

Caractérisation d'une mémoire à changement de phase

Mesure de propriétés thermiques de couches minces à haute température

Vincent Schick, Jean-Luc Battaglia, Andrzej Kusiak, Clément Rossignol, Claudia Wiemer, Andrea Cappella



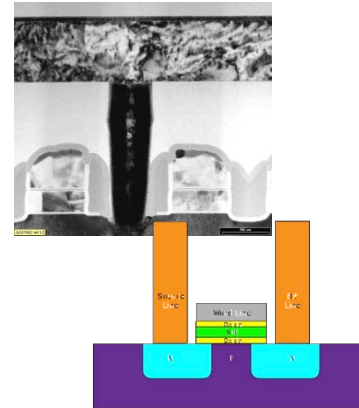
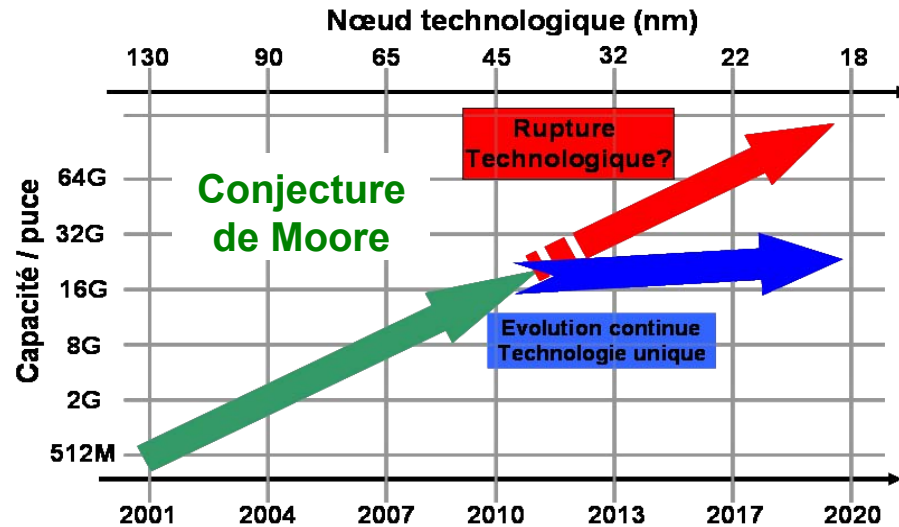
Journée SFT 18/11/2011

Caractérisation thermo-physique et applications micro-électroniques



Contexte général de l'étude

Mémoire non volatile semi-conducteur



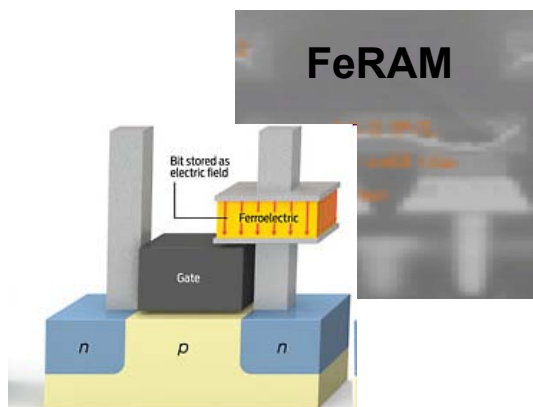
Flash

Limitation actuelle
(Mémoire FLASH)

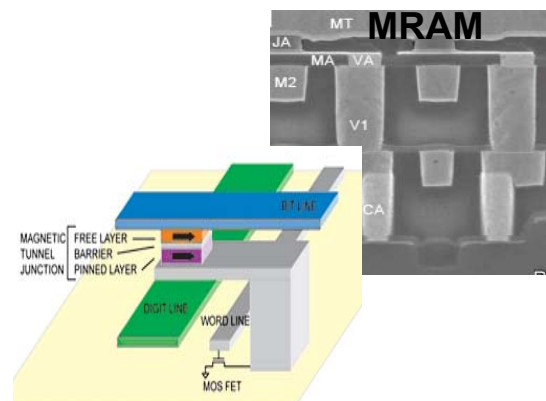
- Vitesse d'écriture
→ 5-10 μ s
- Cycle
→ $10^5 - 10^6$
- Puissance
→ 5V x 1mA

Nécessité d'une rupture par rapport à la technologie actuelle

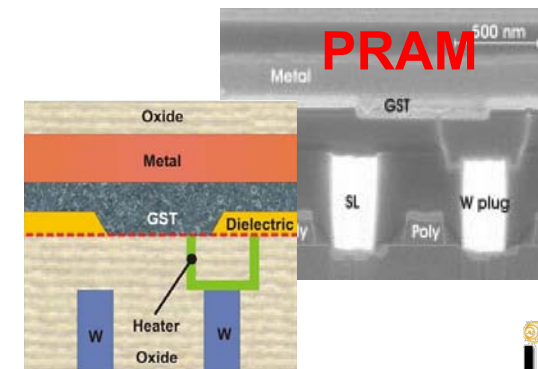
FERROELECTRIQUE



MAGNETIQUE



CHANGEMENT DE PHASE



Comportement thermique d'une mémoire à changement de phase

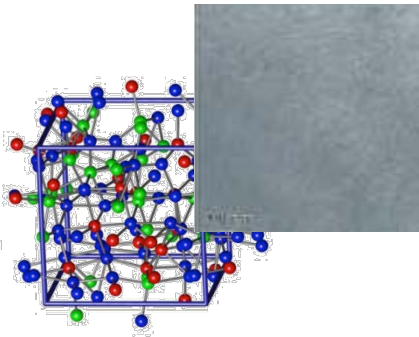
Principe de fonctionnement

Matériaux à changement de phase

Structure des mémoires

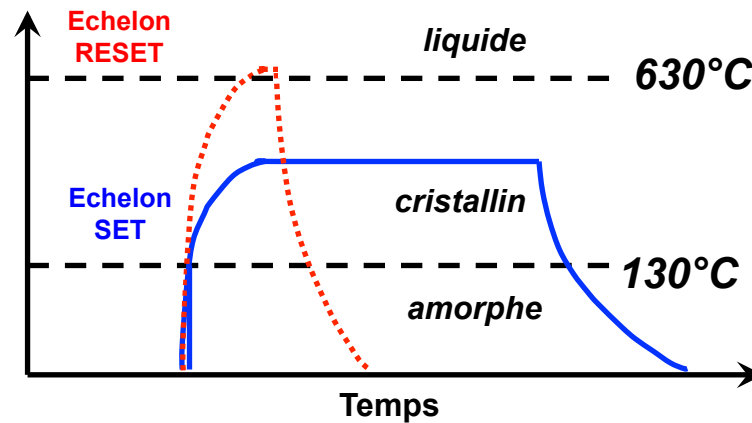
Principe de fonctionnement

Amorphe

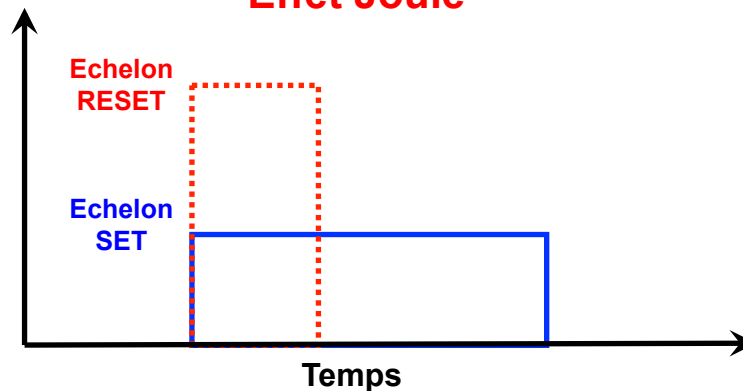


- Haute résistivité électrique
- Ordre à courte distance ($\sim \text{Å}$)

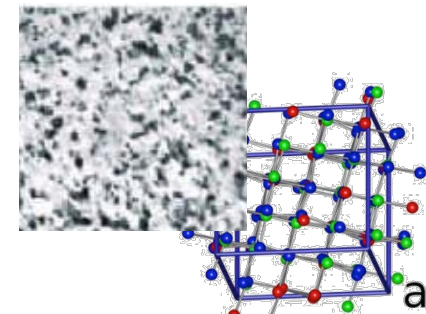
0



Effet Joule



Cristallin



- Faible résistivité électrique
- Ordre à longue distance

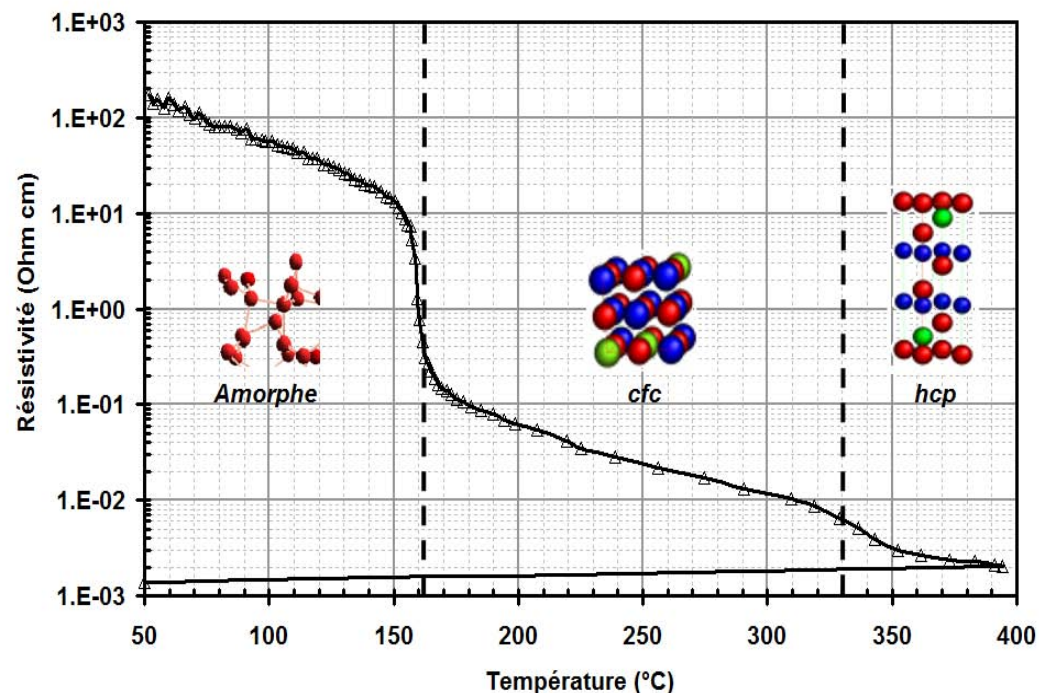
1

Matériaux à changement de phase

Alliage des systèmes Ge-Sb-Te

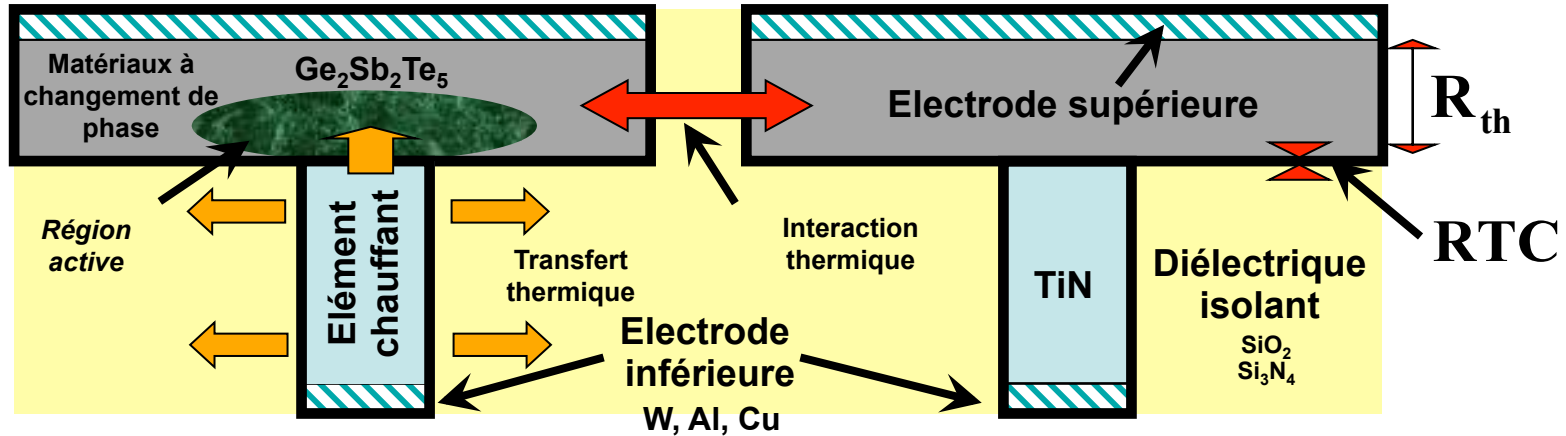
■ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST 225)

