

S Y M P O S I U M

PROTECTION CONTRE L'INCENDIE

DES STRUCTURES EN ACIER

HARMONISATION EUROPEENNE

European Group of Official Laboratories
for Fire Testing

E G O L F

Bruxelles

24-25 novembre 1986

RESISTANCE AU FEU DES PROFILES EN ACIER ISOLES.
DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE APPARENTE λ_i .

J-M. FRANSSEN
Aspirant F.N.R.S.

A. BRULS
Chargé de Cours Trasenster

1. INTRODUCTION.

L'objet de cette étude est de définir une méthode de détermination de la température moyenne d'un profilé en acier isolé, placé dans un four où la température augmente suivant la loi I.S.O. (voir figure 1). A partir de cette température, il est alors possible de connaître la durée de résistance au feu.

La résistance de l'acier en fonction de la température est sensée connue. La figure 2 montre que pour des températures inférieures à 400°C, la limite d'élasticité est supérieure à 60 % de sa valeur à la température ordinaire. Sachant que sous les charges de service, la contrainte sollicitant l'acier dépasse rarement cette valeur, la stabilité d'une structure est en général assurée lorsque sa température reste inférieure à 400°C.

Néanmoins, dans de nombreux cas, la stabilité peut être assurée pour des températures plus élevées si on tient compte de la redistribution des sollicitations et des contraintes, de la réduction des charges variables, et du surdimensionnement éventuel des profilés. Dès lors, il est utile de connaître les conditions dans lesquelles l'acier atteint des températures de 500, voire 600°C. Des températures supérieures à 600° pénalisant trop l'acier (la limite d'élasticité résiduaire descendant à 30 %) ne sont pas retenues.

Une méthode fiable pour connaître le temps après lequel un profilé en acier isolé atteint une température critique doit nécessairement faire appel à des résultats d'essai en laboratoire et à des calculs basés sur des lois théoriques.

Les essais sont indispensables pour connaître les propriétés de l'isolant et les autres paramètres intervenant dans les formules. Mais les essais seuls ne suffisent pas, parce qu'il est impossible de faire des essais couvrant tous les cas se présentant dans la pratique.

Après avoir choisi une loi théorique de l'élévation de la température en fonction du temps dans des conditions bien définies, on décrira une procédure d'essai et de calcul pour connaître les paramètres nécessaires. Enfin, cette procédure sera illustrée par quelques exemples d'application.

2. LOIS D'ELEVATION DE LA TEMPERATURE D'UN PROFILE EN ACIER.

2.1. Profilé non protégé.

L'environnement créé dans un four au cours d'un essai au feu est caractérisé par la température des gaz. Au cours d'un essai, cette température est contrôlée, et en Europe elle respecte la courbe ISO (voir figure 1).

$$\theta_t = \theta_0 + 345 \log (8t + 1) \quad (1)$$

avec θ_t = température dans le four à l'instant t (en °C),

θ_0 = température initiale du four,

t = temps en minute.

Le flux de chaleur qui est transmis vers un corps situé dans ce four s'écrit :

$$\begin{aligned} q &= \alpha_c (\theta_t - \theta) + 5,67 \cdot 10^{-8} \epsilon_r \left((\theta_t + 273)^4 - (\theta + 273)^4 \right) \\ &= \alpha (\theta_t - \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

q = flux de chaleur (en W/m²),

θ = température du corps (en °C),

α_c = coefficient de transfert par convection (en W/m² °C),

ϵ_r = émissivité relative.

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (2')$$

Les caractéristiques thermiques d'un corps sont :

- ρ = la masse spécifique (Kg/m³),
- c = la chaleur spécifique (J/Kg °C),
- λ = la conductivité thermique (W/m °C),

Lorsque le corps étudié est constitué uniquement d'acier, on admet généralement comme hypothèse que la température θ est à tout instant uniforme à cause de la grande conductivité thermique de l'acier ($\lambda = 50$ W/m °C).

Ainsi, l'équation qui gouverne le champ thermique dans un profilé en acier se réduit à une seule dimension. Si le profilé en acier est nu, on écrit simplement l'équation d'équilibre énergétique entre la quantité de chaleur qui pénètre dans le profilé et la quantité de chaleur qui est emmagasinée dans ce profilé :

$$q(t).F.dt = c_s(\theta). \rho_s(\theta).V.d\theta_s \quad (3)$$

où F est la surface du profilé exposée au feu par mètre de longueur (m),

V est le volume de profilé par mètre de longueur (m²).

Cette équation est résolue par différences finies :

$$\Delta\theta_s = \frac{q(t)}{c_s \cdot \rho_s} \cdot F/V \cdot \Delta t = \frac{\alpha}{c_s \cdot \rho_s} \cdot d_s \cdot (\theta_t - \theta_s) \Delta t \quad (4)$$

avec $\theta_s = \theta_0$ en $t = 0$ comme condition initiale.

Dans cette équation,

$q(t)$ caractérise l'environnement et les conditions d'échange thermique avec cet environnement,

$c_s(\theta) \cdot \rho_s(\theta)$ caractérise l'acier constituant le corps,

$d_s = V/F$ est l'épaisseur fictive du profilé, exprimée en mètre, et son inverse F/V est appelé coefficient de massivité et est exprimé en m^{-1} . En procédant par intégration finie de l'équation (4), on peut déterminer la courbe et la température du profilé.

$$\theta_s = \theta_s(t) \quad (5)$$

2.2. Profilé isolé.

Le matériau de protection du profilé métallique a en général une épaisseur constante (d_i), et a comme caractéristiques thermiques ρ_i , c_i et λ_i . La présence d'un matériau isolant retarde l'échauffement du profilé grâce à l'action combinée de trois phénomènes :

- la capacité thermique de l'isolant absorbe pour lui-même une certaine quantité de chaleur en s'échauffant,
- l'eau libre présente dans l'isolant s'évapore et absorbe ainsi une quantité de l'énergie appliquée,
- puisque le matériau est thermiquement isolant, il freine la pénétration de la chaleur.

Le bilan thermique de l'acier s'écrit en considérant le flux de chaleur qui pénètre dans l'acier :

$$q = \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot F \cdot (\theta_t - \theta_s) \quad (6)$$

Dans les recommandations de la C.E.C.M. [1], la valeur de λ_i est à déterminer expérimentalement en fonction de la température moyenne et de la nature de l'isolant ; elles donnent néanmoins des valeurs de λ_i pour certains matériaux. La température de l'acier est obtenue par intégration finie de l'une des équations suivantes :

1°) lorsque l'isolant a une faible capacité thermique :

$$\Delta\theta_s = \frac{\lambda_i}{d_i \cdot c_s \cdot \rho_s} \cdot \frac{F_i}{V} (\theta_t - \theta_s) \cdot \Delta t \quad (7)$$

2°) lorsque l'isolant est lourd :

$$\Delta\theta_s = \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot \frac{F_i}{K_s + 0,5 K_i} (\theta_t - \theta_s) \Delta t - \frac{0,5 K_i \cdot \Delta\theta_t}{K_s + 0,5 K_i} \quad (8)$$

3°) la formule 8 peut être simplifiée en négligeant le 2ème terme :

$$\Delta\theta_s = \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot \frac{F_i}{K_s + 0,5 K_i} \cdot (\theta_t - \theta_s) \Delta t \quad (9)$$

Dans ces équations,

$K_s = c_s \cdot \rho_s \cdot V$ est la capacité thermique de l'acier,

$K_i = c_i \cdot \rho_i \cdot d_i \cdot F_i$ est la capacité thermique de l'isolant,

F_i est la surface intérieure de l'isolant par unité de longueur.

L'équation (9) diffère de l'équation (7) par la prise en compte de la capacité thermique de l'isolant, grâce au terme $0,5.K_i$. Cette hypothèse est à discuter.

Les équations sont établies pour des épaisseurs d_i faibles.

L'équation (8), qui est l'équation la plus complète proposée par la C.E.C.M. est une équation approchée, pour les raisons suivantes :

- 1° le terme K_i est une valeur approchée de la capacité thermique de l'isolant, et l'erreur croît avec l'épaisseur d_i ; ce terme peut être corrigé sans difficulté ;
- 2° le facteur 0,5, qui multiplie la capacité thermique de l'isolant, est en fait variable au cours d'un essai ; d'autres auteurs admettent d'ailleurs des valeurs différentes ;
- 3° Le 2ème terme de l'équation, qui caractérise l'inertie, est approché, et tous les auteurs ne sont pas d'accord sur la forme de ce terme ;
- 4° la forme de l'isolant entourant le profil, modifiant les effets du rayonnement et par conséquent la vitesse d'échauffement, n'est pas pris en compte ; ce serait d'ailleurs impossible en général ;
- 5° la teneur en eau de l'isolant modifie l'échauffement.

Pour la C.E.C.M., ce dernier phénomène doit être considéré séparément, en calculant la chaleur nécessaire à la vaporisation, ce qui ralentit l'échauffement. En réalité, avant vaporisation, il y a migration de la vapeur d'eau de la zone chaude vers le profil froid, phénomène qui accélère l'échauffement et contrarie en partie les effets de la vaporisation (voir figure n°4).

Pratiquement les phénomènes 4 et 5, qui ne sont pas négligeables, ne peuvent être pris en considération par des formules maniables facilement.

