

SELECTION D'EXPERIENCES SILENE

DE REFERENCE POUR LA QUALIFICATION DES CODES

D'ACCIDENTS DE CRITICITE

DAM/Département de Recherche sur les Matériaux Nucléaires/SRNC

Note Technique SRNC 02 - 06

*	P.GRIVOT P.GIROUD	P.FOUILLAUD	F.BARBRY	P. LE POAC		
Indice	Rédacteur (A)	Vérificateur (C)	Approbateur (R)	Emetteur (E)	Nature des Modifications	Secr.
Fich :	selsilene.doc		Date fichier : 10/10/02 09:14			

SOMMAIRE

I. PRESENTATION DU REACTEUR SILENE	4
I.1. Description et principe de fonctionnement.....	4
I.1.1. Géométrie	5
I.1.2. Nature du milieu	5
I.1.3. Insertion de réactivité	5
I.1.4. Les modes de fonctionnement.....	6
I.2. Diagnostic du Réacteur.....	6
I.2.1. Nombre total de fissions	6
I.2.2. Suivi de la puissance et des débits de rayonnements.....	8
I.2.3. Mesure de température et de pression	8
I.2.4. Mesure du niveau de solution fissile	8
II. EXPERIENCES DE TYPE SALVE	8
II.1. Description des expériences.....	8
II.2. Caractéristiques des expériences avec une concentration de 71g/l	9
II.3. Résultats des expériences avec une concentration de 71 g/l	10
II.4. Caractéristiques des expériences avec une concentration de 218 g/l	11
II.5. Résultats des expériences avec une concentration de 218 g/l	11
III. EXPERIENCES DE TYPE LIBRE EVOLUTION.....	12
III.1. Description des expériences.....	12
III.2. Calcul des rampes de réactivité.....	12
III.2.1. Expériences avec une concentration de 70 g/l	12
III.2.2. Expériences avec une concentration de 218 g/l	12
III.3. Caractéristiques des expériences avec une concentration de 70 g/l	13
III.4. Résultats des expériences avec une concentration de 70 g/l	14
III.5. Caractéristiques des expériences avec une concentration de 218 g/l	15
III.6. Résultats des expériences avec une concentration de 218 g/l	16
IV. EXPERIENCES DE TYPE DIVERGENCE.....	16
IV.1. Description des expériences	16
IV.2. Caractéristiques des expériences	17
IV.3. Résultats des expériences	18
V. CONCLUSION.....	18

REFERENCES..... 19

Figure 1 : Photographie du réacteur SILENE 20

Figure 2 : Schéma du cœur du réacteur SILENE 21

Figure 3 : Mode de fonctionnement du réacteur SILENE 22

Les évolutions de la puissance, de l'énergie et de la température au sein du réacteur sont données pour chaque expérience en annexe :

Annexe 1 : S1-300..... 23

Annexe 2 : S2-300..... 26

Annexe 3 : S3-300..... 29

Annexe 4 : S1-196..... 34

Annexe 5 : S2-196..... 38

Annexe 6 : S1-198..... 42

Annexe 7 : LE1-362..... 47

Annexe 8 : LE2-362..... 52

Annexe 9 : LE1-199..... 58

Annexe 10 : LE1-201..... 62

Annexe 11 : LE3-229..... 66

Annexe 12 : LE1-214..... 68

Annexe 13 : LE2-229..... 70

PREAMBULE

Le réacteur SILENE (Source d'Irradiation à Libre Evolution Neutronique) est un moyen expérimental situé au sein du Service de Recherches en Neutronique et Criticité qui permet d'étudier les conséquences et la phénoménologie de l'accident de criticité en solution.

L'objet de cette note est de présenter une sélection d'expériences de référence qui peut-être utilisée pour la qualification des codes d'accidents de criticité. Les expériences sélectionnées ont été réalisées sur SILENE dans une configuration sans écran réflecteur autour de la cuve du réacteur. Les expériences sélectionnées couvrent le plus largement possible les domaines explorés par SILENE :

- en terme de concentration en élément fissile (Uranium à 93% en ^{235}U à 71 g.l^{-1} et 220 g.l^{-1}) ;
- en terme de cinétique (saut ou rampe de réactivité ou divergence) ;
- en terme de réactivité insérée (30 à 2350 pcm).

I. PRESENTATION DU REACTEUR SILENE

I.1. DESCRIPTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

SILENE est un réacteur expérimental homogène utilisant comme combustible une solution fissile de nitrate d'uranyle (U enrichi à 92.7% en ^{235}U) [1].

Le coeur se présente sous la forme d'une cuve annulaire de petite taille placée au centre d'une salle en béton de grandes dimensions appelée « cellule » (fig.1). La solution fissile nécessaire au fonctionnement du réacteur est préparée dans un laboratoire situé dans le sous-sol de la cellule.

Le principe général de fonctionnement du réacteur est le suivant :

- la solution fissile, ajustée au préalable à la concentration de fonctionnement dans une cuve spéciale de grande capacité, est introduite à l'aide d'une pompe dans le coeur jusqu'à un niveau surcritique prédéterminé. Durant cette phase une barre de contrôle est présente dans le coeur de manière à éviter toute divergence ;
- l'excursion de puissance ou « divergence » est alors produite par l'extraction de cette barre hors du coeur selon un processus qui dépend du mode de fonctionnement choisi pour l'expérimentation envisagée ;
- une fois l'expérience terminée, la solution fissile chargée de produits de fission radioactifs est vidangée dans une cuve spéciale placée dans un local blindé, ce qui autorise un accès rapide dans la cellule.

Un circuit de ventilation balaie en permanence la partie supérieure du coeur de manière à diluer l'hydrogène issu de la radiolyse. Les produits de fissions gazeux, après le temps nécessaire à leur décroissance radioactive, sont rejetés à travers des systèmes de filtration ad hoc.

I.1.1. Géométrie

Le coeur de SILENE se présente sous la forme d'une cuve annulaire en acier inoxydable de hauteur 1000 mm et de diamètre 360 mm avec un canal intérieur de 70 mm de diamètre (fig. 2). Les autres dimensions sont :

- diamètre extérieur : 360/368 mm ;
- épaisseur de la paroi externe : 4 mm ;
- diamètre intérieur : 70/76 mm ;
- épaisseur de la paroi interne : 3 mm ;
- épaisseur du fond de la cuve : 36 mm ;
- épaisseur du sommet de la cuve : 30 mm.

I.1.2. Nature du milieu

La solution fissile utilisée est du nitrate d'uranyle avec les caractéristiques moyennes suivantes :

- masse spécifique : 1.161 g.cm⁻³ ;
- concentration en U_{total} : 71 g.litre⁻¹ (concentration de fonctionnement actuel)
ou 218 g.litre⁻¹ (concentration utilisée dans le passé) ;
- acidité H+ : 2 moles.litre⁻¹ ;
- enrichissement en ²³⁵U : 92.7 %.

La composition correspondante pour une concentration de 71 g.l⁻¹ (en U_{total}) est la suivante :

Isotope	Nombre d'atome par 10 ⁻²⁴ cm ⁻³
Hydrogène	6.258 10 ⁻²
Azote	1.569 10 ⁻³
Oxygène	3.576 10 ⁻²
Uranium 234	1.060 10 ⁻⁶
Uranium 235	1.686 10 ⁻⁴
Uranium 236	4.350 10 ⁻⁷
Uranium 238	1.170 10 ⁻⁵

Il s'agit d'une composition moyenne utilisée dans les calculs car il est bien évident qu'au fur et à mesure des expériences, des retraitements et des différents ajustages, les valeurs de ces paramètres ont pu varier.

I.1.3. Insertion de réactivité

C'est par déplacement d'une barre à une vitesse prédéterminée, « lente » ou « rapide » dans le canal central du coeur qu'on provoque la divergence suivant le processus choisi.

Il existe plusieurs types de barre, dites à tort de contrôle, qui sont en fait des barres d'insertion de réactivité. Les deux plus usitées sont en cadmium et en boral.

A titre indicatif, les valeurs en réactivité de ces barres sont, pour la concentration de 71 g.l⁻¹, les suivantes :

- barre cadmium $\Delta k_p \leq 3220$ pcm (4.1 \$) ;
- barre boral $\Delta k_p \leq 4560$ pcm (5.8 \$).

Les mécanismes de commande de sortie de la barre hors du coeur sont de deux types :

- un dispositif mécanique autorisant des déplacements de barre $\leq 2 \text{ cm.s}^{-1}$;
- un dispositif pneumatique permettant d'éjecter la barre à environ 2 m.s^{-1} .

I.1.4. Les modes de fonctionnement

En fonction de la réactivité présente dans le coeur, de la vitesse d'éjection de la barre, de la présence ou non d'une source auxiliaire de neutrons, SILENE peut fonctionner selon 3 modes différents appelés « **SALVE** », « **LIBRE EVOLUTION** », « **PALIER** » :

- le fonctionnement en « **SALVE** » est obtenu par éjection à vitesse rapide (0.2 à 2 m.s^{-1}) de la barre, avec ou sans présence d'une source auxiliaire de neutrons, ce qui permet d'obtenir un pic de puissance très élevé en un temps court (jusqu'à 1000 mégawatts en quelques millisecondes). Il s'agit donc d'un transitoire rapide. La réactivité dans ce mode de fonctionnement est limitée à 2400 pcm du fait de l'onde de pression générée par les gaz de radiolyse au sein du liquide, la pression devant rester inférieure à 8 bars (valeur absolue) ;
- le fonctionnement en « **LIBRE EVOLUTION** » est réalisé par sortie à vitesse lente ($\leq 2 \text{ cm.s}^{-1}$) de la barre en présence d'une source auxiliaire de neutrons*. La réactivité engagée en fonctionnement normal ne peut excéder 4000 pcm. Par le passé, grâce à l'emploi d'une barre spéciale, la réactivité pouvait être portée à 5800 pcm et ainsi provoquer l'ébullition de la solution fissile. Actuellement ce domaine d'étude n'est pas couvert par les prescriptions techniques de SILENE ;
- le fonctionnement en « **PALIER** » est obtenu par asservissement de la barre à une chaîne de pilotage. Les déplacements de la barre se font à une vitesse très lente (de l'ordre de 2 mm.s^{-1}) en présence d'une source auxiliaire de neutrons. Dans ce mode de fonctionnement SILENE est amené à un niveau de puissance stable prédéterminé.

Les performances de SILENE dans les trois modes de fonctionnement décrits ci-dessus sont illustrées dans la figure n°3.

*NOTA : Rappel sur le rôle de la source externe de neutrons.

Quand on indique, dans les caractéristiques de l'expérience, la présence d'une source externe de neutrons il s'agit d'une source de 100 mCi d'Am-Be placée sous le fond de la cuve de coeur (fig. 2). Son rôle est, rappelons-le, de générer un amorçage déterministe de la réaction en chaîne par augmentation de la population initiale neutronique dans le système. Il est évident que pour obtenir un pic de puissance élevé on a intérêt à opérer sans source externe de neutrons et avec une vitesse de sortie de barre la plus élevée possible de manière à avoir introduit toute la réactivité avant que la première chaîne neutronique persistante ne soit initiée.

I.2. DIAGNOSTIC DU REACTEUR

I.2.1. Nombre total de fissions

L'objectif primordial sur un réacteur expérimental est de maîtriser l'énergie totale libérée c'est-à-dire de déterminer le nombre total de fissions au cours de l'expérience.

Pour ce faire deux méthodes peuvent être utilisées pour étalonner le réacteur : la spectrométrie γ sur les produits de fission formés et le bilan thermique.

De plus la technique de spectrométrie gamma étant longue et complexe, on utilise pour réaliser le diagnostic de routine du réacteur :

- des détecteurs à activation (S, Au, Cu, Mg) calibrés lors des expériences d'étalonnage ;
- des détecteurs de suivi de puissance du réacteur dont les informations sont envoyées sur un système d'acquisition et de traitement des données.

- Spectrométrie

Il est possible de déterminer le nombre total de fissions réalisées lors d'une expérience par prélèvement d'un échantillon de solution fissile après l'expérience et analyse par spectrométrie γ de produits de fission judicieusement choisis. Pour SILENE les produits de fission utilisés sont décrits dans le tableau ci-dessous.

Radionucléide	Energie (KeV)	Période	% d'émission	Rendement de fission
Tc 99	140.52	66.02 h	89.4 %	6.16 %
Te 132	228	78.8 h	90 %	4.26 %
Ce 143	293.1	33 h	46 %	5.91 %
Ru 103	497.1	39.35 J	89.7 %	3 %
Zr 95	756.7	65.2 J	54 %	6.2 %
Mo 99	739.4	66.02 h	11.82 %	6.16 %

Cette méthode, en toute rigueur, permet au mieux d'obtenir une précision de 5 % si l'on prend en compte non seulement les erreurs statistiques mais également celles dues aux bibliothèques de données utilisées.

- Bilan thermique

On a constaté sur SILENE que lors des expériences de courte durée (< 2 minutes) le système était sensiblement adiabatique en raison des échanges thermiques avec l'environnement extrêmement réduits. L'échauffement de la solution fissile peut donc être utilisé comme moyen de diagnostic à condition que la température de la solution soit homogène c'est-à-dire qu'il y ait eu brassage important par les gaz de radiolyse mais également à condition de bien connaître les caractéristiques thermiques de la solution.

Dans le cas des solutions de nitrate d'uranyle, nous appliquons pour établir un bilan thermique la relation suivante déduite d'expériences menées en laboratoire à Valduc [1] :

$$C_p = 1 - 0.0008154 \times C_{U_t} - 0.06 H^+$$

A la concentration de 71 g.l^{-1} , C_p est de l'ordre de $0.82 \text{ Cal.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

C_p : Chaleur spécifique en $\text{cal.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$;

C_{U_t} : Concentration en éléments fissiles en g.l^{-1} (g d'Uranium total) ;

H^+ : acidité en moles.l^{-1} .

