

# **RCC-MRx**

**REGLES DE CONCEPTION ET DE CONSTRUCTION  
DES MATERIELS MECANIKES  
DES INSTALLATIONS NUCLEAIRES**

**EDITION 2012**

**1<sup>er</sup> Erratum – Mars 2016**

**afcen**

**Association française pour les règles de conception, de  
construction et de surveillance en exploitation des matériels  
des chaudières électro-nucléaires**

AFCEN - Association régie par la loi du 1er Juillet 1901  
Siège Administratif : AFCEN, 10, rue Juliette Récamier 69456 Lyon Cedex 06 FRANCE  
Dépôt légal n° 131-2012  
ISBN n° 2-913638-39-2

## NOTE AUX UTILISATEURS

Ce document propose des modifications qui correspondent à des erreurs dans la version française du RCC-MRx 2012.

Ces erreurs ont été identifiées à travers la préparation de l'Édition 2015 du RCC-MRx.

Leurs corrections impactent les courbes frontières d'irradiation de l'alliage 6061-T6 ainsi que les valeurs de  $S_{em}$  et  $S_{et}$  associées.

Les pages suivantes (7 pages) sont ainsi à remplacer :

- Section III - Tome 1 - Volume Z – Pages A3.2A 4/24, A3.2A 19/24, A3.2A 20/24, A3.2A 21/24, A3.2A 22/24, A3.2A 23/24 et A3.2A 24/24.

## SOMMAIRE

### Section III – Tome 1 – Volume Z - Annexe A3.2A : Ensemble de Caractéristiques pour les produits et pièces en alliage d'aluminium 6061-T6

<b>A3.2A.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>A3.2A.2</b>	<b>PROPRIETES PHYSIQUES.....</b>	<b>1</b>
A3.2A.21	COEFFICIENTS DE DILATATION .....	1
A3.2A.22	MODULE DE YOUNG .....	2
A3.2A.23	COEFFICIENT DE POISSON .....	2
A3.2A.24	MASSE VOLUMIQUE .....	2
A3.2A.25	CHALEUR SPECIFIQUE, CONDUCTIVITE THERMIQUE, DIFFUSIVITE THERMIQUE .....	2
<b>A3.2A.3</b>	<b>COURBES FRONTIERES.....</b>	<b>3</b>
A3.2A.31	COURBES DE FLUAGE ET VIEILLISSEMENT THERMIQUE NEGLIGEABLES.....	3
A3.2A.311	<i>Courbe de fluage négligeable</i> .....	3
A3.2A.312	<i>Courbe de vieillissement thermique négligeable</i> .....	3
A3.2A.32	COURBE D'IRRADIATION NEGLIGEABLE.....	4
A3.2A.33	IRRADIATION MAXIMALE ADMISSIBLE .....	4
<b>A3.2A.4</b>	<b>DONNEES POUR L'ANALYSE - BASE .....</b>	<b>5</b>
A3.2A.41	LIMITE CONVENTIONNELLE D'ELASTICITE A 0,2 % $R_{P0,2}$ .....	5
A3.2A.42	RESISTANCE A LA TRACTION $R_M$ .....	5
A3.2A.43	VALEURS DE $S_M$ ET $S$ .....	5
A3.2A.44	NUMERO NON UTILISE.....	5
A3.2A.45	LOIS DE CONSOLIDATION EN TRACTION .....	7
A3.2A.451	<i>Pour une déformation plastique limitée à 2%</i> .....	7
A3.2A.452	<i>Pour une déformation totale atteignant l'allongement à la charge maximale (Non fournies)</i> .....	7
A3.2A.46	COURBES CYCLIQUES, VALEURS DE $K_\epsilon$ , $K_V$ ET $K_S$ .....	8
A3.2A.461	<i>Courbes cycliques</i> .....	8
A3.2A.462	<i>Coefficient <math>K_\epsilon</math></i> .....	10
A3.2A.463	<i>Coefficient <math>K_V</math></i> .....	11
A3.2A.464	<i>Coefficient de symétrisation <math>K_S</math></i> .....	12
A3.2A.47	COURBES DE FATIGUE .....	13
<b>A3.2A.5</b>	<b>DONNEES POUR L'ANALYSE – FLUAGE – VIEILLISSEMENT THERMIQUE .....</b>	<b>15</b>
A3.2A.51	FACTEUR DE VIEILLISSEMENT THERMIQUE .....	15
A3.2A.52	VALEURS DE $S_T$ .....	15
A3.2A.53	CONTRAINTES DE RUPTURE EN FLUAGE $S_R$ .....	15
A3.2A.54	LOIS DE FLUAGE-DEFORMATION (NON FOURNIES).....	15
A3.2A.55	DIAGRAMME D'INTERACTION FATIGUE – FLUAGE (NON FOURNI) .....	15
A3.2A.56	DEFORMATION MAXIMALE ADMISSIBLE $D_{MAX}$ (NON FOURNIE).....	15
<b>A3.2A.6</b>	<b>DONNEES POUR L'ANALYSE - IRRADIATION .....</b>	<b>18</b>
A3.2A.61	LIMITE CONVENTIONNELLE D'ELASTICITE A 0,2 % $R_{P0,2}$ (APRES IRRADIATION) .....	18
A3.2A.62	RESISTANCE A LA TRACTION $R_M$ (APRES IRRADIATION) .....	18
A3.2A.63	VALEURS DE $S_{EM}$ ET $S_{ET}$ (APRES IRRADIATION) .....	19
A3.2A.64	DUCTILITE EN TRACTION (AVANT ET APRES IRRADIATION).....	23
A3.2A.65	LOIS DE CONSOLIDATION EN TRACTION (APRES IRRADIATION) - NON FOURNIES.....	24
A3.2A.66	COURBES CYCLIQUES, VALEURS DE $K_\epsilon$ , $K_V$ ET $K_S$ (APRES IRRADIATION) - NON FOURNIES.....	24
A3.2A.67	COURBES DE FATIGUE (APRES IRRADIATION).....	24
A3.2A.68	NUMÉRO NON UTILISÉ.....	24
A3.2A.69	GONFLEMENT (APRES IRRADIATION).....	24
<b>A3.2A.7</b>	<b>NUMÉRO NON UTILISÉ .....</b>	<b>24</b>
<b>A3.2A.8</b>	<b>DONNEES POUR L'ANALYSE – MECANIQUE DE LA RUPTURE.....</b>	<b>24</b>

---

A3.2A.81	MECANIQUE DE LA RUPTURE - BASE.....	24
A3.2A.811	Valeurs de $J_{IC}$ .....	24

## A3.2A.1 INTRODUCTION

L'Ensemble de Caractéristiques **A3.2A** doit être appliqué aux produits et pièces en alliage d'aluminium 6061 dans les états métallurgiques T6, T651 et T652 exclusivement, les STR **RM 522-5** et **RM 522-6** étant exclus.

Certaines caractéristiques sont modifiées pour les analyses qui concernent des zones comportant des jonctions soudées. Ces modifications sont définies dans l'**annexe A9**.

Les interpolations pourront être faites linéairement en utilisant le logarithme de la fluence  $\Phi_{th}$ , le logarithme du temps  $t$ , le logarithme du nombre de cycles  $N$  et les valeurs directes pour les autres caractéristiques.

## A3.2A.2 PROPRIETES PHYSIQUES

### A3.2A.2.1 COEFFICIENTS DE DILATATION

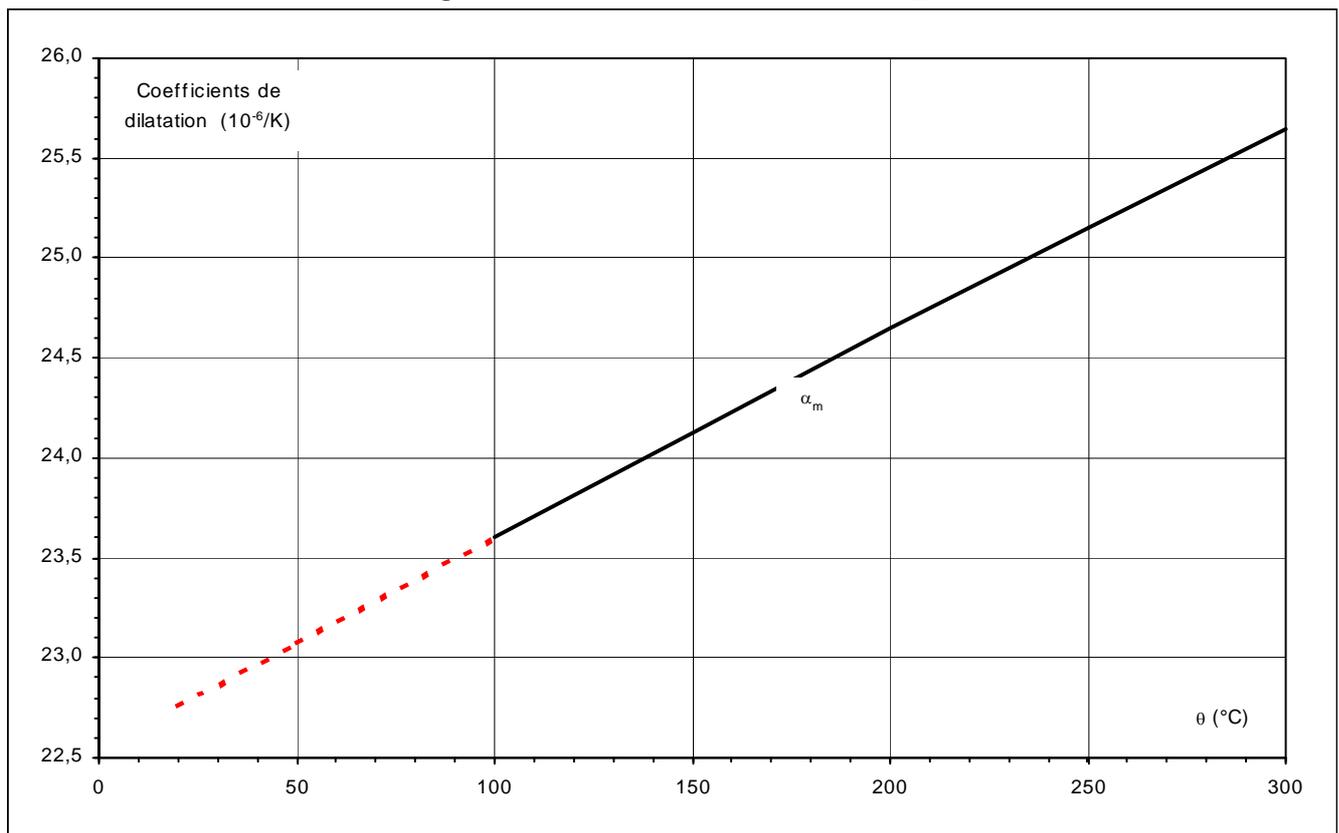
Le coefficient moyen de dilatation thermique linéaire  $\alpha_m$  entre 20 °C et la température  $\theta$  est donné en fonction de  $\theta$  par le **tableau A3.2A.21** et la **figure A3.2A.21**.

En attente de valeurs tabulées complémentaires, le coefficient moyen de dilatation entre 20°C et la température  $\theta$  telle que  $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 300^\circ\text{C}$  sera déterminé par interpolation et extrapolation linéaire.

**Tableau A3.2A.21 : coefficient de dilatation  $\alpha_m$**

$\theta$ (°C)	100	200	300
$\alpha_m$ ( $10^{-6}/\text{K}$ )	23,6	24,65	25,65

**Figure A3.2A.21 : coefficient de dilatation  $\alpha_m$**



## A3.2A.22 *MODULE DE YOUNG*

Le module de Young  $E$  est donné en fonction de la température  $\theta$  par la **formule A3.2A.22**, le **tableau A3.2A.22** et la **figure A3.2A.22**.

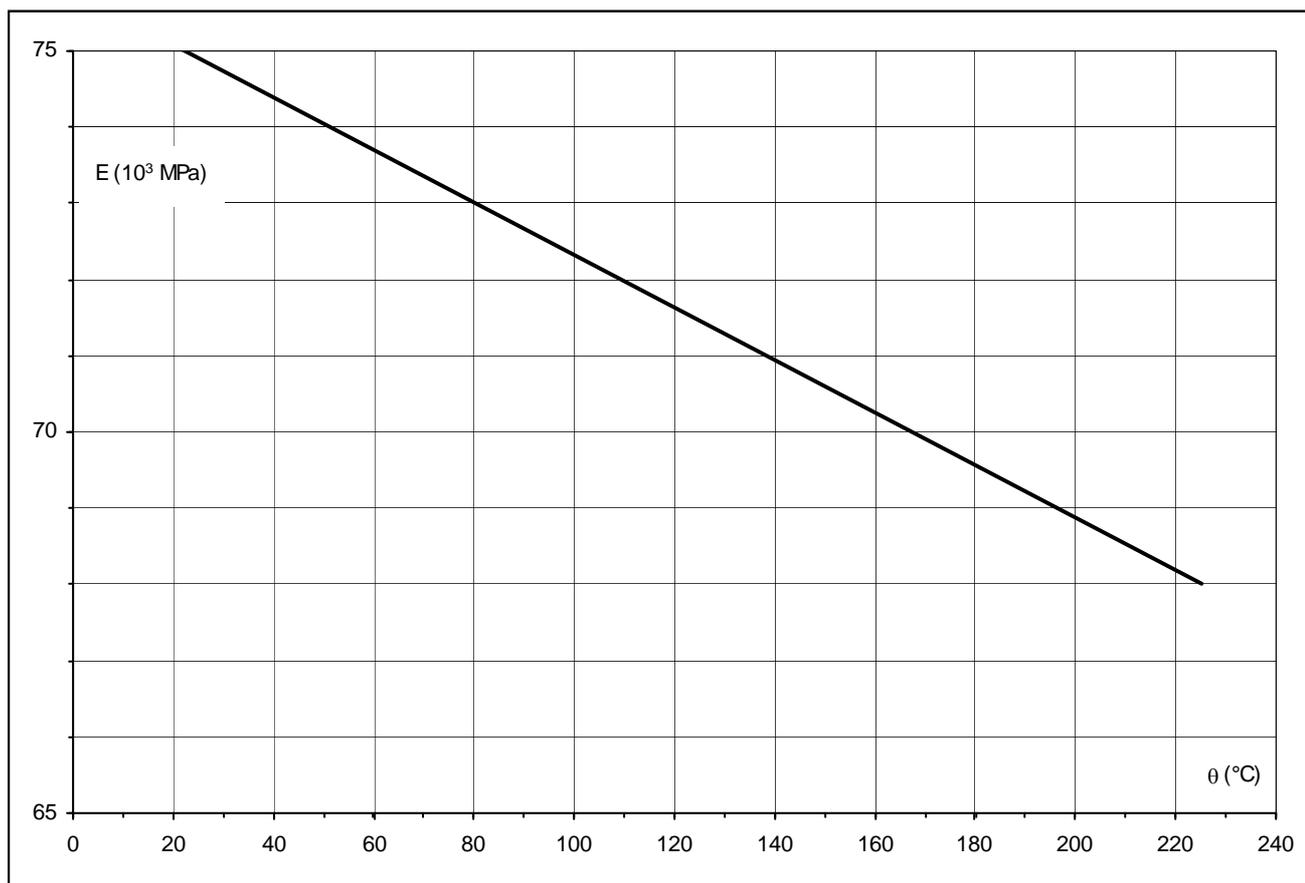
- **Formule A3.2A.22** :  $E = 75,755 - 0,0344 \cdot \theta$

Dans cette formule,  $E$  est exprimé en GPa et  $\theta$  en °C. Cette formule est valable pour  $20 \leq \theta (\text{°C}) \leq 225$ .