Dès lors, toute formule utilisée ne donne qu'une approximation assez grossière de l'échauffement d'un profilé en acier isolé.

Néanmoins, nous devons disposer d'une formule pour effectuer au moins des interpolations à partir des résultats d'essai. Pour cela deux principes doivent être respectés : l'équation utilisée pour les interpolations doit être la même que l'équation utilisée pour le dépouillement des essais, et le dépouillement doit tenir compte de tous les paramètres qui ont une influence sur les résultats.

3. ANALYSE DES PARAMETRES.

3.1. Caractéristiques du profilé.

Le profilé en acier est caractérisé par les propriétés de l'acier et par sa massivité.

Les propriétés de l'acier sont assez bien connues. La C.E.C.M. admet :

$\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$ pour la masse spécifique, et

$c_s = 520 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ pour la chaleur spécifique.

La massivité, ou mieux l'épaisseur fictive $d_s = V/F_1$, est le paramètre de base de toutes les formules relatives à l'échauffement d'un profilé.

Les Recommandations de la C.E.C.M. [1] admettent pour F_i la surface intérieure de l'isolant. Cette hypothèse a l'avantage d'être simple, claire et indépendante de l'épaisseur de l'isolant. Ainsi, lorsqu'un isolant constitué de panneaux rigides protège un profilé en I ou en U, sa surface intérieure est différente de la surface du profilé (voir figure 3).

Les profilés composant chacun des 4 groupes repris à la figure 3 sont influencés différemment par le rayonnement du four. En effet, si on considère un isolant projeté, on voit que pour toutes autres conditions identiques, le profilé rectangulaire s'échauffera plus vite que le profilé H. Cette différence apparaîtra clairement lors du dépouillement des essais.

En principe, on pourrait chercher à donner une définition de F_i , telle qu'une même loi donne l'échauffement correct de chacun des groupes. Cette définition devrait résulter d'une étude expérimentale poussée que nous ne possédons pas. Dès lors, nous proposons d'étudier séparément chacun des quatre groupes suivants (voir figure 3) :

1. profilés en I ou H,
2. profilés rectangulaires, pleins ou creux,
3. profilés ronds, pleins ou creux,
4. profilés plus complexes, tels que cornières, tés, ...

Dans une construction, les profilés peuvent être exposés sur toutes les faces, comme les colonnes ou les barres des poutres en treillis (cas a). Ils peuvent aussi être en contact avec une paroi, comme les poutres sous dalles en béton, ou les colonnes placées contre un mur en maçonnerie (cas b).

La figure 3 résume les différents cas qui peuvent se présenter, chaque isolant n'étant pas nécessairement concerné par chaque groupe.

Lors du dépouillement des résultats d'essais, il faut être attentif à un résultat qui s'écarte nettement de la moyenne, en chercher la cause, et en tirer les conclusions qui s'imposent. Par contre, si aucun écart systématique ne se manifeste entre certains groupes lors du dépouillement, on peut faire des regroupements.

3.2. Caractéristiques de l'isolant.

L'isolant est caractérisé par son épaisseur et ses propriétés thermiques que nous cherchons à connaître.

Lorsque l'isolant est composé de panneaux rigides son épaisseur d_i est bien connue. Lorsque l'isolant est projeté, il faut mesurer les épaisseurs obtenues après application. On admet l'épaisseur moyenne lorsque les écarts sont modérés.

La masse spécifique ρ_i est facile à mesurer.

La chaleur spécifique c_i est plus difficile à connaître avec grande précision.

La conductivité thermique λ_i est le paramètre principal à connaître pour l'étude de l'échauffement du profilé isolé. On sait que la valeur de λ_i d'un isolant varie en fonction de sa température. Or, comme dans le cas qui nous occupe il y a un grand écart entre les températures existant sur les faces extrêmes de l'isolant, il faut nécessairement considérer une valeur approchée dans les calculs. Cette valeur approchée dépend de la formule retenue pour le dépouillement et de la façon dont sont définis les paramètres retenus.

Dans tous les cas, λ_i sera un paramètre de calcul qui est en relation avec la conductivité apparente de l'isolant. En plus, compte tenu des incertitudes citées au § 2.2., nous proposons de regrouper sous un seul paramètre toutes les inconnues qui ont une influence sur l'échauffement du profilé isolé et de retenir la formule n°7, dans lequel il suffit de déterminer par un programme d'essais judicieux, la seule inconnue λ_i .

4. DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE APPARENTE λ_i .

4.1. Principes généraux.

Lors d'un essai d'échauffement, la température du four θ_t augmente suivant la loi ISO, et la température moyenne du profilé θ_s est enregistrée en continu (voir figure 4).

Dans un premier temps, considérons le temps t_{400} après lequel l'acier a atteint la température $\theta_s = 400^\circ\text{C}$. Ce qui se passe avant ce temps, n'a en général pas d'importance pour connaître la résistance au feu d'une structure comme on l'a dit au début.

A partir de la formule 7, il est possible de connaître les valeurs du paramètre λ_i par intégration finie. On verra par un exemple plus loin que la courbe obtenue pour λ_i est complexe et difficile à interpréter (voir figure 5).

Nous proposons au contraire de rechercher une valeur unique de λ_i , qui appliquée entre $\theta_s = \theta_0$ et $\theta_s = 400^\circ$, donne par intégration finie le temps t_{400} obtenu lors de l'essai. Ce calcul se fait par approximations successives. Par cette procédure, on obtient une valeur de λ_{400} , que nous appelons conductivité thermique apparente. La valeur ainsi obtenue pourra être comparée aux valeurs données par la C.E.C.M. ([1] Table C-1). A chaque essai correspond une valeur de λ_{400} . Une étude statistique peut être faite sur un échantillonnage homogène d'essais différents, c'est-à-dire lorsque les conditions suivantes sont réunies :

- 1° le profilé appartient au même groupe,
- 2° l'isolant est disposé de façon identique,
- 3° l'isolant a la même épaisseur.

Nous proposons d'effectuer 5 essais sur des profilés de massivité différente de façon à pouvoir mettre éventuellement en évidence un comportement anormal d'une éprouvette. La valeur retenue est la valeur caractéristique égale à la moyenne plus un écart type.

Dans un second temps, on peut recommencer le calcul, en considérant des températures θ_s de 500 ou 600° au lieu de 400°C, ce qui conduit à des valeurs supérieures de λ_i .

Les profilés à tester sont choisis de façon à éviter toute extrapolation ultérieure. Le nombre d'essais est en relation avec le domaine d'application visé et la gamme des épaisseurs disponibles pour l'isolant.

Les essais sont à réaliser sur les épaisseurs extrêmes de l'isolant et si le rapport entre ces valeurs dépasse 2 ou 3, un essai de contrôle est à prévoir sur une épaisseur intermédiaire. De même, si on dispose des essais réalisés sur un groupe a, il suffit d'effectuer un contrôle sur un profilé du groupe b (voir figure 3).

4.2. Programme des essais.

Pour couvrir l'ensemble des applications concernant les profilés recouverts d'un isolant sur toutes ses faces, les essais suivant sont à prévoir. A chaque profilé correspond une épaisseur fictive d_s .

1. Profilé I et H.

	IPE 100	IPE 300	HEA 200	HEB 300	HEM 300	
$d_s =$	2,57	4,61	4,72	8,62	16,52	(1)
(mm)	3,32	5,98	6,90	12,42	23,31	(2)

2. Profilés rectangulaires.

	50 x 50 x 2,5	60 x 60 x 5	200 x 100 x 5	250 x 250 x 8	60 x 60 plein
$d_s =$	2,35	4,58	4,73	7,51	15,00
(mm)					

3. Profilés ronds.

	48,3 x 2,9	101,6 x 5	193,7 x 8	60 plein
$d_s =$	2,73	4,75	7,67	15,00
(mm)				

4. Autres profilés.

	L 50 x 50 x 5	½ IPE 100	L 50 x 50 x 10	½ IPE 300	L100x100x20	
$d_s =$	2,40	2,57	4,53	8,62	9,04	(1)
(mm)	2,40	3,32	4,53	12,42	9,04	(2)

(1) : panneaux rigides

(2) : projection.

Si certains profilés sont utilisés comme poutre supportant un plancher en béton, ou comme colonne placée contre un mur (voir cas b de la figure 3), il y a lieu de faire un essai de contrôle, par exemple sur un profilé IPE 300 ou un tube 200 x 100 x 5.

Par ailleurs, certaines dispositions pratiques doivent être prises lors des essais afin de garantir leur représentativité du comportement réel des poutres en cas d'incendie :

- 1° il faut être attentif à la disposition des profilés testés dans le four de façon à éviter l'influence intempestive du rayonnement des parois froides du four ;
- 2° la longueur des profilés testés doit être supérieure à 2 ou 3 fois le diamètre circonscrit et des dispositions doivent être prises pour exclure un apport thermique par les extrémités ;
- 3° si les profilés réels sont mis en charge après application de l'isolant, il faut procéder à un essai de poutre chargée de façon à vérifier le bon comportement mécanique de l'isolant et connaître l'influence de la déformation de l'isolant sur son pouvoir isolant.