I.2.2. Suivi de la puissance et des débits de rayonnements

Pour suivre l'évolution de la puissance du réacteur, différents types de détecteurs ont été utilisés (chambres à fissions, scintillateurs, chambres à ionisation) et étalonnés en puissance à partir d'une comparaison entre leur signal et le nombre de fissions résultant du précédent diagnostic.

Des précautions sont toutefois à prendre pour éviter les erreurs dues :

- au temps de vol des neutrons, si l'on fait une mesure en neutrons thermiques ;
- au rayonnement diffusé par les murs en béton qui peut notamment fausser de manière importante le suivi de la chute brutale de puissance lors du premier pic.

Sur SILENE des détecteurs spécifiques placés derrière des écrans et collimatés ont été élaborés pour pallier à ces difficultés.

Pour les mesures de débits de doses neutrons et gamma on a utilisé des détecteurs étalonnés en dose (KERMA rads pour les neutrons et rads-tissus pour les gamma).

I.2.3. Mesures de température et de pression

Hormis les détecteurs nucléaires que nous venons de mentionner, la seule instrumentation non nucléaire placée en permanence sur le réacteur consiste en deux thermocouples (chromel-alumel) placés respectivement dans la solution fissile à 20 et 30 cm du fond de la cuve de coeur et un capteur de pression placé sur le fond de la cuve dont l'objectif est de mesurer l'onde de pression générée lors des pics de puissance.

I.2.4. Mesure du niveau de solution fissile

Deux dispositifs indépendants permettent de mesurer la hauteur de solution fissile introduite dans la cuve de coeur.

Le premier dispositif est de type « électro-mécanique » et consiste à venir établir avec un palpeur un contact électrique sur la surface du liquide. L'ensemble correspondant est implanté sur la partie supérieure du coeur.

Il existe également, sur le fond de la cuve de coeur, un dispositif de mesure de niveau par ultra-sons qui comprend deux détecteurs immergés dans la solution. Le premier détecteur envoie un signal sur la surface du liquide et traite l'information à partir du second détecteur « dit de référence » qui lui, par contre, envoie son signal sur une surface fixe de référence de manière à prendre en compte la variation de la vitesse de l'onde en fonction de la densité et de la température de la solution fissile.

II. EXPERIENCES DE TYPE SALVE

II.1. DESCRIPTION DES EXPERIENCES

Pour réaliser ces expériences, on ajoute la solution dans la cuve du réacteur avec la barre de contrôle enfoncée jusqu'à une hauteur initiale de solution supérieure à la hauteur critique de solution en l'absence de barre de contrôle. Ensuite la barre de contrôle est éjectée à grande vitesse. La réactivité insérée peut alors être assimilée à un saut de réactivité dont la valeur dépend de la différence entre la hauteur initiale et la hauteur critique de solution. Trois salves S1-300, S2-300 et S3-300 ont été sélectionnées pour une concentration de 71 g.l^{-1} et trois autres S1-196, S2-196 et S1-198 ont été sélectionnées pour une concentration de 218 g.l^{-1} .

Pour la salve S1-300 une source externe de neutrons était présente pour obtenir un amorçage non probabiliste des réactions en chaîne de fissions. Pour les autres il n'y avait pas de source externe de neutrons.

II.2. CARACTERISTIQUES DES EXPERIENCES AVEC UNE CONCENTRATION DE 71 g.l⁻¹

Les caractéristiques principales des salves S1-300, S2-300, S3-300 sont données dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	S1-300	S2-300	S3-300
béta effectif en pcm	794	794	794
réactivité insérée en pcm	405	769	1832
hauteur critique en cm	37.36	37.36	37.36
hauteur initiale en cm	38.16	38.91	40.96
température initiale en °C	22.2	22.1	22.3
durée de l'expérience en seconde	1100	265	120

La concentration exacte est de 70.8 g.l⁻¹ d'uranium total et l'acidité est de 2 moles.l⁻¹.

La source externe de puissance pour S1-300 est de 15910 fissions.s⁻².g⁻¹ (voir III.1).

II.3. RESULTATS DES EXPERIENCES AVEC UNE CONCENTRATION DE 71 g.l⁻¹

Les résultats des salves S1-300, S2-300, S3-300 sont donnés dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	S1-300	S2-300	S3 - 300
ω en (seconde) ⁻¹	0.182	5.3	285
puissance maximum au sommet du premier pic en fissions/seconde	1.3×10^{15}	1.7×10^{16}	1.1×10^{19}
nombre de fissions intégré jusqu'au sommet du premier pic	2.2×10^{16}	1.3×10^{16}	6.6×10^{16}
nombre de fissions intégré jusqu'au premier minimum *	4×10^{16}	4.5×10^{16}	1×10^{17}
instant du sommet du premier pic en seconde	110	9.5	1.31
température finale en °C	35.9	43.8	62.2
nombre total de fissions	6.5×10^{16}	1.1×10^{17}	2.1×10^{17}
Instant de l'apparition des bulles de gaz de radiolyse	132.5	10.5	1.31

* Ces données ne sont pas mentionnées dans les rapports mais ont été récupérées dans les archives, pour S1-300 il s'agit en fait d'un point d'inflexion.

Remarque : ω est l'inverse de la période minimum de la puissance avant le premier pic.

II.4. CARACTERISTIQUES DES EXPERIENCES AVEC UNE CONCENTRATION DE 218 g.l⁻¹

Les caractéristiques principales des salves S1-196, S2-196, S1-198 sont données dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	S1-196	S2-196	S1-198
béta effectif en pcm	853	853	853
réactivité insérée en pcm	762	1069	1391
hauteur critique en cm	23.28	23.28	23.28
hauteur initiale en cm	23.84	24.05	24.23
température initiale en °C	18.8	18.8	18.9
durée de l'expérience en seconde	260	180	160

La concentration exacte est de 217.9 g.l⁻¹ d'uranium total et l'acidité est de 1.96 moles. l⁻¹

II.5. RESULTATS DES EXPERIENCES AVEC UNE CONCENTRATION DE 218 g.l⁻¹

Les résultats des salves S1-196, S2-196 et S1-198 sont donnés dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	S1-196	S2-196	S1-198
ω en (seconde) ⁻¹	2.31	161	405
puissance maximum au sommet du premier pic en fissions/seconde	8.2×10^{15}	1×10^{18}	6.6×10^{18}
nombre de fissions intégré jusqu'au premier minimum	2.5×10^{16}	3.4×10^{16}	5.6×10^{16}
instant du sommet du premier pic en seconde	13	1.35	2.58
température finale en °C	43.6	51.8	55
nombre total de fissions	8.1×10^{16}	1.1×10^{17}	1.2×10^{17}

Remarque : ω est l'inverse de la période minimum de la puissance avant le premier pic.

III. EXPERIENCES DE TYPE LIBRE EVOLUTION

III.1. DESCRIPTION DES EXPERIENCES

Pour réaliser ces expériences, on ajoute la solution dans la cuve du réacteur avec la barre de contrôle enfoncée jusqu'à une hauteur initiale de solution supérieure à la hauteur critique de solution en l'absence de barre de contrôle. Ensuite la barre est retirée à faible vitesse (de l'ordre de 1 cm/seconde). L'insertion de réactivité peut alors être assimilée à une rampe de réactivité dont la valeur dépend du poids en réactivité de la barre (en pcm/cm) et de sa vitesse de retrait (en cm/s). La réactivité totale insérée dépend de la différence entre la hauteur initiale et la hauteur critique de solution. Les libres évolutions LE1-362 et LE2-362 ont été sélectionnées pour une concentration de 70 g/litre et les libres évolutions LE1-199 et LE1-201 ont été sélectionnées pour une concentration de 218 g/litre. Les quatre expériences ont été effectuées en présence d'une source externe de neutrons.

Pour déterminer l'apport réel de cette source externe de 100 mCi, des calculs statiques à l'aide du schéma APOLLO 1- MORET III ont été entrepris (réf. 9). La source additionnelle induite dans la solution est de :

- 3.8×10^4 neutrons/s pour 70 g.l⁻¹ ;
- 6.5×10^4 neutrons/s pour 218 g.l⁻¹.

On montre dans la référence 9 que cette source de neutrons apporte dans les équations de la cinétique neutronique ponctuelle une source externe constante de puissance en fissions.s⁻².g⁻¹.

III.2. CALCUL DES RAMPES DE REACTIVITE

III.2.1. Expériences avec une concentration de 70 g.l⁻¹

Ces expériences ont été effectuées avec une barre de contrôle en Cadmium dont l'étalonnage est donné dans les références 6 et 7. La réactivité apportée par le retrait de la barre est de 140 pcm pour un déplacement de 1 cm de la barre. Pour l'expérience LE1-362, la vitesse de retrait de la barre est de 0.2 cm/seconde, la rampe de réactivité apportée par le retrait de la barre est donc de $140 \times 0.2 = 28$ pcm/seconde. Pour l'expérience LE2-362 la vitesse de retrait de la barre est de 0.95 cm/seconde, la rampe de réactivité apportée par le retrait de la barre est donc de $140 \times 0.95 = 133$ pcm/seconde. La réactivité totale insérée étant de 2350 pcm, la durée de l'insertion de réactivité est de $2350/28 = 83.93$ seconde pour LE1-362 et $2350/133 = 17.67$ seconde pour LE2-362.

L'origine des temps pour déterminer l'instant du premier pic de la puissance correspond approximativement à l'instant où la base de la barre coïncide avec la base de la solution fissile.

III.2.2. Expériences avec une concentration de 218 g.l⁻¹

Ces expériences ont été effectuées avec une barre de contrôle en Boral remplie à l'intérieur de polyéthylène et dont l'étalonnage est donné dans la référence 8. Pour les expériences LE1-199 et LE1-201, la réactivité apportée par le retrait de la barre est de 275 pcm/cm. La vitesse de retrait de la barre étant de 1 cm/seconde, la rampe de réactivité apportée par le retrait de la barre est donc de 275 pcm/seconde. La réactivité totale insérée est de 2093 pcm pour LE1-199, la durée de l'insertion de réactivité est de $2093/275 = 7.611$ seconde. Pour LE1-201 la réactivité totale insérée est de 2543 pcm et la durée de l'insertion de réactivité est de $2543/275 = 9.247$ seconde.

L'origine des temps pour déterminer l'instant du premier pic de puissance correspond approximativement à l'instant du départ de la barre.

III.3. CARACTERISTIQUES DES EXPERIENCES AVEC UNE CONCENTRATION DE 70 g.l⁻¹

Les caractéristiques des libres évolutions LE1-362 et LE2-362 sont données dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	LE1-362	LE2-362
béta effectif en pcm	794	794
réactivité insérée en pcm	2350	2350
rampe de réactivité en pcm/seconde	28	133
durée de l'insertion de réactivité en seconde	83.93	17.67
hauteur critique en cm	37.57	37.57
hauteur initiale en cm	42.17	42.17
température initiale en °C	20	20
source de puissance en fissions.s ⁻² .g ⁻¹	1.45 x 10 ⁴	1.45 x 10 ⁴
durée de l'expérience en seconde	560	210

La concentration exacte est de 69.9 g.l⁻¹ d'uranium total et l'acidité est de 2 moles.l⁻¹.

III.4. RESULTATS DES EXPERIENCES AVEC UNE CONCENTRATION DE 70 g.l⁻¹

Les résultats des libres évolutions LE1-362 et LE2-362 sont donnés dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	LE1-362	LE2-362
ω en (seconde) ⁻¹	5.1	28.3
puissance maximum au sommet du premier pic en fissions/seconde	2×10^{16}	1.8×10^{17}
nombre de fissions intégré jusqu'au premier minimum	4.4×10^{16}	4.7×10^{16}
instant du sommet du premier pic en seconde	63.5	14.58
température finale en °C	72	70
nombre total de fissions	3.1×10^{17}	2.8×10^{17}

III.5. CARACTERISTIQUES DES EXPERIENCES AVEC UNE CONCENTRATION DE 218 g.l⁻¹

Les caractéristiques des libres évolutions LE1-199 et LE1-201 sont données dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	LE1-199	LE1-201
béta effectif en pcm	853	853
réactivité insérée en pcm	2093	2543
rampe de réactivité en pcm/seconde	275	275
durée de l'insertion de réactivité en seconde	7.611	9.247
hauteur critique en cm	23.25	23.25
hauteur initiale en cm	24.75	25.16
température initiale en °C	17.9	19.1
source de puissance en fissions.s ⁻² .g ⁻¹	9.5 x 10 ⁴	9.4 x 10 ⁴
durée de l'expérience en seconde	310	280

La concentration exacte pour ces expériences est de 217.9 g.l⁻¹ d'uranium total et l'acidité est de 1.96 mole.l⁻¹.

III.6. RESULTATS DES EXPERIENCES AVEC UNE CONCENTRATION DE 218 g.l⁻¹

Les résultats des libres évolutions LE1-199 et LE1-201 sont donnés dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	LE1-199	LE1-201
ω en (seconde) ⁻¹	69.3	69.3
puissance maximum au sommet du premier pic en fissions/seconde	3.5×10^{17}	3×10^{17}
nombre de fissions intégré jusqu'au premier minimum	3.1×10^{16}	3.0×10^{16}
instant du sommet du premier pic en seconde	22.6	15.4
température finale en °C	78.2	88.4
nombre total de fissions	2.2×10^{17}	2.5×10^{17}

IV. EXPERIENCES DE TYPE DIVERGENCE

IV.1. DESCRIPTION DES EXPERIENCES

Pour ce type d'expérience, la barre de contrôle reste sortie du réacteur. On ajoute la solution dans la cuve du réacteur jusqu'à une hauteur finale de solution légèrement supérieure à la hauteur critique. Les trois divergences LE3-229, LE1-214 et LE2-229 ont été sélectionnées pour une concentration de 71 g/litre. Les trois expériences ont été effectuées en présence d'une source externe de neutrons. La différence entre la hauteur finale de solution et la hauteur critique varie de 0.549 mm à 6.51 mm et la réactivité insérée de 28 à 332 pcm. Le débit de solution est de 50 litres/heure soit 0.143 mm de solution/seconde. Le poids en réactivité du mm de solution étant de 51 pcm/mm, on a donc pour les trois divergences une rampe de réactivité de 7.29 pcm/seconde.