**Tableau A3.2A.22 : module de Young  $E$**

$\theta$ (°C)	20	50	75	100	125	150	175	200	225
$E$ ( $10^3$ MPa)	75,1	74,0	73,2	72,3	71,5	70,6	69,7	68,9	68,0

**Figure A3.2A.22 : module de Young  $E$**



## A3.2A.23 *COEFFICIENT DE POISSON*

On prend  $\nu = 0,33$  dans le domaine élastique.

## A3.2A.24 *MASSE VOLUMIQUE*

La masse volumique  $\rho$  à 20°C est de 2700 kg/m<sup>3</sup>. Pour une température  $\theta$  telle que  $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 300^\circ\text{C}$ , la masse volumique peut être déterminée en tenant compte de la dilatation volumique calculée à partir de  $\alpha_m$ .

## A3.2A.25 *CHALEUR SPECIFIQUE, CONDUCTIVITE THERMIQUE, DIFFUSIVITE THERMIQUE*

Pour des températures comprises entre 20°C et 150°C, la chaleur spécifique  $C_p$ , la conductivité thermique  $\lambda$  et la diffusivité thermique  $a$  sont :

- $C_p = 896$  J/(kg.K)
- $\lambda = 167$  W/(m.K)
- $a = 6,9 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s

## A3.2A.3 COURBES FRONTIERES

### A3.2A.31 COURBES DE FLUAGE ET VIEILLISSEMENT THERMIQUE NEGLIGEABLES

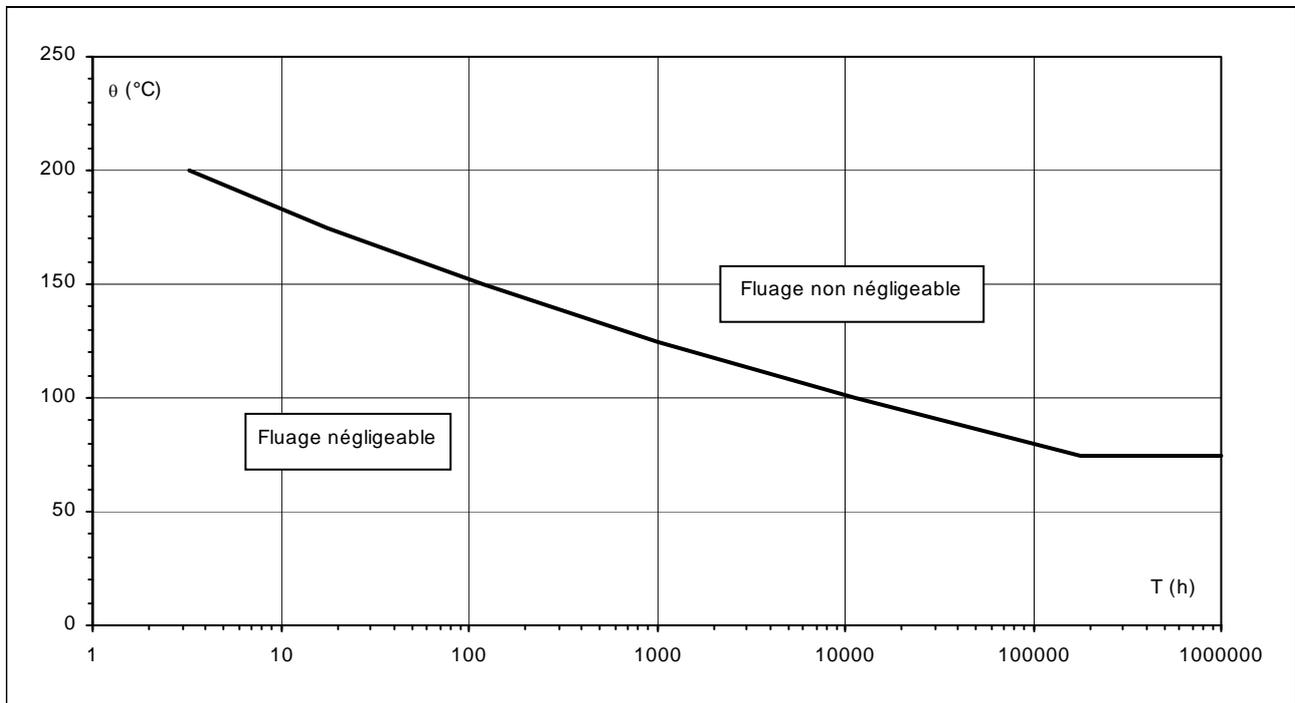
#### A3.2A.311 COURBE DE FLUAGE NEGLIGEABLE

Pour des températures inférieures à 75 °C, le fluage est négligeable quel que soit le temps de maintien. Le temps maximal T (h) durant lequel la structure peut rester à la température  $\theta$  sans que le fluage soit significatif est donné en fonction de  $\theta$  par le **tableau A3.2A.311** et la **figure A3.2A.311**.

**Tableau A3.2A.311 : courbe de fluage négligeable**

$\theta$ (°C)	75	100	125	150	175	200
T (h)	$1,8 \cdot 10^5$	11200	1000	119	18	3,3

**Figure A3.2A.311 : courbe de fluage négligeable**



#### A3.2A.312 COURBE DE VIEILLISSEMENT THERMIQUE NEGLIGEABLE

Pour des températures inférieures à 75 °C, le vieillissement thermique est négligeable quel que soit le temps de maintien. Le temps maximal T (h) durant lequel la structure peut rester à la température  $\theta$  sans que le vieillissement thermique soit significatif est donné, en fonction de  $\theta$ , en utilisant le **tableau A3.2A.51**.

### A3.2A.32 COURBE D'IRRADIATION NEGLIGEABLE

Les conditions d'irradiation négligeable  $\Phi_{ir.neg}$  sont données par le **tableau A3.2A.32** et la **figure A3.2A.32**, en fonction de la température  $\theta$ .

La fluence  $\Phi_{ir.neg}$  est exprimée en neutrons thermiques conventionnels notés  $n_{th}$  ( $E = 0,0254$  eV) par  $cm^2$ .

### A3.2A.33 IRRADIATION MAXIMALE ADMISSIBLE

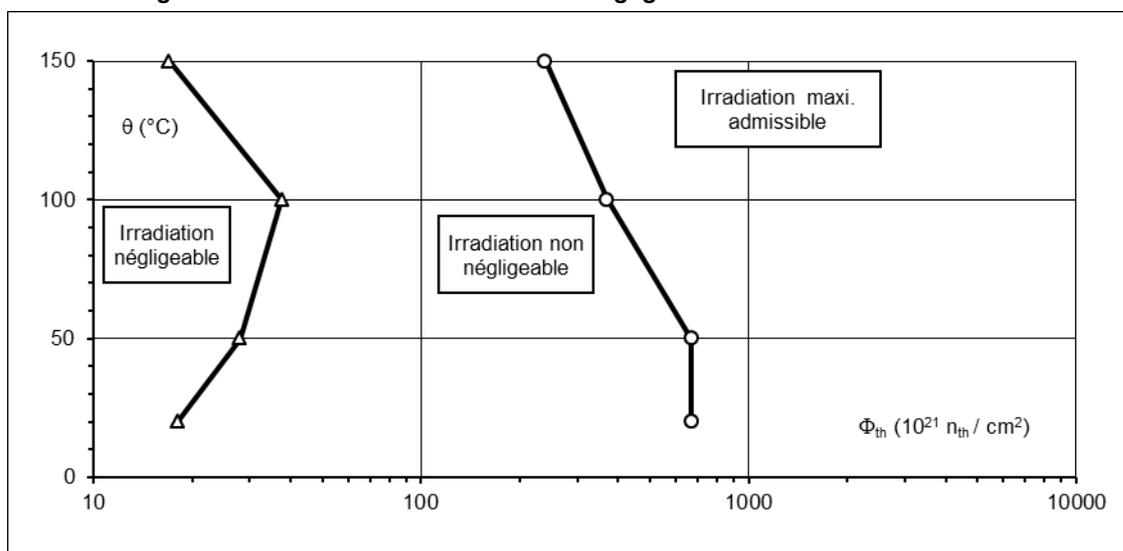
Les conditions d'irradiation maximale admissible  $\Phi_{ir.max}$  sont données par le **tableau A3.2A.32** et la **figure A3.2A.32**, en fonction de la température  $\theta$ .

La fluence  $\Phi_{ir.max}$  est exprimée en neutrons thermiques conventionnels notés  $n_{th}$  ( $E = 0,0254$  eV) par  $cm^2$ .

**Tableau A3.2A.32 : conditions d'irradiation négligeable et d'irradiation maximale**

$\theta$ (°C)	20°C	50°C	100°C	150°C
$\Phi_{ir.neg}$ ( $10^{21}$ $n_{th}/cm^2$ )	18	28	37,5	17
$\Phi_{ir.max}$ ( $10^{21}$ $n_{th}/cm^2$ )	670	670	370	240

**Figure A3.2A.32 : courbes d'irradiation négligeable et d'irradiation maximale**



## A3.2A.4 DONNEES POUR L'ANALYSE - BASE

### A3.2A.41 LIMITE CONVENTIONNELLE D'ELASTICITE A 0,2 % $R_{p0,2}$

- La limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % **moyenne**  $(R_{p0,2}^t)_{\text{moy}}$  est donnée en fonction de la température  $\theta$  par la **formule A3.2A.41a**, le **tableau A3.2A.41** et la **figure A3.2A.41**.
  - Formule A3.2A.41a :**  

$$(R_{p0,2}^t)_{\text{moy}} = 301,9 - 0,45987 \cdot \theta + 7,200 \cdot 10^{-4} \cdot \theta^2 - 3,956 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^3$$
 Dans cette formule  $(R_{p0,2}^t)_{\text{moy}}$  est en MPa et  $\theta$  en °C. Cette formule est applicable pour  $20 \leq \theta$  (°C)  $\leq 250$ .
- La limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % **minimale**  $(R_{p0,2}^t)_{\text{min}}$  est donnée en fonction de la température  $\theta$  par la **formule A3.2A.41b**, le **tableau A3.2A.41** et la **figure A3.2A.41**.
  - Formule A3.2A.41b :**  

$$(R_{p0,2}^t)_{\text{min}} = 0,819 \cdot (R_{p0,2}^t)_{\text{moy}}$$
 Dans cette formule  $(R_{p0,2}^t)_{\text{min}}$  est en MPa et  $\theta$  en °C. Cette formule est applicable pour  $50 \leq \theta$  (°C)  $< 250$ . Pour 20°C et 250°C,  $(R_{p0,2}^t)_{\text{min}}$  est donnée dans le **tableau A3.2A.41**.

### A3.2A.42 RESISTANCE A LA TRACTION $R_m$

- La résistance à la traction **moyenne**  $(R_m)_{\text{moy}}$  est donnée en fonction de la température  $\theta$  par la **formule A3.2A.42a**, le **tableau A3.2A.41** et la **figure A3.2A.41**.
  - Formule A3.2A.42a :**  

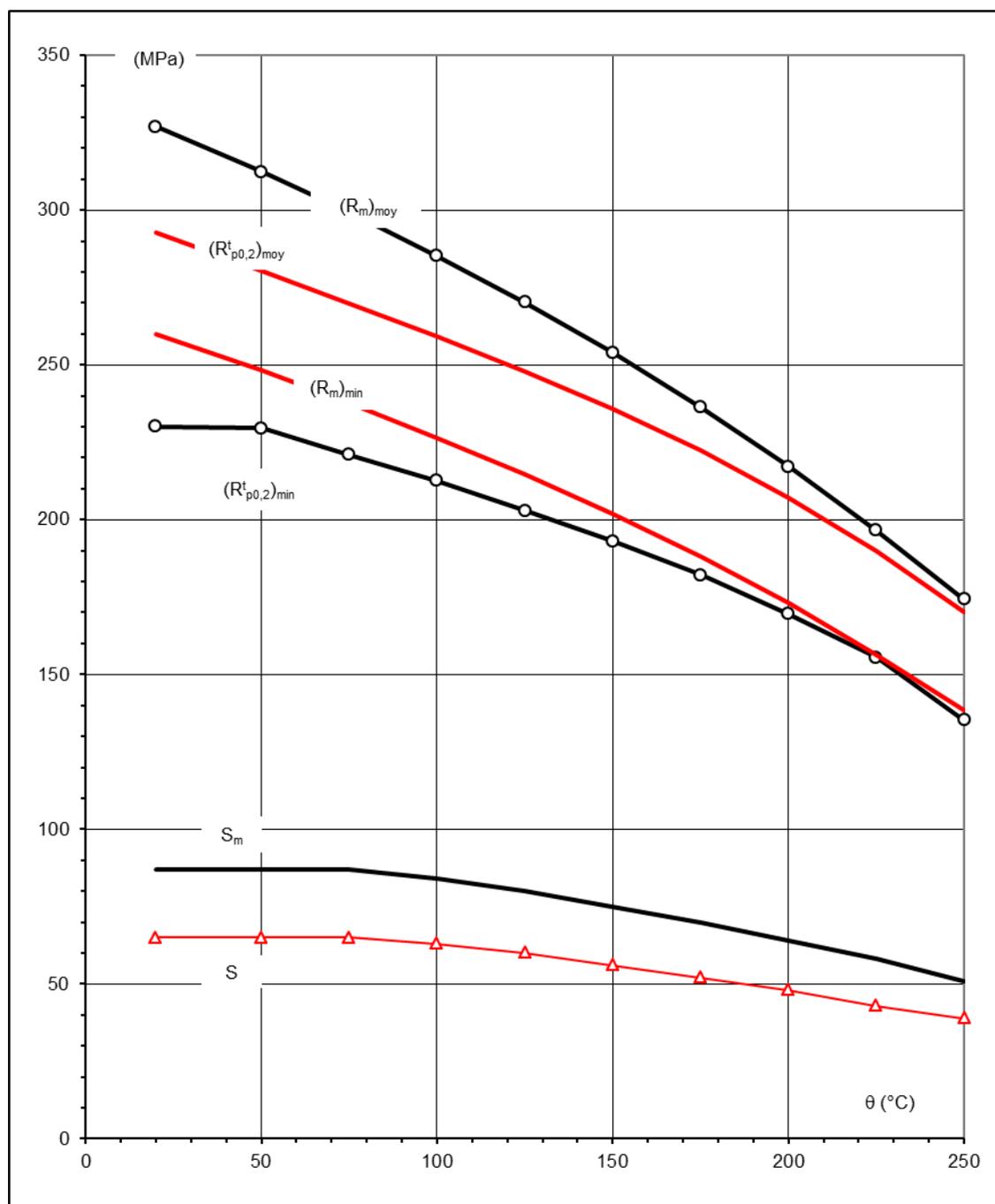
$$(R_m)_{\text{moy}} = 336,2 - 0,4529 \cdot \theta - 4,2650 \cdot 10^{-4} \cdot \theta^2 - 1,416 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^3$$
 Dans cette formule  $(R_m)_{\text{moy}}$  est en MPa et  $\theta$  en °C. Cette formule est applicable pour  $20 \leq \theta$  (°C)  $\leq 250$ .
- La résistance à la traction **minimale**  $(R_m)_{\text{min}}$  est donnée en fonction de la température  $\theta$  par la **formule A3.2A.42b**, le **tableau A3.2A.41** et la **figure A3.2A.41**.
  - Formule A3.2A.42b :**  

$$(R_m)_{\text{min}} = 0,795 \cdot (R_m)_{\text{moy}}$$
 Dans cette formule  $(R_m)_{\text{min}}$  est en MPa et  $\theta$  en °C. Cette formule est applicable pour  $20 \leq \theta$  (°C)  $\leq 250$ .