5. DEPOUILLEMENT D'ESSAIS.

5.1. Isolant n°1.

Cet isolant se présente sous forme de panneaux rigides à base d'asbest-ciment dont la masse spécifique vaut 750 kg/m³. Le tableau reprend les principales données des essais réalisés au laboratoire universitaire de Gand.

Test N°	d _i mm	Profilé	d _s = $\frac{V}{F_1}$ mm	θ _s = 400°C		θ _s = 500°C	
				t min	λ ₄₀₀ W/m°C	t min	λ ₅₀₀ W/m°C
1829 1	10	IPE 300	6,0	32	0,100	41	0,100
1828 2	12	IPE 300	6,0	41	0,108	49	0,120
1971 3	20	IPE 300	6,0	63	0,083	78	0,088
1827 4	2x15=30	IPE 300	6,0	83	0,089	102	0,095
1971 5	20+15=35	IPE 300	6,0	112	0,071	138	0,076
1828 6	12	HEA 300	9,6	46	0,119	59	0,121
1877 7	25	HEA 300	9,6	94	0,101	118	0,105
1865 8	8	HEB 300	12,4	37	0,136	49	0,133
1878 9	10	HEB 300	12,4	48	0,121	60	0,127
1878 10	8	HEM 300	23,3	68	0,117	87	0,119
1932 11	2X25=50	HEB 300	12,4	230	0,088	280	0,095
valeur moyenne					0,103		0,107
écart type					0,019		0,018
coefficient de variation					19 %		17 %
valeur caractéristique					0,122		0,125

Dans une première étude, on a calculé les valeurs de λ_i par la formule 7, point par point. La figure 5 reproduit les courbes obtenues pour les 11 essais. On a admis que la température de l'isolant est égale à la moyenne arithmétique entre la température du four et la température de l'acier. On constate que pour $\theta_i < 600^\circ\text{C}$, λ_i croît avec θ_i . Pour $\theta_i > 600^\circ\text{C}$, les valeurs de λ_i varient en sens divers, et de façon difficilement explicable.

Au vu de ces résultats, on a opté pour une valeur unique de λ_i , que nous avons appelé conductivité thermique apparente et qui est calculée par approximation successive. Les valeurs ainsi obtenues sont données au tableau. On voit que le coefficient de variation est inférieur à 20 % et que λ_i augmente de 3 % lorsque θ_s passe de 400° à 500°C .

Les figures 6 montrent que λ_i décroît lorsque d_i augmente, l'influence de d_s paraît plus aléatoire. La présence de 2 panneaux pour $d_i > 30$ mm. peut aussi avoir une influence. La figure 7, donne le temps après lequel on obtient une température $\theta_s = 540^\circ$, d'après les essais, et ensuite d'après le calcul par λ_i variable et λ_i apparent constant moyen. On constate que les différences ne sont pas grandes lorsqu'on reste dans le domaine d'interpolation des résultats d'essais.

Enfin, rappelons que la C.E.C.M. propose $\lambda_i = 0,150$ pour ce genre de produit, soit une valeur nettement supérieure aux valeurs obtenues par les essais.

5.2. Isolant n°2.

Cet isolant se présente sous forme de panneaux rigides à base de laine minérale dont la masse spécifique vaut 400 kg/m³. Le tableau reprend les principales données des essais effectués au T.N.O. à Delft.

Test N°	d _i mm	Profilé	d _s = $\frac{V}{F_i}$ mm	$\theta_s = 400^\circ\text{C}$		$\theta_s = 500^\circ\text{C}$		$\theta_s = 600^\circ\text{C}$	
				t min	400 W/m°C	t min	500 W/m°C	t min	600 W/m°C
1	13	IPE 200	4,8	44 ½	0,067	54	0,074	65	0,079
4	13	HEA 300	9,6	64	0,085	78	0,092	94	0,098
8	13	HEM 300	23,2	109	0,106	135	0,112	164	0,116
2	20	IPE 200	4,8	53 ½	0,082	65 ½	0,088	78 ½	0,095
5	20	HEA 300	9,6	83 ½	0,094	101 ½	0,101	122	0,108
7	20	HEM 200	16,0	103 ½	0,118	129	0,125	155	0,132
3	30	IPE 200	4,8	74	0,081	89	0,090	105	0,098
6	30	HEA 300	9,6	111	0,098	134	0,108	159	0,116
valeur moyenne					0,091		0,099		0,105
écart type					0,016		0,016		0,016
coefficient de variation					18 %		16 %		15 %
valeur caractéristique					0,107		0,115		0,121

Le tableau montre que le coefficient de variation est inférieur à 20 %. On voit que λ_i augmente de 13 % lorsque θ_s passe de 400 à 500°C. Il y a donc lieu de corriger la valeur de λ_i en fonction de la température critique de l'acier. D'après les figures 8, l'épaisseur de l'isolant d_i et l'épaisseur fictive du profilé d_s n'ont pas une influence significative sur les valeurs de λ_i .

5.3. Isolant n°3.

Cet isolant est composé de laine minérale projetée avec un liant. La masse volumique vaut 250 kg/m³. Le tableau reprend les principales données des essais effectués au C.S.T.B. en France.

Test N°	d _i mm moy.	Profilé	d _s mm	θ = 400°C		θ = 500°C			θ = 600°C	
				t	λ ₄₀₀	t	λ ₅₀₀		t	λ ₆₀₀
				min.	(1)	mm.	(1)	(2)	min.	(1)
1	14	H305x127x42	5,5	34	0,117	43	0,122	0,133	52	0,132
2	25	HEB 260	7,9	75	0,110	92	0,118	0,131	108	0,129
3	25	plat 120 x 6	2,9	33	0,119	39	0,131	0,168	44	0,154
4	26,4	HEB 260	7,9	75	0,116	89	0,130	0,145	108	0,139
5	45	H305x127x42	5,5	145	0,062	172	0,068	0,087	202	0,074
6	45	HEB 260	7,9	146	0,088	169	0,100	0,119	198	0,109
7	48	plat 120 x 6	2,9	54	0,118	63	0,135	0,209	73	0,151
8	47	IPE 270	4,4	108	0,074	125	0,084	0,114	142	0,096
9	61	plat 120 x 6	2,9	77	0,095	87	0,117	0,194	97	0,133
10	62	IPE 270	4,4	207	0,044	226	0,054	0,081	245	0,064
11	74	HEB 260	7,9	308	0,059	336	0,072	0,094	365	0,085
12	76	plat 120 x 6	2,9	117	0,071	129	0,086	0,133	140	0,104
14	80,5	IPE 270 poutre	4,4	280	0,040	297	0,051	0,081	314	0,062
15	80,5	plat 300 x 20	9,4	239	0,103	267	0,123	0,158	300	0,139
moyenne					0,087		0,099	0,134		0,112
Ensemble des profilés écart type					0,028		0,030	0,041		0,032
coefficient de variation					32 %		30 %	31		29 %
H seuls moyenne					0,079		0,089	0,109		0,099
écart type					0,020		0,027	0,024		0,030
coefficient de variation					25 %		31 %	22		30 %
Plats seuls moyenne					0,101		0,118	0,178		0,136
écart type					0,020		0,019	0,022		0,029
coefficient de variation					20 %		16 %	12		21 %

(1) obtenus avec la formule 7.
(2) obtenus avec la formule 9.

Le tableau montre que le coefficient de variation atteint 30 %. Les figures 9 montrent que λ_i diminue lorsque d_i augmente. On voit également, que les valeurs de λ_i obtenues pour les plats sont toujours supérieures aux valeurs obtenues pour les profilés H. Si on fait une distinction entre les profilés H et les plats, le coefficient de variation ne change presque pas dans le premier cas, mais diminue dans le second. Il faut donc faire une analyse distincte dans le cas des profilés H pour différentes épaisseurs. La grande dispersion s'explique ici par les fortes épaisseurs de la projection (80 mm.) en comparaison avec la hauteur des profilés.

Pour $\theta_s = 500^\circ$, on a calculé les valeurs de λ avec la formule n°9, qui fait intervenir la capacité thermique de l'isolant ($C_i = 1100 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, $\rho_i = 250 \text{ kg/m}^3$). Les résultats sont reportés sur la figure n°10. Les valeurs de λ ainsi obtenues sont plus élevées pour les grandes épaisseurs d'isolant, ce qui se traduit par une diminution de la dispersion. Cependant, on ne peut pas dire que la prise en compte de ce facteur modifie fondamentalement les résultats.

Enfin, rappelons que la C.E.C.M. propose $\lambda_i = 0,100 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ pour ce genre de produit, soit une valeur nettement inférieure aux valeurs obtenues par les essais.

6. CONCLUSIONS.

A la suite de cette analyse, il est apparu clairement que toute étude d'échauffement d'un profilé en acier protégé par un isolant doit se faire sur la base d'essais et de calculs. Il est indispensable d'analyser séparément les effets d'un certain nombre de paramètres dont le rôle est difficile, voire impossible à cerner par la théorie. Il est incorrecte d'admettre, une valeur unique de λ pour un produit isolant, sans distingué la forme du profilé ou l'épaisseur de l'isolant.

L'analyse des résultats d'essais permet également de repérer le comportement anormal d'un essai, et d'apporter les corrections nécessaires. Cette méthode, qui ne permet que des interpolations entre les résultats d'essais, ne peut pas donner des résultats s'écartant de façon exagérée du comportement réel, et donne ainsi toute garantie à l'utilisateur.

