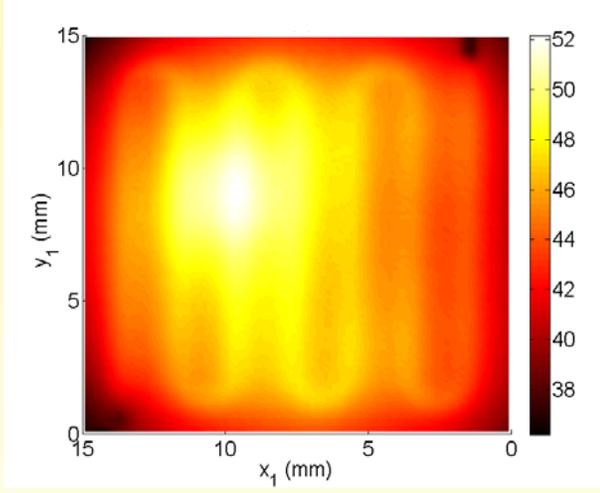


Résultats expérimentaux

➤ Liaison adhésive présentant un défaut : élément chauffant en serpentin

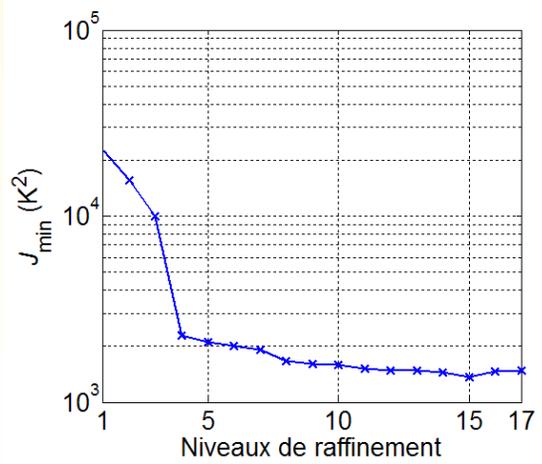


Position de la lame d'air (dimensions en mm)

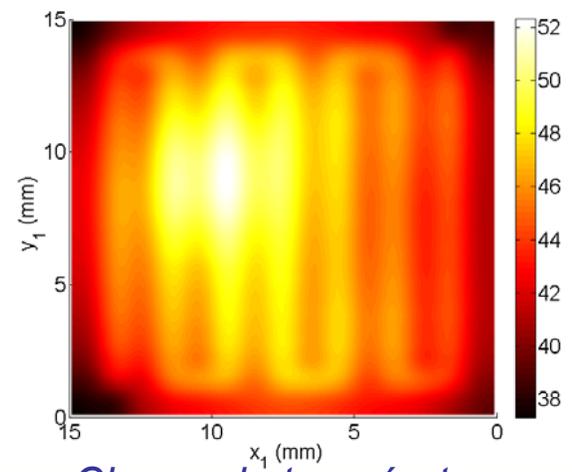


Champ de température mesuré (°C - P=6,5 W)

➤ Minimisation du critère (raffinement de la liaison et actualisation de X) :



Critère minimum à chaque niveau de raffinement



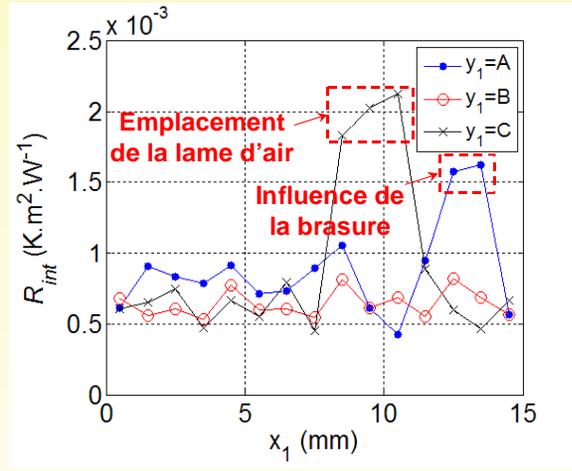
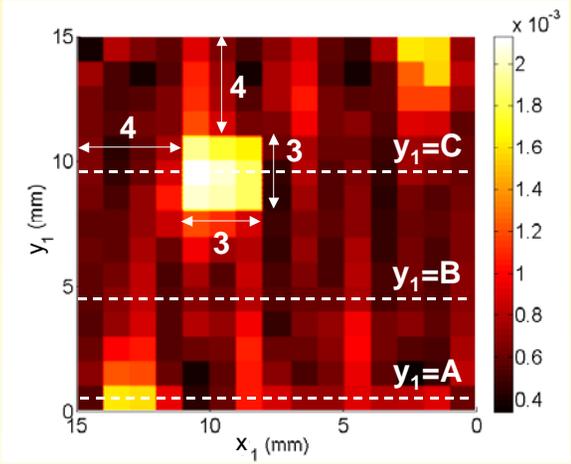
Champ de température estimé (°C)