- Amorphe jusqu'à 130°C
- 130-300°C Cristallin Cubique Face Centré (cfc)
- Au-delà de 300°C Cristallin Hexagonal (hcp)
- Après 630°C Fusion



Fallica, R.; Battaglia, J.-L.; S.Cocco; Monguzzi, C.;
Teren, A.; Wiemer, C.; Varesi, E. & Fanciulli, M.
Journal of Chemical and Engineering Data, 2009, 54, 1969-1701

Structure des mémoires



- Dimensionnement thermique
 - Transfert thermique lié au chauffage par effet joule
 - Interaction thermique entre les cellules
- Simulation du comportement de la cellule
 - Électrique et thermique (multiphysique)
 - Connaissance des propriétés thermiques
 - Capacité thermique
 - **Conductivité thermique**
 - **Résistance thermique de contact RTC**

$$R_{th} \approx \frac{e_d}{k_d} \rightarrow \begin{matrix} \nearrow \approx 100 \text{ nm} \\ \longrightarrow \approx 0,2 - 200 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \end{matrix}$$



$$\approx 0,5 \times 10^{-10} - 0,5 \times 10^{-7} \text{ K m}^2 / \text{W}$$

$$\approx \text{RTC}$$

Mesure thermique de couches minces à haute température : Méthodologie

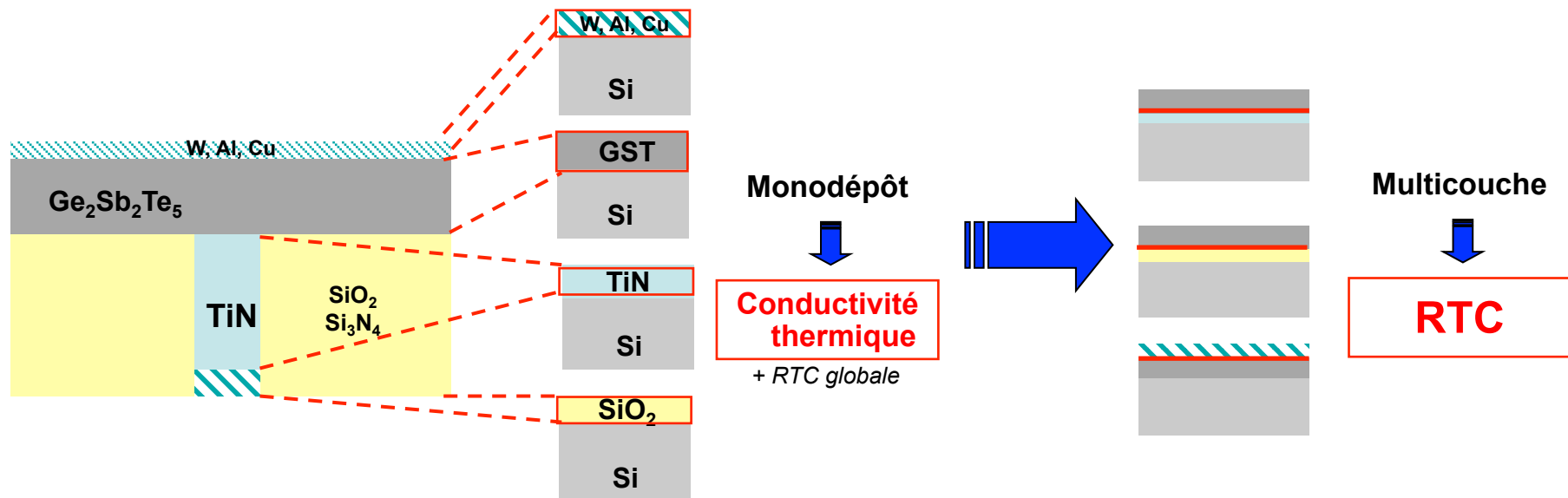
Démarche de l'étude

Choix de méthode de mesure : Échelle de temps

Caractérisations Structurale et Chimique

Démarche de l'étude

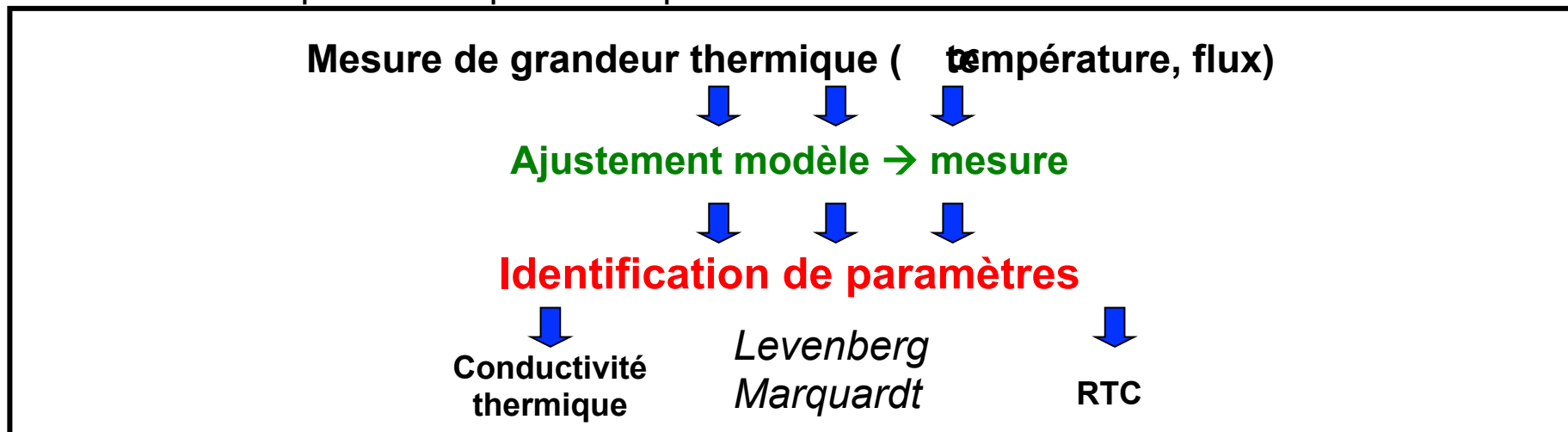
Dépôts de couches minces sur substrat



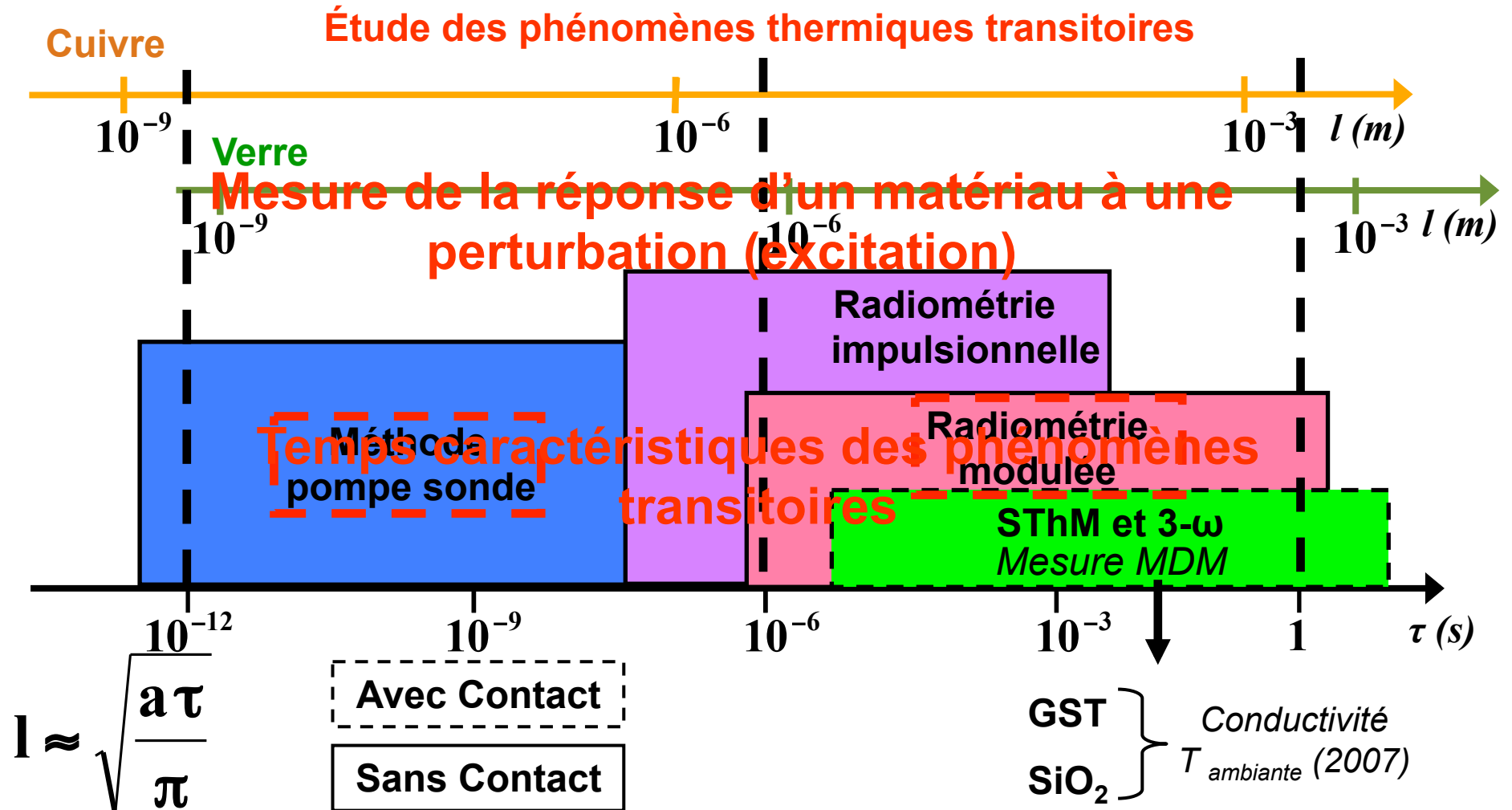
- Conditions expérimentales reproduisant celles de mise en œuvre des PRAM
 - Températures de fonctionnement « solide » 25-400°C
 - Couche mince (~100nm)
 - Procédé de déposition

Démarche de l'étude : méthode inverse

- Problématique expérimentale (**mesure**)
 - Choix du dispositif (adapté à la configuration des systèmes thermiques)
 - Haute température (**20 – 400°C**)
- Problématique théorique (**modèle**)
 - Transfert thermique aux micro et nano-échelles (**~100 nm**)
 - Modèle adapté aux dispositifs expérimentaux



Choix de méthode de mesure : Échelle de temps



Caractérisation Structurale et Chimique

- Certification de la mesure (Avant/Après)

Haute température (20-400°C) 

Accroît les cinétiques de réaction (oxydation)
 Favorise la diffusion des espèces chimiques présentes dans les dépôts

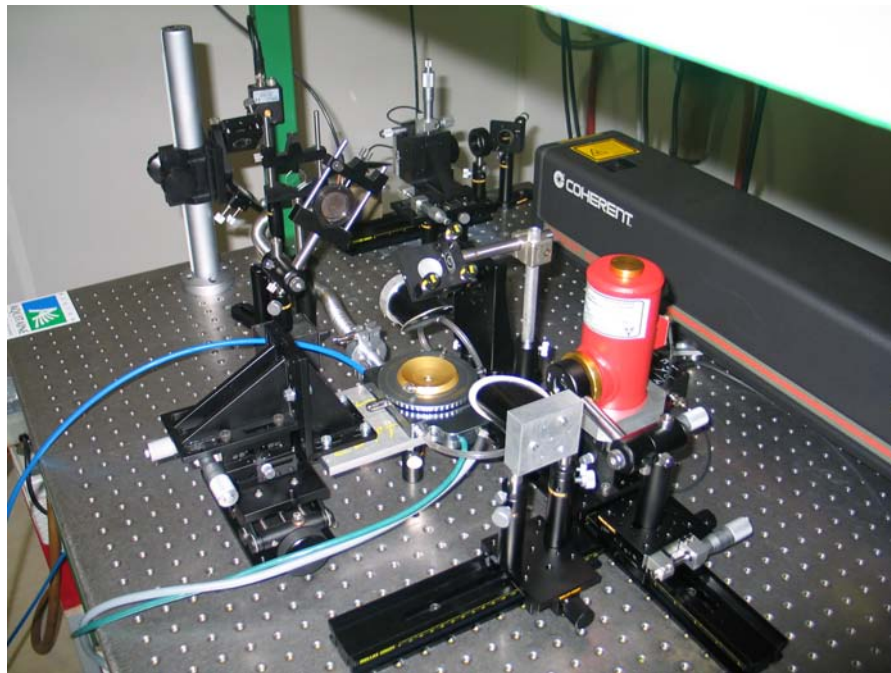
Présence de matériaux « actifs » 

Modification de structures
 Modification de propriétés physiques

Technique	TOF-SIMS	Diffraction Rayon X	MEB	AFM	Ellipsométrie
Mesure	Profil de concentration d'espèces	Structure cristalline	Imagerie (~nm)	État de surface	État de surface
Laboratoire	MDM	MDM	MDM et TREFLE	I2M DUMAS	MDM