En suivant la procédure décrite, il est possible d'apprécier la durée après laquelle la température critique est atteinte, et ensuite de choisir l'épaisseur de l'isolant.

(1) ECCS - CECM - EKS :

European Recommendations for the fire Safety of Steel Structure.

T A B L E D E S M A T I E R E S .

1. Introduction.
2. Lois d'élévation de la température d'un profilé en acier.
3. Analyse des paramètres.
4. Détermination de la conductivité thermique apparente λ_i .
5. Dépouillement d'essais.
6. Conclusions.

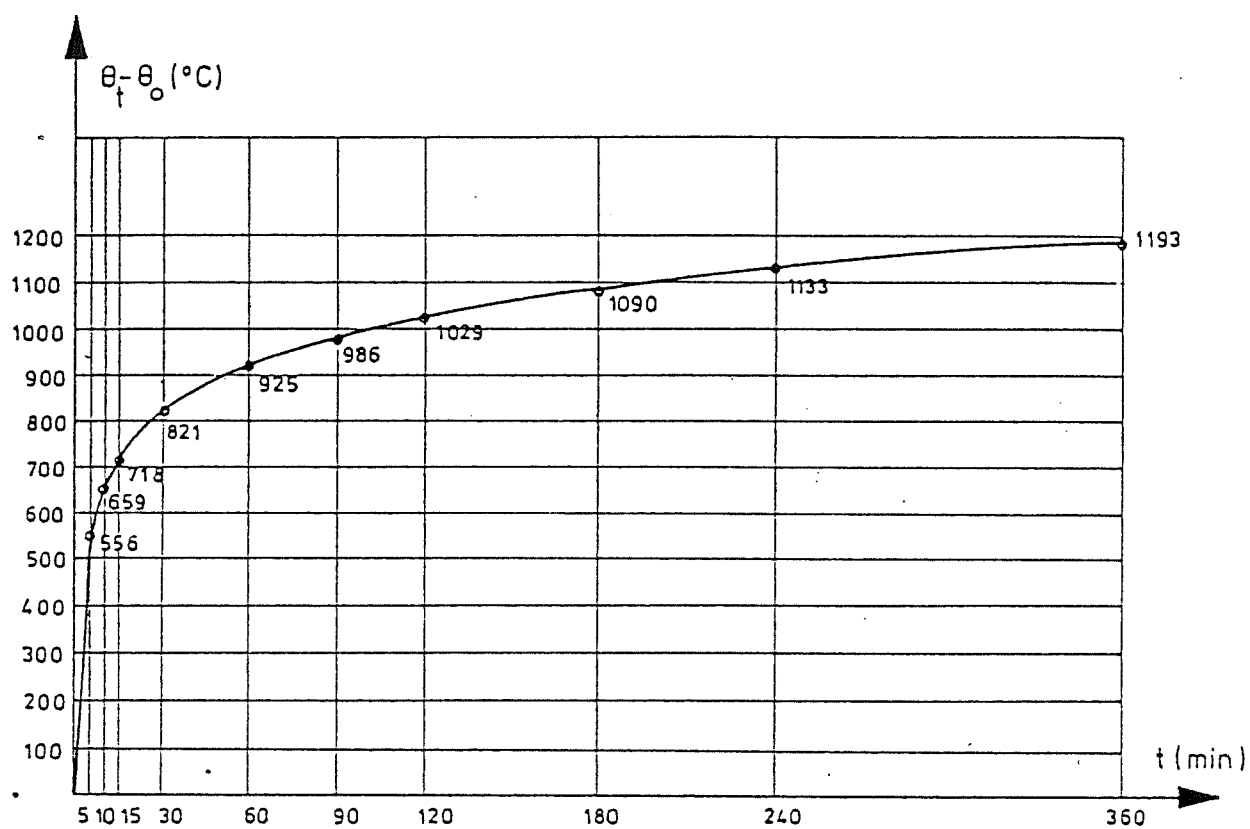


Figure 1 : Courbe température-temps normalisée ("courbe ISO")

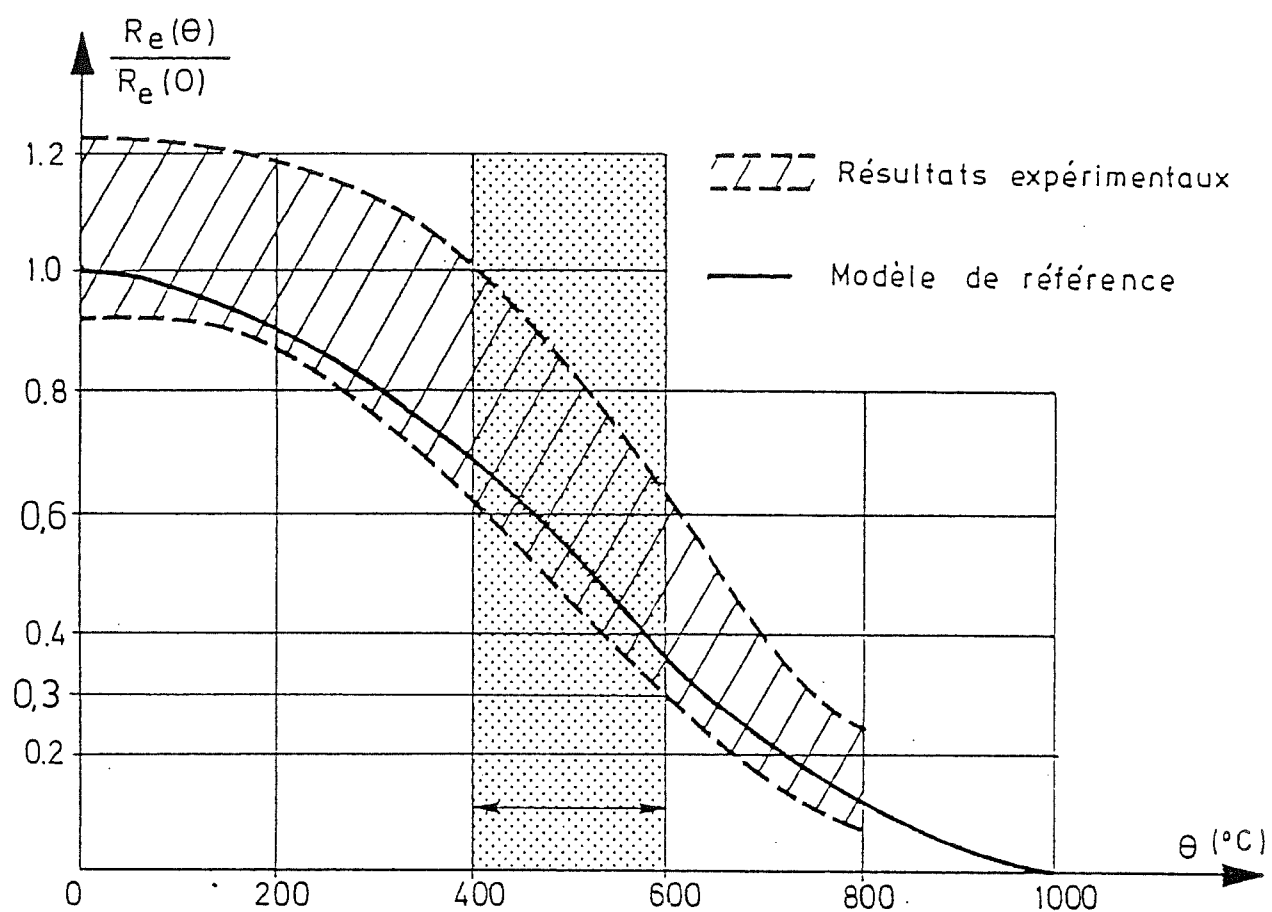


Figure 2 : Variation avec la température de la limite élastique des aciers de construction

Regroupement des profilés isolés

Isolant projeté

a

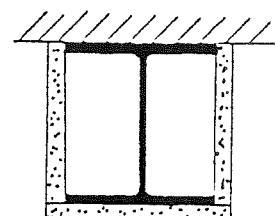
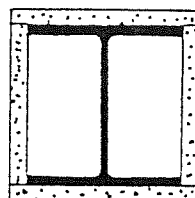
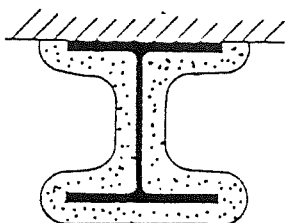
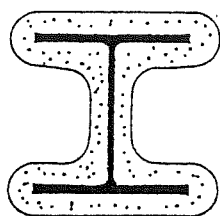
b

Isolant en panneaux

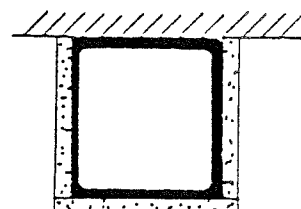
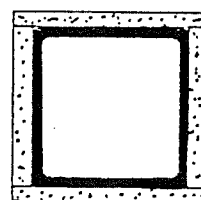
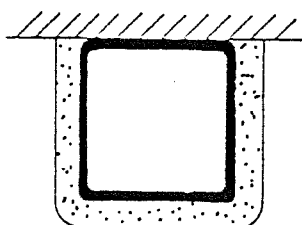
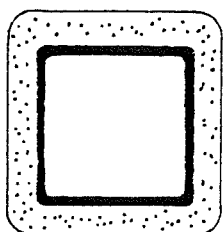
a

b

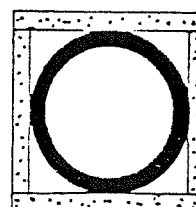
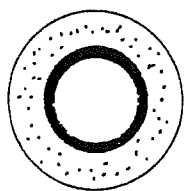
1 Profilés I et H