➔ minimum du critère atteint au niveau de raffinement n°15 (225 cellules de discrétisation)

➔ bonne compatibilité entre les champs de température mesuré et estimé

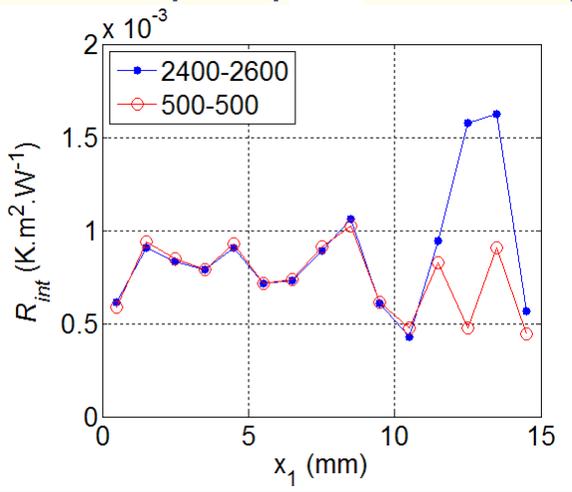
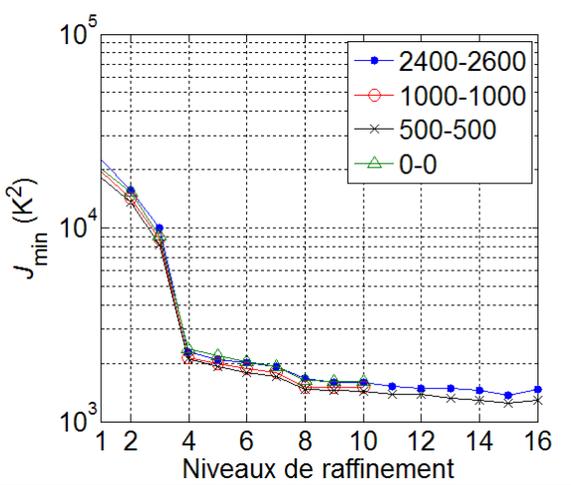
Résultats expérimentaux

➤ Résultats de l'estimation : distribution et profils de résistance thermique estimée ($K.m^2.W^{-1}$)



- ➔ disposition de la lame d'air tout à fait restituée
- ➔ niveaux de résistance compatibles avec la liaison réalisée
- ➔ résistance surestimée sur les zones surplombées par les brasures

➤ Influence des conductances thermiques prises en compte sur les brasures :



- ➔ valeurs de conductance calculée trop élevées
- ➔ modélisation imparfaite des fuites thermiques, incertitude concernant la corrélation de convection naturelle

- **Problématique des transferts thermiques aux interfaces des composants électroniques de puissance**

- **Développement d'une technique de mesure pour la caractérisation thermique de défauts et d'hétérogénéités à la liaison d'assemblage :**
 - modèle direct adapté aux mesures infrarouges
 - méthode d'estimation de distribution 2D de résistance thermique
 - raffinement progressif de la liaison, actualisation de la matrice de sensibilité
 - mise au point d'un dispositif expérimental
 - traitement d'images acquises par thermographie infrarouge
 - validation du dispositif sur la caractérisation de liaisons adhésives

- **Améliorations futures de la méthode de mesure :**
 - développement de la méthode de raffinement associée à une partition non régulière de la liaison
 - passage en régime transitoire