Analyses recoupées entre elles et couplées aux mesures thermiques

Mesure de propriétés thermiques par radiométrie photothermique modulée



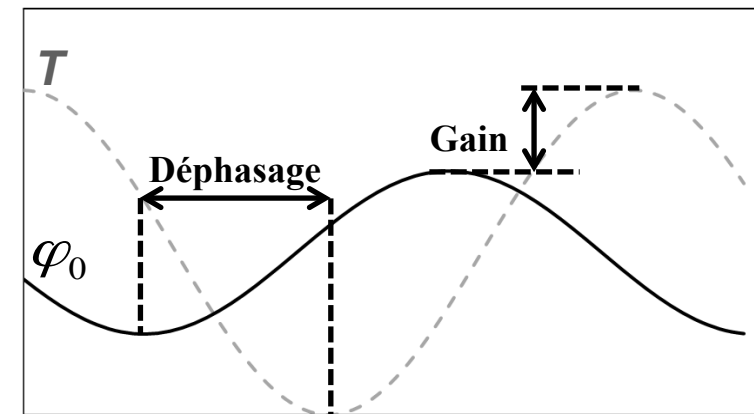
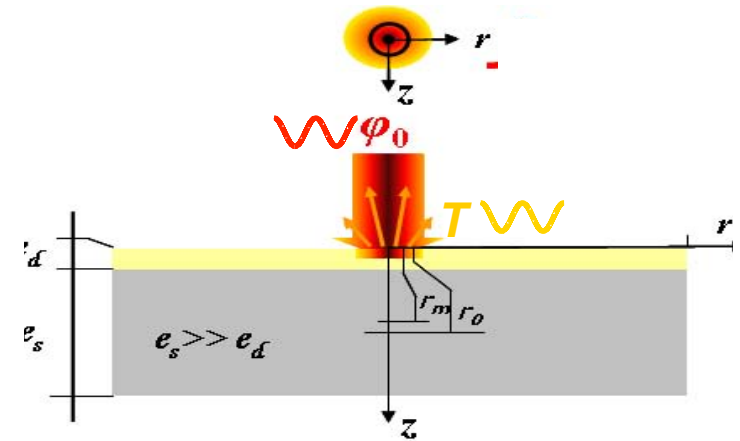
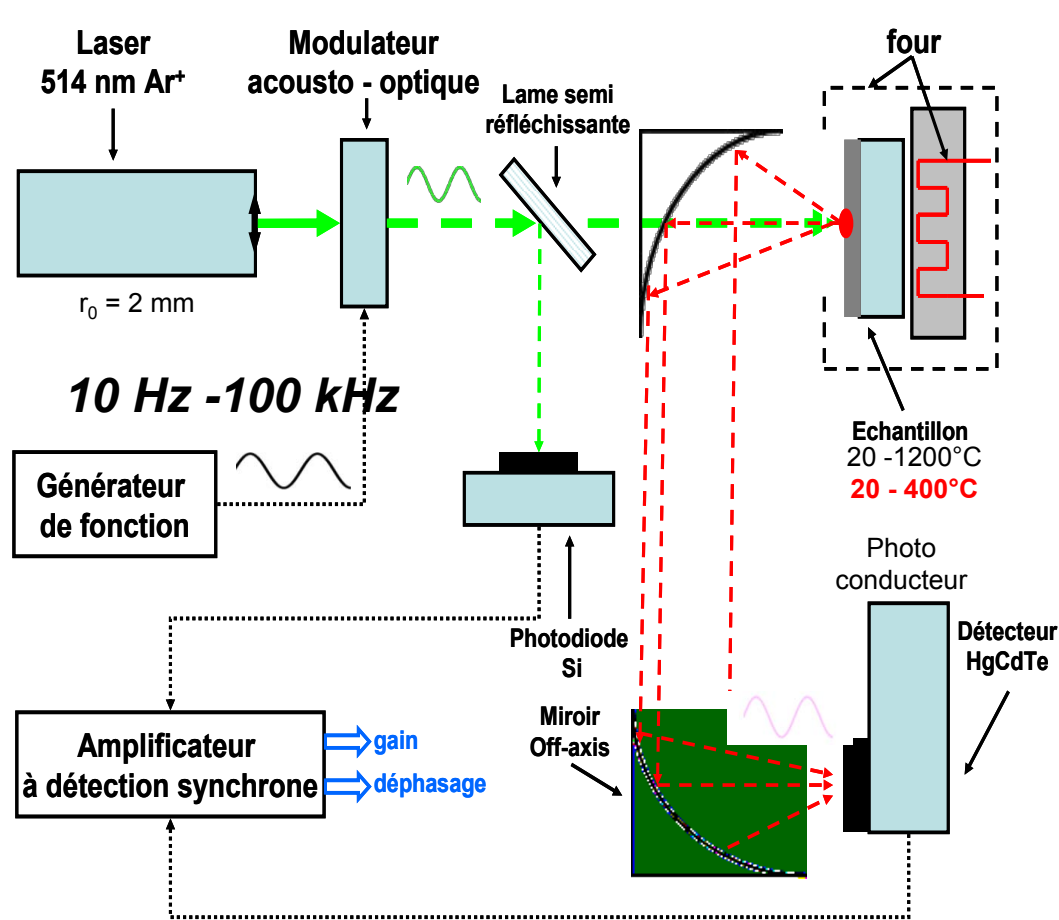
Dispositif expérimental

Préparation des échantillons

Modélisation de l'expérience

Résultats et analyse

Dispositif expérimental



Préparation des échantillons : transducteurs

- Absorption du flux de photons
 - Échelle micrométrique → prise en compte de la loi de Beer-Lambert
 - Importance de κ pour minimiser l'épaisseur d'absorption devant

$$\beta \approx \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \ll l \approx \sqrt{a\tau/\pi}$$

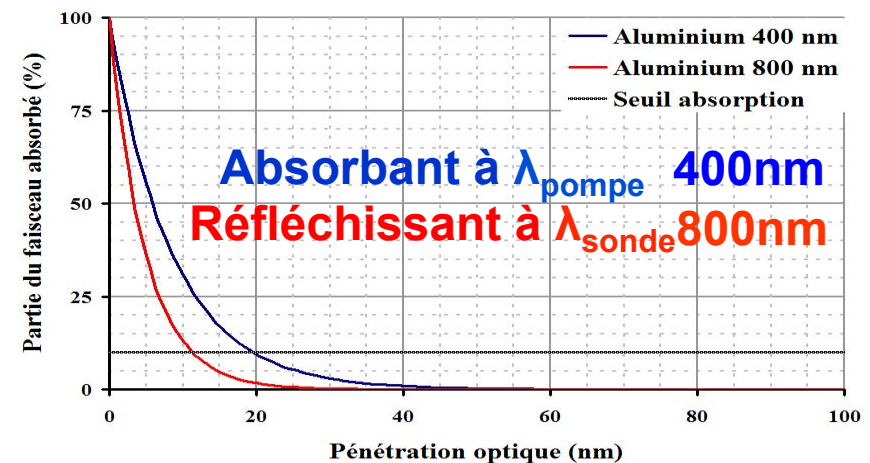
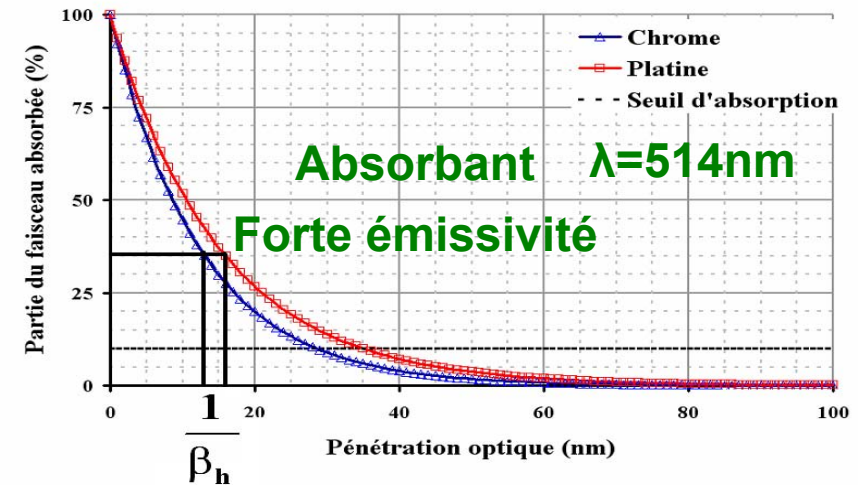
- épaisseur ~10 nm

- Choix : Métal évaporé thermiquement

- **Émission (Radiométrie)**
 - Chrome, Platine
- Réflexion
 - Aluminium, Or

- Blocage du rayonnement non phonique

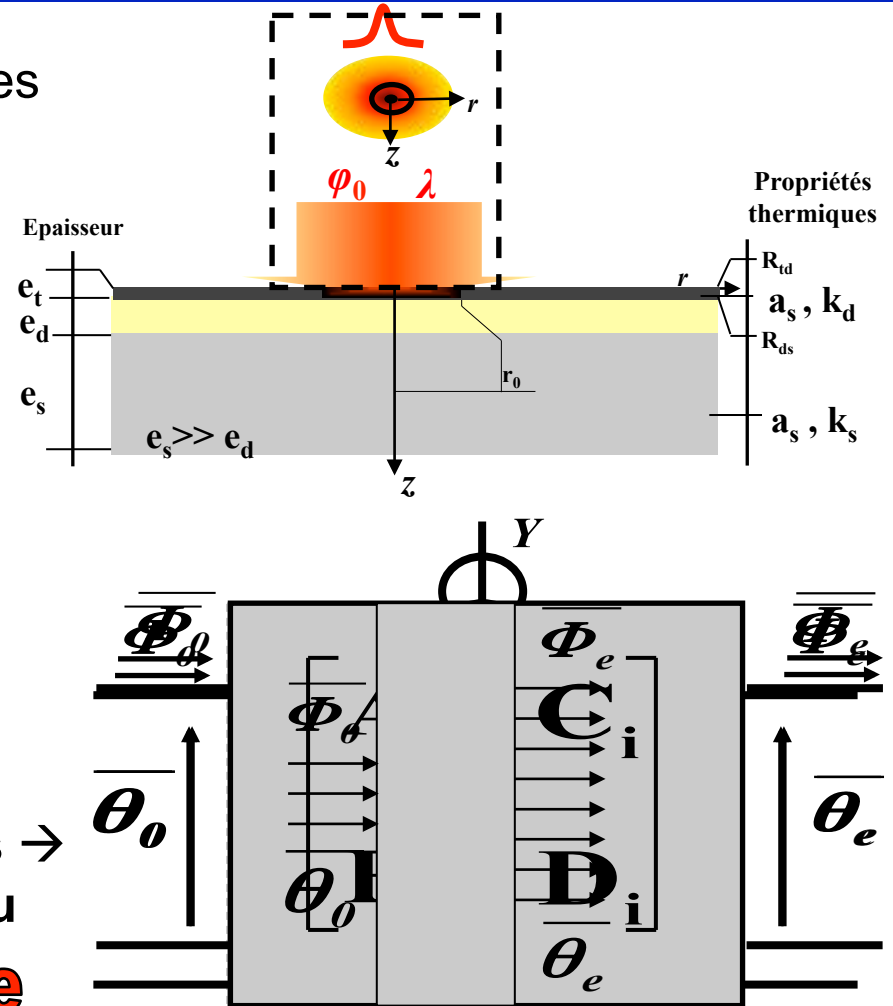
- Matériau semi-transparent
- Matériau semi-conducteur



Modélisation de l'expérience

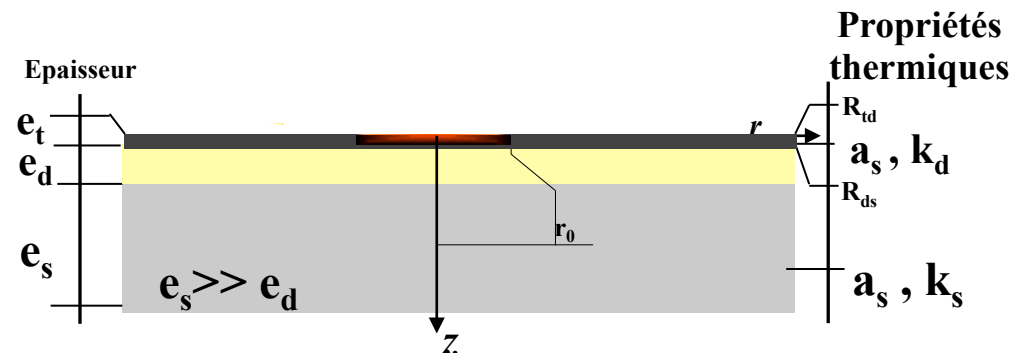
- Configuration expérimentale à trois couches
 - Transducteur – Dépôt – Substrat
- Symétrie axiale
- Résolution de l'équation de diffusion de la chaleur dans le **domaine fréquentiel**
 - Transformées intégrales (Laplace, Hankel)
 - Représentation par quadripôles
- Représentation de chaque couche par un réseau d'impédances
- Absorptions volumiques du flux de photons → **terme source au nœud central du réseau**

