

Essai disque chaud : méthode de la source plane transitoire

► Objectif de l'essai :

- Déterminer les **propriétés thermiques** d'un matériau telles que la **conductivité** et la **diffusivité thermiques**, et la **capacité calorifique volumique ou massique** par la méthode de la **source plane transitoire**.
- Essai réalisé chez **Tipee** pour des **solides homogènes ou hétérogènes** considérés **isotropes** et sous forme de **deux éprouvettes en masse identiques** dont la conductivité thermique est comprise **entre 0,01 et 400 W/(m.K)**.

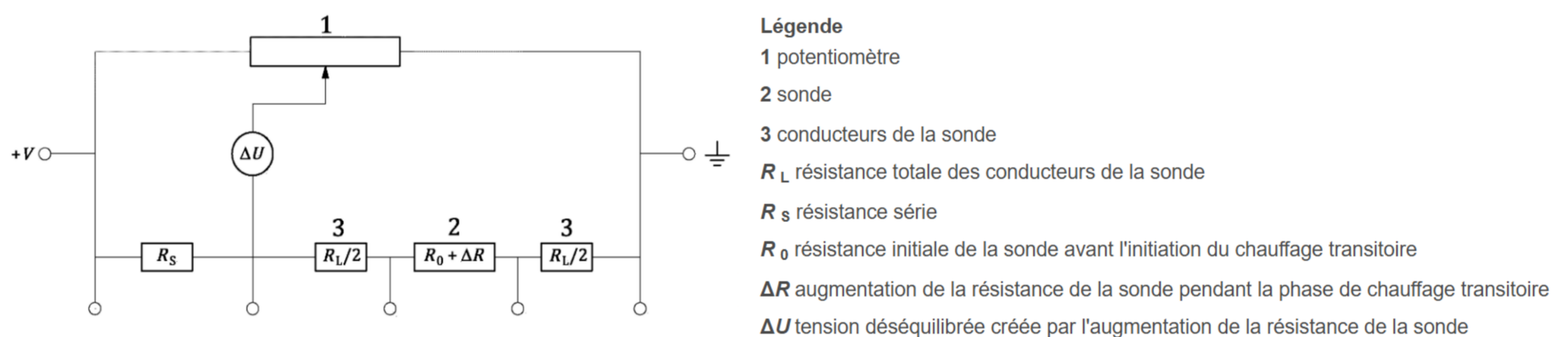
► Définitions :

- **Transitoire thermique** : Perturbation temporaire de la température dans un système initialement à une température uniforme, due à un choc thermique pendant une période au cours de laquelle le système n'atteint pas l'équilibre
- **Choc thermique** : Variation soudaine de la température d'un système provoquée par une source de chaleur
- **Conductivité thermique** : Capacité d'un matériau à propager la chaleur par conduction
- **Diffusivité thermique** : Vitesse de propagation de la chaleur au sein d'un matériau
- **Capacité calorifique volumique/massique** : Capacité d'un matériau à emmagasiner de la chaleur par unité de volume/masse

► Principe de l'essai :

La méthode du disque chaud consiste à placer une **sonde** entre **deux éprouvettes symétriques de surfaces planes** de l'échantillon à caractériser. Cette sonde est composée d'une **résistance bifilaire variable** sous forme de spirale et est intégrée à un **pont de Wheatstone** qui se trouve dans un boîtier appelé « **TPS1500** ».

Le pont de Wheatstone est un circuit électrique composé de la **résistance variable de la sonde** (reliée à ses conducteurs $R_L/2$) et d'une **résistance R_s connue ($R_s = 6,766163 \Omega$)**.



Lorsqu'un courant circule dans le pont, la résistance **dissipe de l'énergie** par **effet Joule**. En fonction de la puissance dissipée visée, la **valeur de la résistance augmente en fonction du temps** et **l'échantillon chauffe**. En effet, un **champ de température dynamique** en fonction du temps est généré au sein de l'échantillon.