### A3.2A.43 VALEURS DE $S_m$ ET $S$

La contrainte maximale admissible  $S_m$  et la contrainte admissible  $S$  sont données en fonction de la température  $\theta$  par le **tableau A3.2A.41** et la **figure A3.2A.41**.

### A3.2A.44 Numéro non utilisé

Figure A3.2A.41 : valeurs de  $R_{p0,2}^t$ ,  $R_m$ ,  $S_m$  et  $S$ Tableau A3.2A.41 : valeurs de  $R_{p0,2}^t$ ,  $R_m$ ,  $S_m$  et  $S$ 

$\theta$ (°C)	$(R_{p0,2}^t)_{min}$ (MPa)	$(R_{p0,2}^t)_{moy}$ (MPa)	$(R_m)_{min}$ (MPa)	$(R_m)_{moy}$ (MPa)	$S_m$ (MPa)	$S$ (MPa)
20	230	293	260	327	87	65
50	230	280	248	312	87	65
75	221	270	238	299	87	65
100	213	259	226	285	84	63
125	203	248	215	270	80	60
150	193	236	202	254	75	56
175	182	222	188	236	70	52
200	170	207	173	217	64	48
225	156	190	156	197	58	43
250	135	170	139	174	51	39

## A3.2A.45 LOIS DE CONSOLIDATION EN TRACTION

### A3.2A.451 POUR UNE DEFORMATION PLASTIQUE LIMITEE A 2%

- Les lois de consolidation **moyenne** en traction sont données par la **formule A3.2A.451a** et la **figure A3.2A.451**.

- **Formule A3.2A.451a :**

$$\sigma = k_0 \times (\varepsilon_p)^{n_0} \quad \varepsilon_t = 100 \times \sigma/E + [\sigma/(k_0)]^\alpha$$

Dans ces formules,  $\varepsilon_p$  (%) et  $\varepsilon_t$  (%) désignent respectivement la déformation plastique et la déformation totale causée par la contrainte  $\sigma$  (MPa).

Le paramètre  $n_0$  est égal à 0,0371 à 20°C, 0,0371 à 75°C et 0,02 à 150°C ;  $\alpha = 1/n_0$

La constante  $k_0$  est égale à 310,9 à 20 °C, 286,3 à 75°C et 243,4 à 150°C.

- Les lois de consolidation **minimale** en traction sont données par la **formule A3.2A.451b**.

- **Formule A3.2A.451b :**

$$\sigma = k'_0 \times (\varepsilon_p)^{n'_0} \quad \varepsilon_t = 100 \times \sigma/E + [\sigma/(k'_0)]^\alpha$$

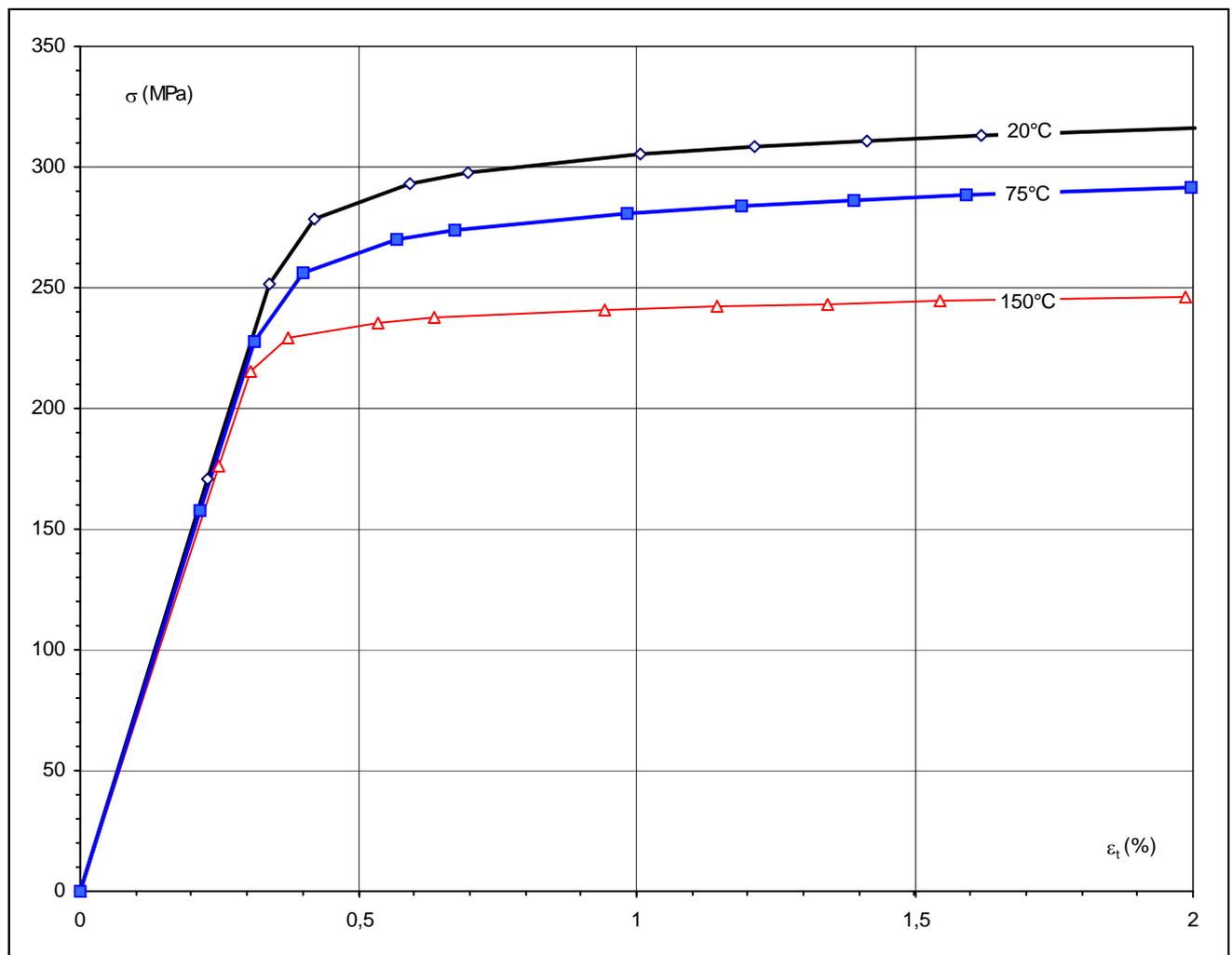
Le paramètre  $n'_0$  est égal à 0,0371 à 20°C, 0,0371 à 75°C et 0,02 à 150°C ;  $\alpha = 1/n'_0$

La constante  $k'_0$  est égale à 254,8 à 20 °C, 234,6 à 75°C et 199,5 à 150°C.

avec les mêmes désignations que pour les formules de la loi moyenne.

Pour les températures intermédiaires, on construira la courbe point par point en interpolant linéairement sur les contraintes.

**Figure A3.2A.451 : lois de consolidation moyenne en traction**



### A3.2A.452 POUR UNE DEFORMATION TOTALE ATTEIGNANT L'ALLONGEMENT A LA CHARGE MAXIMALE (Non fournies)

## A3.2A.46 COURBES CYCLIQUES, VALEURS DE $K_\varepsilon$ , $K_v$ ET $K_s$

### A3.2A.461 COURBES CYCLIQUES

Les courbes cycliques sont données par la **formule A3.2A.461** et la **figure A3.2A.461a** et **b**. Pour les températures intermédiaires, on construit la courbe cyclique point par point en interpolant linéairement sur les contraintes.

- **Formule A3.2A.461** :  $\overline{\Delta\varepsilon}_t(\%) = 100 \cdot \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{3E} \left( \overline{\Delta\sigma} \right) + \left( \frac{\overline{\Delta\sigma}}{K} \right)^{1/m}$

E : module de Young fonction de la température  $\theta$

K, m : coefficients fournis par le **tableau A3.2A.461**

**Tableau A3.2A.461 : coefficients K et m**

$\theta$ (°C)	K (MPa)	m
20	613,1	0,0941
50	594,1	0,0769
75	579,9	0,0486
100	571,5	0,0970
125	543	0,1388

**Figure A3.2A.461a : courbes cycliques**

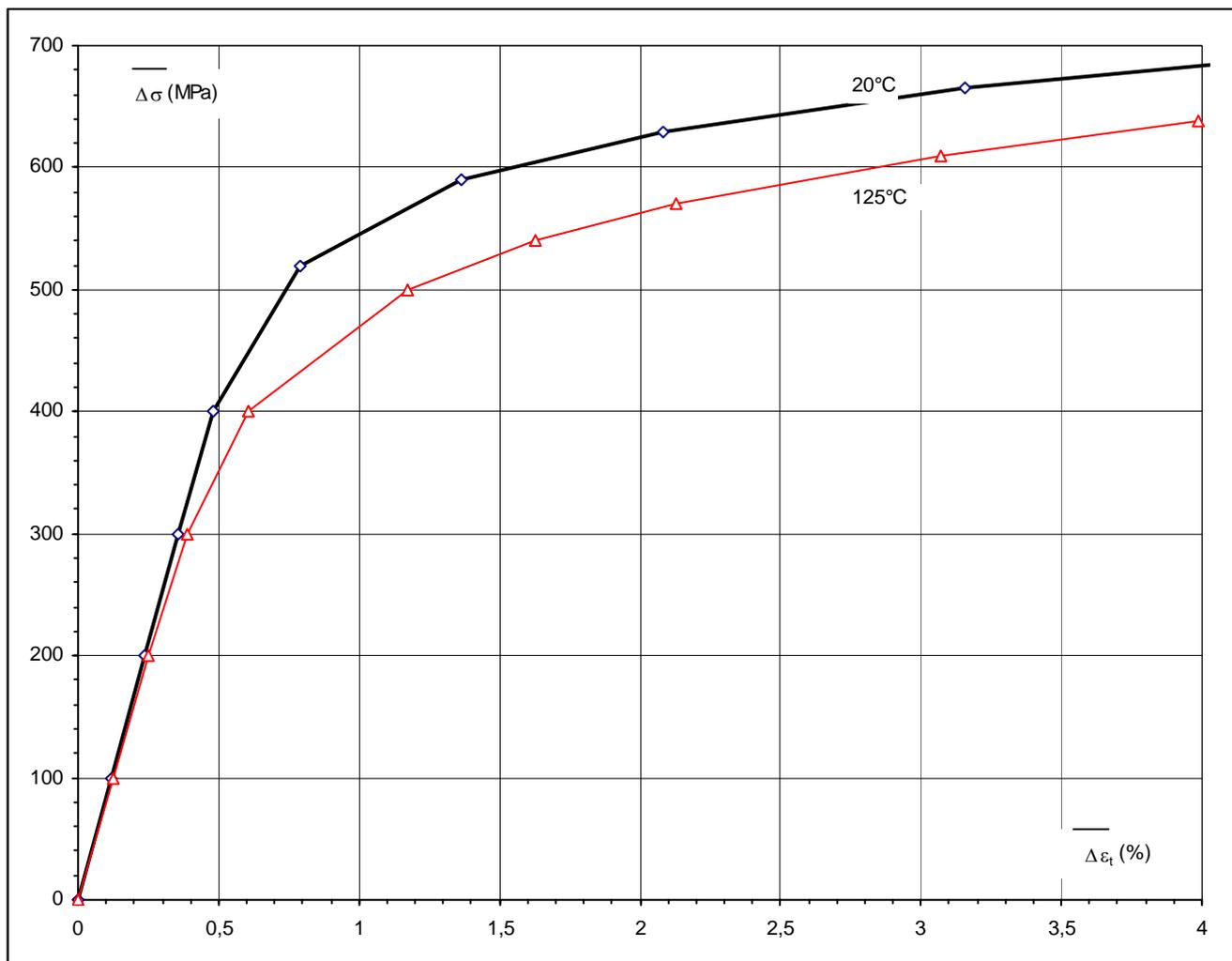
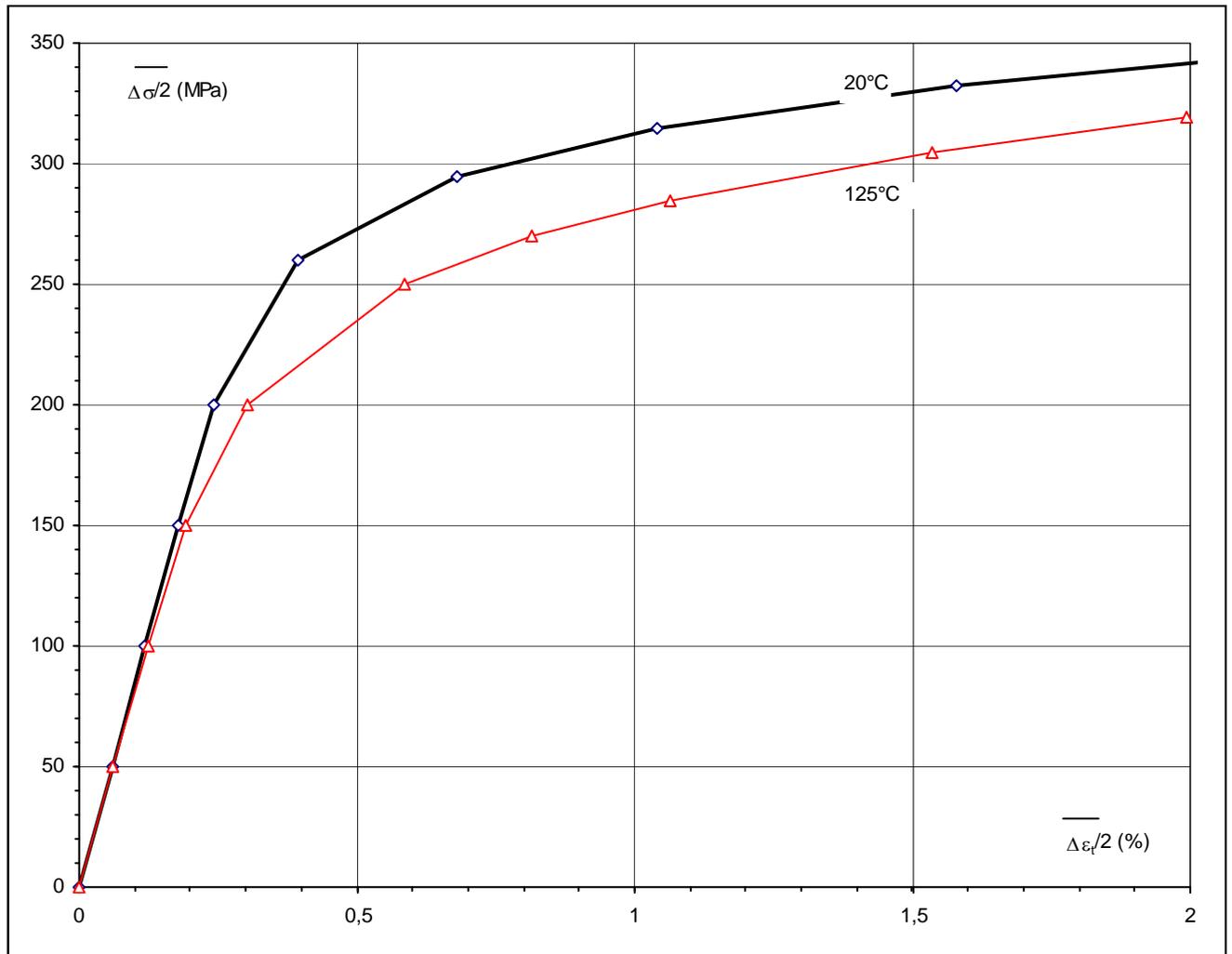