IV.2. CARACTERISTIQUES DES EXPERIENCES

Les caractéristiques des divergences LE1-214, LE2-229 et LE3-229 sont données dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	LE3-229	LE1-214	LE2-229
béta effectif en pcm	794	794	794
réactivité insérée en pcm	28	111	332
rampe de réactivité en pcm/seconde	7.29	7.29	7.29
débit de solution en cm/seconde	0.0143	0.0143	0.0143
durée de l'insertion de réactivité en seconde	3.84	15.24	45.52
hauteur critique en cm	37.2	37.9	37.2
excès de solution au dessus de la hauteur critique en cm	0.0549	0.218	0.651
température initiale en °C	20	19	20
source de puissance en fissions.s ⁻² .g ⁻¹	1.62 x 10 ⁴	1.62 x 10 ⁴	1.62 x 10 ⁴
durée de l'expérience en seconde	14400	16200	14400

La concentration exacte pour LE3-229 et LE2-229 est de 71.5 g.l⁻¹ d'uranium total et pour LE1-214 de 71.3 g.l⁻¹ d'uranium total pour LE1-214, l'acidité est de 2 moles.l⁻¹ pour ces expériences.

IV.3. RESULTATS DES EXPERIENCES

Les résultats des divergences LE1-214, LE2-229 et LE3-229 sont données dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	LE3-229	LE1-214	LE2-229
ω en (seconde) ⁻¹	0.003	0.016	0.112
puissance maximum au sommet du premier pic en fissions/seconde	1.4×10^{12}	4.5×10^{13}	7.1×10^{14}
nombre de fissions intégré jusqu'au sommet du premier pic	1.1×10^{15}	1.0×10^{16}	1.9×10^{16}
nombre de fissions intégré jusqu'au premier minimum *	pas de minimum	2×10^{16}	5.6×10^{16}
instant du sommet du premier pic en seconde	3900	980	220
température finale en °C	21	23	31.5
nombre total de fissions	3.1×10^{15}	2.4×10^{16}	7.5×10^{16}

* Ces données ne sont pas mentionnées dans les rapports mais ont été récupérées dans les archives.

V. CONCLUSION

Cette note décrit 13 expériences de référence du programme expérimental SILENE pour la qualification des codes d'accidents de criticité.

Le domaine de qualification est défini par :

- une solution de nitrate d'uranyle enrichi à 92.7 % en ²³⁵U et dont la concentration en uranium total est de 71 g.l⁻¹ ou de 218 g.l⁻¹ ;
- une géométrie cylindrique annulaire de 36 cm de diamètre ;
- une insertion de réactivité par saut brusque (mode Salve) ou par rampe (Libre Evolution ou Divergence). Les sauts pouvant aller jusqu'à 1800 pcm et les rampes jusqu'à 275 pcm/s ;
- une réactivité insérée de 30 à 2350 pcm.

REFERENCES

- 1 - Rapport SRSC n°223 - Septembre 1994
SILENE Reactor - Results of selected typical experiment
- 2 - Note technique SRSC n°216 du 14 Avril 1987
Résultats des deux premières expériences réalisées sur le réacteur Silène dans le cadre du contrat CCE d'étude des excursions accidentelles de criticité en solution
- 3 - Note technique SEESNC n°82.17
Compte-rendu des essais d'étalonnage du réacteur Silène à la concentration de 220g/l
- 4 - Note technique SRSC n°83.33
Excursions de puissance à cinétique lente réalisées sur le réacteur Silène
- 5 - Note technique SRSC n°87.83
Point sur les connaissances en matière de formation de gaz de radiolyse lors d'une excursion de criticité en solution
- 6 - Note technique SRSC n°88.05
Etalonnage de la barre de contrôle en Cadmium utilisée avec le système de commande à vis sur le réacteur Silène en configuration sans écran
- 7 - Note technique SRSC n° 92-11
Actualisation des connaissances sur le poids en réactivité de la barre Cadmium du réacteur Silène en configuration sans écran (concentration 71g/l)
- 8 - Note SRSC sous référence AQ : INB010QINP9101ET**229
Calcul du poids en réactivité d'une barre de contrôle annulaire en Boral remplie de polyéthylène sur le réacteur Silène en configuration sans écran
- 9 - Note SRSC sous référence AQ : INB010QINP9101ET**231
Introduction d'une source externe de puissance de fission dans le code CRITEX - Application au réacteur SILENE



Figure 1 : Photographie du réacteur SILENE

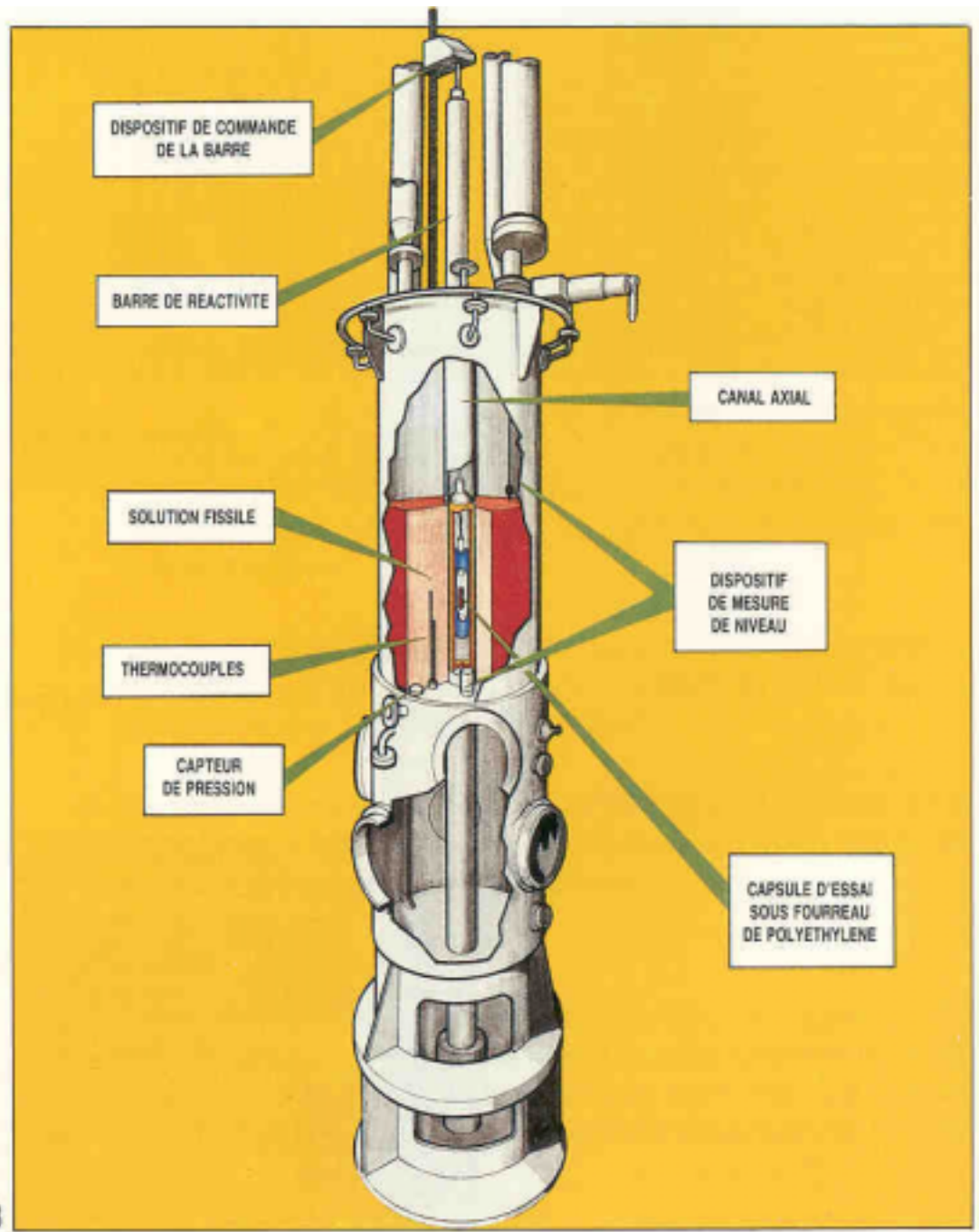
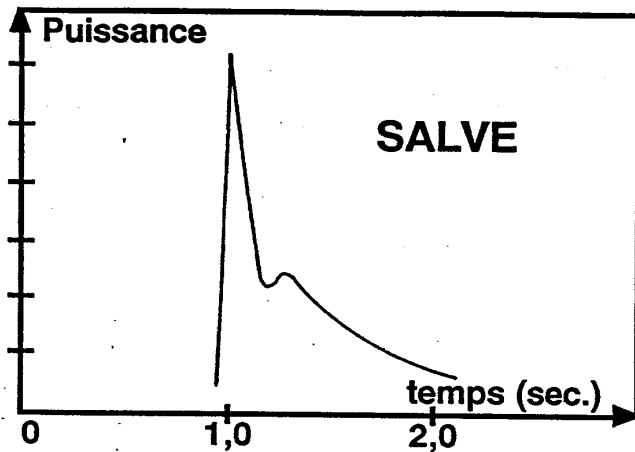


Figure 2 : Schéma du cœur du réacteur SILENE

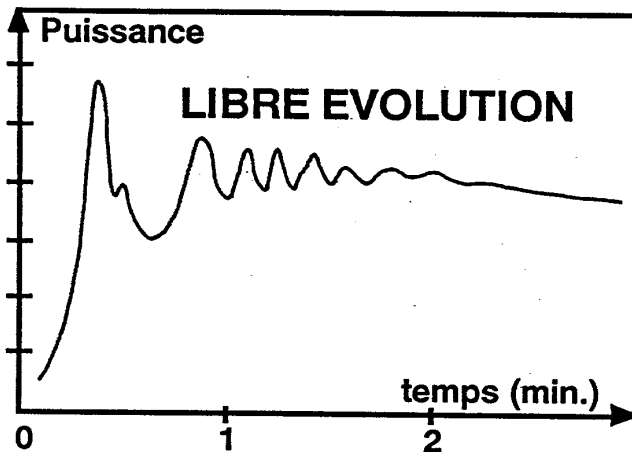


PUISSANCE DU PIC
 $\leq 3,3 \cdot 10^{19}$ fissions.s⁻¹
 (1000 Mégawatts)

ENERGIE DU PIC
 $\leq 2 \cdot 10^{17}$ fissions.

TEMPS DE DOUBLEMENT
 $\geq 1,5$ ms

LARGEUR DU PIC
 ≥ 6 ms

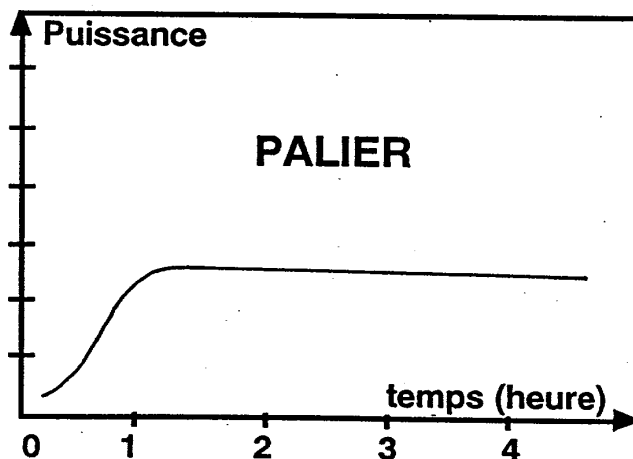


PUISSANCE 1ER PIC
 $\leq 2 \cdot 10^{17}$ fissions.s⁻¹

ENERGIE 1ER PIC
 $\leq 5 \cdot 10^{16}$ fissions.

ENERGIE TOTALE
 $\leq 5 \cdot 10^{17}$ fissions.