→ Solution analytique

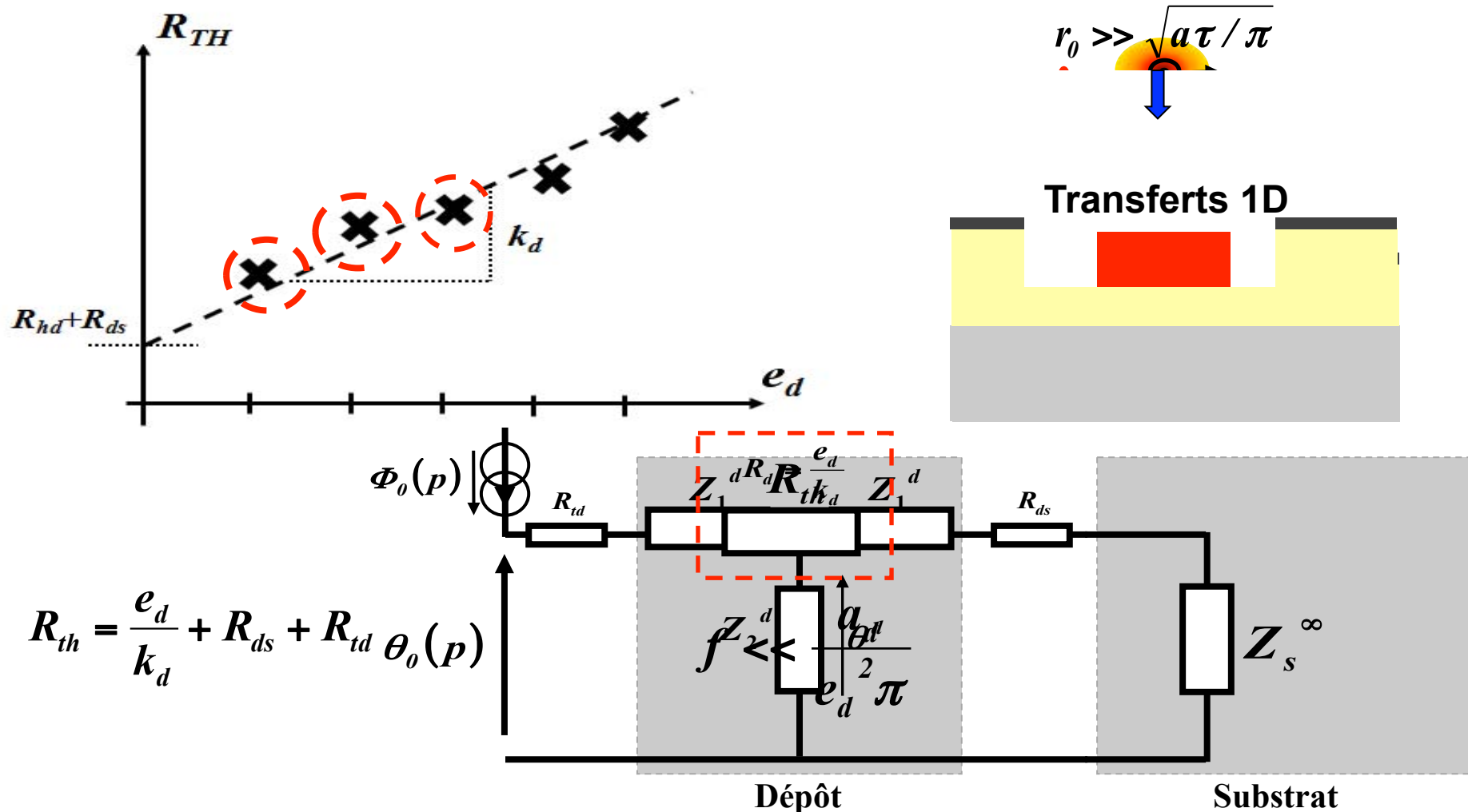


Modélisation de l'expérience

- Substrat
 - Température imposée face arrière ($T=0$)
 - $e_s \gg e_d$
- Dépôt
 - RTC – dépôt/substrat et dépôt/transducteur
- Transducteur
 - Absorption optique terme source (3D)
 - Mince $e \ll z_h$ et $e \sim z_0$
 - Pertes thermiques par convection



Modélisation de l'expérience : Simplification



Résultats et analyse

Mesure des RTC et des conductivités thermiques Identification de R_{th} - mesure de phase (1 – 100kHz)

■ SiO₂ (25 – 500°C)

- Dépôts SAUSG (150 - 300nm)
- Dépôts HDP (50 - 300nm)

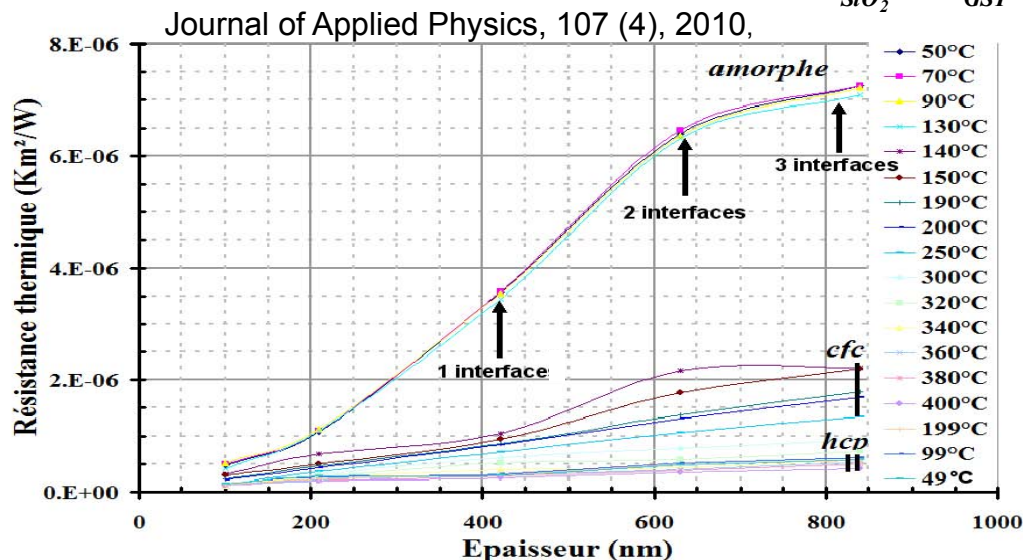
$$R_{th} = \frac{e_{SiO_2}}{k_{SiO_2}} + RTC$$

	k (W/m/K)
SAUSG 25 °C	1,26
SAUSG 500 °C	1,44
HDP 25 °C	1,67
HDP 500 °C	1,30

■ GST (50 – 400°C)

- Dépôts réalisés par pulvérisation cathodique DC magnétron (100 - 840nm)

$$R_{th} = \frac{e_{SiO_2}}{k_{SiO_2}} + \frac{e_{GST}}{k_{GST}} + RTC$$



Résultats et analyse

■ Identification de R_{th} →

- k_{GST} (W/m/K)

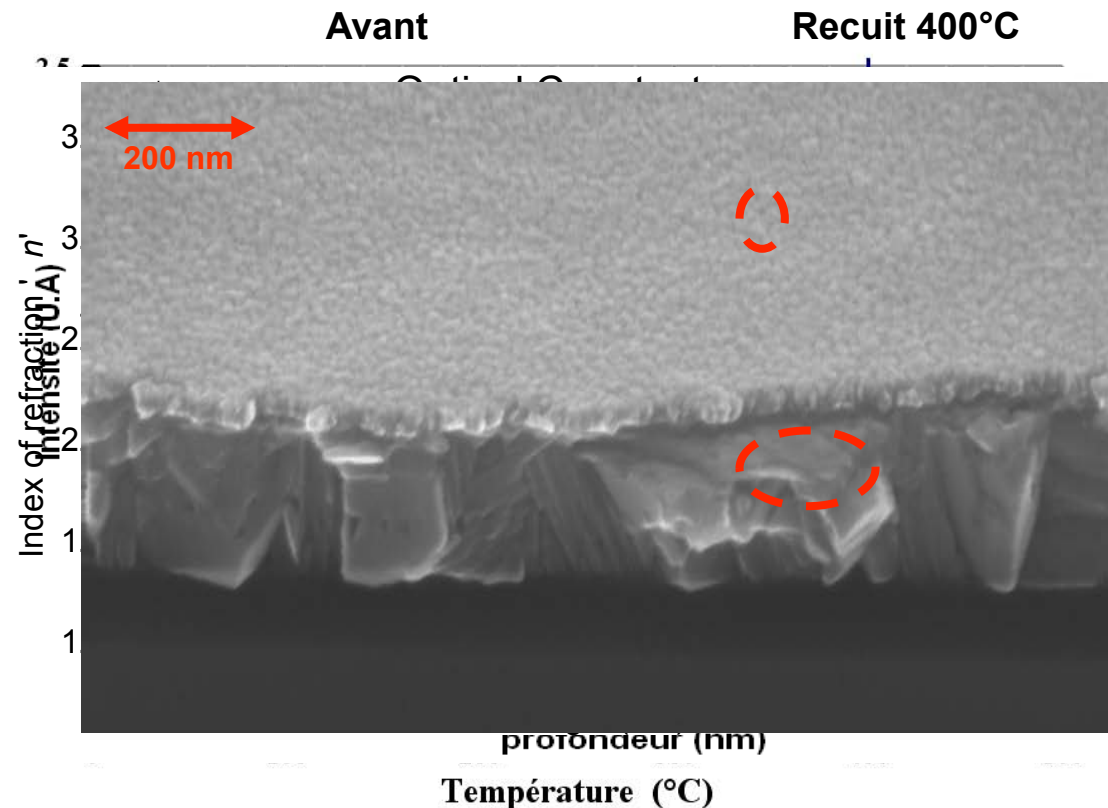
<i>amorphe</i>	<i>cfc</i>	<i>hcp</i>
0,2	0,4-0,9	1,3-2,5

- RTC (Km^2/W)

<i>amorphe</i>	<i>cfc</i>	<i>hcp</i>
5×10^{-8}	10^{-8}	10^{-7}

■ TOF-SIMS – MEB ellipsométrie

- Légère diffusion de Te dans transducteur
- Rugosité du film de platine (abîmé)



Résultats et analyse

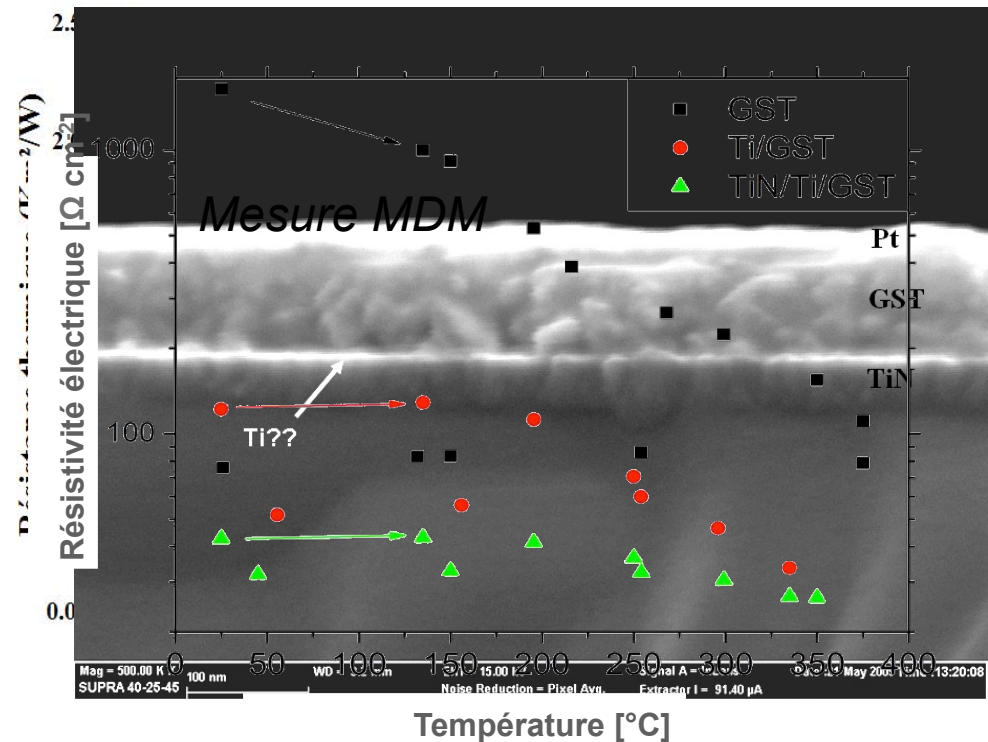
- Ensemble de chauffage d'une mémoire à changement de phase