Figure A3.2A.461b : courbes cycliques réduites



### A3.2A.462 COEFFICIENT $K_\varepsilon$

Les valeurs de  $K_\varepsilon$  sont données par les **formules A3.2A.462**, le **tableau A3.2A.462** et la **figure A3.2A.462** : Pour une température intermédiaire, on calcule les valeurs de  $K_\varepsilon$  avec les **formules A3.2A.462** et la courbe cyclique à cette température.

- **Formules A3.2A.462**

$$\overline{\Delta\varepsilon_1} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1+\nu}{E} \cdot \overline{\Delta\sigma_{\text{tot}}}$$

$$\overline{\Delta\sigma_{\text{tot}}} \cdot \overline{\Delta\varepsilon_1} = \overline{\Delta\sigma} \cdot (\overline{\Delta\varepsilon_1} + \overline{\Delta\varepsilon_3})$$

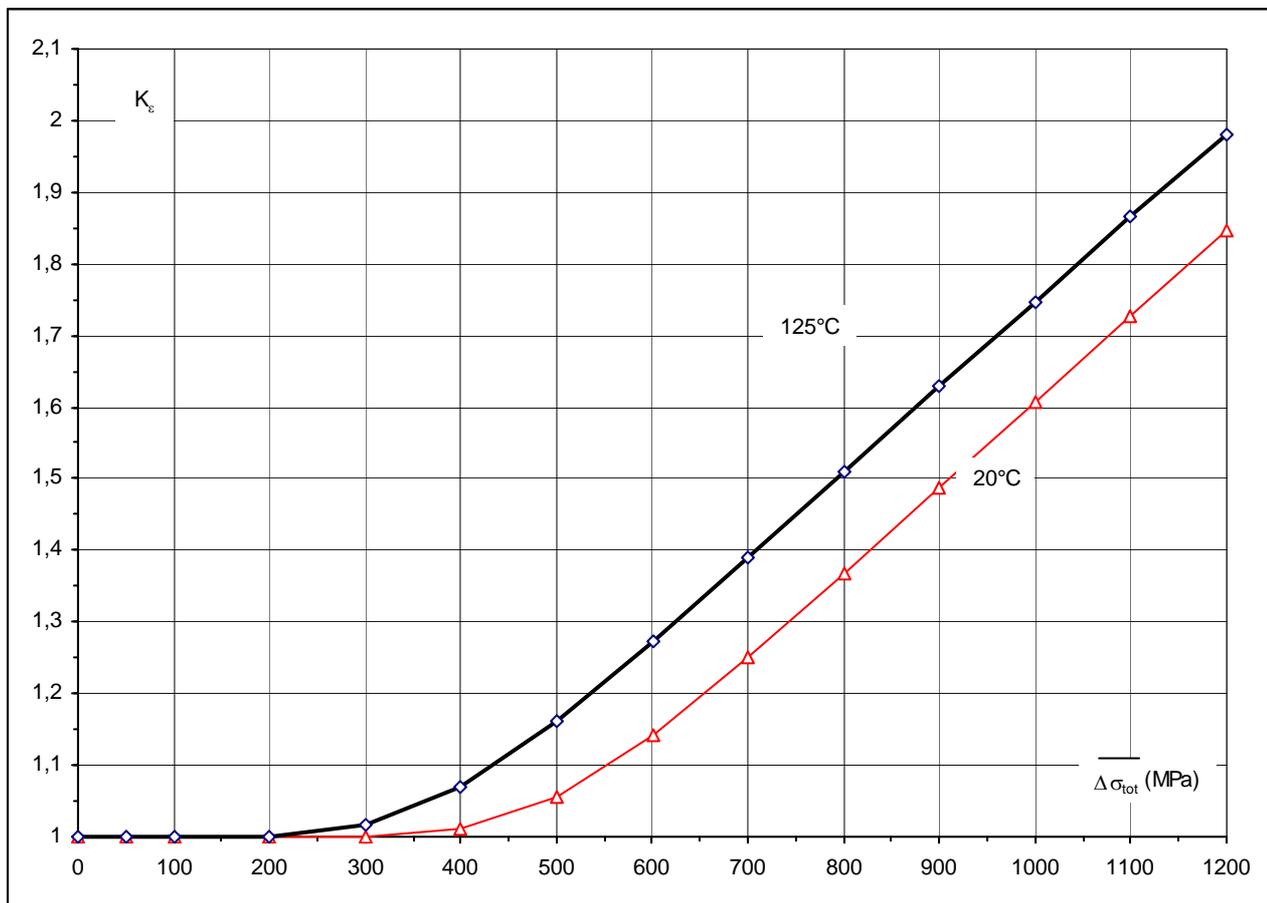
$$\overline{\Delta\varepsilon_1} + \overline{\Delta\varepsilon_3} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1+\nu}{E} \cdot \overline{\Delta\sigma} + 0,01 \cdot \left( \frac{\overline{\Delta\sigma}}{K} \right)^{1/m}$$

$$K_\varepsilon = \frac{\overline{\Delta\varepsilon_1} + \overline{\Delta\varepsilon_3}}{\overline{\Delta\varepsilon_1}} \quad (\overline{\Delta\varepsilon_2} \text{ négligeable})$$

**Tableau A3.2A.462 : valeurs de  $K_\varepsilon$**

$\overline{\Delta\sigma_{\text{tot}}}$	50 MPa	100 MPa	200 MPa	300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa	900 MPa	1000 MPa	1100 MPa	1200 MPa
20 °C	1	1	1	1,00	1,01	1,06	1,14	1,25	1,37	1,49	1,61	1,73	1,85
50 °C	1	1	1	1,00	1,01	1,05	1,15	1,27	1,39	1,52	1,65	1,78	1,92
75 °C	1	1	1	1,00	1,00	1,02	1,13	1,26	1,41	1,55	1,70	1,85	1,99
100 °C	1	1	1	1,00	1,02	1,09	1,20	1,32	1,44	1,57	1,70	1,83	1,95
125 °C	1	1	1,00	1,02	1,07	1,16	1,27	1,39	1,51	1,63	1,75	1,87	1,98

**Figure A3.2A.462 : valeurs de  $K_\varepsilon$**



### A3.2A.463 COEFFICIENT $K_v$

Les valeurs de  $K_v$  sont données par les formules A3.2A.463, le tableau A3.2A.463 et la figure A3.2A.463. Pour une température intermédiaire, on calcule les valeurs de  $K_v$  avec les formules A3.2A.463 et la courbe cyclique à cette température.

• Formules A3.2A.463 :

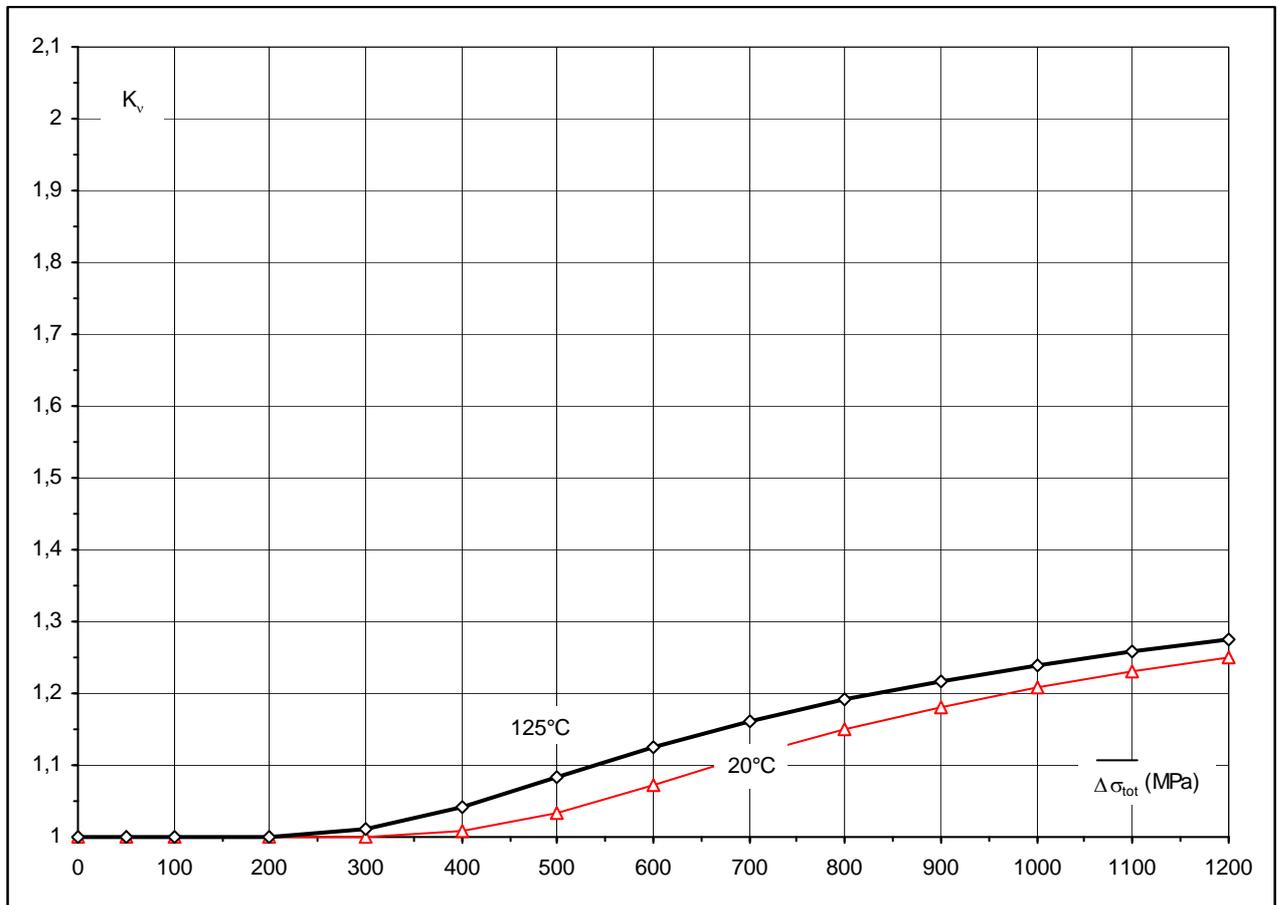
$$K_v = [3(1 - \nu) + (4\nu - 2) \cdot t] / (1 + \nu) \quad t + A \cdot t^r \cdot (\Delta\sigma_{\text{tot}})^{r-1} = 1$$

$$A = E / (200 \cdot (1 - \nu) \cdot K_v^r) \quad r = 1/m$$

Tableau A3.2A.463 : valeurs de  $K_v$

$\Delta\sigma_{\text{tot}}$	50 MPa	100 MPa	200 MPa	300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa	900 MPa	1000 MPa	1100 MPa	1200 MPa
20 °C	1	1	1	1,00	1,01	1,03	1,07	1,11	1,15	1,18	1,21	1,23	1,25
50 °C	1	1	1	1,00	1,00	1,03	1,07	1,12	1,16	1,19	1,21	1,24	1,26
75 °C	1	1	1	1,00	1,00	1,02	1,06	1,11	1,16	1,19	1,22	1,24	1,26
100 °C	1	1	1	1,00	1,01	1,05	1,09	1,14	1,17	1,20	1,23	1,25	1,26
125 °C	1	1	1,00	1,01	1,04	1,08	1,13	1,16	1,19	1,22	1,24	1,26	1,27

Figure A3.2A.463 : valeurs de  $K_v$



### A3.2A.464 COEFFICIENT DE SYMETRISATION $K_S$

Sur la plage de température de 50 à 80°C, le coefficient de symétrisation  $K_S$  est donné par la **formule A3.2A 464** et la **figure A3.2A.464**.