TEMPS DE DOUBLEMENT
 ≥ 23 ms



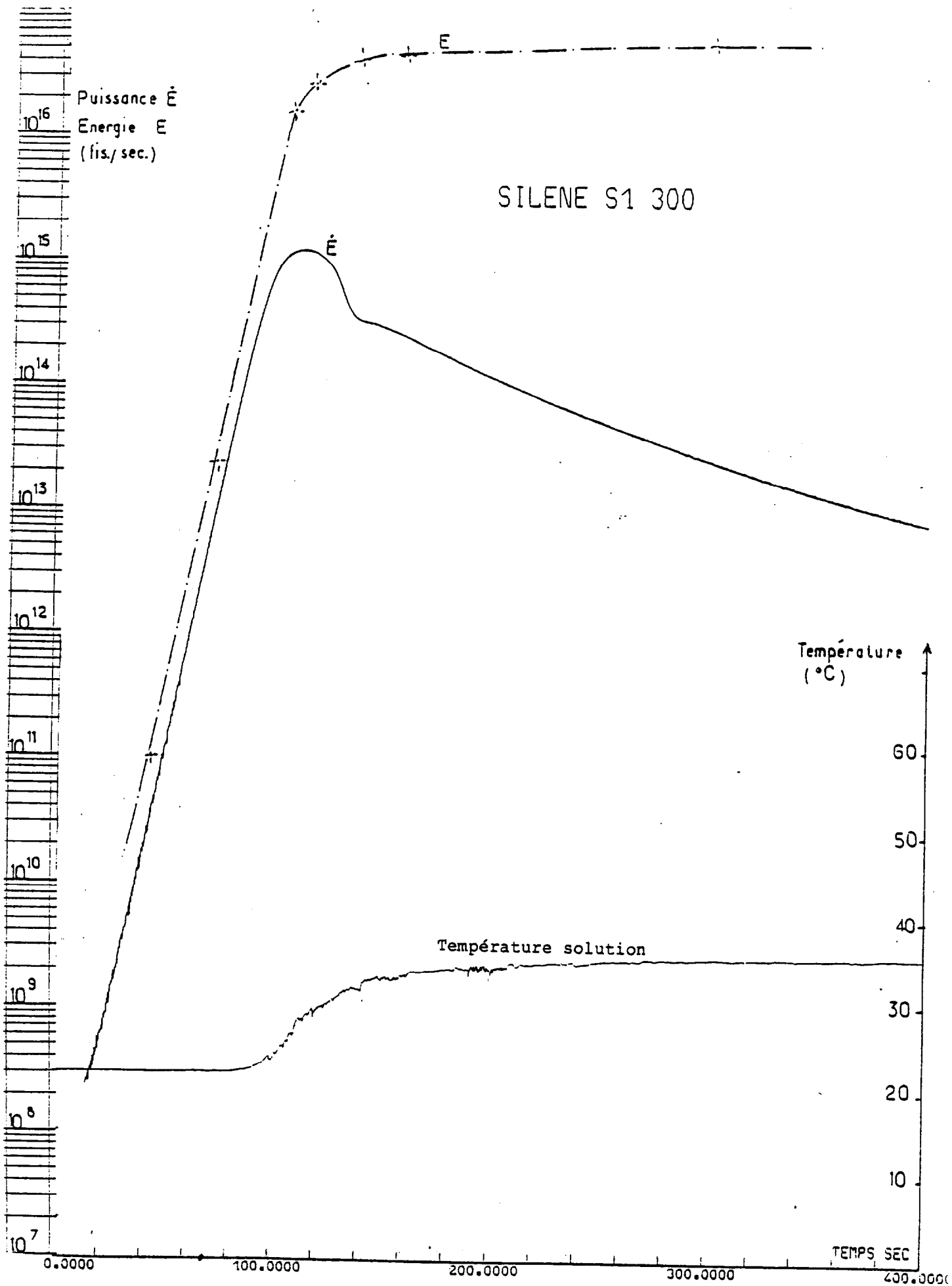
1/100 WATT < Puissance < 10 kwatts

DUREE
 Plusieurs heures

ENERGIE TOTALE
 $\leq 5 \cdot 10^{17}$ fissions

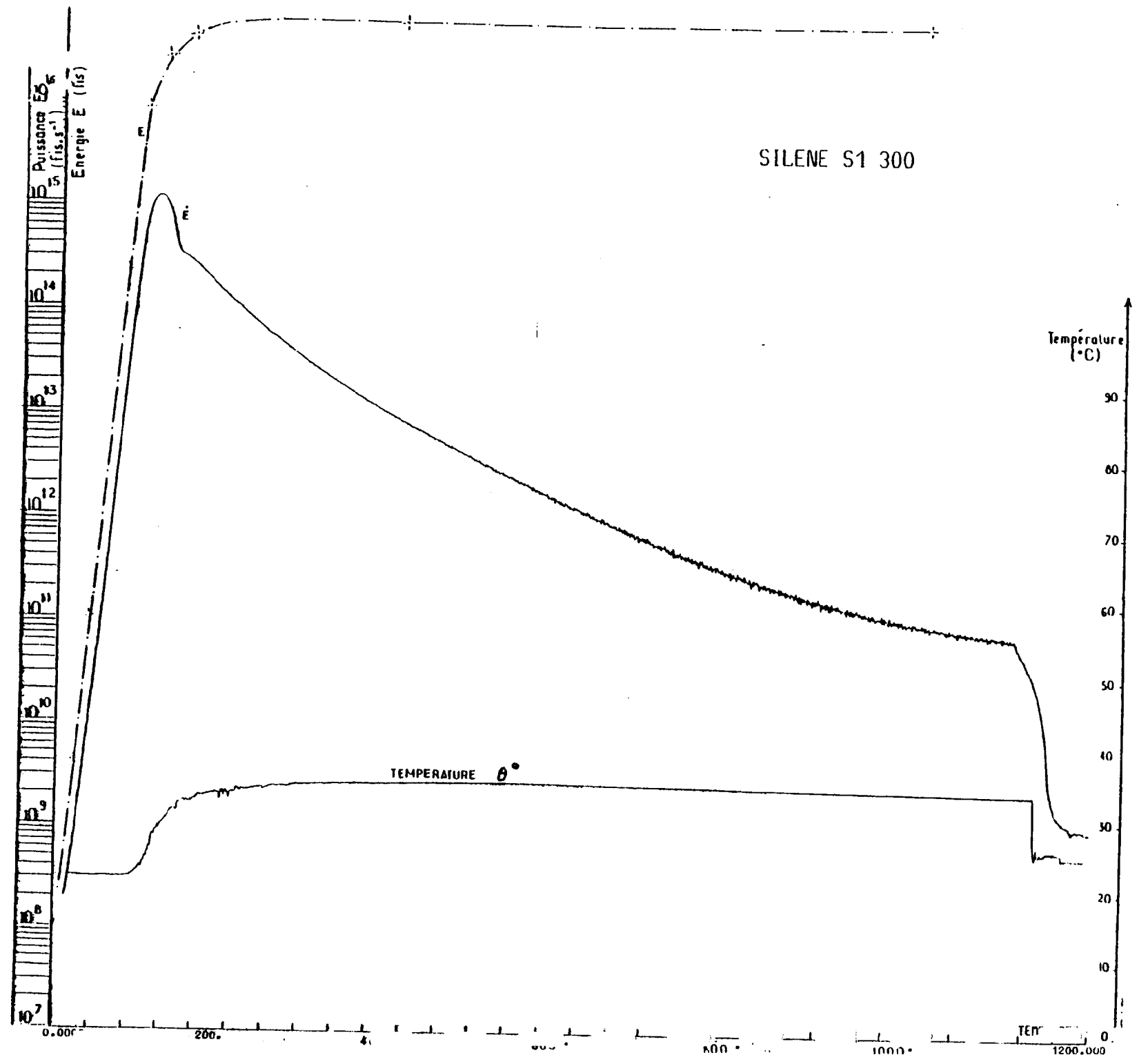
Figure 3 : Modes de fonctionnement du réacteur SILENE

ANNEXE 1 : S1-300



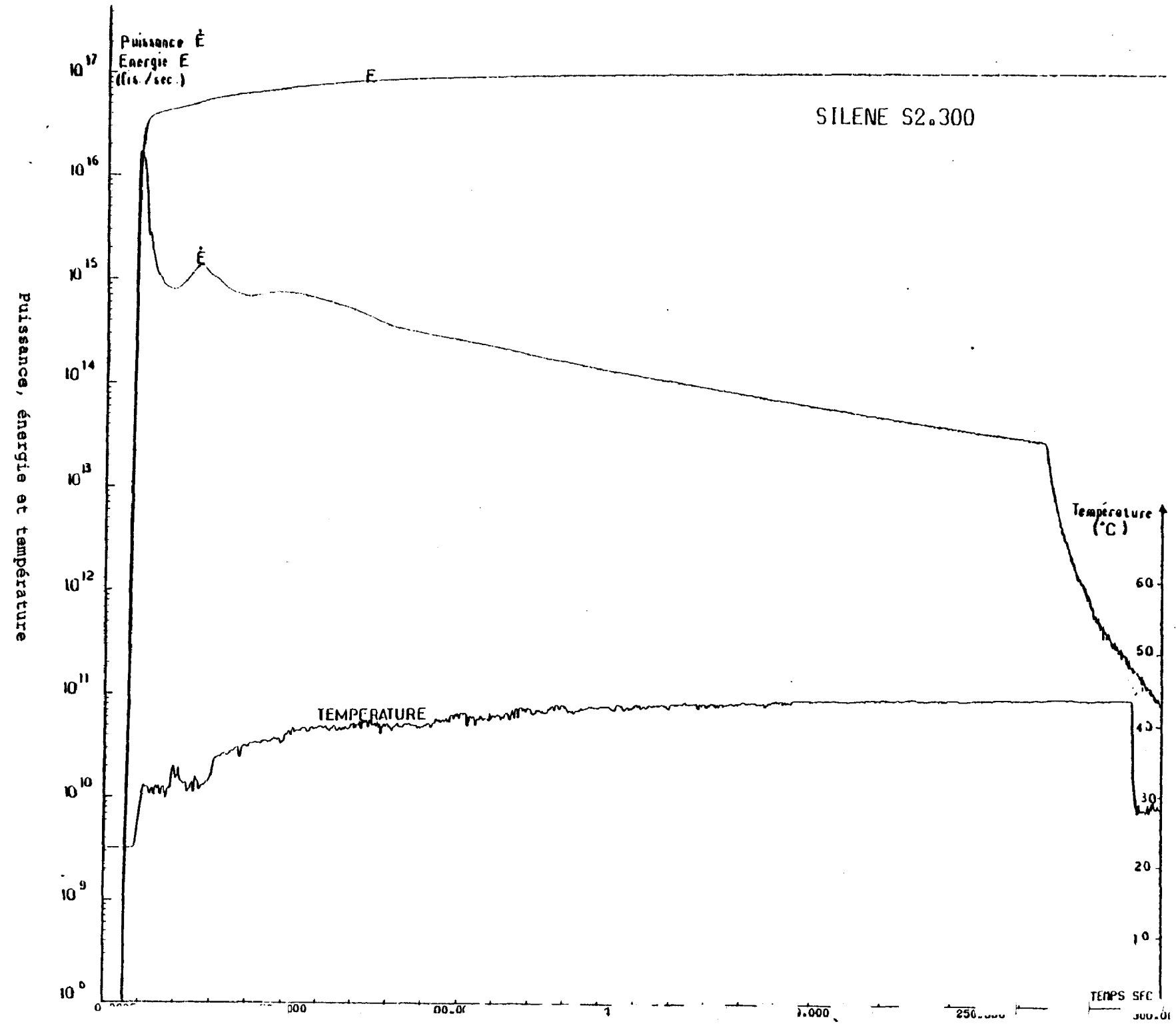
Puissance, énergie et température (détail ler pic)

Puissance, énergie et température



ANNEXE 2 : S2-300

SILENE S2.300



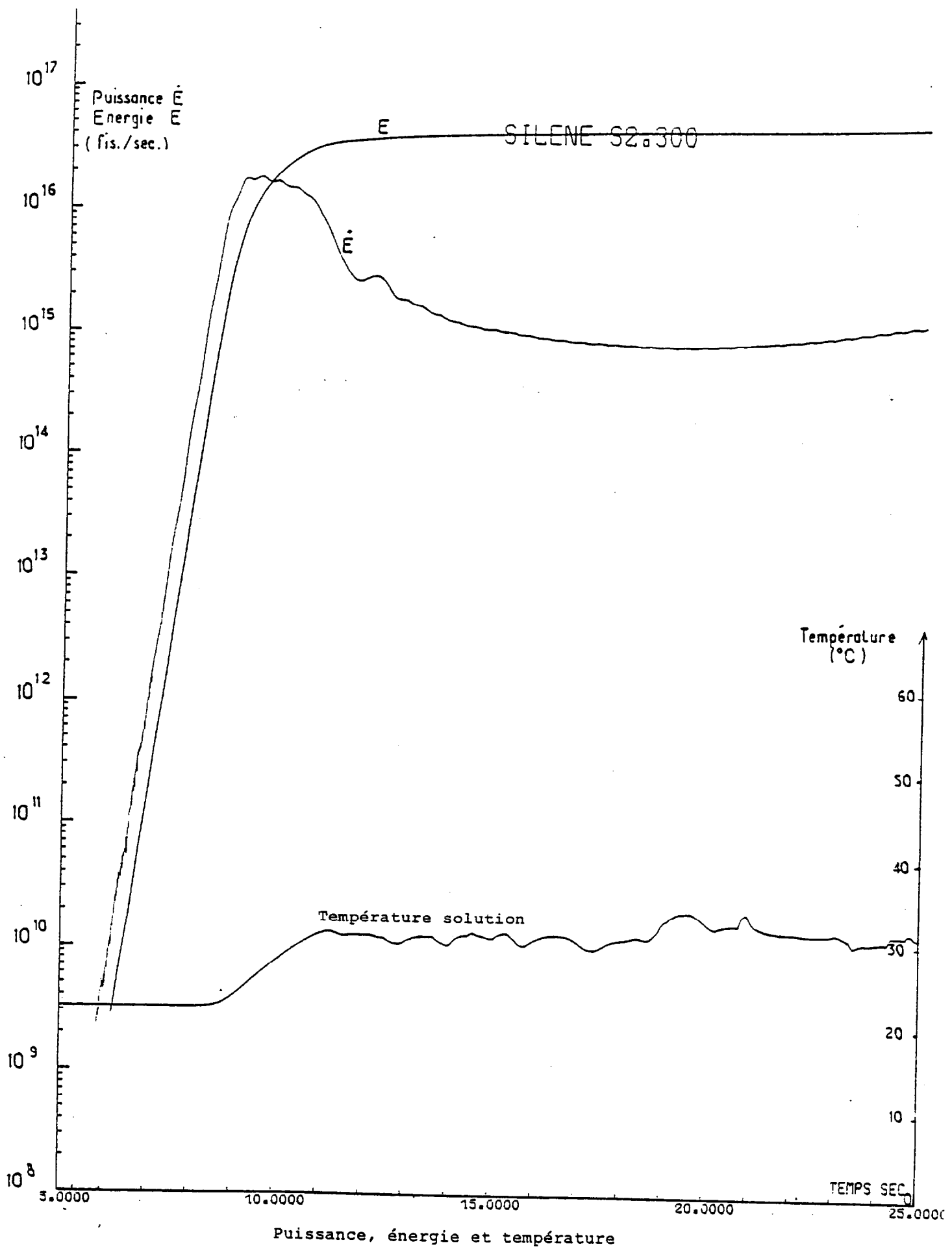
Puissance \dot{E}
Energie E
(1/s) / (sec.)