Comme la tension de la résistance de la sonde est modifiée, un **déséquilibre** apparaît avec la tension de la résistance R_s . Pour cela, un **potentiomètre** permet de **rééquilibrer le pont** et de **connaître l'augmentation de température de la sonde** :

$$\Delta T(t) = \frac{(R_s + R_L + R_0)\Delta U(t)}{(J_0 R_s - \Delta U(t))k R_0}$$

$\Delta T(t)$: Augmentation de la température de la sonde en fonction du temps (K)

k : Coefficient de température de la résistance de la sonde ($k = 0,004693 \text{ K}^{-1}$ à 20°C)

J_0 : Courant qui traverse le détecteur au début du transitoire

Celle-ci permet alors de calculer 200 fois la valeur de la résistance de la sonde pendant le temps de mesure :

$$R(t) = R_0(1 + k \times \Delta T(t))$$

Puis, la **conductivité** et la **diffusivité thermiques** peuvent être déterminées à partir de la relation suivante :

$$\Delta T(t) = \Delta T_i + \Delta T_s(t) = \Delta T_i + \frac{P_{\text{chauffe}}}{\pi^2 \times r_{\text{sonde}} \times \lambda} \times D(\tau)$$

Avec :

- ΔT_i : Augmentation de la température de la couche en Kapton de la sonde (devient constante après une très courte durée si la couche d'isolation de la sonde est mince et que la puissance de sortie est constante)
- $\Delta T_s(t)$: Augmentation de la température de la surface de l'éprouvette en contact avec la sonde
- r_{sonde} : Rayon de la sonde [m]
- λ : Conductivité thermique de l'échantillon [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
- P_{chauffe} : Puissance dissipée par la sonde [W]
- $D(\tau)$: Fonction sans dimension dépendant du temps

Avec : $\tau = \sqrt{\frac{t}{\theta}}$ et θ : le temps caractéristique du disque chaud = $\frac{r_{\text{sonde}}^2}{\alpha}$

Avec : r_{sonde} : rayon de la sonde [m]

α : diffusivité thermique de l'échantillon [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]

D'après la relation ci-dessus, la **variation totale de température ΔT** est tracée **en fonction de $D(\tau)$** . Ainsi, une droite est obtenue dont la **pente** est $\frac{P_{\text{chauffe}}}{\pi^2 \times r_{\text{sonde}} \times \lambda}$ et l'ordonnée à l'origine est ΔT_i .

Enfin, par une **itération mathématique**, les valeurs de **conductivité thermique** et de **diffusivité thermique** sont **calculées** automatiquement par le logiciel.

► Choix des paramètres de l'essai :

Avant d'effectuer une mesure, plusieurs paramètres sont à considérer comme la **taille de la sonde**, le **temps de mesure**, la **puissance de chauffe de la sonde** et la **plus petite profondeur sondable**.

En effet, dans le cas d'un matériau **hétérogène**, il est préférable d'utiliser la plus grande sonde possible. Cependant, plus la sonde est grande, plus l'**onde thermique** qu'elle génère le sera aussi. Il en est de même pour le temps de mesure et la puissance de chauffe.

De ce fait, lorsque ces paramètres sont **trop élevés**, l'onde thermique fini par **sortir de l'échantillon**, ce qui implique alors que les résultats soient **faussés** puisque les calculs de conductivité et diffusivité prennent en compte **l'environnement** (l'air, le support métallique par exemples) **en plus de l'échantillon**. C'est pour cela qu'il y a des critères à respecter pour le choix de ces paramètres.

Les calculs suivants sont issus du **manuel Hot Disk** et de la norme **NF EN ISO 22007-2**.