- **formule A3.2A 464**

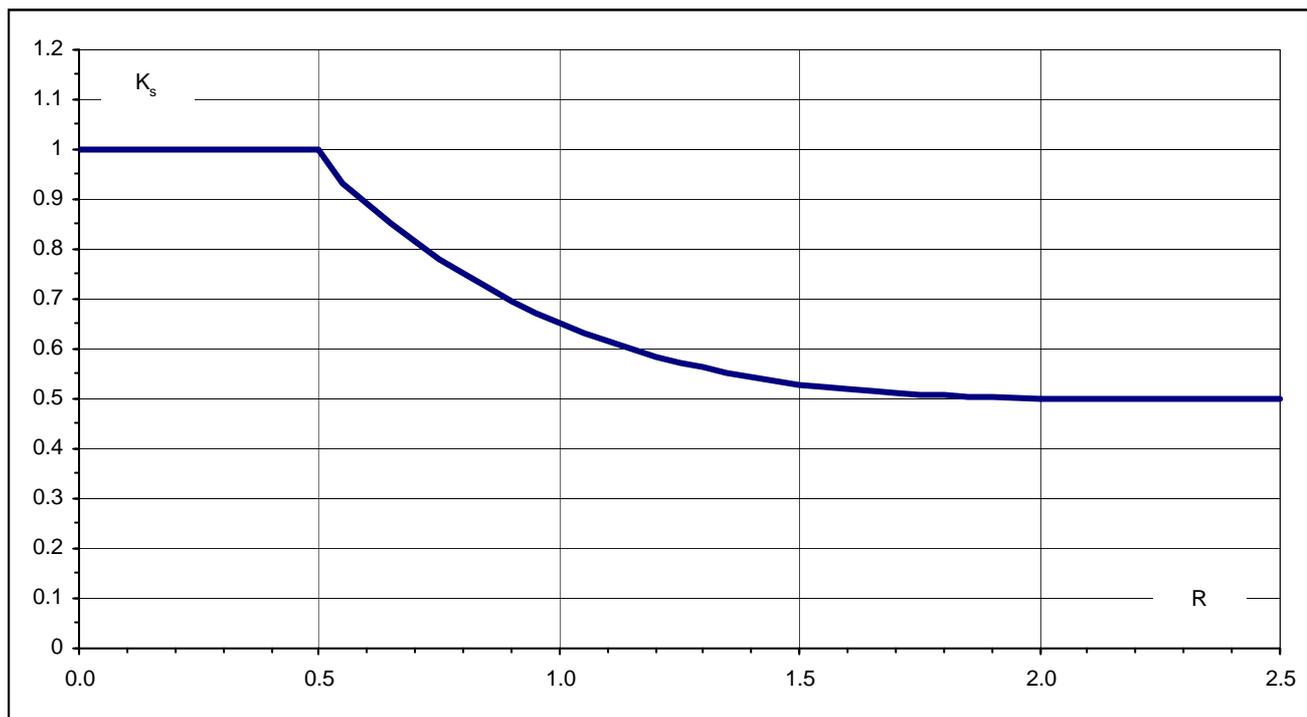
Pour  $R \leq 0,5$  :  $K_S = 1$

Pour  $0,5 < R < 2$  :  $K_S = 0,5 + 0,03 \cdot (2,5 - R)^4$

Pour  $R \geq 2$  :  $K_S = 0,5$

avec 
$$R = \frac{\Delta\sigma}{2 \times R_{p0.002\min}}$$

Figure A3.2A.464 : coefficient de symétrisation  $K_S$



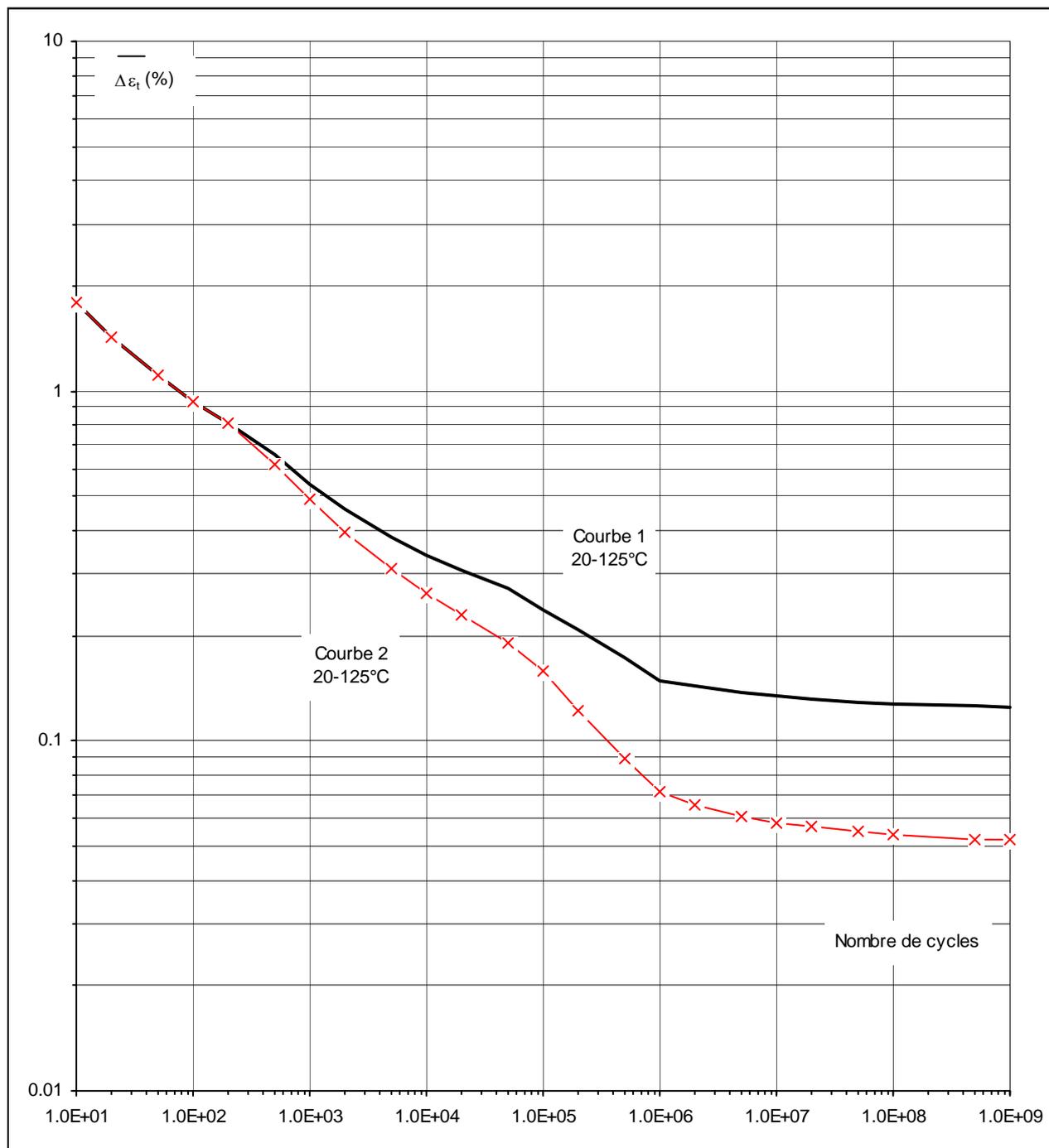
### **A3.2A.47**      ***COURBES DE FATIGUE***

La variation de déformation équivalente admissible  $\overline{\Delta\varepsilon}_t$  (%) est donnée en fonction du nombre de cycles N par le **tableau A3.2A.47** et la **figure A3.2A.47**.

La courbe 1 ne peut être utilisée qu'en l'absence de contrainte moyenne.

La courbe 2 est utilisée pour prendre en compte un effet majoré de la contrainte moyenne. Le concepteur pourra utiliser une courbe intermédiaire sous réserve de justification.

S'il y a lieu, on pourra extrapoler les courbes de fatigue par une droite passant par les deux derniers points de chaque courbe dans le diagramme bilogarithmique ( $\overline{\Delta\varepsilon}$ , N).

Figure A3.2A.47 : courbes de fatigue  $\overline{\Delta\varepsilon_t}$  (%)Tableau A3.2A.47 : courbes de fatigue  $\overline{\Delta\varepsilon_t}$  (%)

N	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	$10^4$	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
20 – 125°C : courbe 1	1,8	1,431	1,105	0,937	0,814	0,656	0,542	0,46	0,383	0,341	0,308	0,273
20 – 125°C : courbe 2	1,8	1,431	1,105	0,937	0,814	0,618	0,489	0,396	0,311	0,265	0,229	0,191

N	$10^5$	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$10^6$	$2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$10^7$	$2 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$10^8$	$5 \cdot 10^8$	$10^9$
20 – 125°C : courbe 1	0,238	0,207	0,172	0,149	0,143	0,137	0,134	0,132	0,129	0,128	0,126	0,125
20 – 125°C : courbe 2	0,159	0,122	0,089	0,072	0,066	0,061	0,058	0,057	0,055	0,054	0,0525	0,052

## A3.2A.5 DONNEES POUR L'ANALYSE – FLUAGE – VIEILLISSEMENT THERMIQUE

### A3.2A.51 FACTEUR DE VIEILLISSEMENT THERMIQUE

Pour les pièces et produits qui ont subi après leur approvisionnement, un maintien de durée  $T_m$  (en heures) à la température  $\theta$ , les caractéristiques  $(R_m)_{\min}$ ,  $(R_m)_{\text{moy}}$ ,  $(R_{p0,2}^t)_{\min}$ ,  $(R_{p0,2}^t)_{\text{moy}}$ ,  $S_m$  et  $S$  doivent être multipliées par le facteur de vieillissement thermique  $F_v(T_m)$  donné par le **tableau A3.2A.51**.

**Tableau A3.2A.51 : facteur de vieillissement thermique  $F_v(T_m)$**

$\theta$ (°C)	1 h	10 h	30 h	100 h	300 h	1000 h	3000 h	$10^4$ h	$3 \cdot 10^4$ h	$10^5$ h	$3 \cdot 10^5$ h
75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,89	0,86
125	1	1	1	1	1	1	1	0,88	0,85	0,81	0,71
150	1	1	1	1	1	0,89	0,86	0,82	0,77	0,53	0,48
175	1	1	1	0,90	0,87	0,83	0,79	0,70	0,49	0,46	0,44
200	1	1	0,89	0,85	0,82	0,76	0,53	0,47	0,45	0,43	0,42
225	1	0,87	0,84	0,80	0,73	0,50	0,47	0,44	0,43	0,41	0,40
250	0,90	0,83	0,79	0,70	0,49	0,46	0,44	0,42	0,41	0,40	0,39

### A3.2A.52 VALEURS DE $S_t$

La contrainte admissible  $S_t$  (MPa) est donnée en fonction de la température  $\theta$  et du temps  $t$  par le **tableau A3.2A.52** et la **figure A3.2A.52**.

S'il y a lieu, on pourra extrapoler au-delà de  $3 \cdot 10^5$  h, les courbes donnant la contrainte  $S_t$ , par une droite passant par les deux derniers points de chaque courbe dans le diagramme bilogarithmique temps-contrainte.

### A3.2A.53 CONTRAINTE DE RUPTURE EN FLUAGE $S_r$

- La valeur **minimale** de la contrainte de rupture en fluage  $S_r$  (MPa) est donnée en fonction de la température  $\theta$  et du temps  $t$  par le **tableau A3.2A.53** et la **figure A3.2A.53**.
- La valeur **moyenne** de la contrainte de rupture  $(S_r)_{\text{moy}}$  (MPa) est donnée en fonction de la température  $\theta$  et du temps  $t$  en multipliant la valeur minimale (**Tableau A3.2A.53**) par un facteur égal à 1,25.

S'il y a lieu, on pourra extrapoler au-delà de  $3 \cdot 10^5$  h, les courbes donnant la contrainte  $S_r$ , par une droite passant par les deux derniers points de chaque courbe dans le diagramme bilogarithmique temps-contrainte.

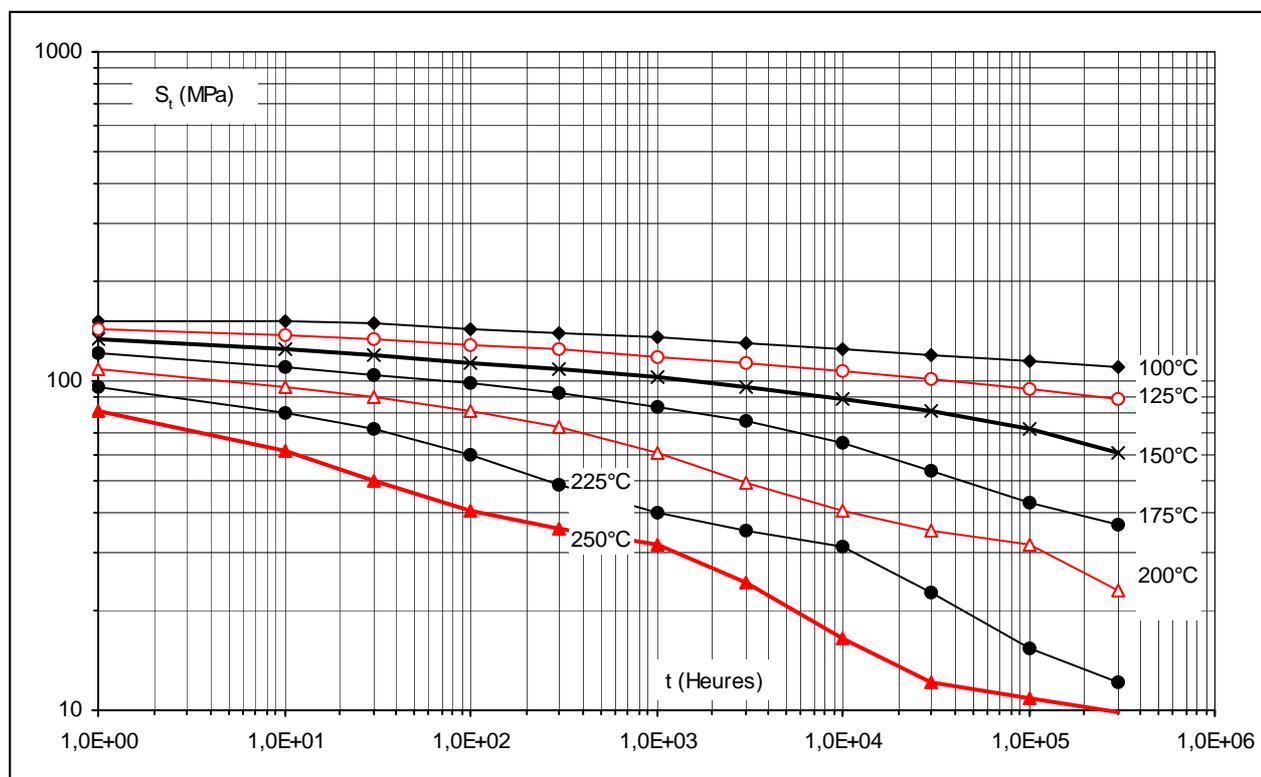
### A3.2A.54 LOIS DE FLUAGE-DEFORMATION (Non fournies)