Puissance, énergie et température

TEMPERATURE

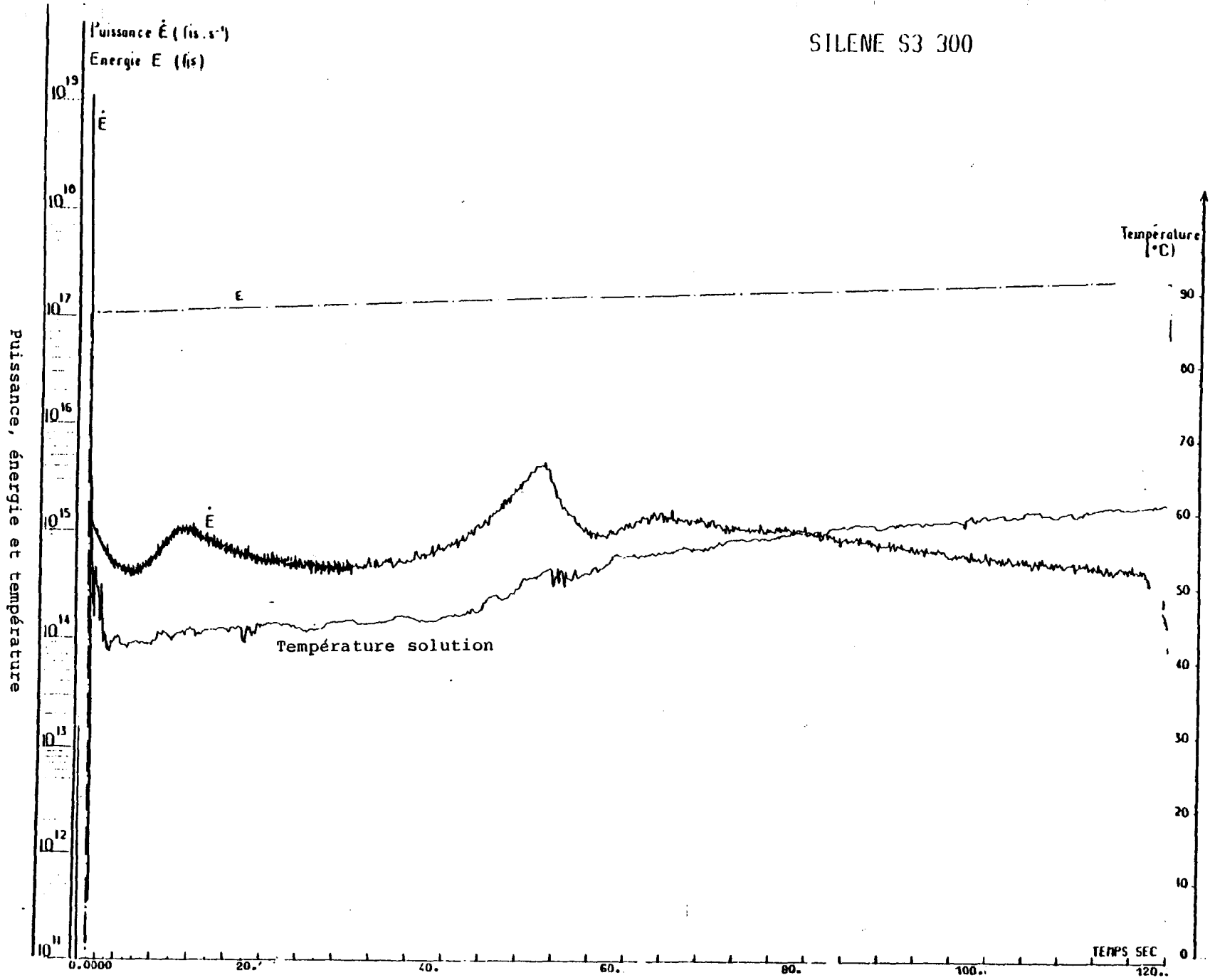
Température (°C)