• Choix de la sonde

Le rayon de la sonde à utiliser doit respecter les critères suivants par rapport à l'échantillon :

$$r_{\text{sonde}} < \frac{D_{\text{éch}}}{4} \text{ et } r_{\text{sonde}} < e_{\text{éch}}$$

Avec : r_{sonde} : Rayon de la sonde (m)

$D_{\text{éch}}$: Diamètre de l'échantillon (m)

$e_{\text{éch}}$: Epaisseur de l'échantillon (m)

• Profondeur sondable

La profondeur sondable de l'échantillon est à définir dans le logiciel HotDisk. Pour cela, elle est déterminée comme suit :

$$\Delta p = \min(\Delta p_{\text{radiale}} ; \Delta p_{\text{axiale}})$$

$$\text{Avec : } \Delta p_{\text{radiale}} = \frac{D_{\text{éch}}}{2} - r_{\text{sonde}}$$

$$\Delta p_{\text{axiale}} = e_{\text{éch}}$$

Avec : Δp : Profondeur sondable (m)

$\Delta p_{\text{radiale}}$: Profondeur parallèle à la sonde (m)

Δp_{axiale} : Profondeur perpendiculaire à la sonde (m)

Remarque : Cette profondeur sondable doit être calculée à chaque changement de sonde et/ou d'échantillon.

• Temps de mesure

Le TPS1500 permet des temps de mesure de 20 s, 40 s, 80 s, 160 s, 320 s, 640 s, 1280 s, 2560 s et 5120 s.

Pour choisir le temps de mesure, il faut respecter le critère suivant :

$$0,33 \frac{r_{\text{sonde}}^2}{\alpha_{\text{éch}}} < \Delta t_{\text{exp}} < \frac{r_{\text{sonde}}^2}{\alpha_{\text{éch}}}$$

Avec : r_{sonde} : Rayon de la sonde (m)
 $\alpha_{\text{éch}}$: Diffusivité de l'échantillon (m²/s)
 Δt_{exp} : Temps expérimental de mesure (s)

Pour cela, il faut donc avoir une idée de la diffusivité du matériau étudié. Si ce n'est pas le cas, il est conseillé de réaliser une mesure avec un temps de mesure assez faible (40 s) et d'ajuster ce temps de mesure avec la diffusivité obtenue.

Remarque : Lorsque l'intervalle de temps défini ne comprend aucun des temps permis par le TPS1500, il est possible d'effectuer la mesure pendant 20 s et lors du calcul, raccourcir l'intervalle de points sélectionnés jusqu'à satisfaire le temps de mesure à respecter.

• Puissance de chauffe

La puissance de chauffe que la sonde doit délivrer est déterminée de la façon suivante :

$$P = 2 \frac{\overline{\Delta T}}{D_n(\tau)} \times \pi^{\frac{3}{2}} \times r_{\text{sonde}} \times \lambda_{\text{éch}}$$

Avec :

λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	$\frac{\overline{\Delta T}}{D_n(\tau)}$
$\lambda < 0,1$	6
$0,1 < \lambda < 1$	2
$1 < \lambda < 15$	1
$15 < \lambda$	0,1

De la même manière que pour le temps de mesure, il faut donc avoir une idée de la conductivité thermique du matériau étudié pour estimer la puissance de chauffe à imposer à la sonde. Dans le cas contraire, il est conseillé de choisir une très faible puissance (10 mW) pour s'assurer de ne pas détériorer le matériau et la sonde, puis, d'effectuer le calcul de puissance avec la conductivité obtenue.