### A3.2A.55 DIAGRAMME D'INTERACTION FATIGUE – FLUAGE (Non fourni)

### A3.2A.56 DEFORMATION MAXIMALE ADMISSIBLE $D_{\text{max}}$ (Non fournie)

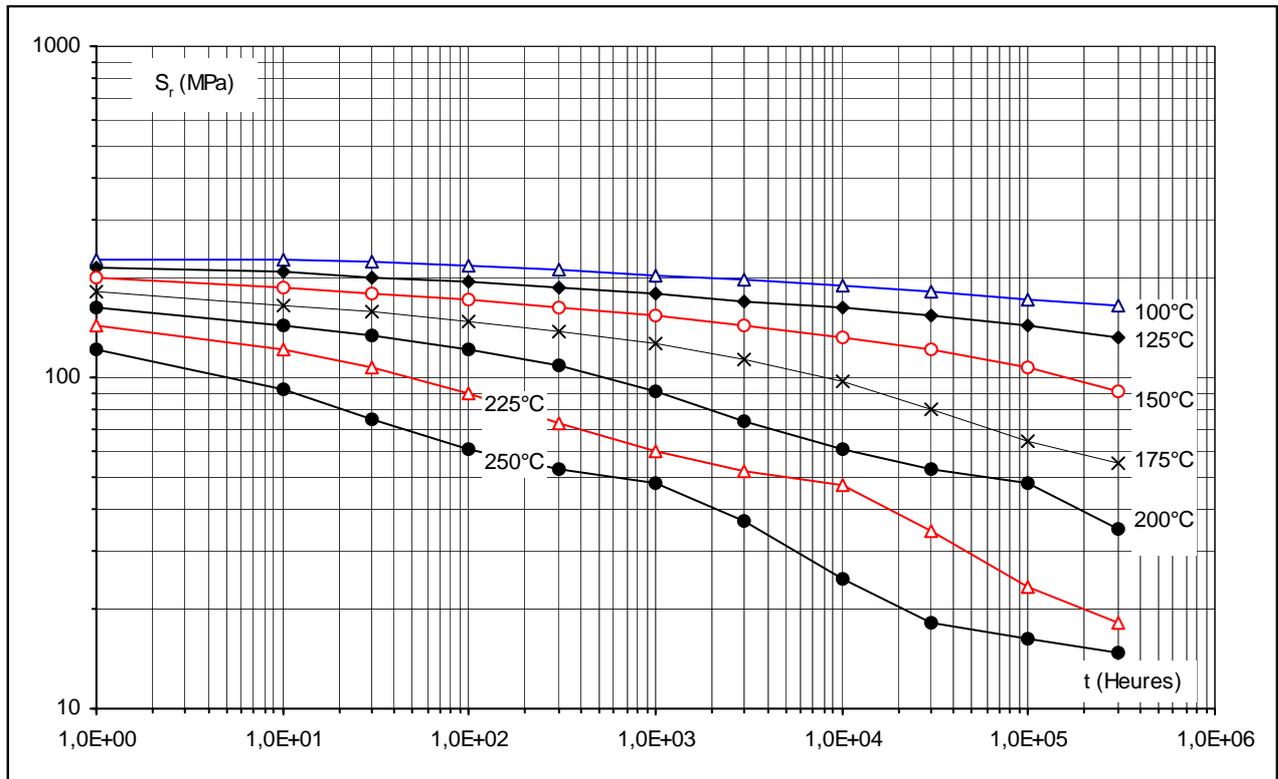
Tableau A3.2A.52 : valeurs de  $S_t$  (MPa)

$\theta$ (°C)	1 h	10 h	30 h	100 h	300 h	1000 h	3000 h	$10^4$ h	$3 \cdot 10^4$ h	$10^5$ h	$3 \cdot 10^5$ h
100	151	151	149	144	140	135	131	126	121	115	110
125	143	138	134	129	124	119	114	108	102	95	88
150	134	124	119	114	108	102	96	89	81	71	61
175	121	110	105	98	92	84	76	65	53	43	37
200	109	96	89	81	73	61	49	40	35	32	23
225	96	80	72	60	48	40	35	31	23	16	12
250	81	61	50	40	35	32	24	17	12	11	10

Figure A3.2A.52 : valeurs de  $S_t$ 

**Tableau A3.2A.53 : valeurs minimales de la contrainte de rupture en fluage  $S_r$  (MPa)**

$\theta$ (°C)	1 h	10 h	30 h	100 h	300 h	1000 h	3000 h	10 <sup>4</sup> h	3.10 <sup>4</sup> h	10 <sup>5</sup> h	3.10 <sup>5</sup> h
100	226	226	224	217	210	203	196	188	181	173	165
125	215	208	201	193	186	178	170	162	153	143	133
150	201	186	179	171	163	153	144	133	121	107	91
175	182	166	157	147	138	126	113	97	80	64	55
200	163	144	134	122	109	91	74	60	53	48	35
225	143	121	107	90	73	60	52	47	34	23	18
250	122	92	74	61	53	48	37	25	18	16	15

**Figure A3.2A.53 : valeurs minimales de la contrainte de rupture en fluage  $S_r$** 

## A3.2A.6 DONNEES POUR L'ANALYSE - IRRADIATION

La fluence  $\Phi_{th}$  est exprimée en neutrons thermiques conventionnels notés  $n_{th}$  ( $E = 0,0254$  eV) par  $cm^2$ .

### A3.2A.61 LIMITE CONVENTIONNELLE D'ELASTICITE A 0,2 % $R_{p0,2}$ (après irradiation)

- Les limites conventionnelles d'élasticité à 0,2 % **moyennes**  $(R_{p0,2}^t)_{moy}$  sont obtenues en appliquant le facteur multiplicateur  $(f_{p0,2})^{ir}$  aux limites d'élasticité moyennes avant irradiation (**A3.2A.41**).  $(f_{p0,2})^{ir}$  est donné en fonction de la fluence  $\Phi_{th}$  par les formules du **tableau A3.2A.61** et par la **figure A3.2A.61**. Les formules ne sont applicables que si on obtient  $(R_{p0,2}^t)_{moy} \leq (R_m)_{moy}$ . Les valeurs du **tableau A3.2A.61** sont applicables si  $\Phi_{th}$  ( $10^{21} n_{th}/cm^2$ )  $\leq 300$ .
- Les limites conventionnelles d'élasticité à 0,2 % **minimales**  $(R_{p0,2}^t)_{min}$  sont obtenues en multipliant  $(R_{p0,2}^t)_{moy}$  par 0,783.

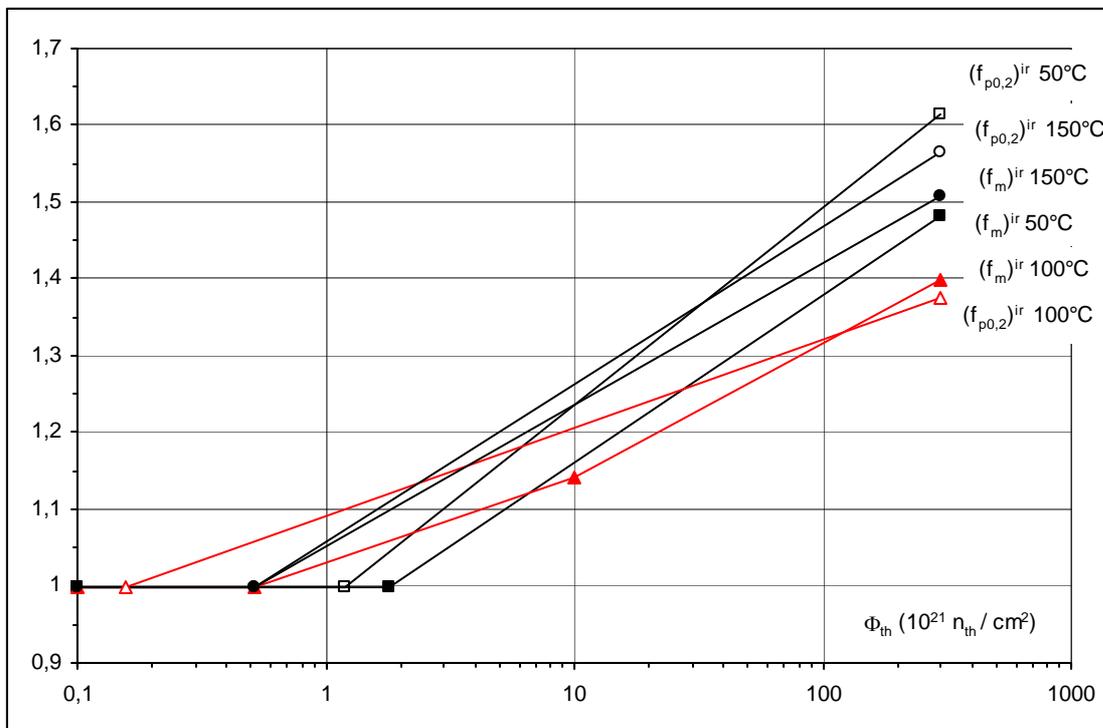
### A3.2A.62 RESISTANCE A LA TRACTION $R_m$ (après irradiation)

- Les résistances à la traction **moyennes**  $(R_m)_{moy}$  sont obtenues en appliquant le facteur multiplicateur  $(f_m)^{ir}$  aux résistances à la traction moyennes avant irradiation (**A3.2A.42**).  $(f_m)^{ir}$  est donné en fonction de la fluence  $\Phi_{th}$  par les formules du **tableau A3.2A.61** et par la **figure A3.2A.61**. Les valeurs du **tableau A3.2A.61** sont applicables si  $\Phi_{th}$  ( $10^{21} n_{th}/cm^2$ )  $\leq 300$ .
- Les résistances à la traction **minimales**  $(R_m)_{min}$  sont obtenues en multipliant  $(R_m)_{moy}$  par 0,772.

Tableau A3.2A.61 : facteurs multiplicateurs  $(f_{p0,2})^{ir}$  et  $(f_m)^{ir}$

	$\Phi_{th}$ ( $10^{21} n_{th}/cm^2$ )	$(f_{p0,2})^{ir}$	$\Phi_{th}$ ( $10^{21} n_{th}/cm^2$ )	$(f_m)^{ir}$
50°C	$\Phi_{th} \leq 1,2$	1	$\Phi_{th} \leq 1,8$	1
	$1,2 < \Phi_{th} \leq 300$	$-4,3928 + 0,1111 \text{ Ln}(\Phi_{th})$	$1,8 < \Phi_{th} \leq 300$	$-3,6151 + 0,0943 \text{ Ln}(\Phi_{th})$
100°C	$\Phi_{th} \leq 0,156$	1	$\Phi_{th} \leq 0,52$	1
	$0,156 < \Phi_{th} \leq 300$	$-1,3155 + 0,0498 \text{ Ln}(\Phi_{th})$	$0,52 < \Phi_{th} \leq 10$	$-1,2588 + 0,0474 \text{ Ln}(\Phi_{th})$
			$10 < \Phi_{th} \leq 300$	$-2,7704 + 0,0771 \text{ Ln}(\Phi_{th})$
150°C	$\Phi_{th} \leq 0,52$	1	$\Phi_{th} \leq 0,52$	1
	$0,52 < \Phi_{th} \leq 300$	$-3,2364 + 0,0888 \text{ Ln}(\Phi_{th})$	$0,52 < \Phi_{th} \leq 300$	$-2,8264 + 0,0802 \text{ Ln}(\Phi_{th})$

Figure A3.2A.61 : facteurs multiplicateurs  $(f_{p0,2})^{ir}$  et  $(f_m)^{ir}$



### A3.2A.63 VALEURS DE $S_{em}$ ET $S_{et}$ (après irradiation)

Pour les critères de niveau A, C et D, les valeurs des contraintes élastiques admissibles de membrane  $S_{em}^A$ ,  $S_{em}^C$ ,  $S_{em}^D$  et des contraintes élastiques admissibles totales  $S_{et}^A$ ,  $S_{et}^C$ ,  $S_{et}^D$ , pour les structures autres que les tuyauteries et piquages, sont données en fonction de la température  $\theta$  (°C) et de la fluence  $\Phi_{th}$  par le **tableau A3.2A.63** et la **figure A3.2A.63**.

Pour ce matériau :  $S_e^A = (2 / 2,5)$   $S_e^C = (1,35 / 2,5)$   $S_e^D$

Pour les tuyauteries et piquages des formules sont proposées en **A3.GEN .42**.

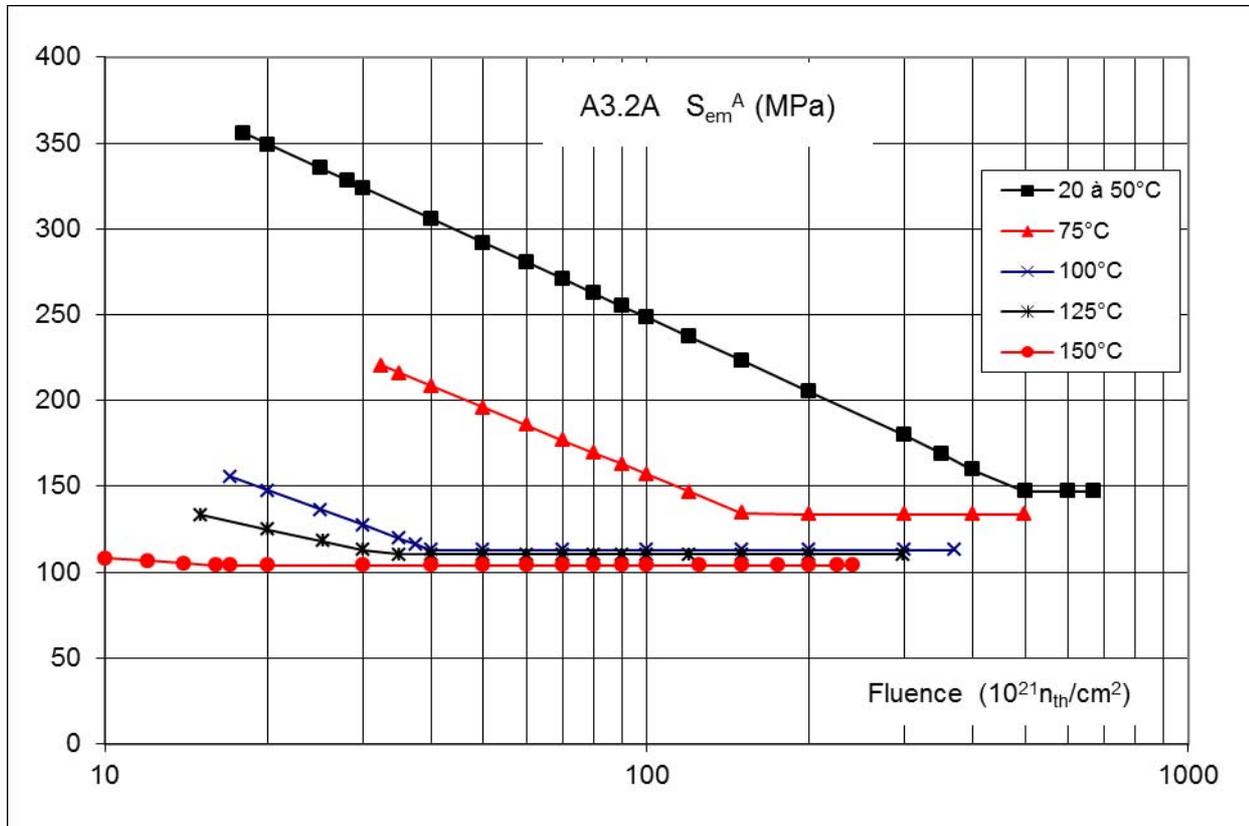
**Tableau A3.2A.63 : valeurs de  $S_{em}^A$ ,  $S_{em}^C$ ,  $S_{em}^D$  et  $S_{et}^A$ ,  $S_{et}^C$ ,  $S_{et}^D$  (MPa) en fonction de la température  $\theta$  (°C) et de la fluence  $\Phi_{th}$  ( $10^{21}$  n<sub>th</sub>/cm<sup>2</sup>)**