TEMPS SEC

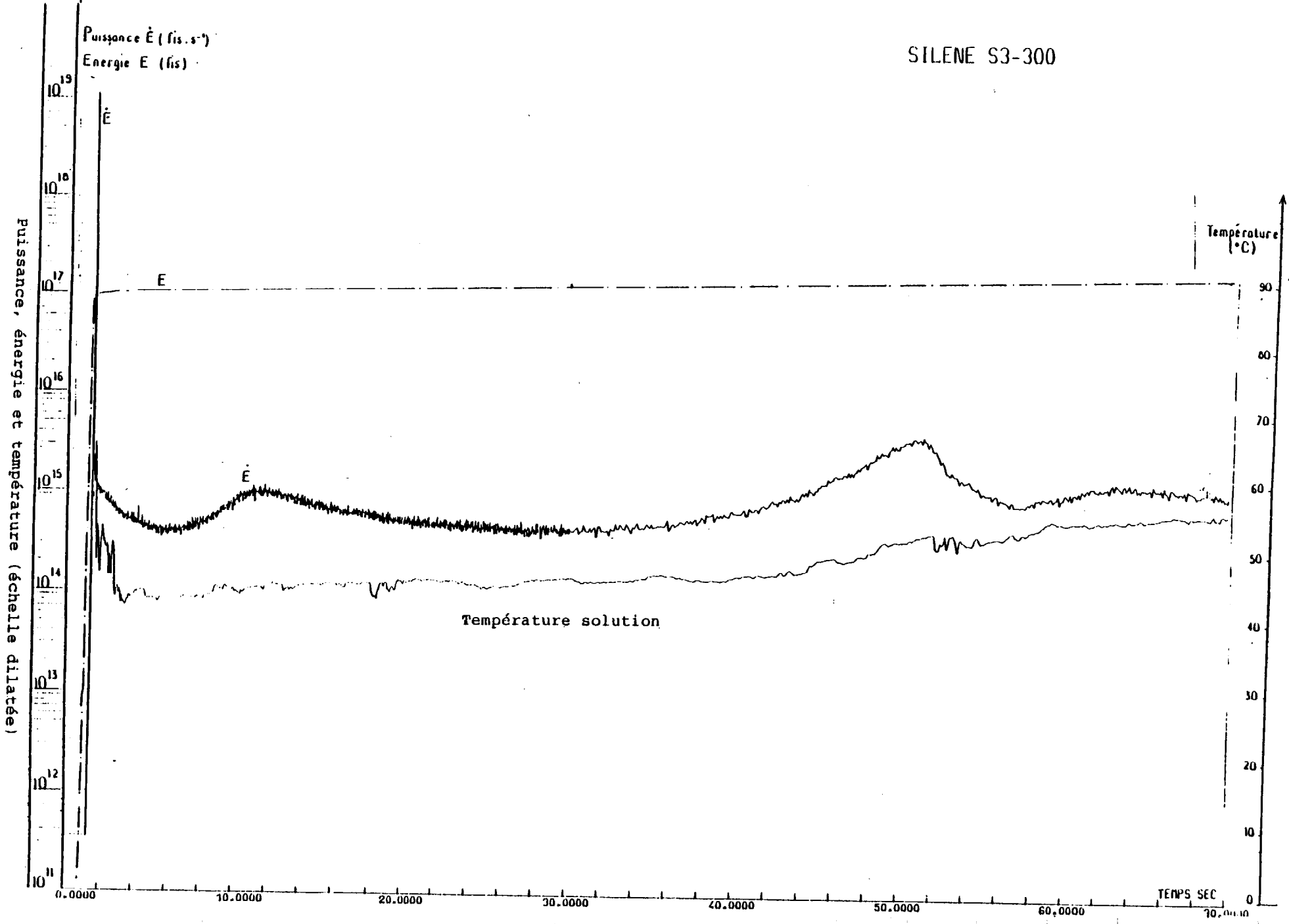


ANNEXE 3 : S3-300

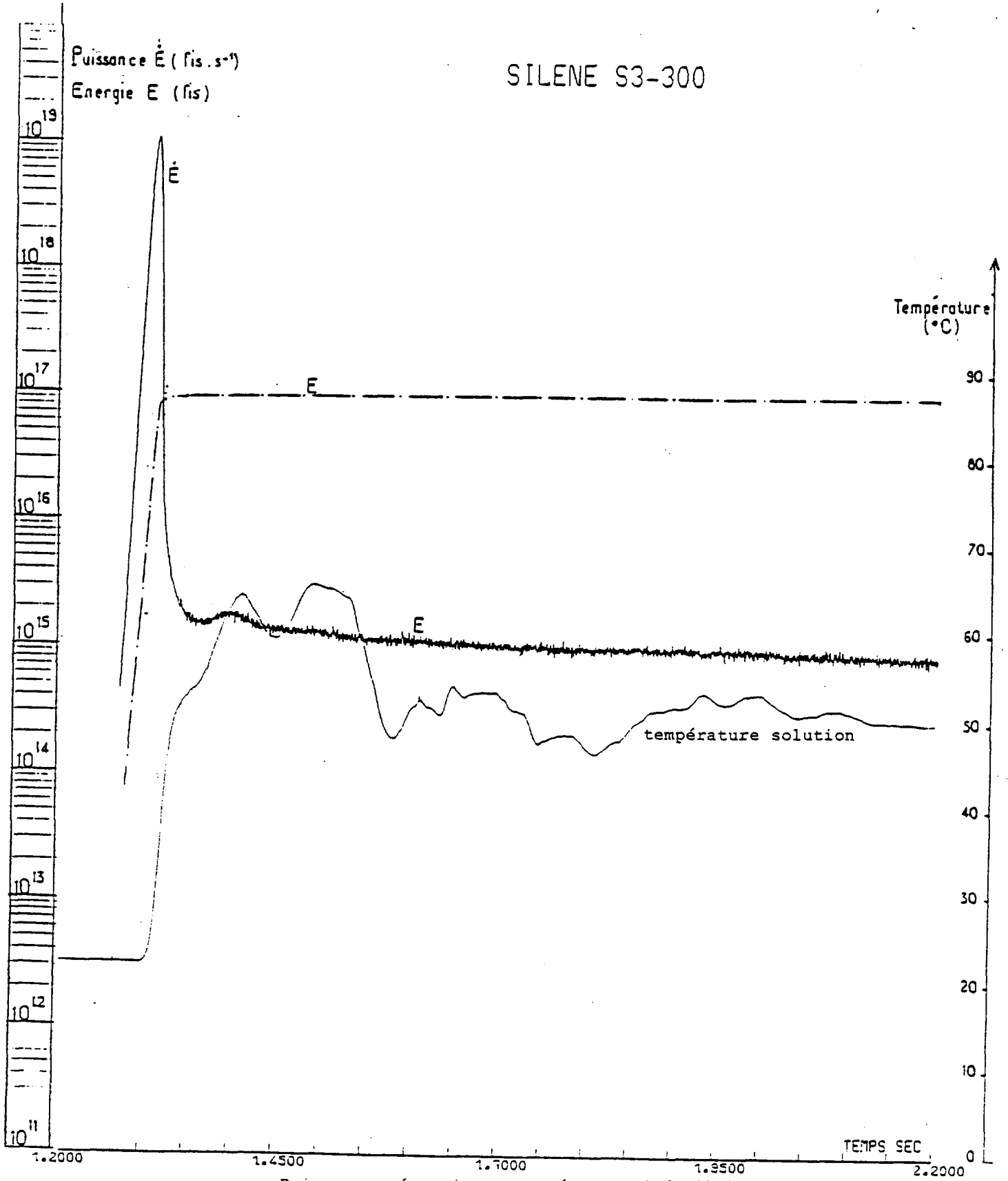
SILENE S3 300



SILENE S3-300

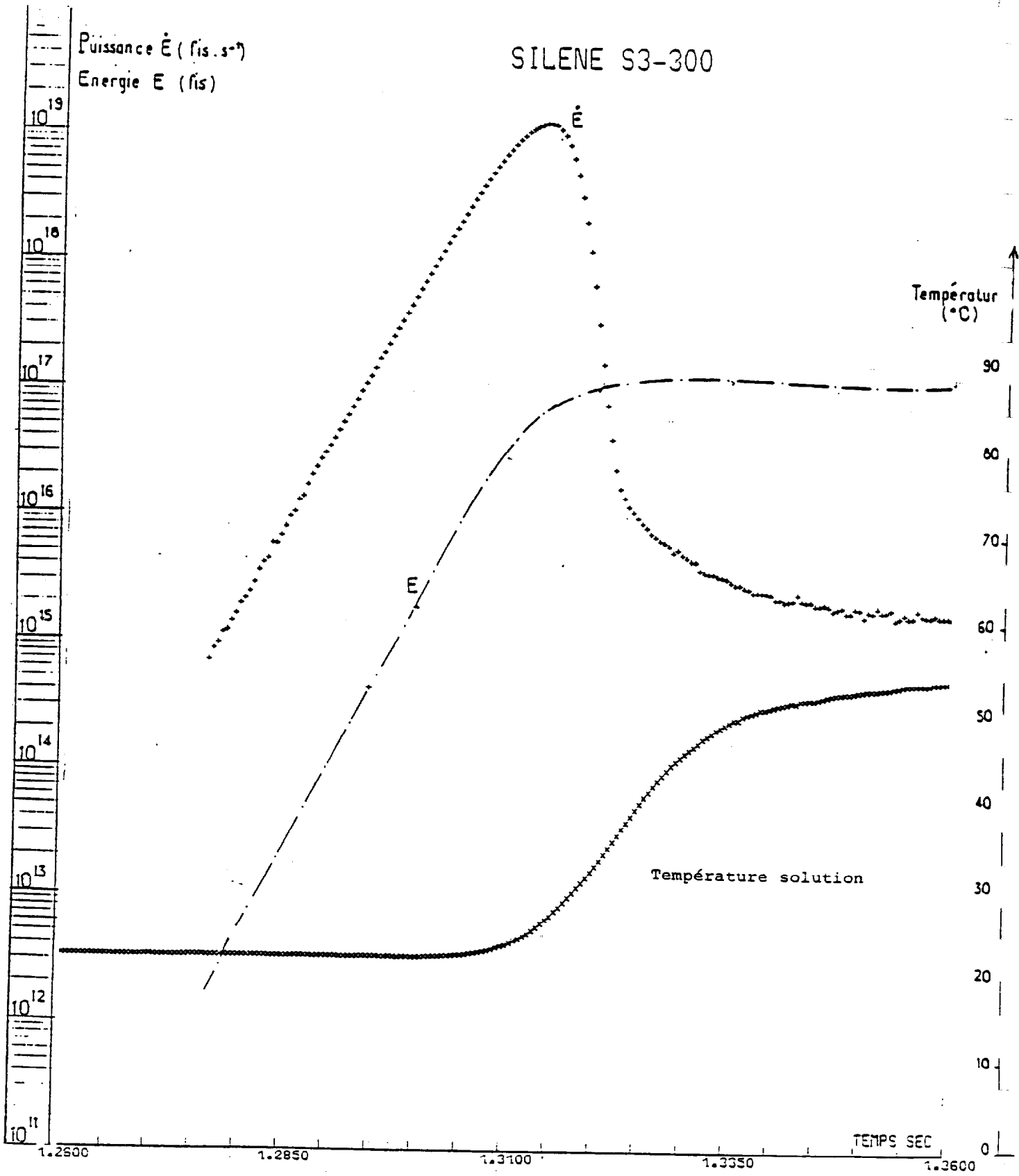


SILENE S3-300



Puissance, énergie et température (détail 1er pic)

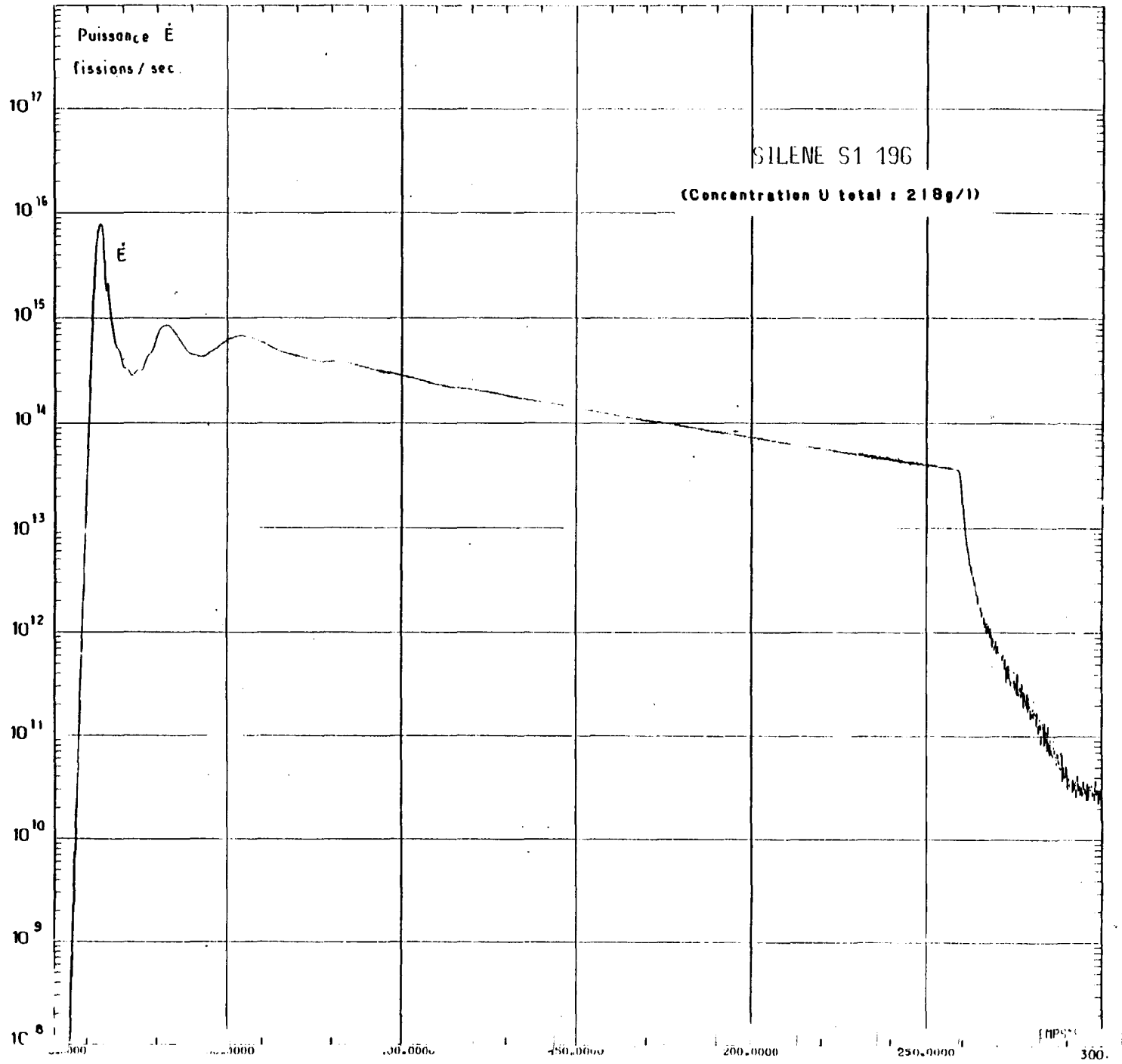
SILENE S3-300

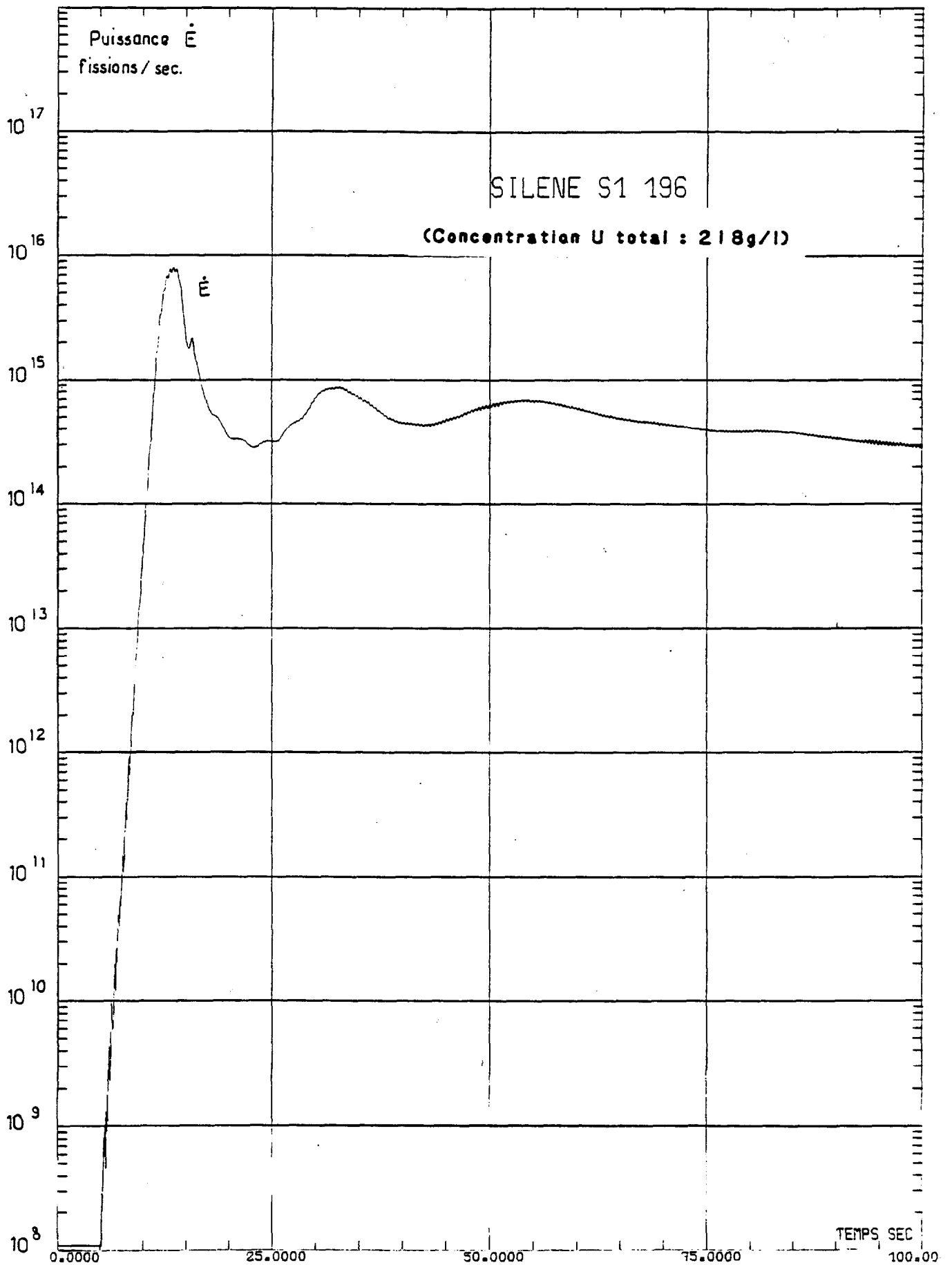


Puissance, énergie et température (détail 1er pic)

ANNEXE 4 : S1-196

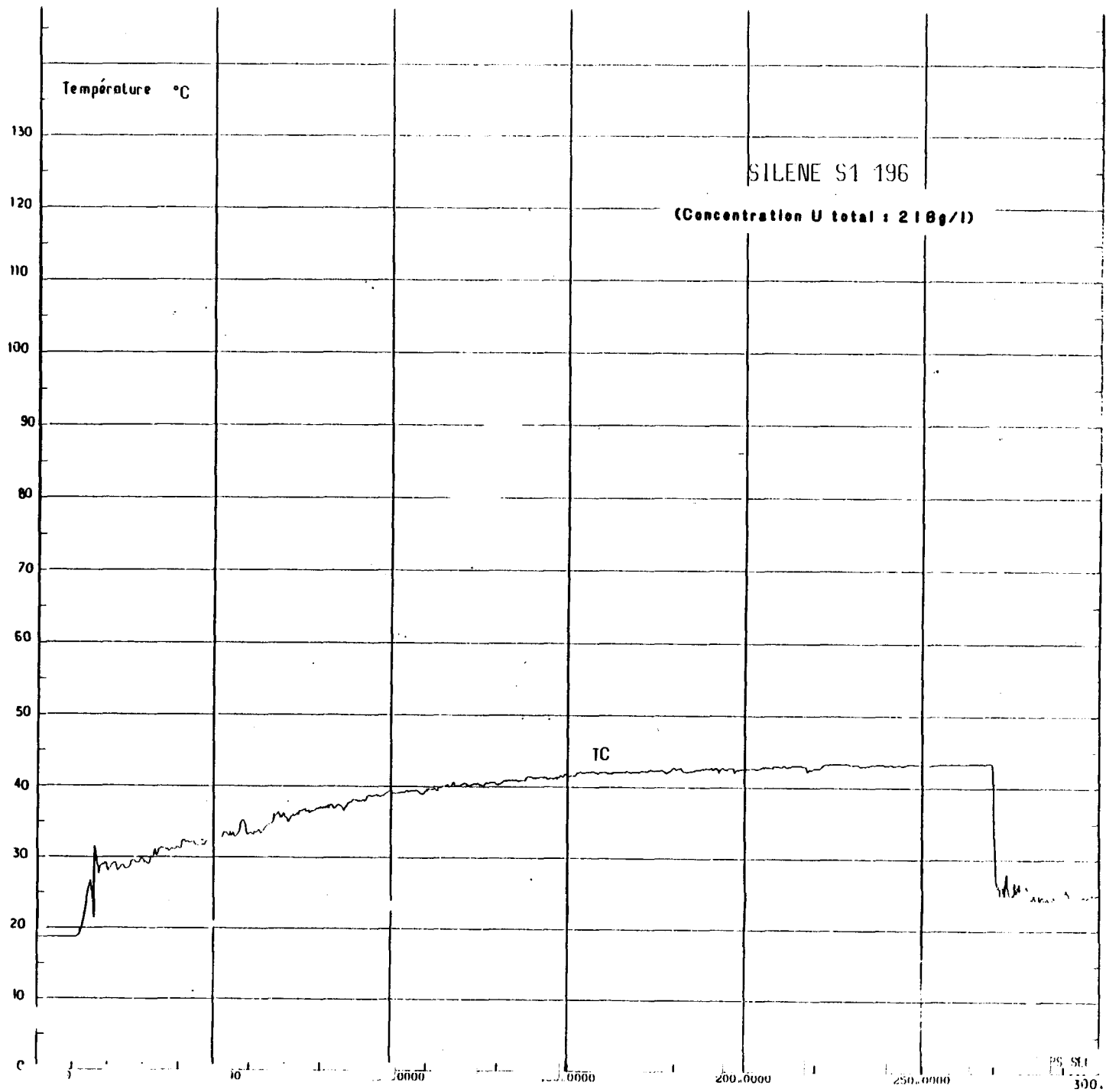
SILENE
- Expérience du type "Salve"
Evolution de la puissance
(toute l'expérience)