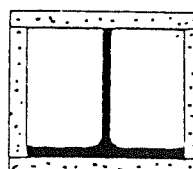
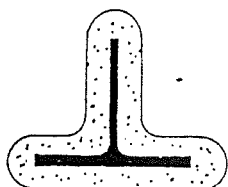
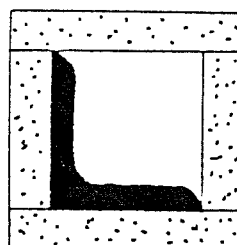
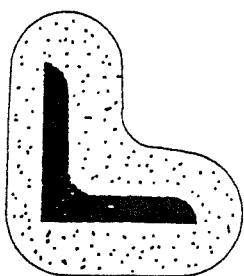
2 Profilés rectangulaires, pleins ou creux



3 Profilés ronds, pleins ou creux



4 Autres profilés



Température moyenne des profils en acier θ_s

Isolant n°1

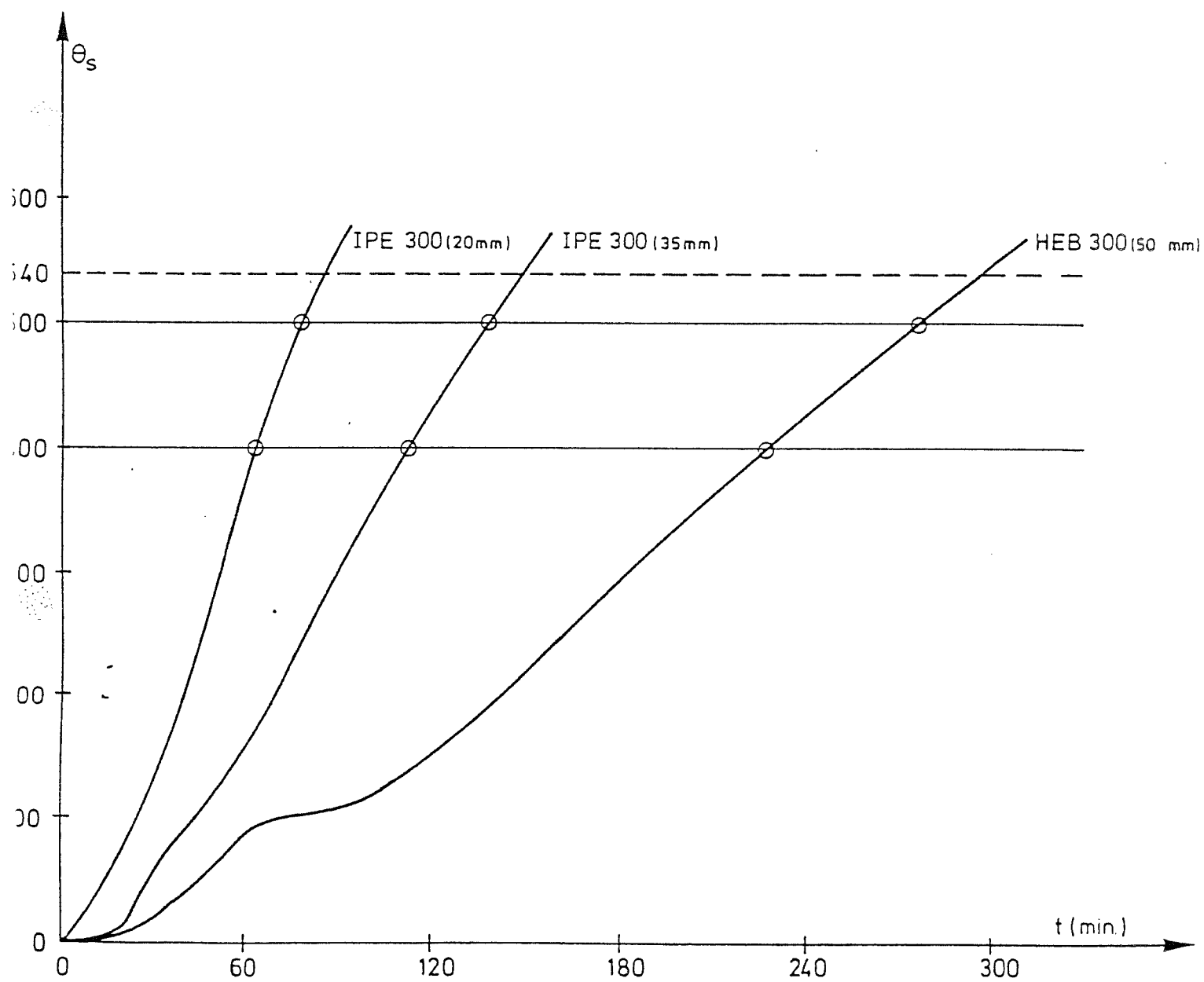
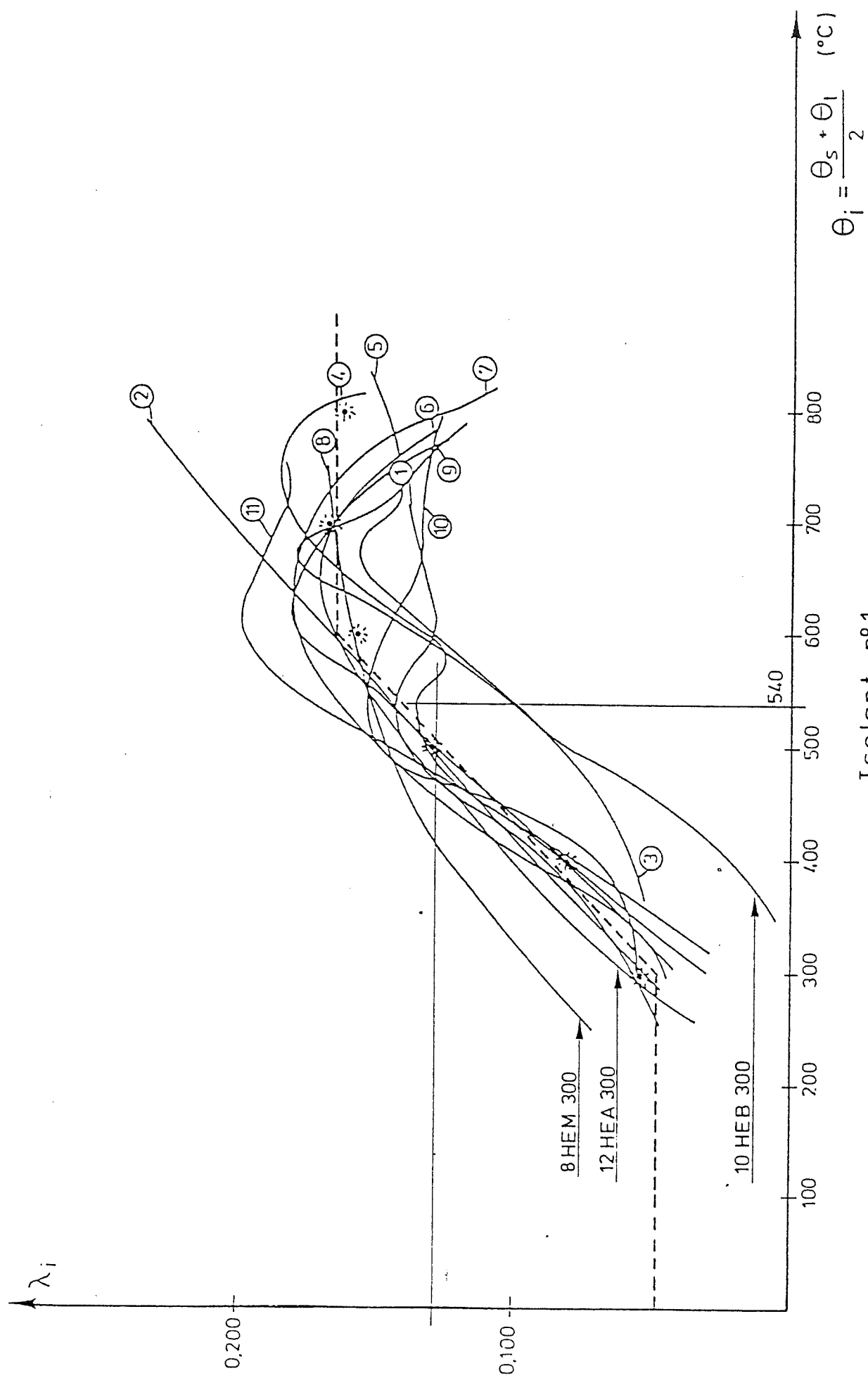