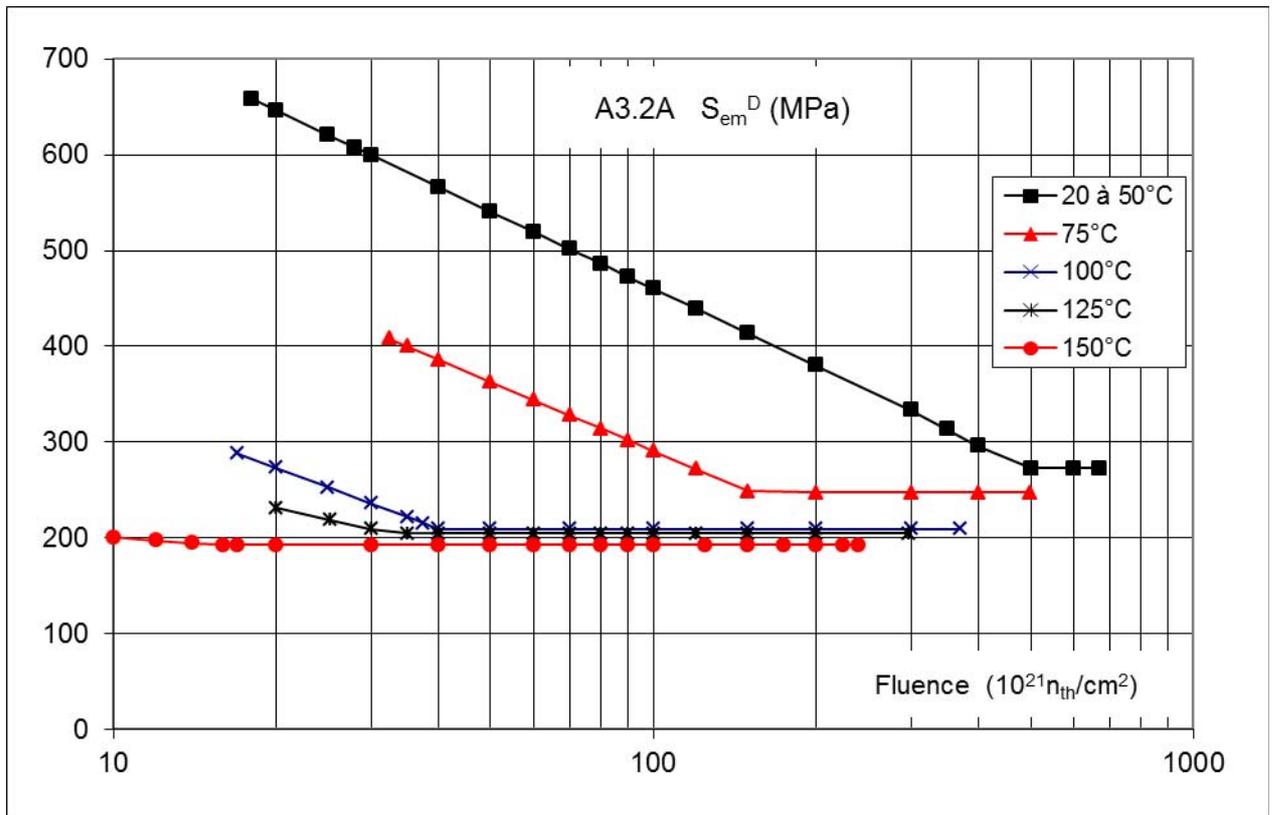
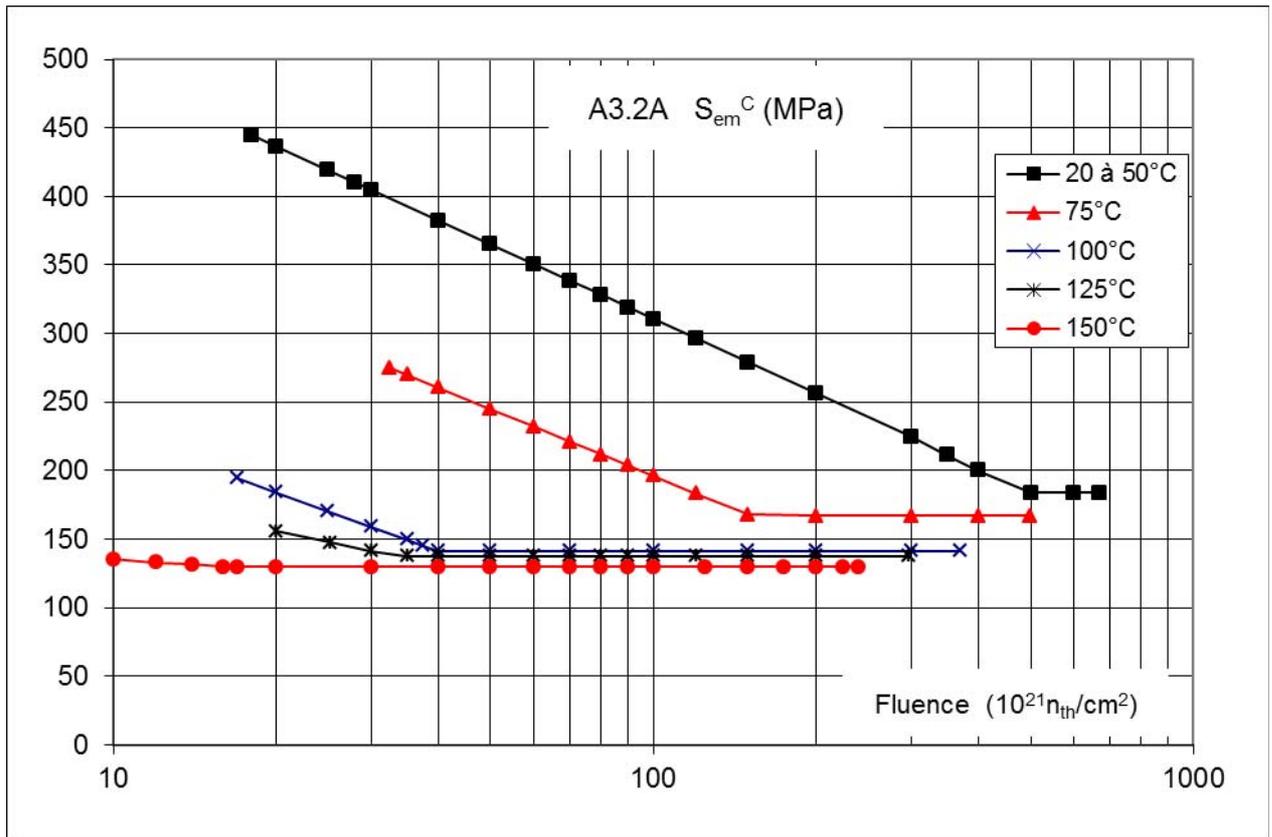
20 à 50°C							75°C						
$\Phi_{th}$	$S_{em}^A$	$S_{em}^C$	$S_{em}^D$	$S_{et}^A$	$S_{et}^C$	$S_{et}^D$	$\Phi_{th}$	$S_{em}^A$	$S_{em}^C$	$S_{em}^D$	$S_{et}^A$	$S_{et}^C$	$S_{et}^D$
18	356	445	659	720	901	1334	32	220	275	408	565	706	1046
20	349	437	647	716	895	1326	35	216	270	400	556	696	1030
25	335	419	621	706	883	1307	40	209	261	386	537	672	995
28	328	410	608	701	876	1298	50	196	245	363	497	621	921
30	324	405	600	690	862	1277	60	186	232	344	464	579	858
35	314	393	582	664	830	1230	70	177	221	328	434	543	804
40	306	382	566	642	802	1188	80	170	212	314	408	510	755
50	292	365	541	604	755	1119	90	163	204	302	383	479	709
60	281	351	520	574	717	1062	100	157	196	291	360	450	666
70	271	339	502	548	685	1014	120	147	184	272	314	392	581
80	263	328	486	525	656	972	150	134	168	249	236	295	438
90	255	319	473	505	631	935	200	134	167	248	194	243	360
100	249	311	460	487	609	902	300	134	167	248	162	203	301
120	237	297	439	456	570	844	400	134	167	248	137	172	254
150	223	279	414	417	521	772	498	134	167	248	137	171	254
200	205	257	380	365	456	676							
300	180	225	333	286	358	530							
350	169	212	313	251	314	465							
400	160	200	296	217	271	401							
500	147	184	273	152	190	282							
600	147	184	273	147	184	273							
670	147	184	273	147	184	273							

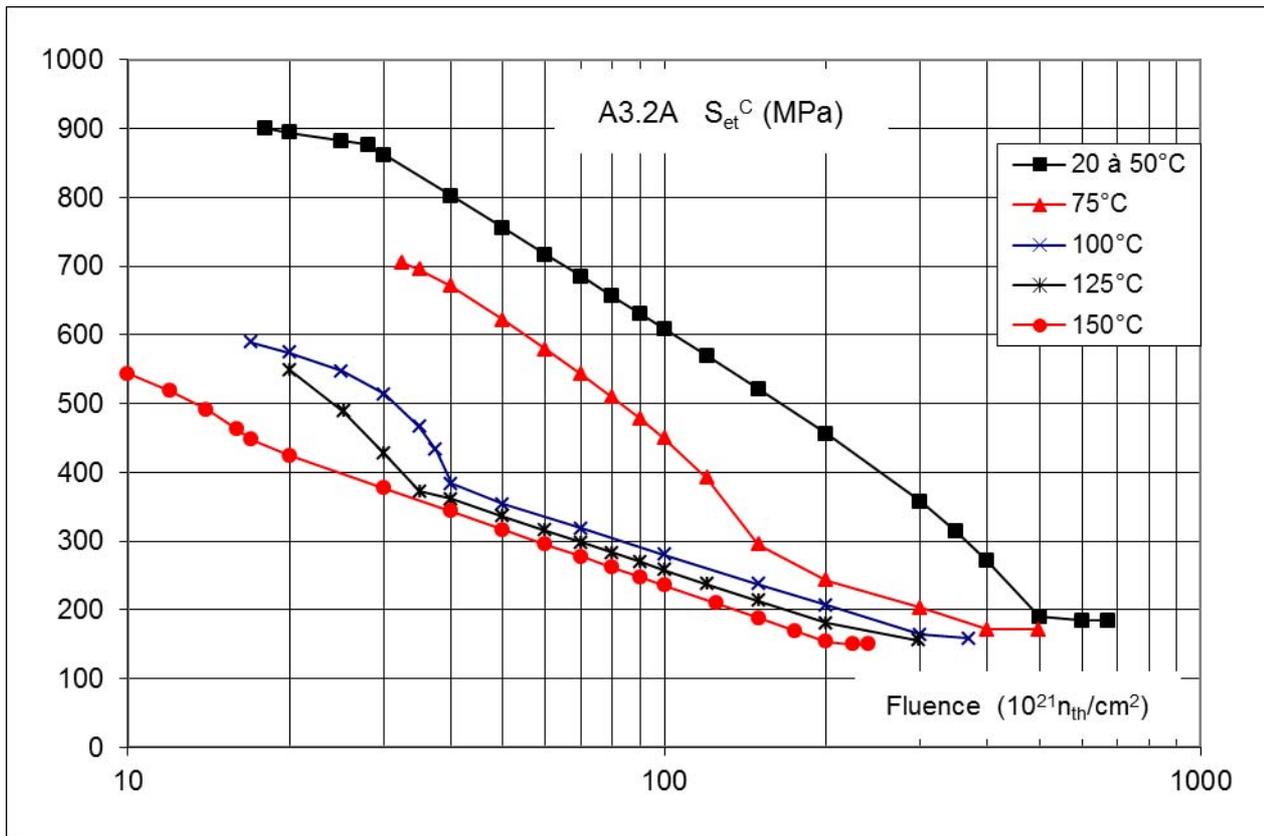
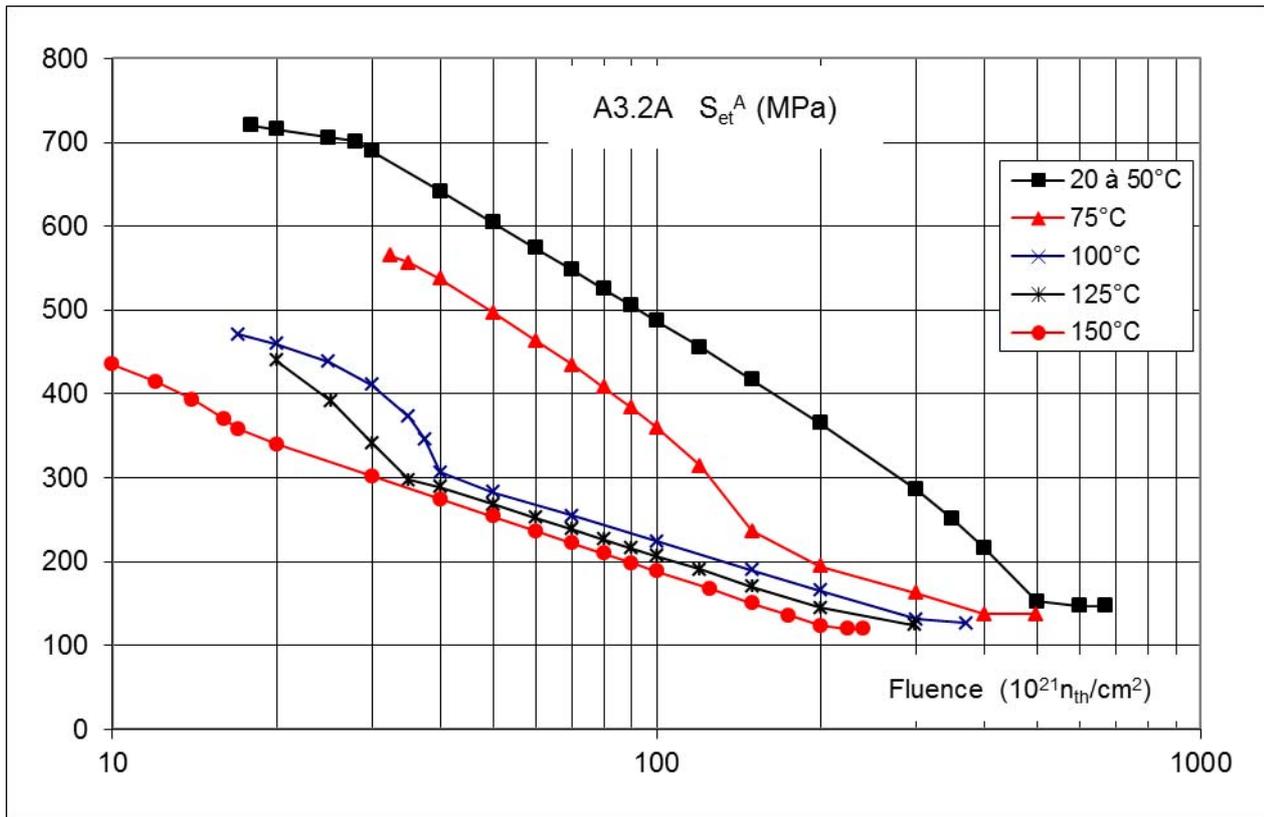
100°C							125°C						
$\Phi_{th}$	$S_{em}^A$	$S_{em}^C$	$S_{em}^D$	$S_{et}^A$	$S_{et}^C$	$S_{et}^D$	$\Phi_{th}$	$S_{em}^A$	$S_{em}^C$	$S_{em}^D$	$S_{et}^A$	$S_{et}^C$	$S_{et}^D$
17	156	195	288	471	589	872	15	133	167	247	476	595	882
20	148	184	273	459	574	851	20	125	156	231	440	549	814
25	136	171	253	438	548	812	25	118	148	219	391	489	725
30	127	159	236	411	514	762	30	113	141	209	342	427	633
35	120	150	222	373	466	691	35	110	138	204	298	372	551
37.5	116	145	215	346	433	641	40	110	138	204	289	361	535
40	113	141	209	307	383	568	50	110	138	204	269	336	498
50	113	141	209	283	354	524	60	110	138	204	252	315	467
70	113	141	209	255	318	471	70	110	138	204	239	298	442
100	113	141	209	224	280	415	80	110	138	204	227	283	420
150	113	141	209	190	237	352	90	110	138	204	216	270	400
200	113	141	209	165	207	306	100	110	138	204	207	258	383
300	113	141	209	131	164	243	120	110	138	204	190	238	352
370	113	141	209	127	158	235	150	110	138	204	170	213	316
							200	110	138	204	145	181	268
							298	110	138	204	125	156	231