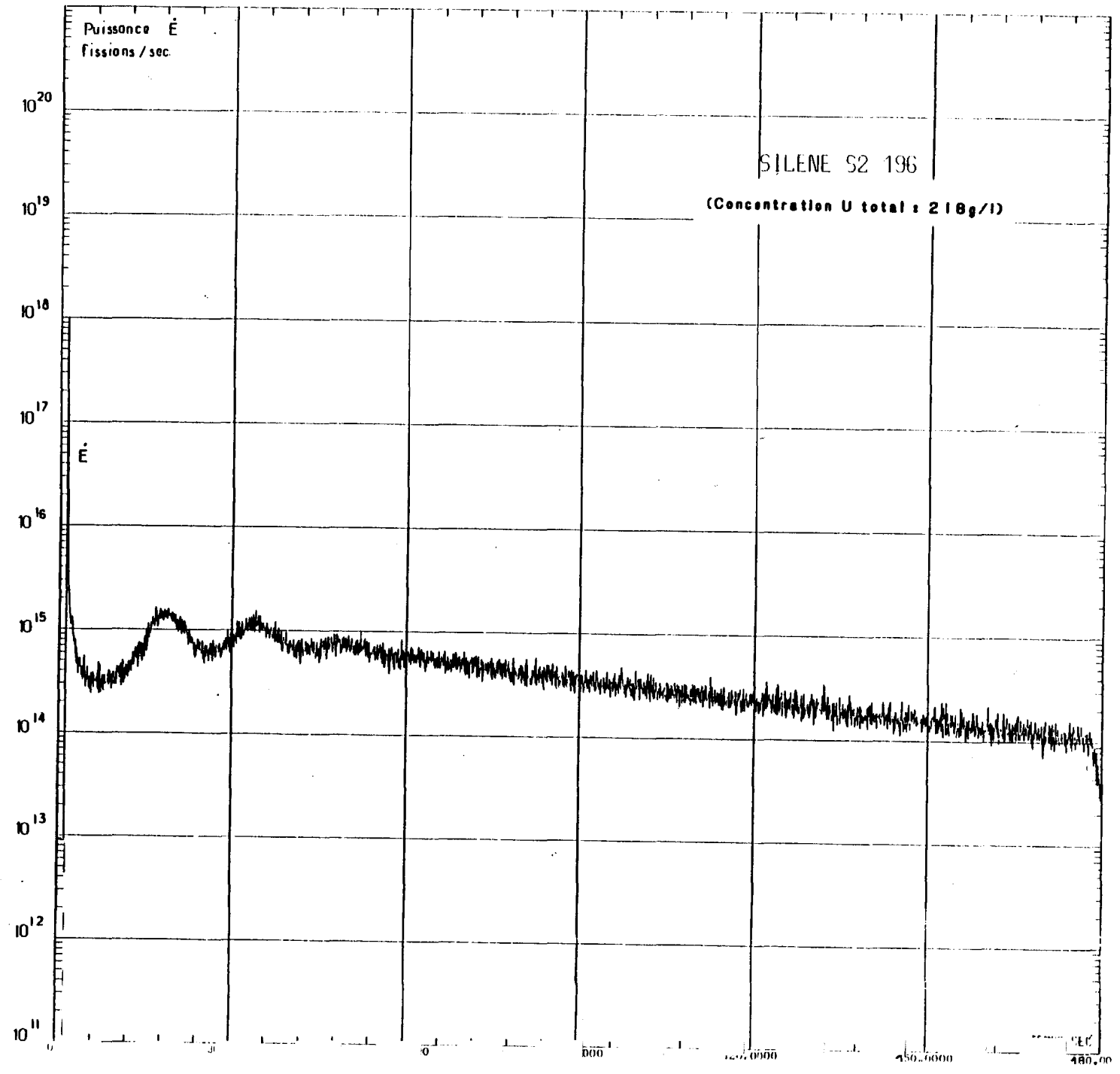
SILENE
- Expérience du type "Salve"
Evolution de la puissance
(premier pic)

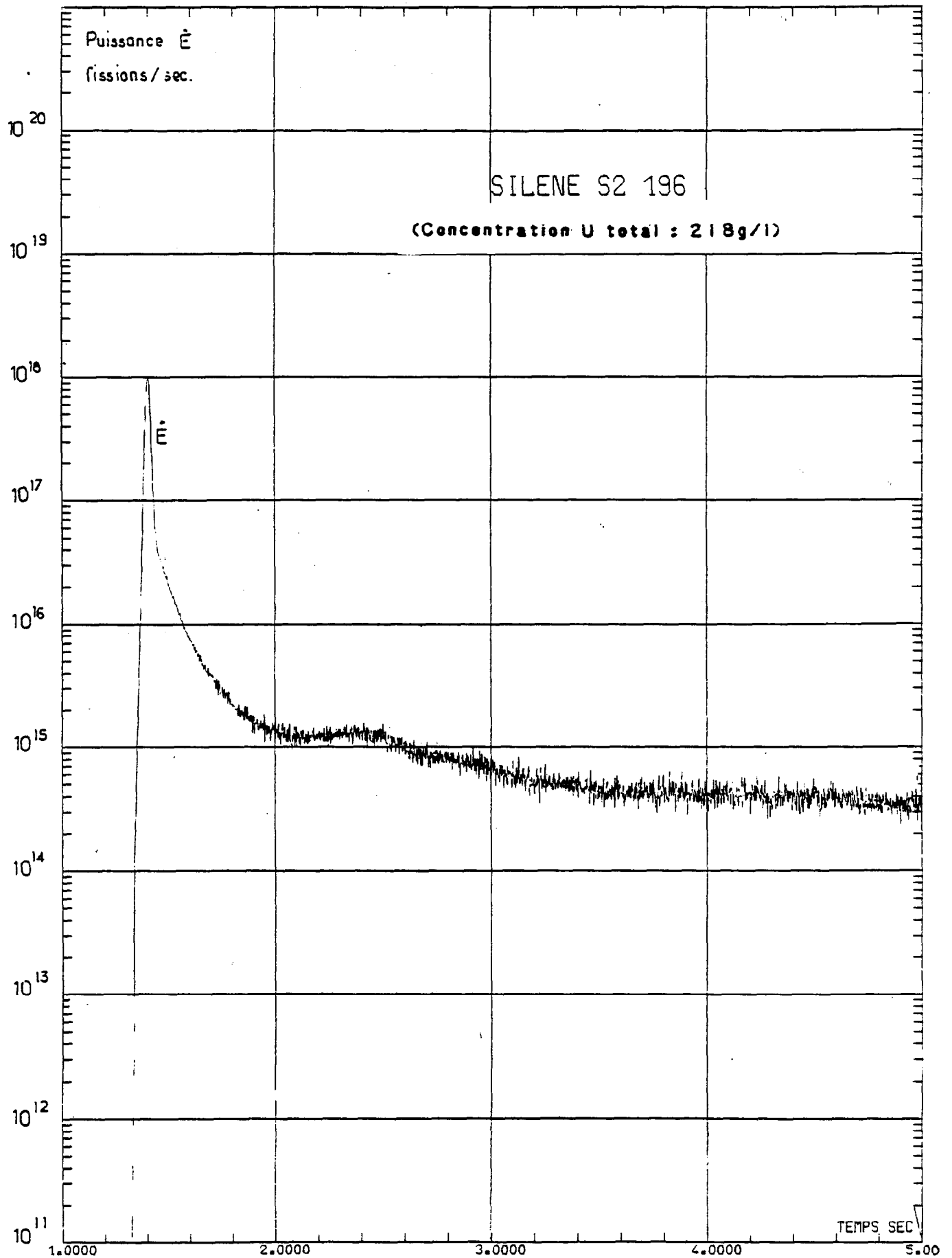
SILENE
- Expérience du type "Salve"
Evolution de la température au sein du réacteur



ANNEXE 5 : S2-196

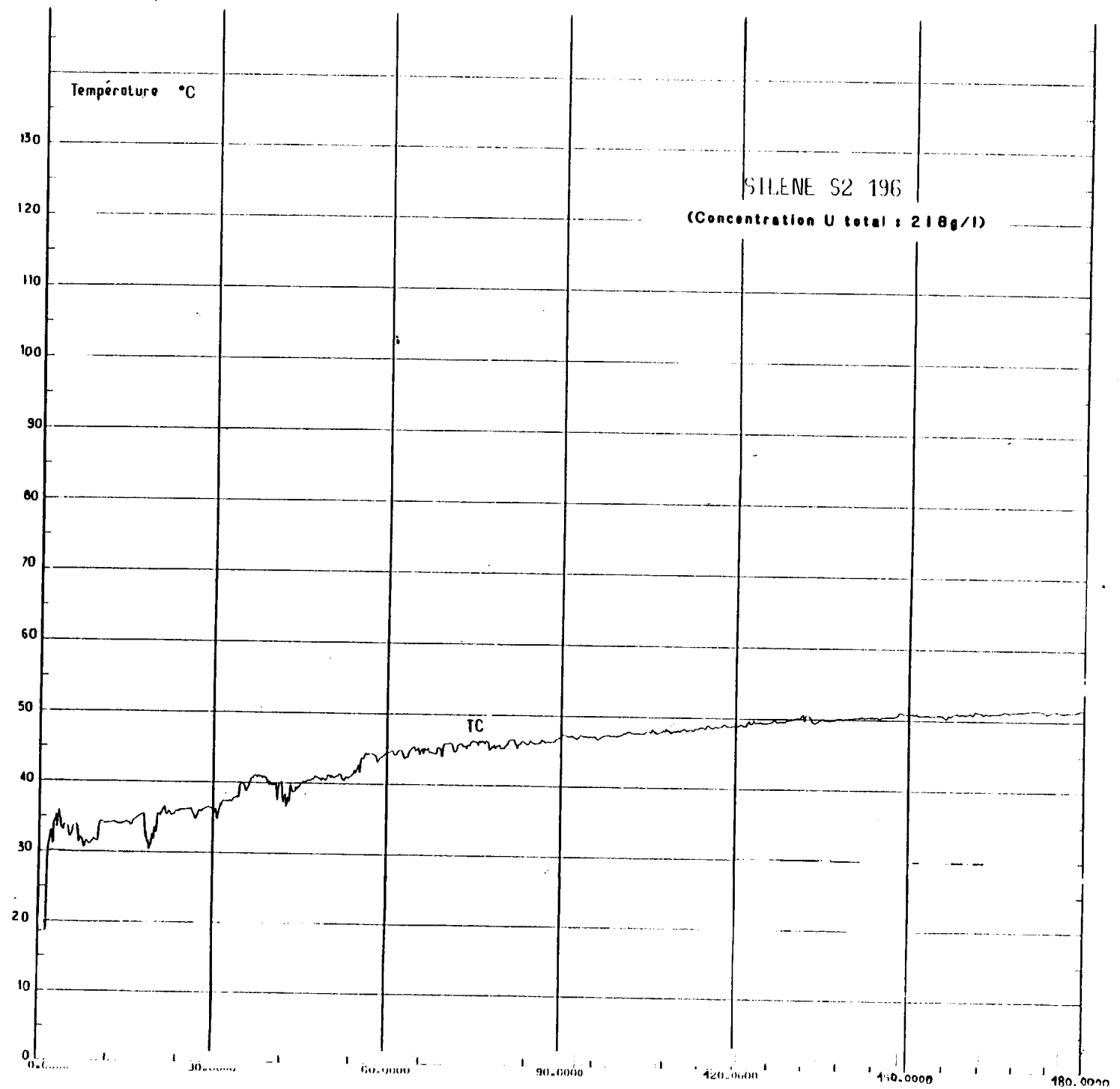
SILENE
- Expérience du type "Salve"
Evolution de la puissance
(toute l'expérience)





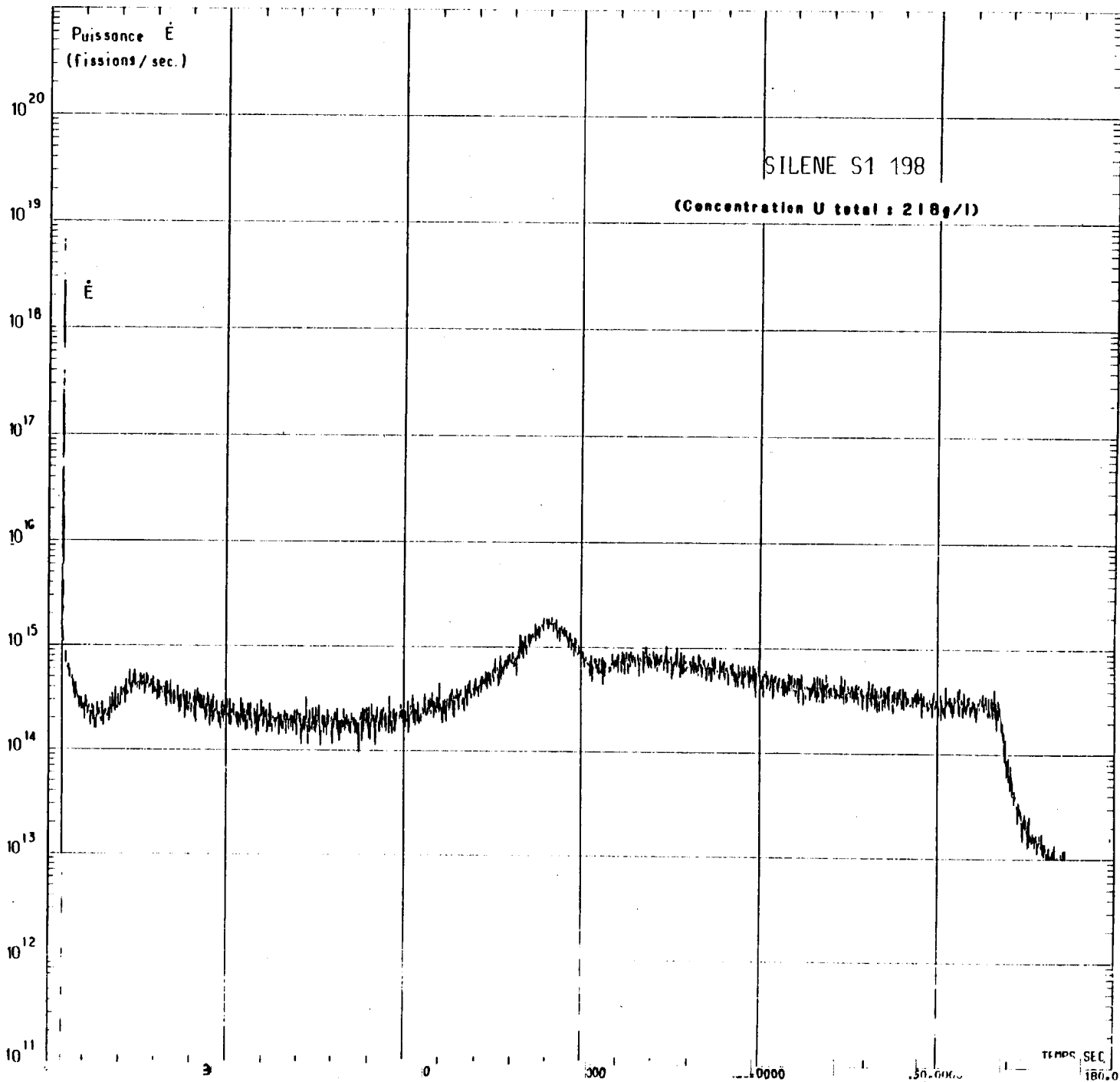
SILENE
 - Expérience du type "Salve"
 Evolution de la puissance
 (premier pic)