Si//TiN(40)/*cfc*-GST(70)/Pt(30)
 Si//TiN(40)/Ti(4)/*cfc*-GST(70)/Pt(30)
 (Pulvérisation DC magnétron)

- Identification $R_{th} = \frac{e_{TiN}}{k_{TiN}} + \frac{e_{GST}}{k_{GST}} + RTC$

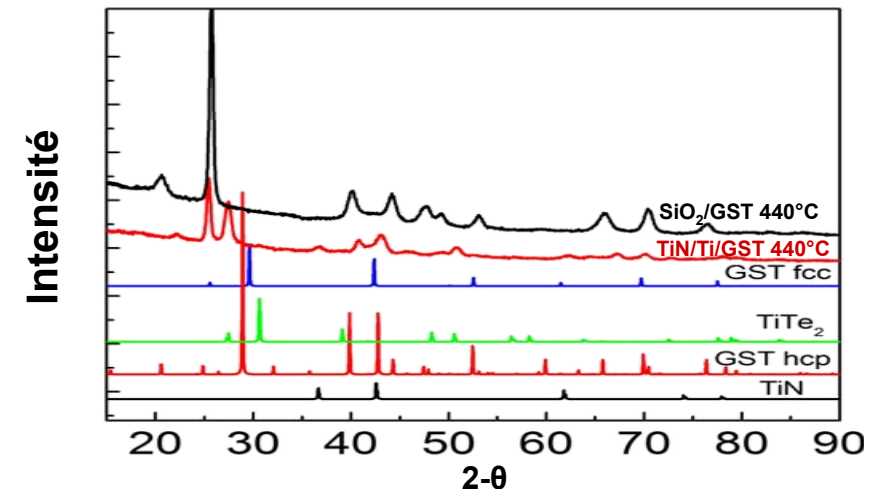
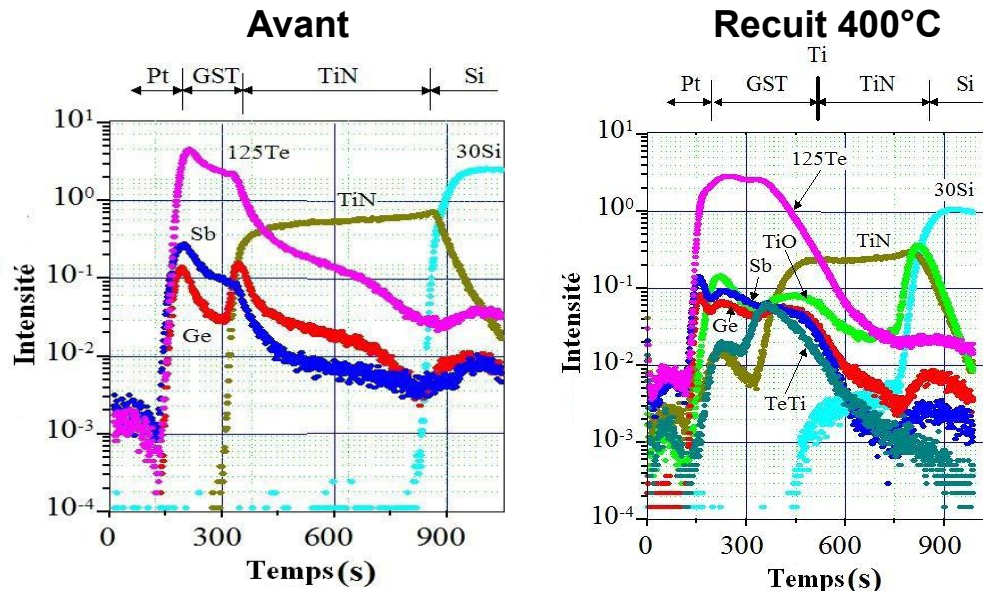
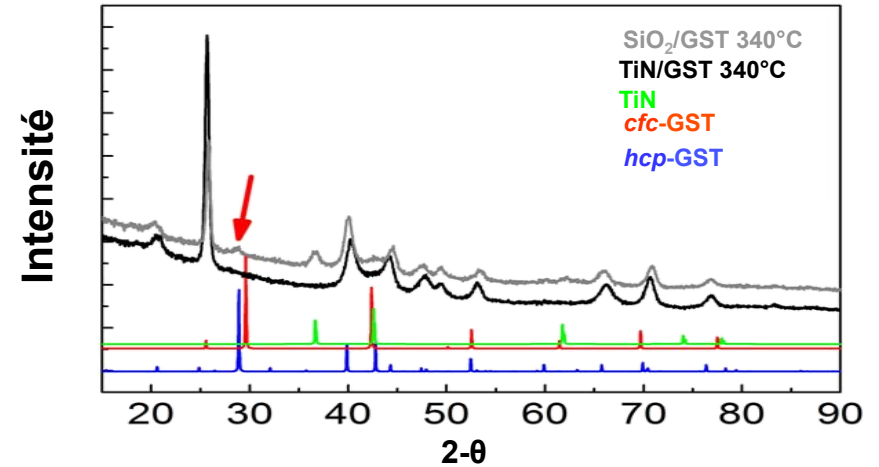
- Résultats

- Ti perturbe transition *cfc-hcp*
- Mesure électrique : présence de Ti, améliore le contact électrique
- Difficulté à discriminer k de RTC

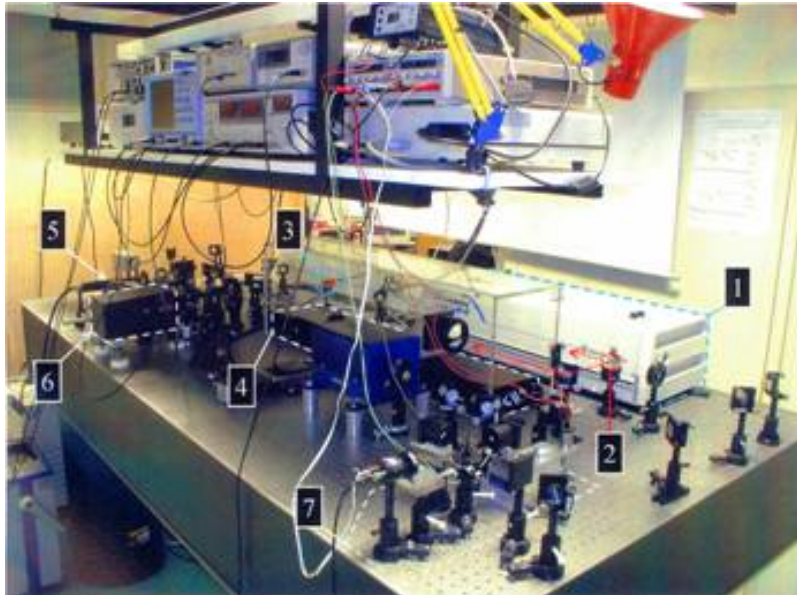


Résultats et analyse

- Diffraction des rayons X
 - GST-*hcp* peu présent lors du recuit
 - Apparition de cristaux Ti-Te
- TOF SIMS
 - Ségrégation du tellure → TiTe_2



Mesure de propriétés thermiques par Thermoréfectométrie pompe sonde



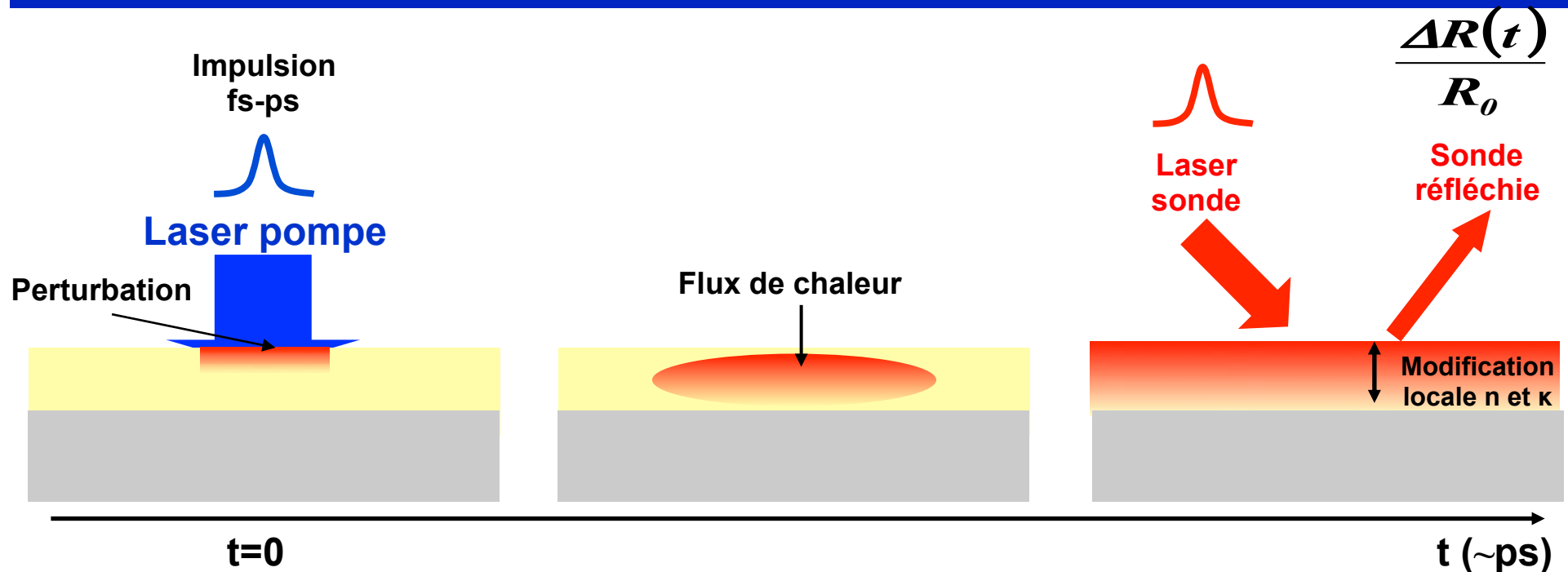
Principe

Dispositif expérimental

Modélisation de l'expérience

Résultats et analyse

Principe



Relaxation thermique

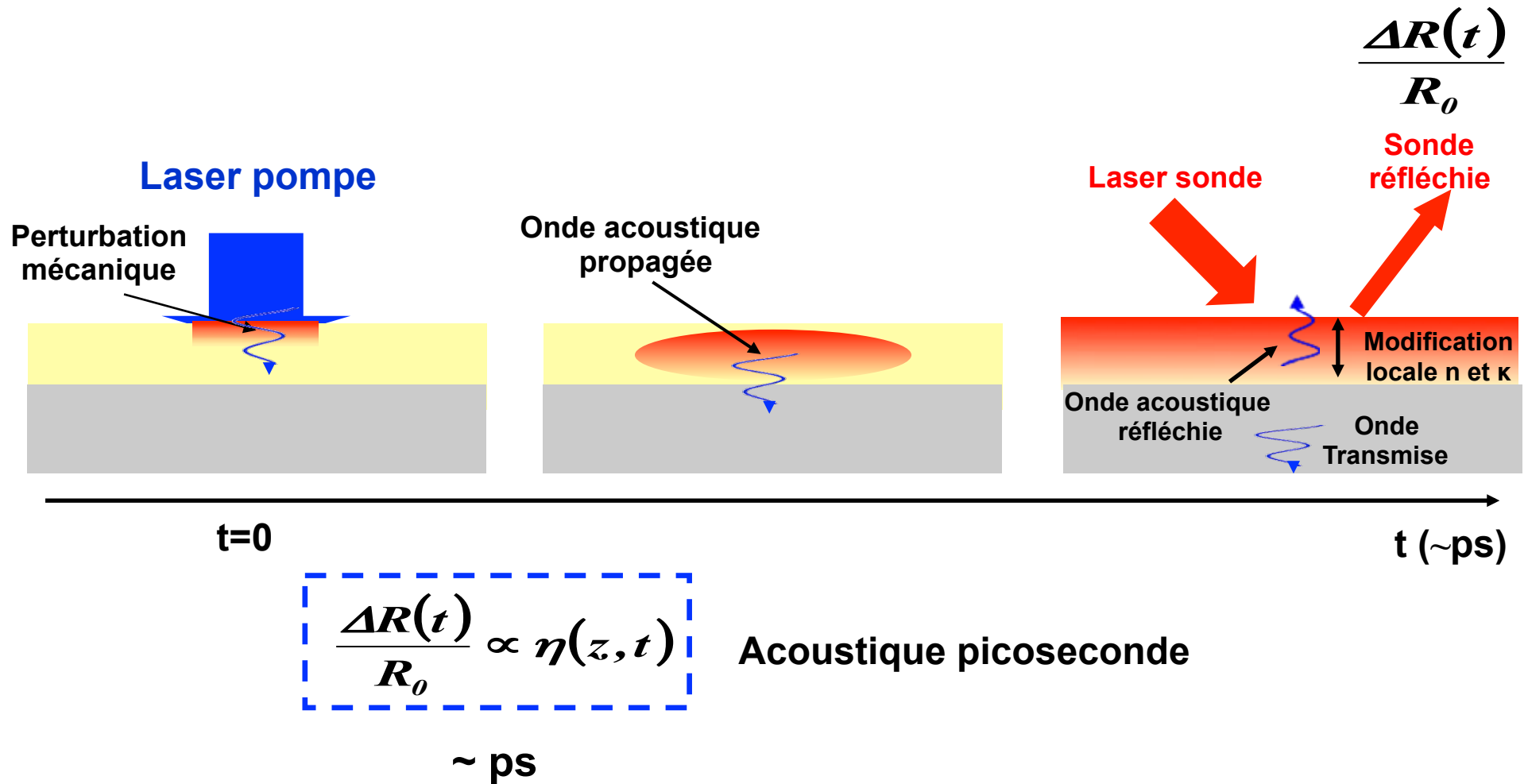
$$\frac{\Delta R(t)}{R_0} \propto \Delta T$$