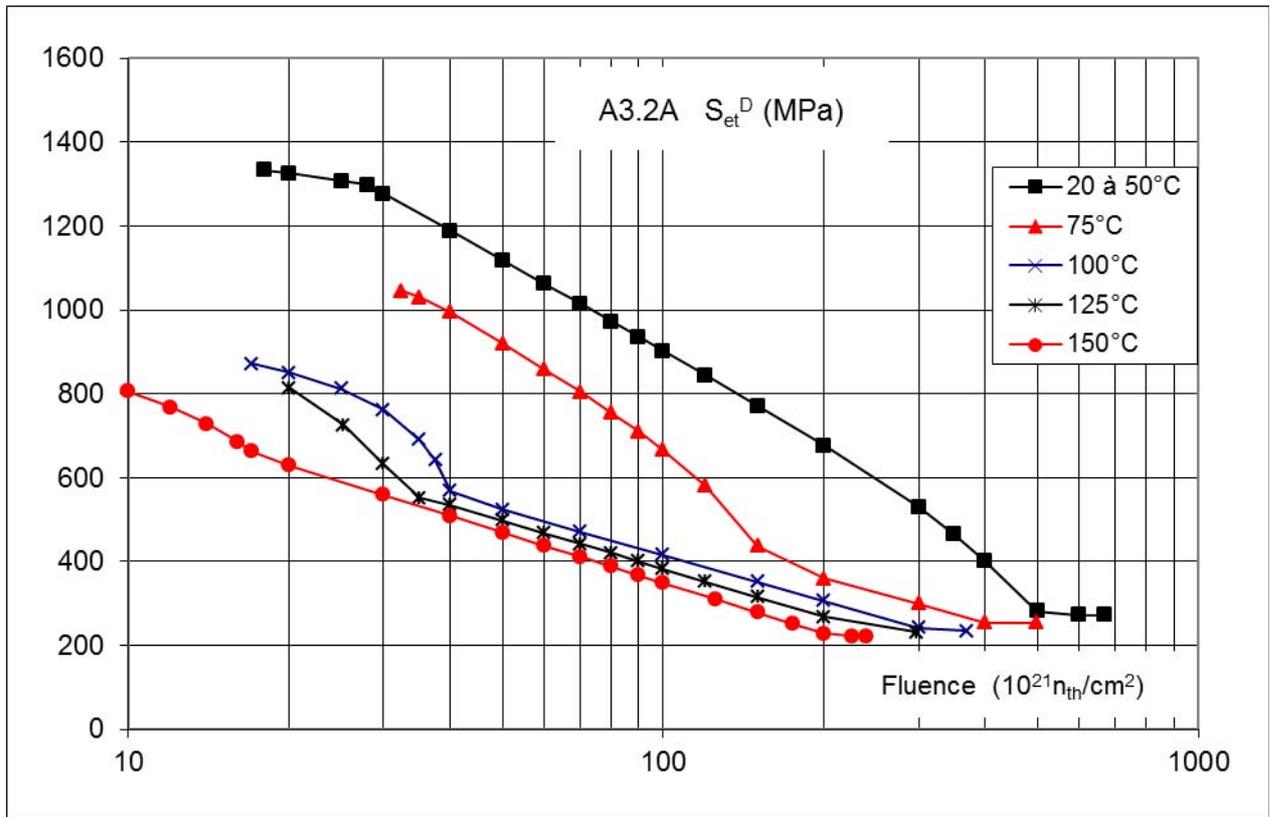
150°C						
$\Phi_{th}$	$S_{em}^A$	$S_{em}^C$	$S_{em}^D$	$S_{et}^A$	$S_{et}^C$	$S_{et}^D$
10	108	135	200	435	544	806
12	107	133	197	415	519	768
14	105	132	195	393	492	728
16	104	130	193	370	463	686
17	104	130	193	358	448	663
20	104	130	193	340	425	629
30	104	130	193	302	377	559
40	104	130	193	275	343	508
50	104	130	193	254	317	470
60	104	130	193	236	296	438
70	104	130	193	222	277	411
80	104	130	193	209	262	388
90	104	130	193	198	248	367
100	104	130	193	188	236	349
125	104	130	193	167	209	310
150	104	130	193	150	188	278
175	104	130	193	136	170	252
200	104	130	193	123	154	228
240	104	130	193	120	150	223
240	104	130	193	120	150	223

Figure A3.2A.63 : valeurs de  $S_{em}^A$ ,  $S_{em}^C$ ,  $S_{em}^D$  et  $S_{et}^A$ ,  $S_{et}^C$ ,  $S_{et}^D$  (MPa) en fonction de la température  $\theta$  (°C) et de la fluence  $\Phi_{th}$  ( $10^{21} n_{th}/cm^2$ )









### A3.2A.64 DUCTILITE EN TRACTION (avant et après irradiation)

Les caractéristiques de ductilité sont l'allongement total à rupture ( $A_t$ ) et l'allongement total sous la charge maximale ( $A_{gt}$ ).

- Avant irradiation, les valeurs minimales de  $A_t$  et  $A_{gt}$  sont données en fonction de la température par le **tableau A3.2A.64a**.
- Après irradiation, les valeurs de  $A_t$  et  $A_{gt}$  sont donnés par le **tableau A3.2A.64b** et la **figure A3.2A.64** en fonction de la fluence  $\Phi_{th}$  exprimée en neutrons thermiques conventionnels par  $cm^2$ .

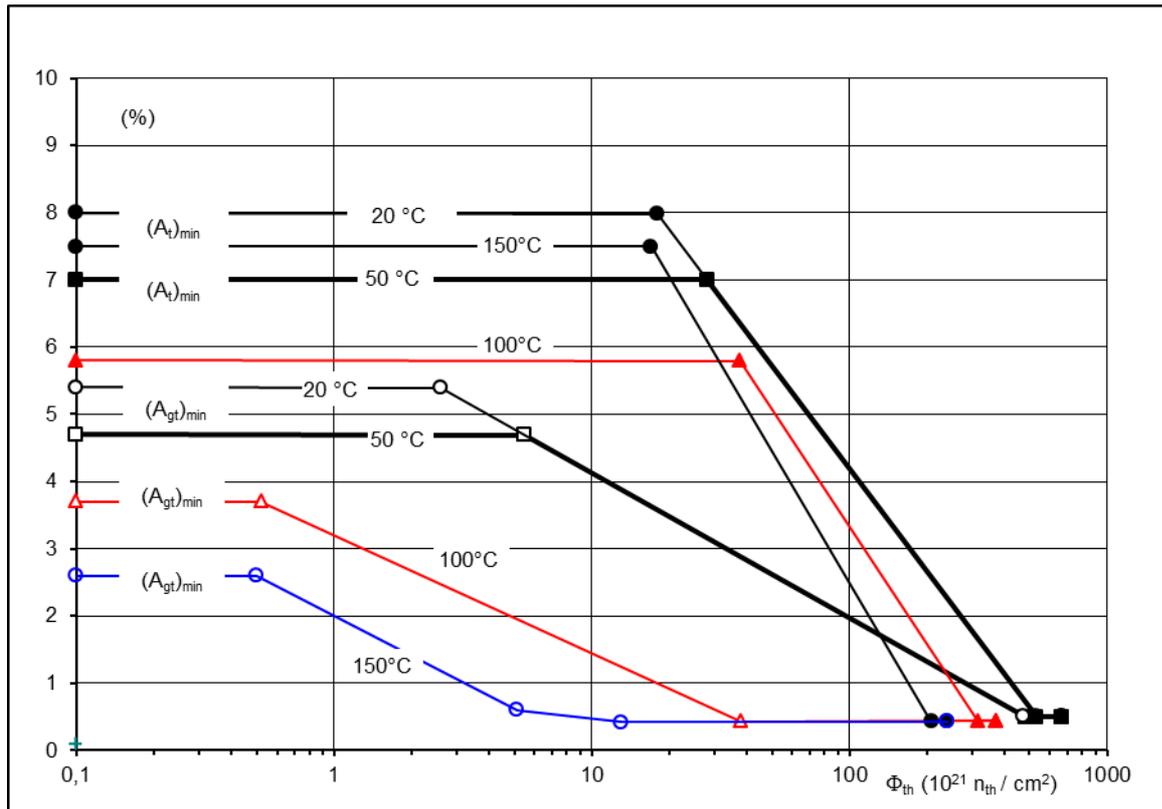
Pour les températures intermédiaires, les valeurs de  $A_{gt}$  et de  $A_t$  peuvent être obtenues par interpolation linéaire.

**Tableau A3.2A.64a :  $A_{gt}$  et  $A_t$  avant irradiation**

$\theta$ (°C)	20	50	100	150
$(A_{gt})_{min}$ (%)	5,4	4,7	3,7	2,6
$(A_t)_{min}$ (%)	8	7	5,8	7,5

**Tableau A3.2A.64b :  $A_{gt}$  et  $A_t$  après irradiation**

	$\Phi_{th}$ ( $10^{21} n_{th}/cm^2$ )	$(A_{gt})_{min}$ (%)	$\Phi_{th}$ ( $10^{21} n_{th}/cm^2$ )	$(A_t)_{min}$ (%)
20°C	$2,6 < \Phi_{th} \leq 472$	$51,7 - 0,939 \ln(\Phi_{th})$	$18 < \Phi_{th} \leq 528$	$121,23 - 2,210 \ln(\Phi_{th})$
	$\Phi_{th} > 472$	0,51	$\Phi_{th} > 528$	0,51
50°C	$5,5 < \Phi_{th} \leq 481$	$51,7 - 0,939 \ln(\Phi_{th})$	$28 < \Phi_{th} \leq 532$	$121,23 - 2,210 \ln(\Phi_{th})$
	$\Phi_{th} > 481$	0,50	$\Phi_{th} > 532$	0,50
100°C	$0,52 < \Phi_{th} \leq 38$	$40 - 0,761 \ln(\Phi_{th})$	$37,5 < \Phi_{th} < 314$	$136,62 - 2,517 \ln(\Phi_{th})$
	$\Phi_{th} > 38$	0,44	$\Phi_{th} > 314$	0,44
150°C	$0,5 < \Phi_{th} \leq 5,13$	$43,402 - 0,8562 \ln(\Phi_{th})$	$17 < \Phi_{th} < 208$	$152 - 2,823 \ln(\Phi_{th})$
	$5,13 < \Phi_{th} \leq 13$	$10,417 - 0,1963 \ln(\Phi_{th})$	$\Phi_{th} > 208$	0,43
	$\Phi_{th} > 13$	0,43		

Figure A3.2A.64 :  $A_{gt}$  et  $A_t$  après irradiation

**A3.2A.65** *LOIS DE CONSOLIDATION EN TRACTION (après irradiation) - non fournies*

**A3.2A.66** *COURBES CYCLIQUES, VALEURS DE  $K_\epsilon$ ,  $K_v$  ET  $K_s$  (après irradiation) - non fournies*

**A3.2A.67** *COURBES DE FATIGUE (après irradiation)*

On utilisera les courbes avant irradiation données en A3.2A.47.

**A3.2A.68** *Numéro non utilisé*

**A3.2A.69** *GONFLEMENT (après irradiation)*

Pour des températures limitées à 55°C et une fluence  $\Phi_{th}$  ne dépassant pas  $300 \cdot 10^{21} n_{th} / cm^2$ , le gonflement est inférieur à 1,5 %.

**A3.2A.7** *Numéro non utilisé*

**A3.2A.8** *DONNEES POUR L'ANALYSE – MECANIQUE DE LA RUPTURE*

**A3.2A.81** *MECANIQUE DE LA RUPTURE - BASE*

**A3.2A.811** *VALEURS DE  $J_{IC}$*

Pour une température  $\theta$  telle que  $20 \leq \theta$  (°C)  $\leq 150$ , la valeur minimale de  $K_{IC}$  est de 25,3 MPa $\sqrt{m}$  ; la valeur correspondante de  $J_{IC}$  est donnée par  $J_{IC} = K_{IC}^2/E$ .