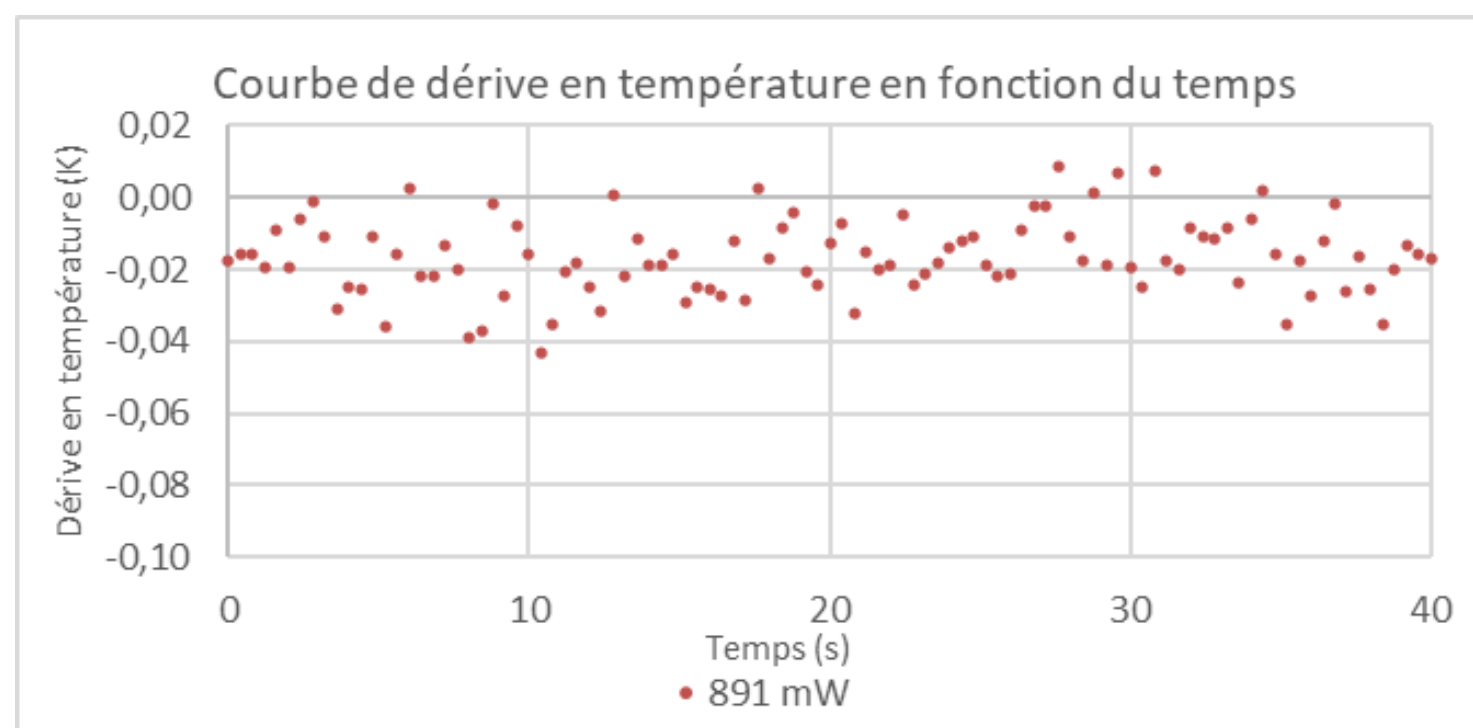
► Préparation des échantillons :

- Un **échantillon** est composé de **deux éprouvettes symétriques** qui présentent au moins une **surface** parfaitement **plane** et **lisse** chacune pour assurer le **contact** avec la sonde
- Dans le cas d'une **norme produit** existante ou d'une **spécification** indiquée par le client : les éprouvettes sont **conditionnées** aux conditions de température et humidité auxquelles l'essai doit être réalisé. Sinon, **sans spécification particulière**, les éprouvettes sont placées au moins **24h avant l'essai** dans les **conditions de l'essai**.

► Traitement des résultats :

A la fin du calcul, plusieurs paramètres sont à vérifier pour valider les résultats :