~ ns

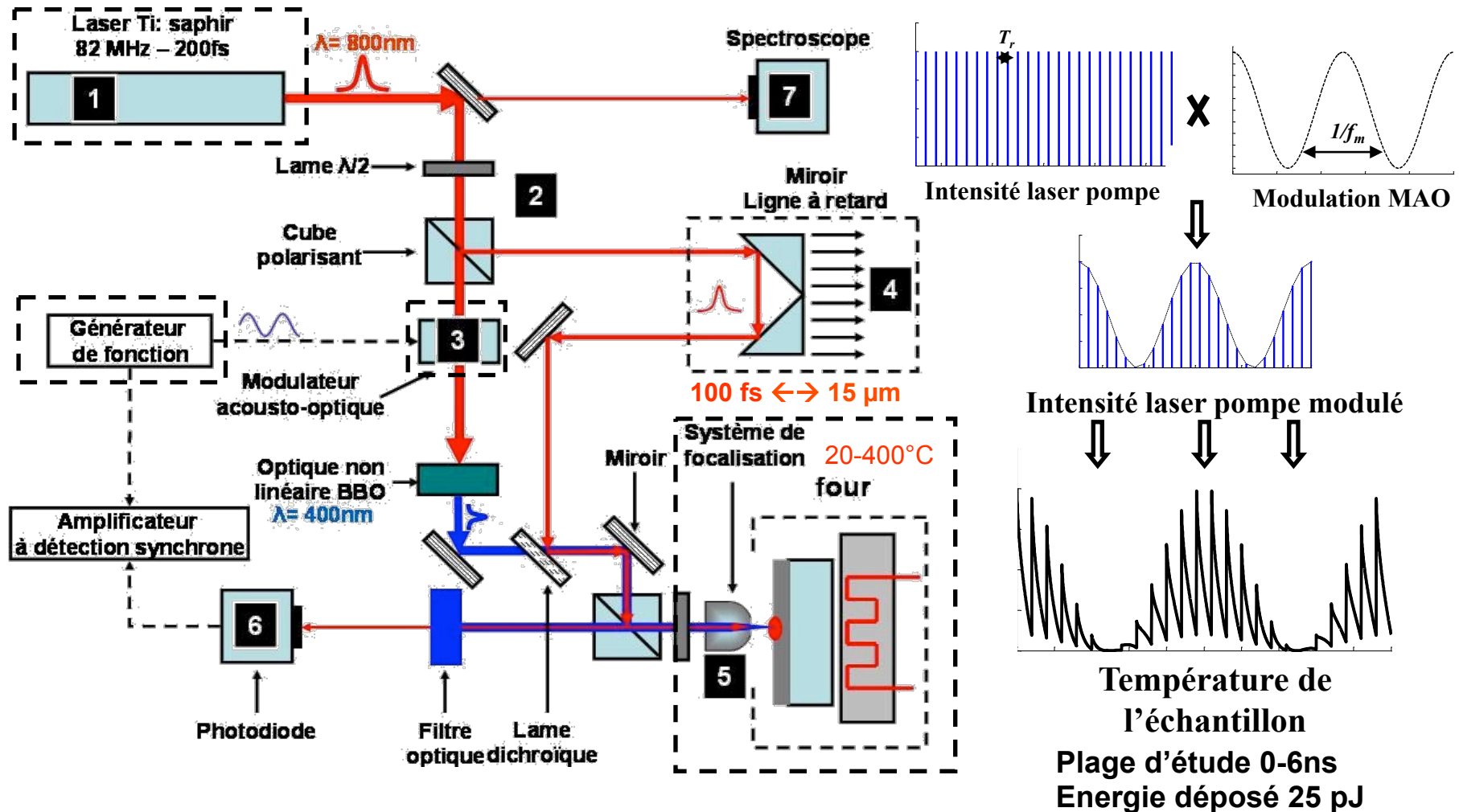


Étude des contacts
GST/métal

Principe



Dispositif expérimental



Modélisation de l'expérience

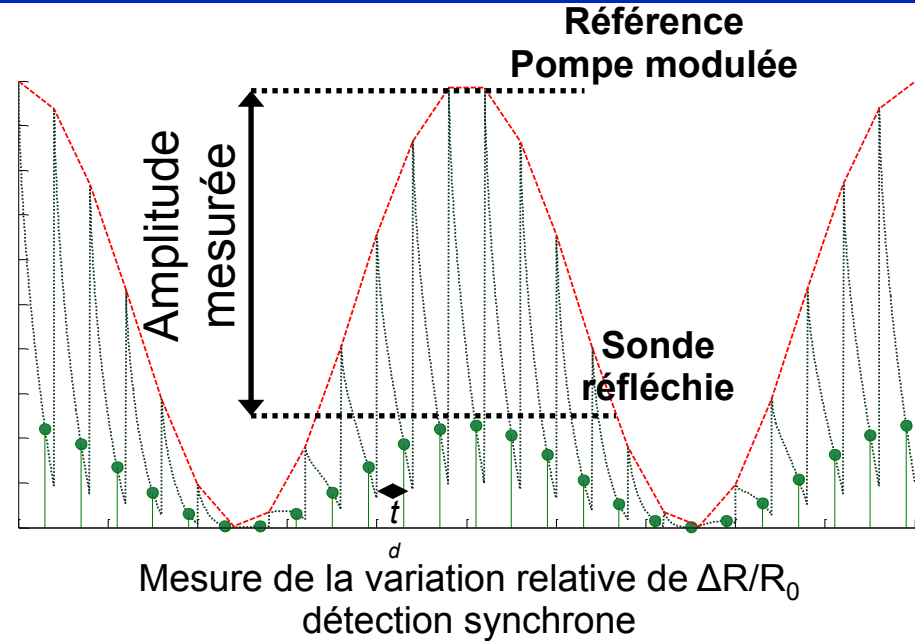
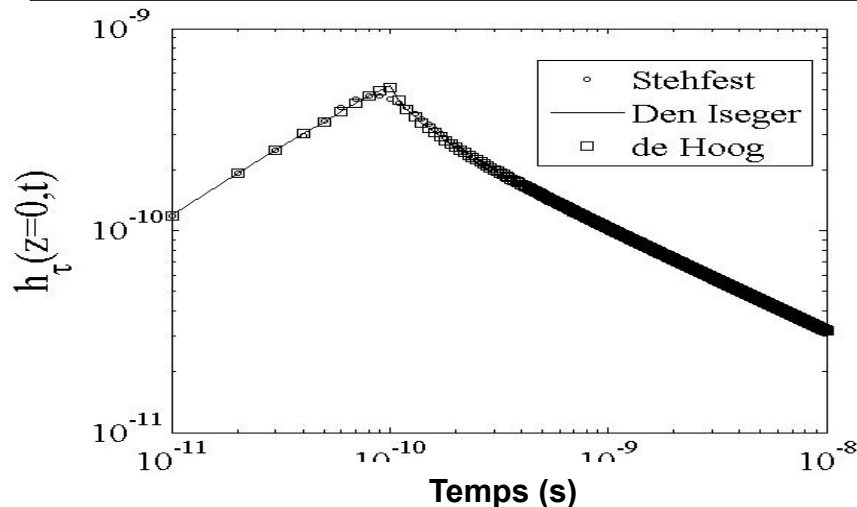
■ Terme d'accumulation

Fonction de transfert θ_t

$$S(t_d) \approx \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \theta_t \left(f_m + \frac{k}{T_r} \right) \exp\left(\frac{2i\pi k t_d}{T_r} \right)$$

Réponse impulsionnelle h_t

$$S(t_d) \approx \sum_{k=0}^{+\infty} h_t(t_d + k T_r) \exp(2i\pi f_m(t_d + k T_r))$$



■ Transformée de Laplace inverse

- Stehfest
- De Hoog
- Den Iseger

Modélisation de l'expérience

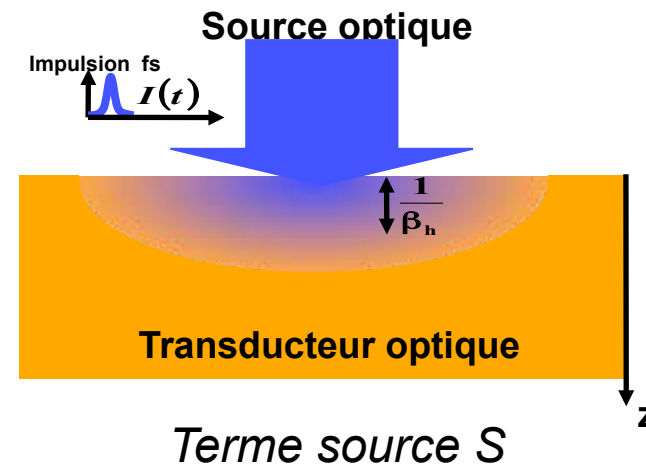
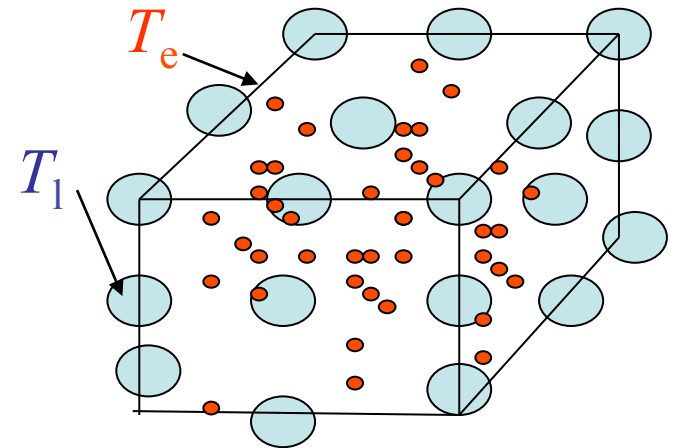
- Grandeurs caractéristiques de l'expérience

- Temps : 100 fs – 12,5 ns
- Longueur caractéristique de diffusion de la chaleur : ~ 10 - 100 nm
- Couche métallique

➔ Contact métal/GST

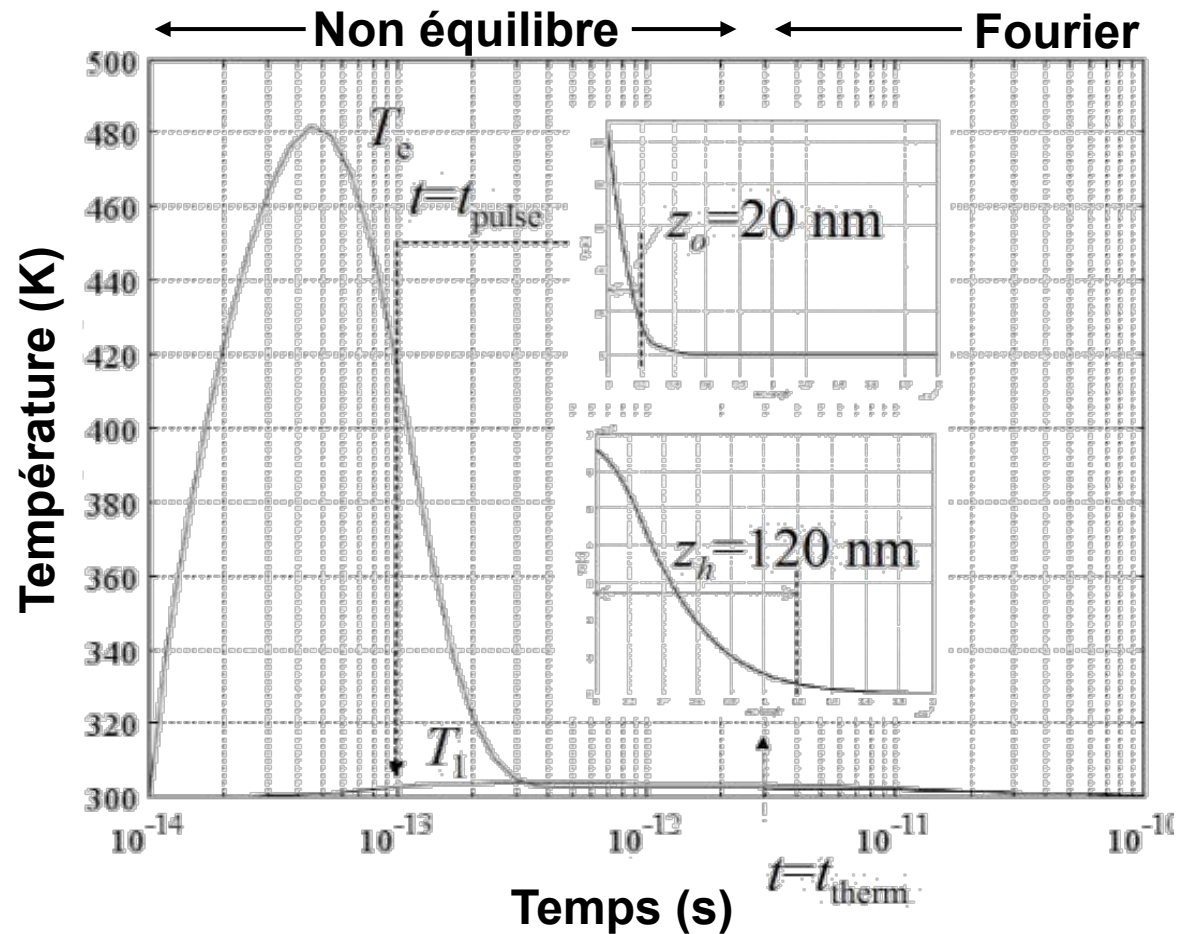
- Utilisation du modèle à deux températures (dépôts métalliques)

$$\begin{cases}
 T_e \text{ électron} & C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} + C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \nabla_{r,z} \cdot [k_e(T_e, T_l) \nabla_{r,z} T_e] + S \\
 T_l \text{ réseau} & C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = g(T_e - T_l) \\
 & S = \frac{T_\lambda}{\beta_o \pi r_h^2} e^{-z/\beta_o} e^{-(r/r_h)^2} I(t)
 \end{cases}$$