Figure 4



Isolant n°1

Figure 5

Isolant n°1 $\theta_S = 400^\circ\text{C}$

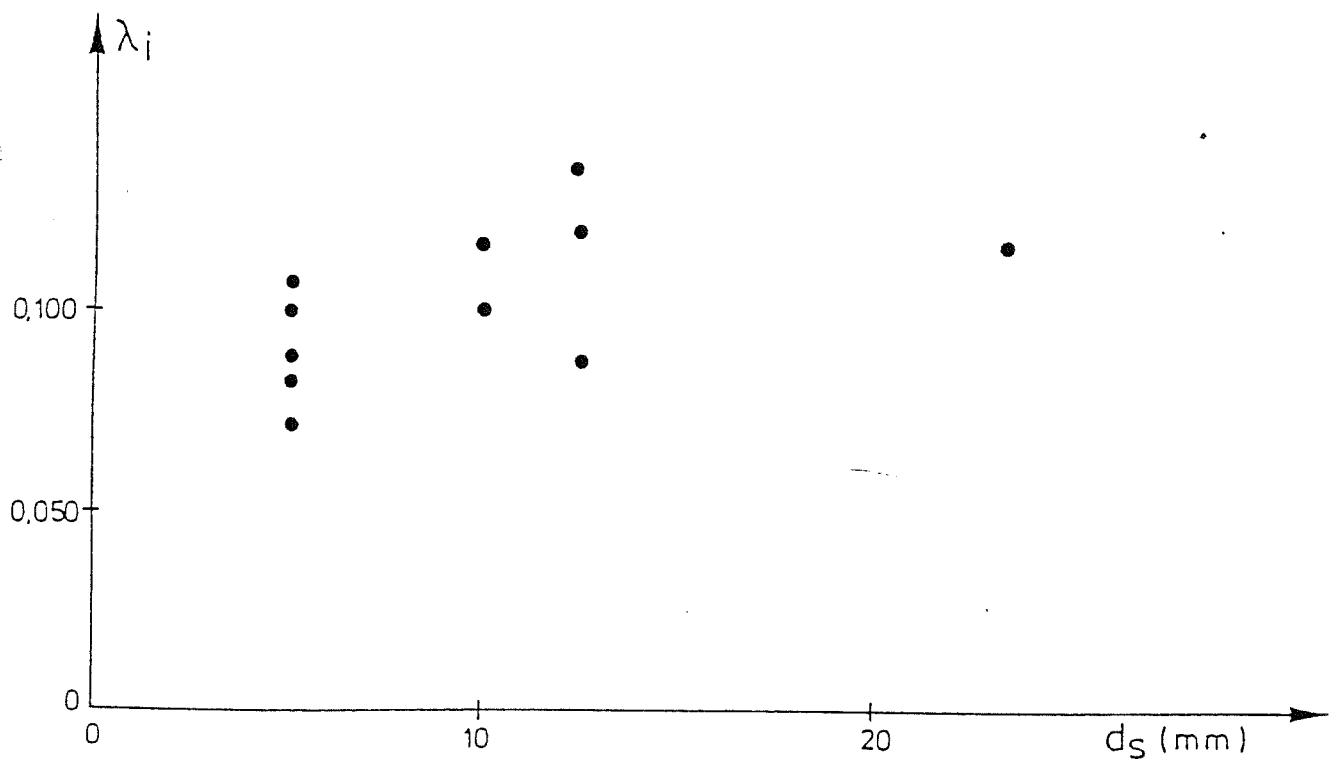
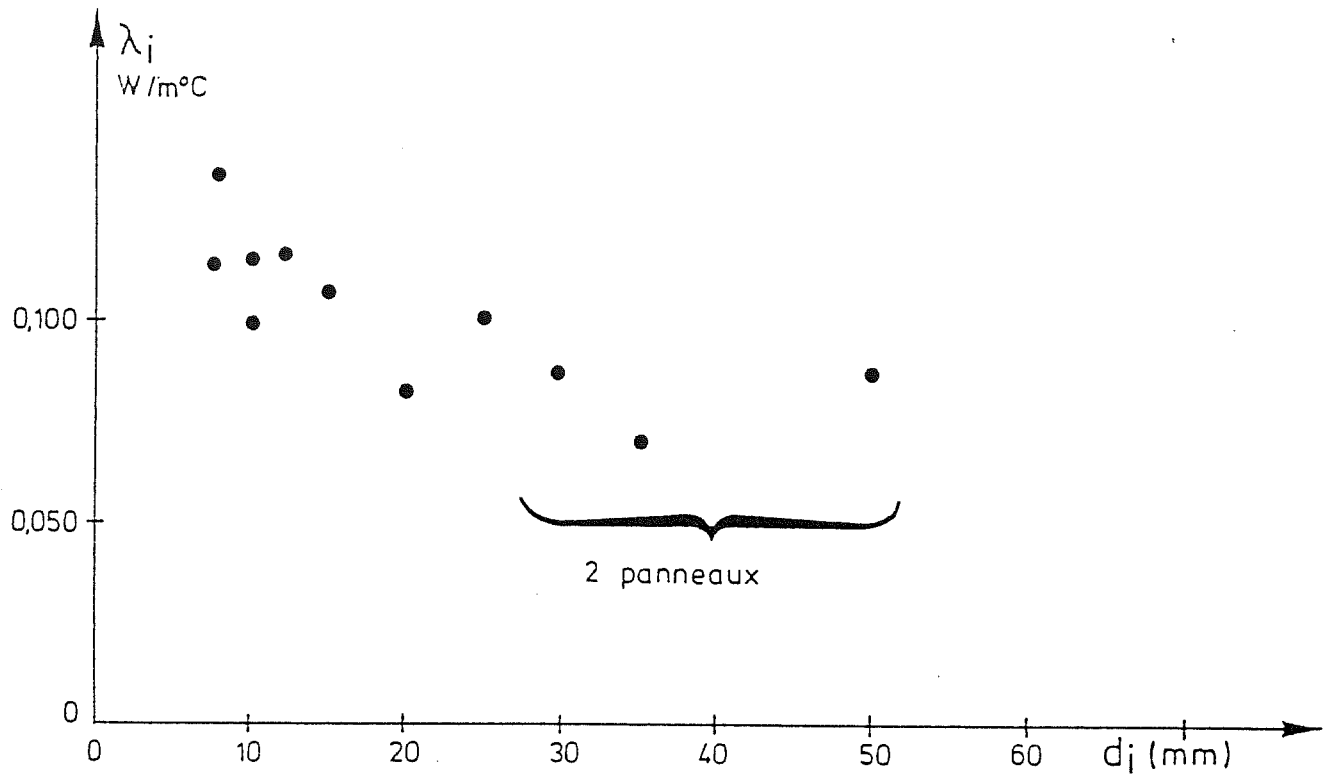
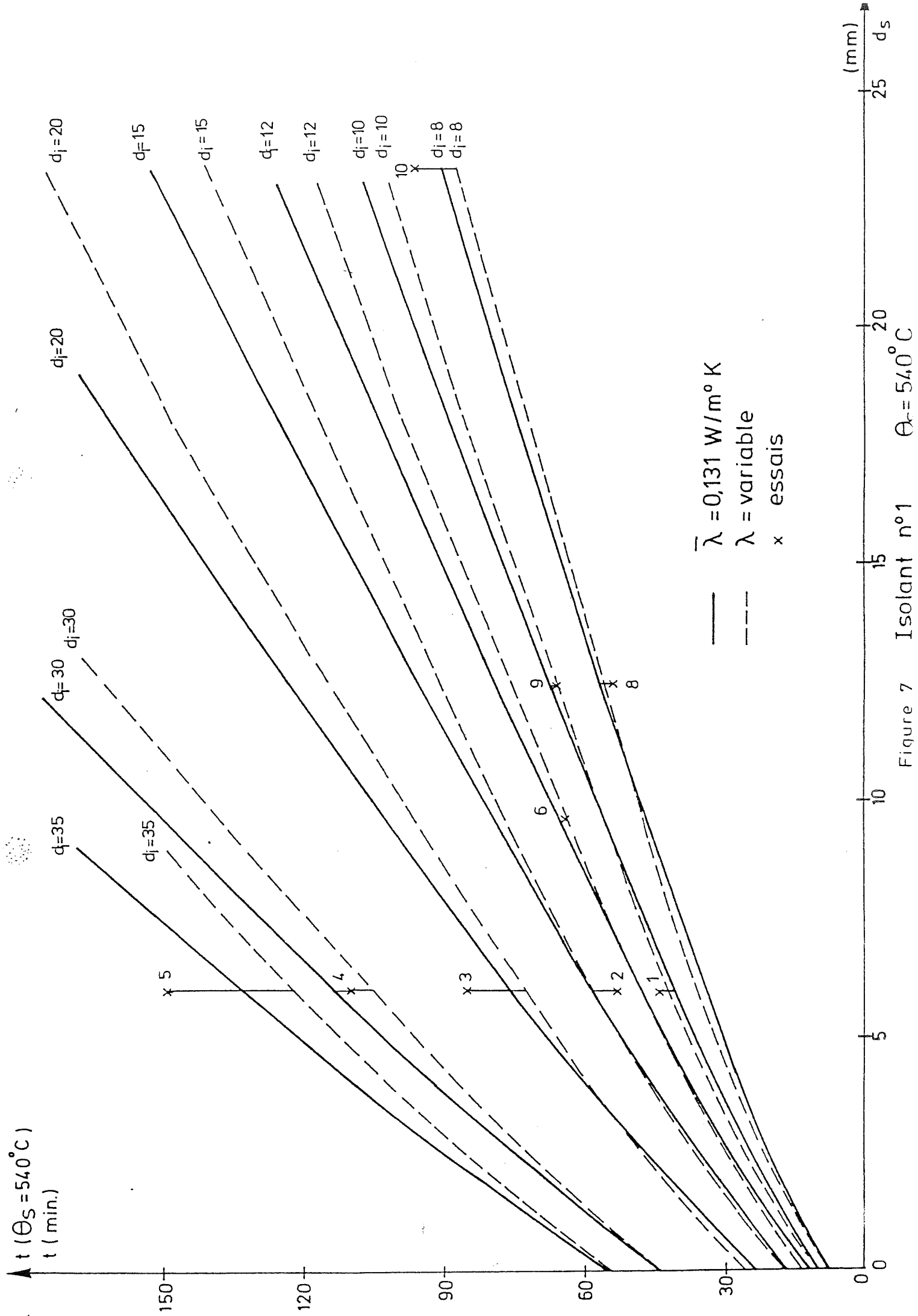