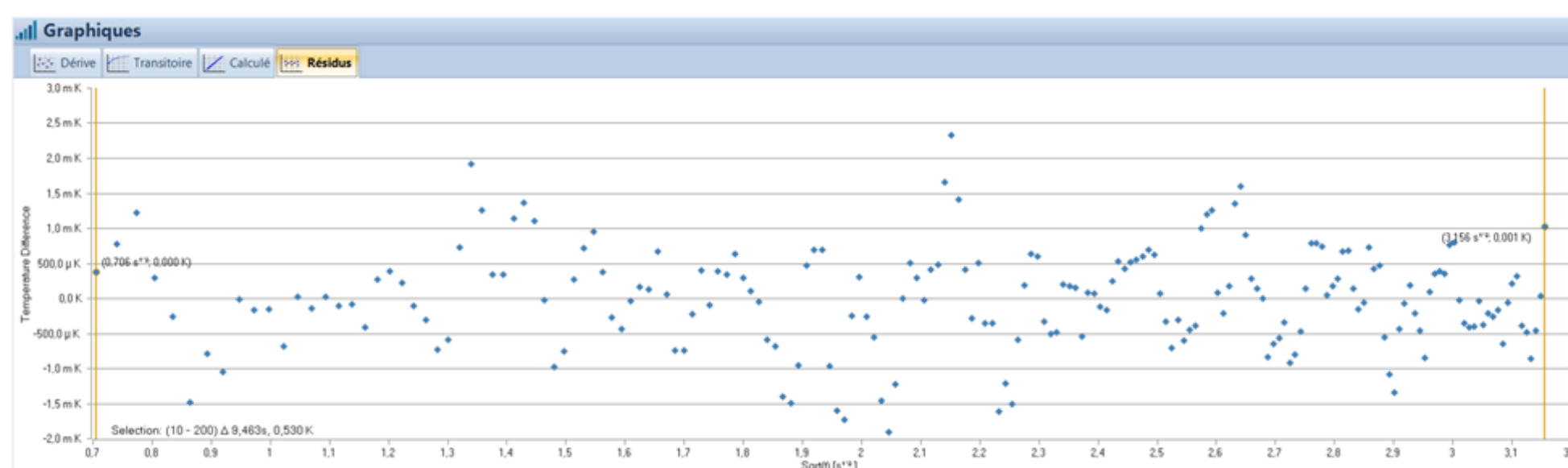
- La **dérive** en température doit être représentée par un **nuage de points** répartis **horizontalement** et **aléatoirement**. Dans le cas contraire, cela signifie que l'échantillon n'était **pas stable en température** avant la mesure -> Attendre avant de réaliser une nouvelle mesure.



Exemple de points de dérive répartis horizontalement et aléatoirement

- La **profondeur sondée** doit être **inférieure** à la profondeur sondable calculée avant la mesure
- Le **temps total caractéristique** doit être compris entre **0,33 et 1**

- L'**augmentation totale de température** doit être comprise entre **2 et 5K**
- Les **résidus**, qui correspondent à la différence entre l'augmentation de température mesurée et celle calculée par le modèle théorique, doivent être répartis **horizontalement** et **aléatoirement** autour de l'axe des abscisses.



Exemple de points de résidus répartis horizontalement et aléatoirement

Dans tous les cas, **après chaque mesure**, la **puissance de chauffe** et le **temps expérimental** doivent être recalculés à partir de la conductivité et la diffusivité déterminées lors de la mesure précédente jusqu'à ce qu'ils demeurent **inchangés**. A ce moment-là les paramètres expérimentaux sont **optimisés** et **3 mesures identiques** doivent être effectuées afin de déterminer une **valeur moyenne de conductivité**, et **diffusivité** et ainsi de **chaleur spécifique volumique**.

► Applications :

- Déterminer les **propriétés thermiques** des matériaux, notamment ceux de **construction**

► Exemples de valeurs (Norme NF EN ISO 22007-2) :

Type de matériau	Ordre de grandeur de conductivité thermique (W/(m.K))	Ordre de grandeur de diffusivité thermique (mm ² /s)
Alliage métallique	170	69
Céramique dense	40	11
Acier	14	3,7
Céramique	1,5	0,96
Polymère	0,19	0,11
Matériau d'isolation	0,028	0,75

► Références :

- **Norme NF EN ISO 22007-1** : Plastiques - Détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique - Partie 1 : principes généraux, mars 2024
- **Norme NF EN ISO 22007-2** : Plastiques – Détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique – Partie 2 : Méthode de la source plane transitoire (disque chaud), juin 2022
- **Norme NF EN ISO 9346** : Performance hygrothermique des bâtiments et des matériaux pour le bâtiment - Grandeurs physiques pour le transfert de masse - Vocabulaire, décembre 2007
- **Hot Disk Thermal Constants Analyser**, Instruction Manual, septembre 2022
- **Test Protocol Hot Disk TPS1500**, M. Gustavsson, août 2013
- **Mesure de conductivité par la méthode du disque chaud**, T. Marcel, (site internet : <https://matwo.fr/thibaud-marcel/conductivite-thermique/>)