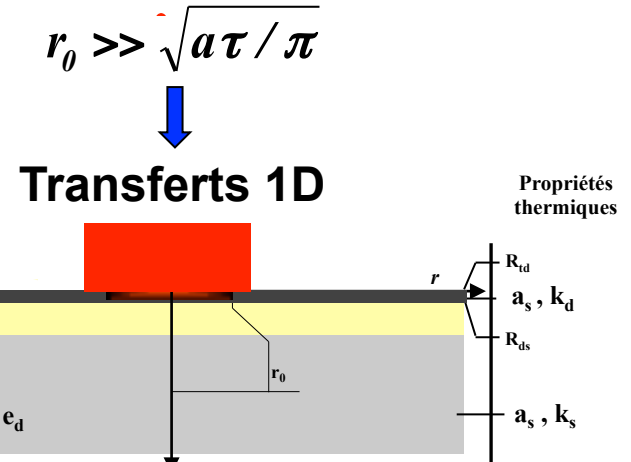
Modélisation de l'expérience

- Simulation 2T par éléments finis pour aluminium
 - Thermalisation du film d'Al entre 3 et 10 ps
 - $z_0 = 20$ nm (optique) et $z_h = 120$ nm (thermique)
- Résolution de l'équation de diffusion de la chaleur possible (~ 10 ps)

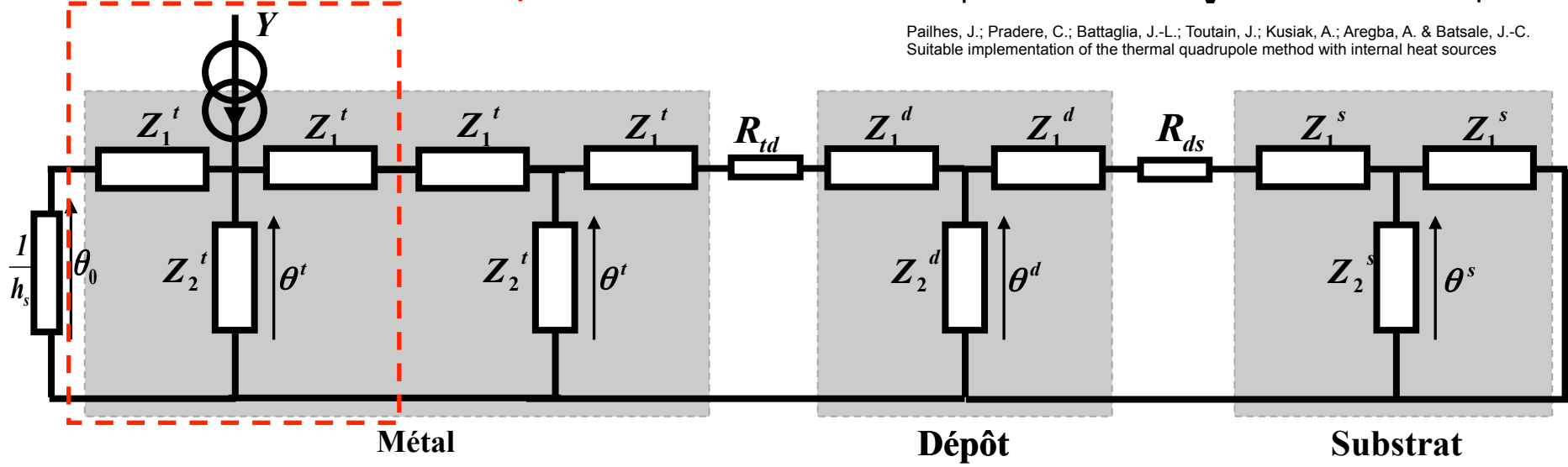


Modélisation de l'expérience : simplification

- Temps trop courts pour l'établissement d'un régime de convection (ns)
- Dépôt à analyser semi – infini $e_d \gg \sqrt{a\tau/\pi}$
- Transducteur Capacitif
 - Mince $e \ll z_h$ et $e \sim z_0$
 - Source d'excitation (quasi Dirac)
- Identification de RTC dépôt/transducteur

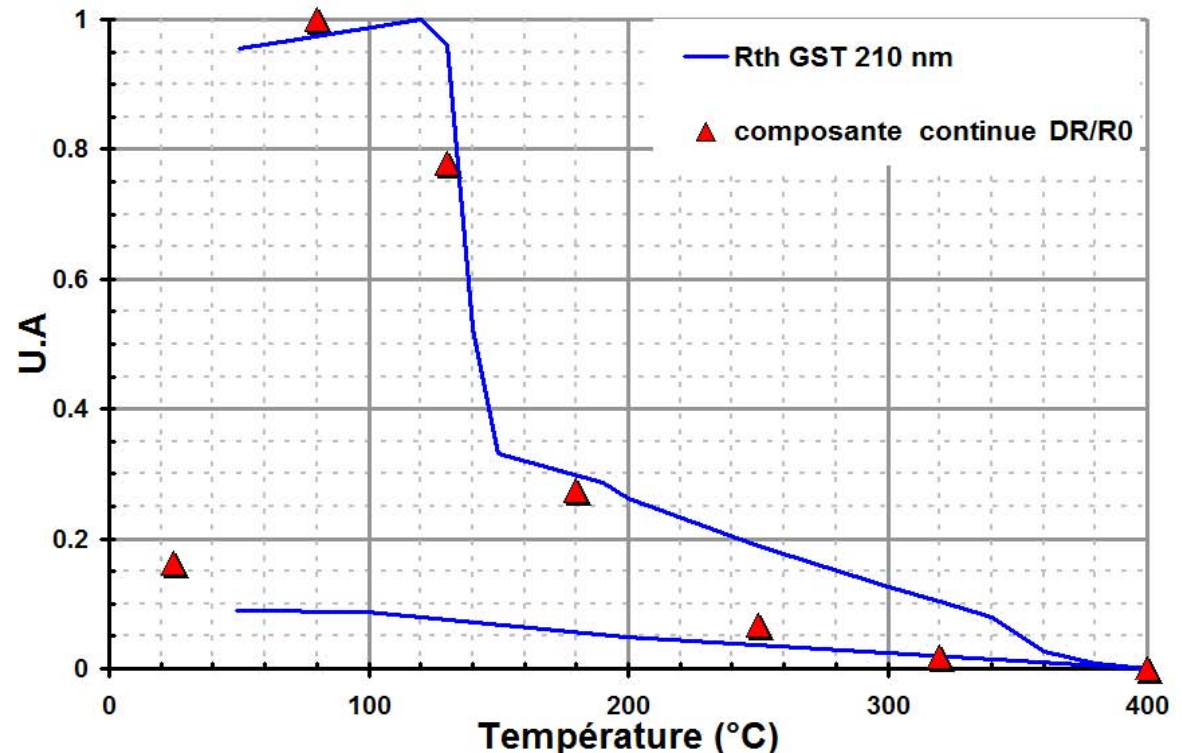


Pailhes, J.; Pradere, C.; Battaglia, J.-L.; Toutain, J.; Kusiak, A.; Aregba, A. & Batsale, J.-C. Suitable implementation of the thermal quadrupole method with internal heat sources



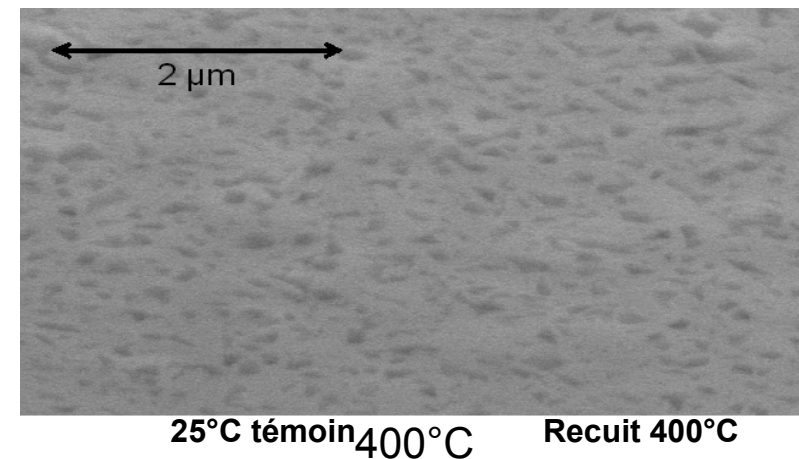
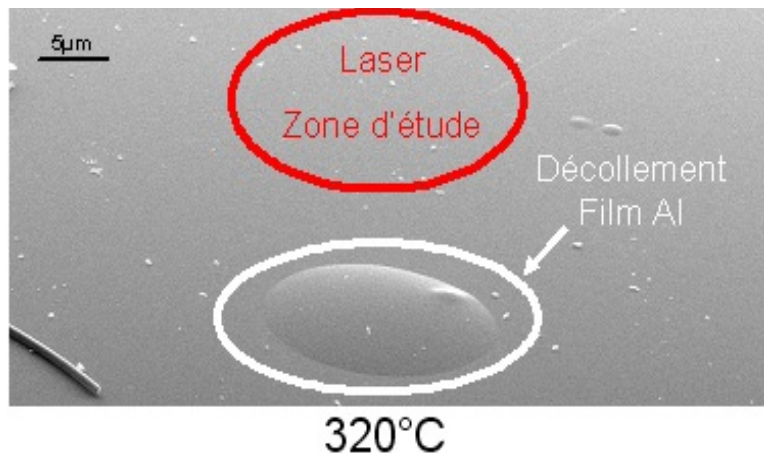
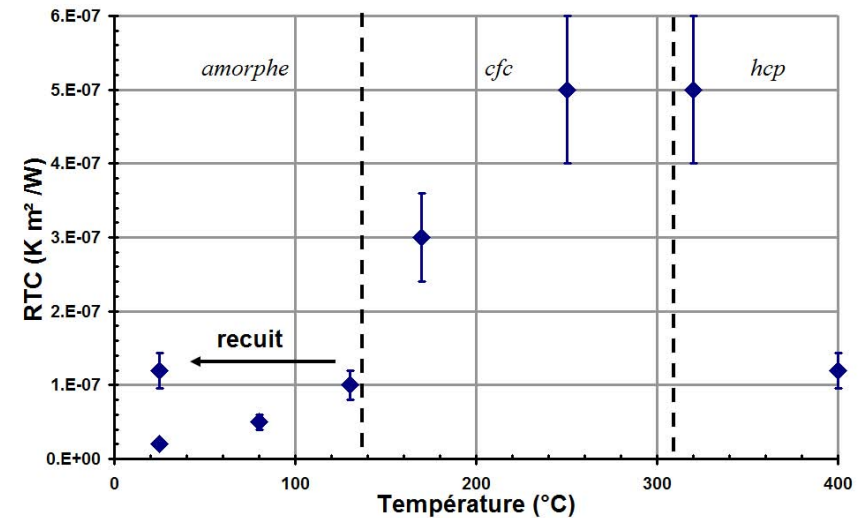
Résultats et analyse