Figure 6



Isolant n° 2 $\theta_S = 400^\circ\text{C}$

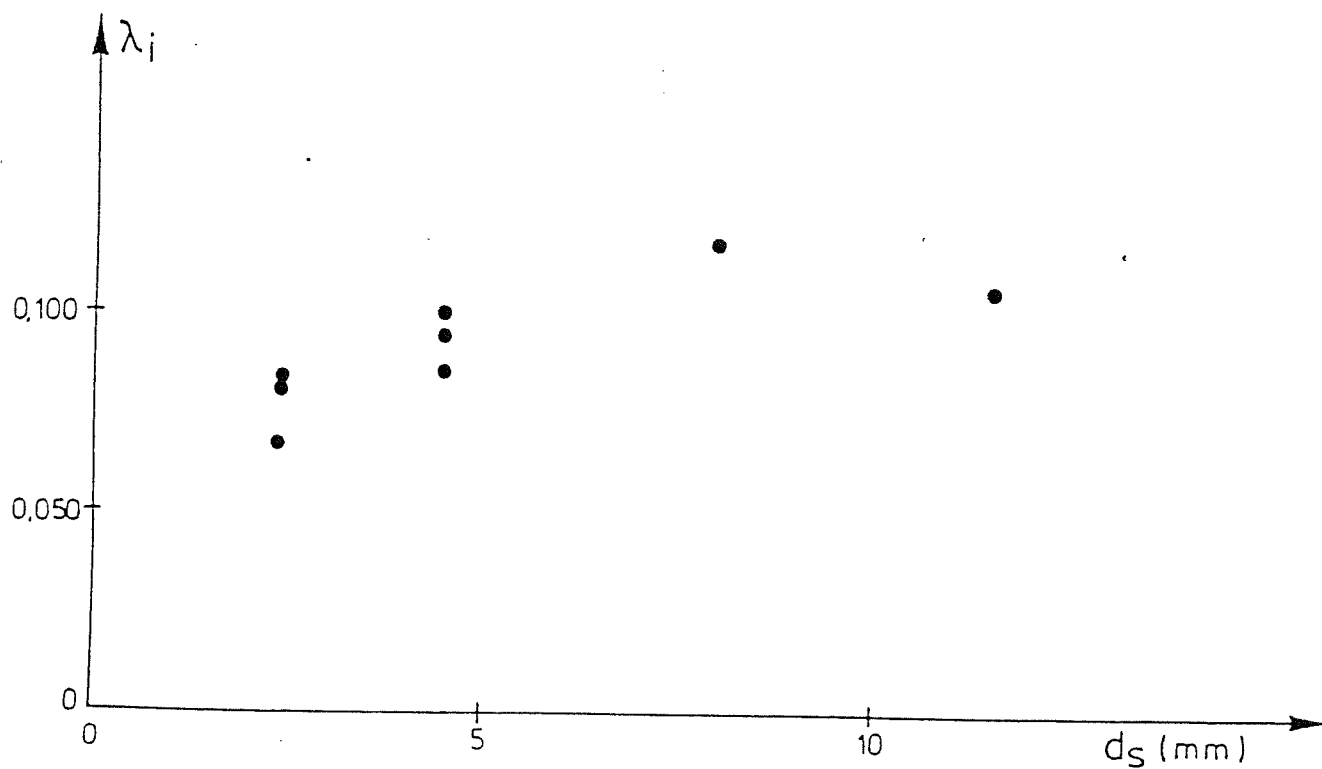
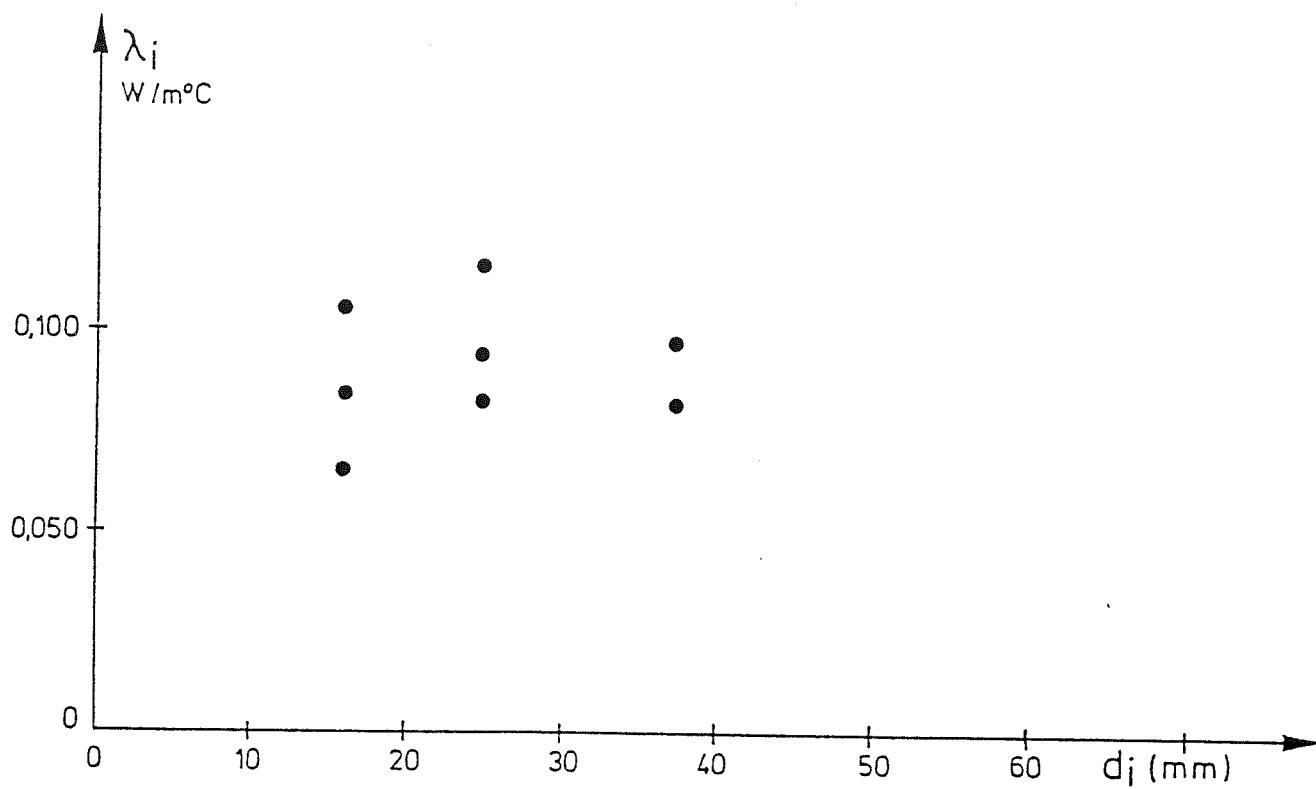