- Identification de la résistance thermique de contact GST/Al
 - Si//SiO₂(90)/α-GST(210)/Al(20)
 - Mesure en réflectométrie (0 - 6ns)
- Étude de la composante continue
 - Effet « d'accumulation » des impulsions pompe
 - Sensibilité de la composante continue aux propriétés thermiques du dépôt



Résultats et analyse

- Résistance thermique de contact GST/Al
 - Amorphe : 10^{-8} – 10^{-7} $\text{K m}^2/\text{W}$
 - *cfc* 5×10^{-7} $\text{K m}^2/\text{W}$!!!!
 - *hcp* chute à 10^{-7} $\text{K m}^2/\text{W}$
- Imagerie MEB et visible
 - Décollement global du film
 - Effondrement du film en *hcp*



Résultats et analyse

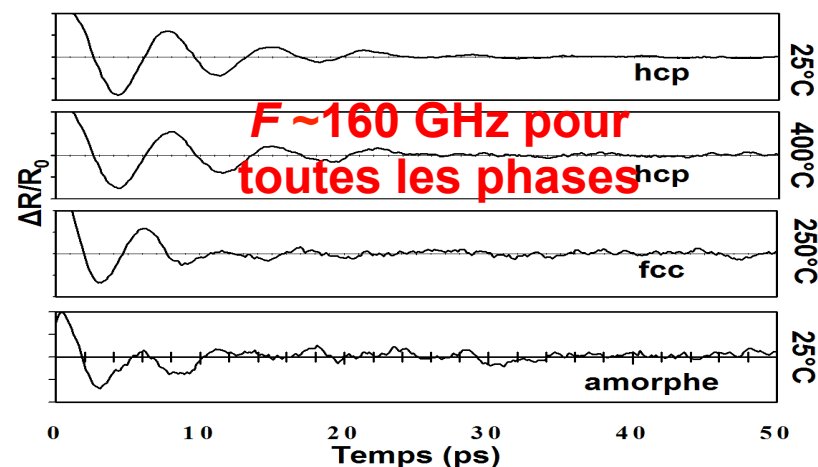
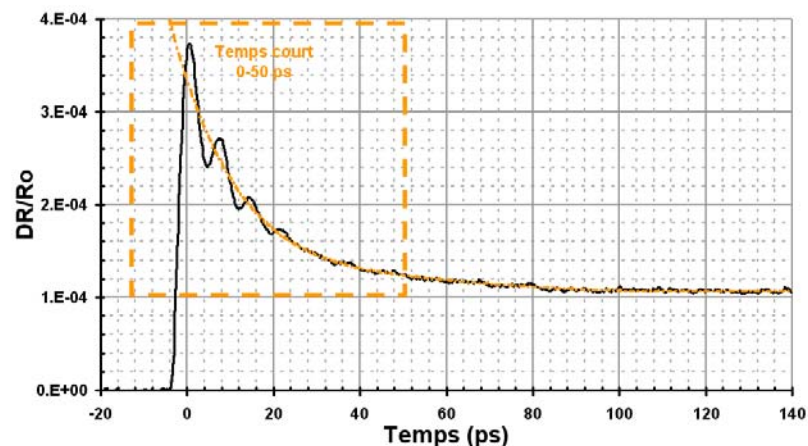
■ Phénomène acoustique aux temps courts

- Résonance du film d'aluminium croissante avec le changement de phase
- Modification des propriétés acoustiques
 - Décollement
 - Diffusion d'espèce

■ Théorie

- Si $Z_{AL} < Z_{GST}$ $F = V_l / 2e_t \rightarrow F = 80 \text{ GHz}$
- Si $Z_{AL} > Z_{GST}$ $F = V_l / 4e_t \rightarrow F = 160 \text{ GHz}$

Z_{Al}	$Z_{\alpha\text{-GST}}$	$Z_{fcc\text{-GST}}$	$Z_{hcp\text{-GST}}$
17.3	13.3	19.8	21.1



Résultats et analyse

■ Réflexion acoustique

Théorique $R_{ac} = \frac{(Z_{Al} - Z_{GST})(Z_{Al} + Z_{GST})}{(Z_{Al} + Z_{GST})}$

Expérimentale $|R_{ac}| = \frac{\alpha_{exp}}{f_{exp}}$

≠

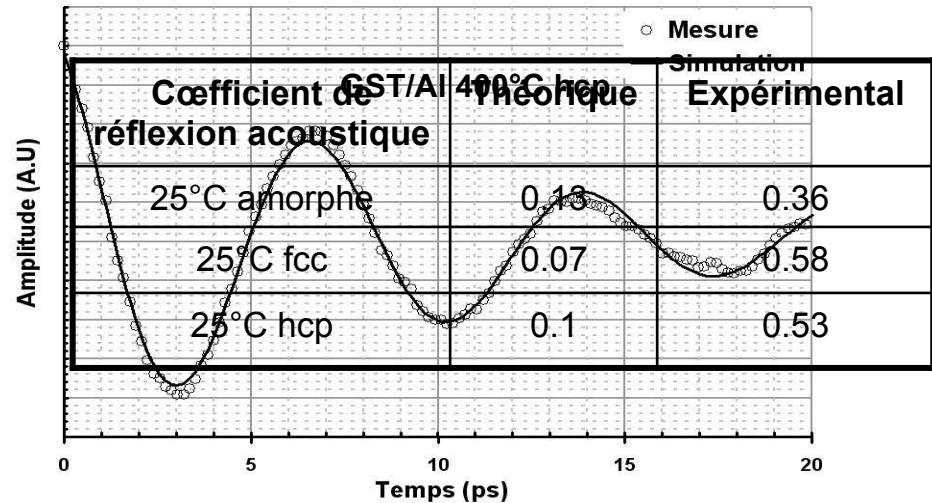
■ Couche interfaciale

- $Z_{interf} \sim 2-7 \text{ Pa s/m}$
- **Décollement** - Interdiffusion

■ Modèle : Couche considérée comme ressort sans masse

- Amorphe 15 MPa/nm
- *cfc* 8 MPa/nm
- *hcp* 7 MPa/nm

Expérimentale ←



$$R_{ac} = \frac{(Z_{Al} - Z_{GST})(Z_{Al} + Z_{GST}) + \left(\frac{2\pi \cdot f_{exp} \cdot Z_{Al} \cdot Z_{GST}}{k} \right)^2}{(Z_{Al} + Z_{GST})^2 + \left(\frac{2\pi \cdot f_{exp} \cdot Z_{Al} \cdot Z_{GST}}{k} \right)^2}$$

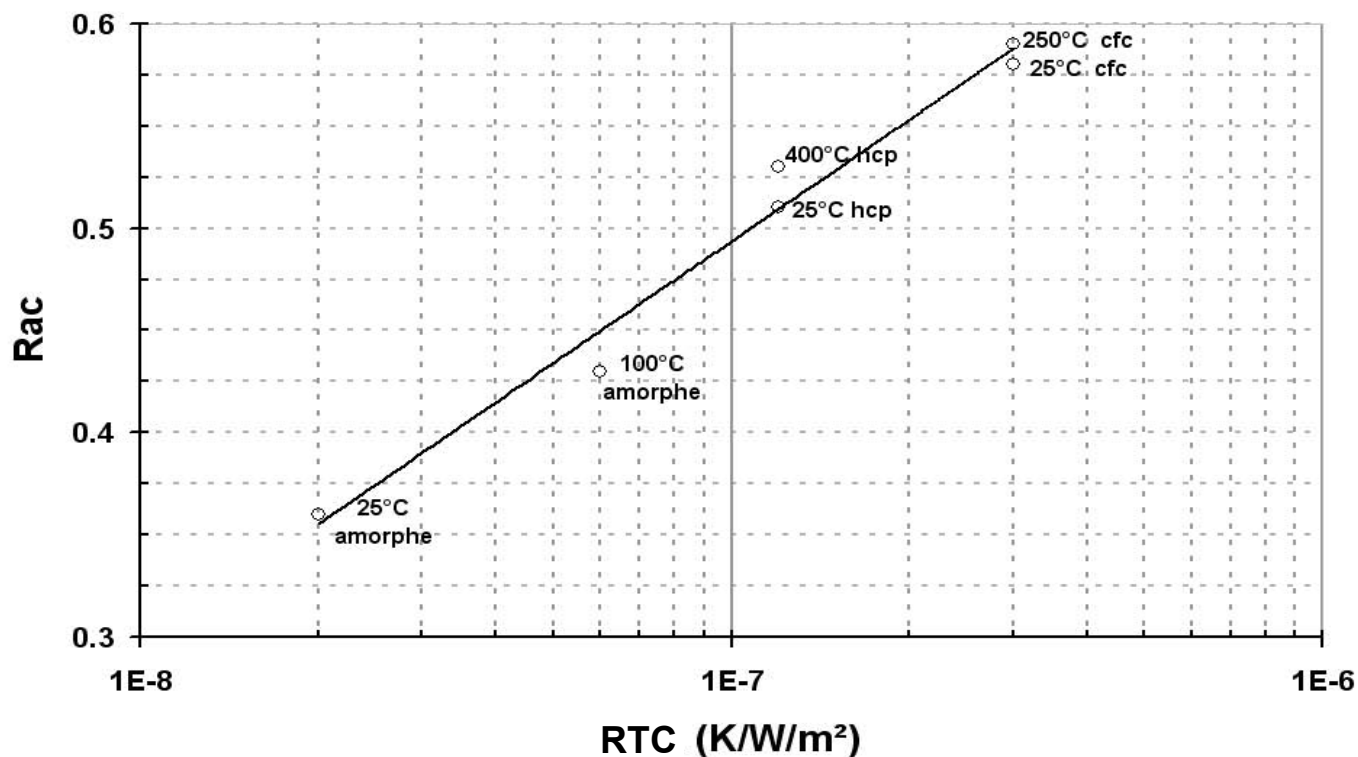


Faible (Al évaporé thermiquement)

Tas, G.; Loomis, J.; Maris, H.; Bailes, A. & Seiberling, L. APL, 1998, 72, 2235

Résultats et analyse

$$|R_{ac}| = \frac{\alpha_{exp}}{f_{exp}}$$

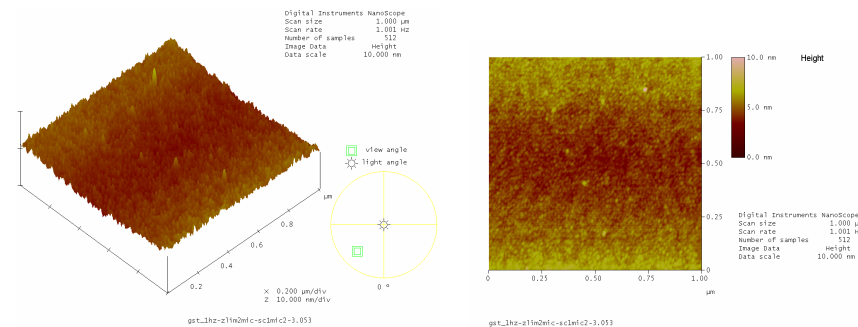
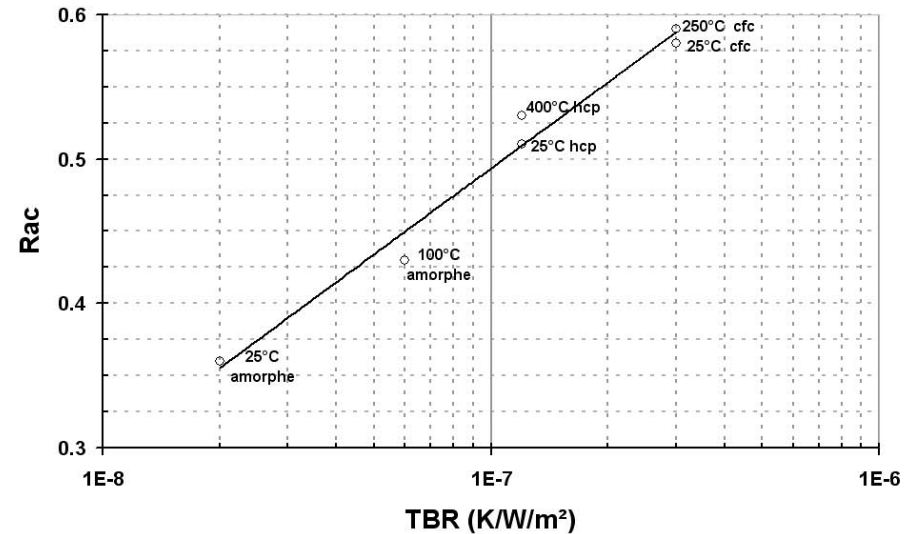


- La réflectivité acoustique R_{ac} est proportionnelle au logarithme de la résistance thermique de contact GST/Al

Conclusion et Perspectives

Conclusion et perspectives

- Corrélation acoustique thermique
 - Nouvelle mesure acoustique
 - Étude de rugosité interface par AFM
- Étude de l'état liquide
 - Couche mince liquide
 - Thèse Andrea Cappella Trefle-LNE
- Étude de Si_3N_4
 - Remplacement de SiO_2
 - Difficulté de mesure



I. Aubert - DUMAS