Figure 8

Isolant n°3 $\theta_S = 400^\circ\text{C}$

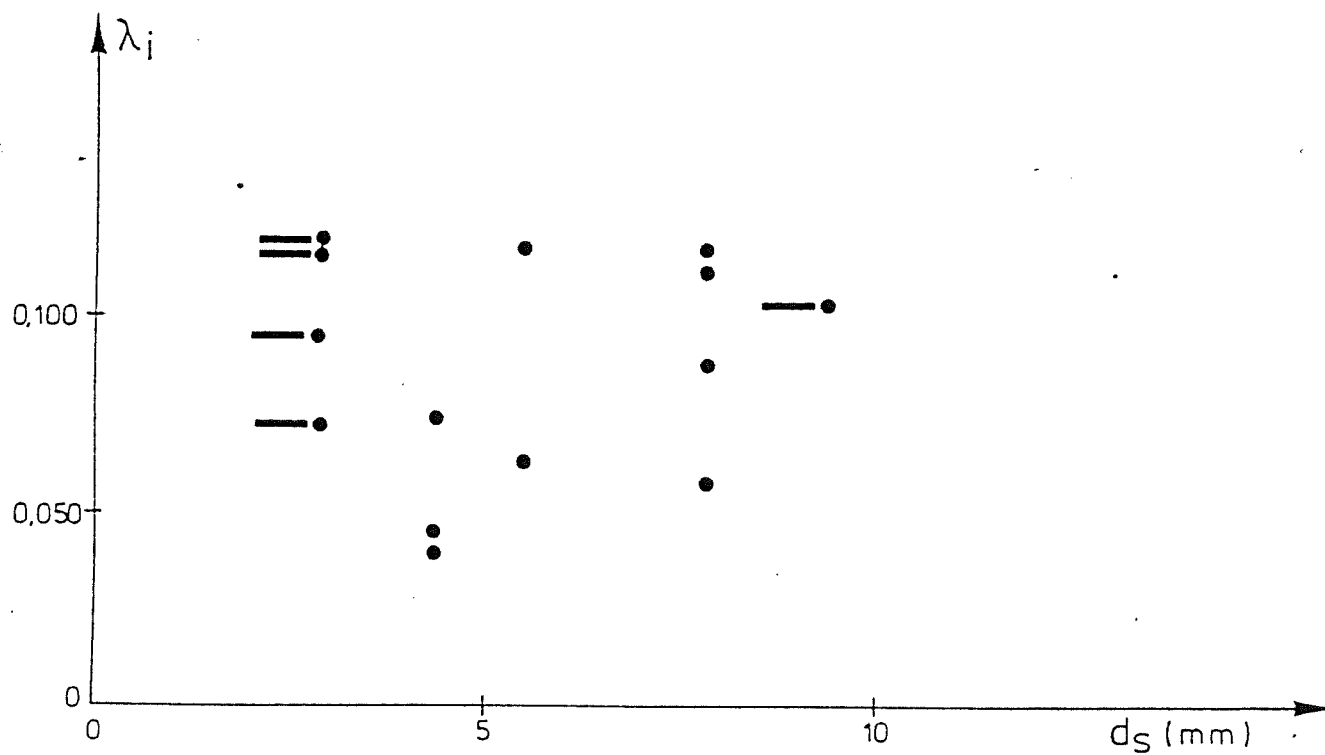
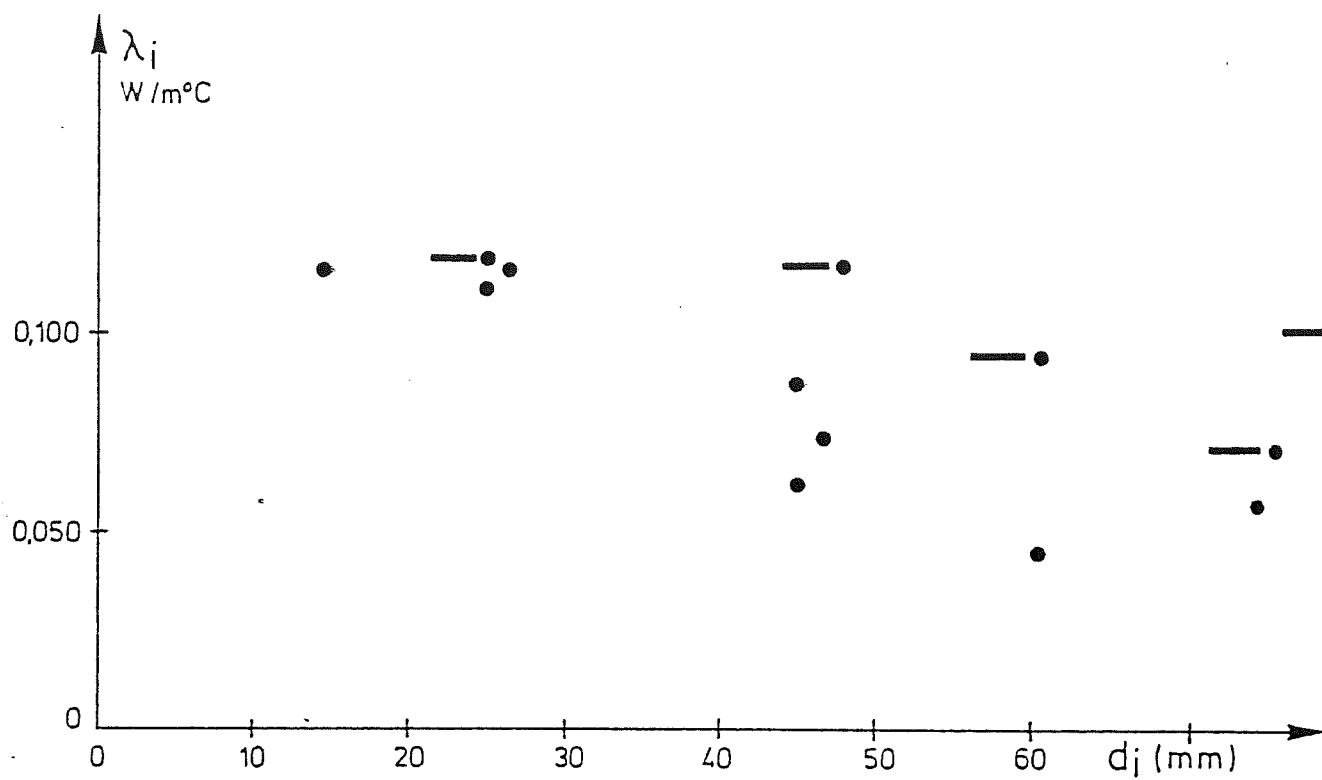
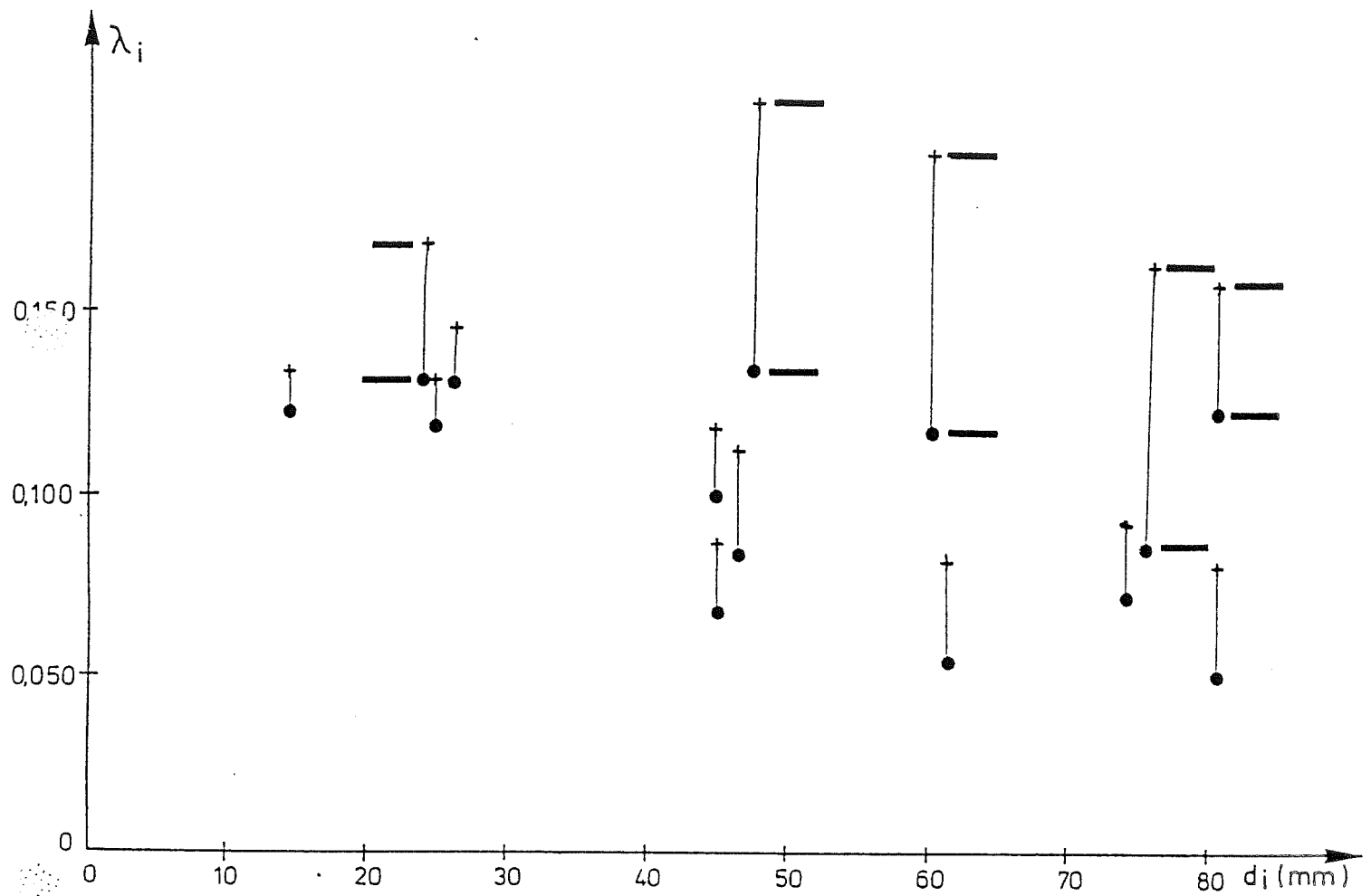


Figure 9

Isolant n° 3

$\theta_s = 500^\circ$



• $K_i = 0$

+ $K_i = 1100 \times 250 \times d_i$

Figure 10