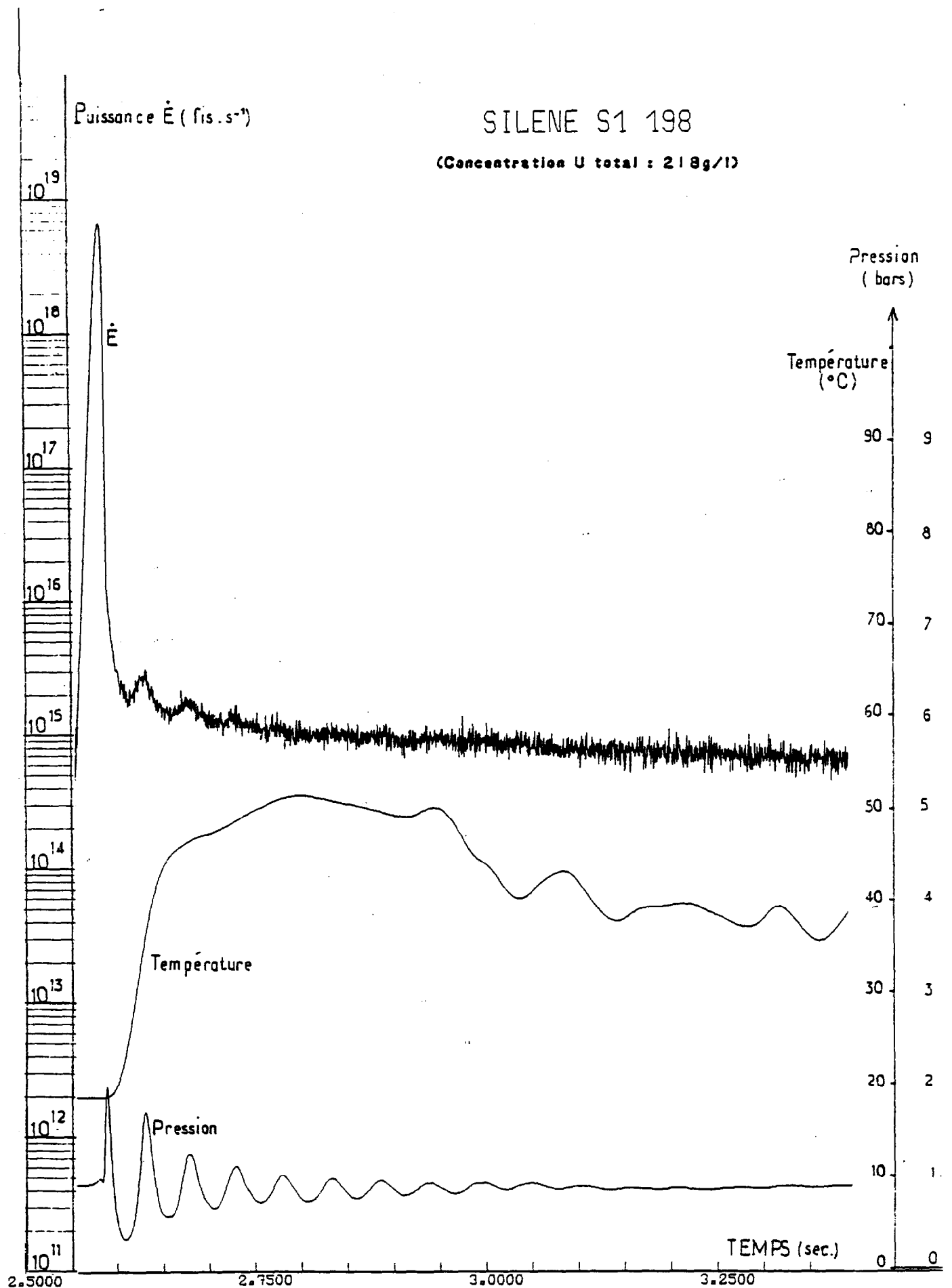
SILENE
- Expérience du type "Salve"
Evolution de la température au sein du réacteur



ANNEXE 6 : S1-198

SILENE
- Expérience du type "Salve"
Evolution de la puissance
(toute l'expérience)





SILENE S1 198

(Concentration U total : 218g/l)

Puissance \dot{E} (fis.s⁻¹)

Pression (bars)

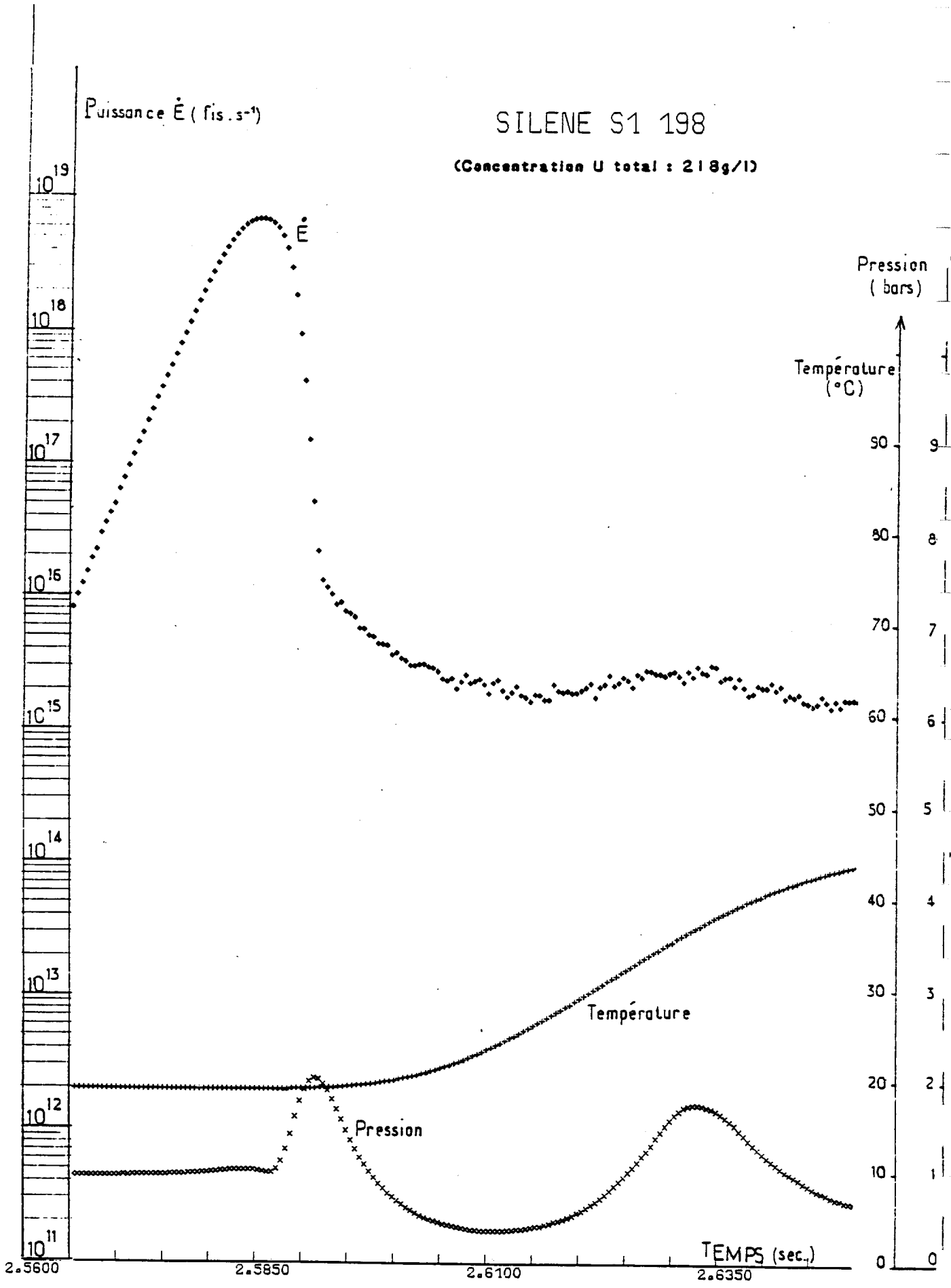
Température (°C)

Température

Pression

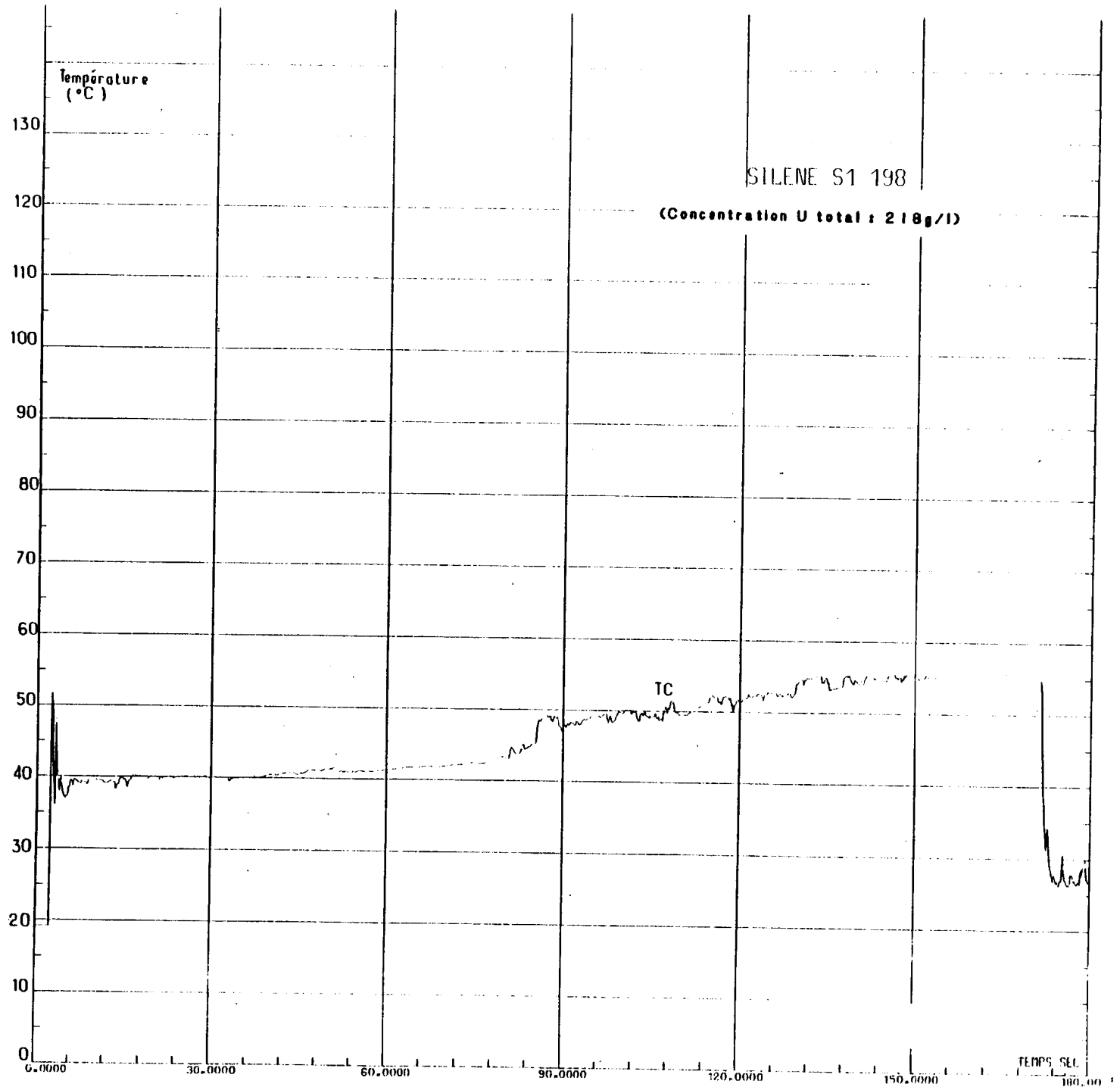
TEMPS (sec.)

- SILENE_ (218g/l) . Evolution de la puissance , de la température , de la pression au sein du réacteur

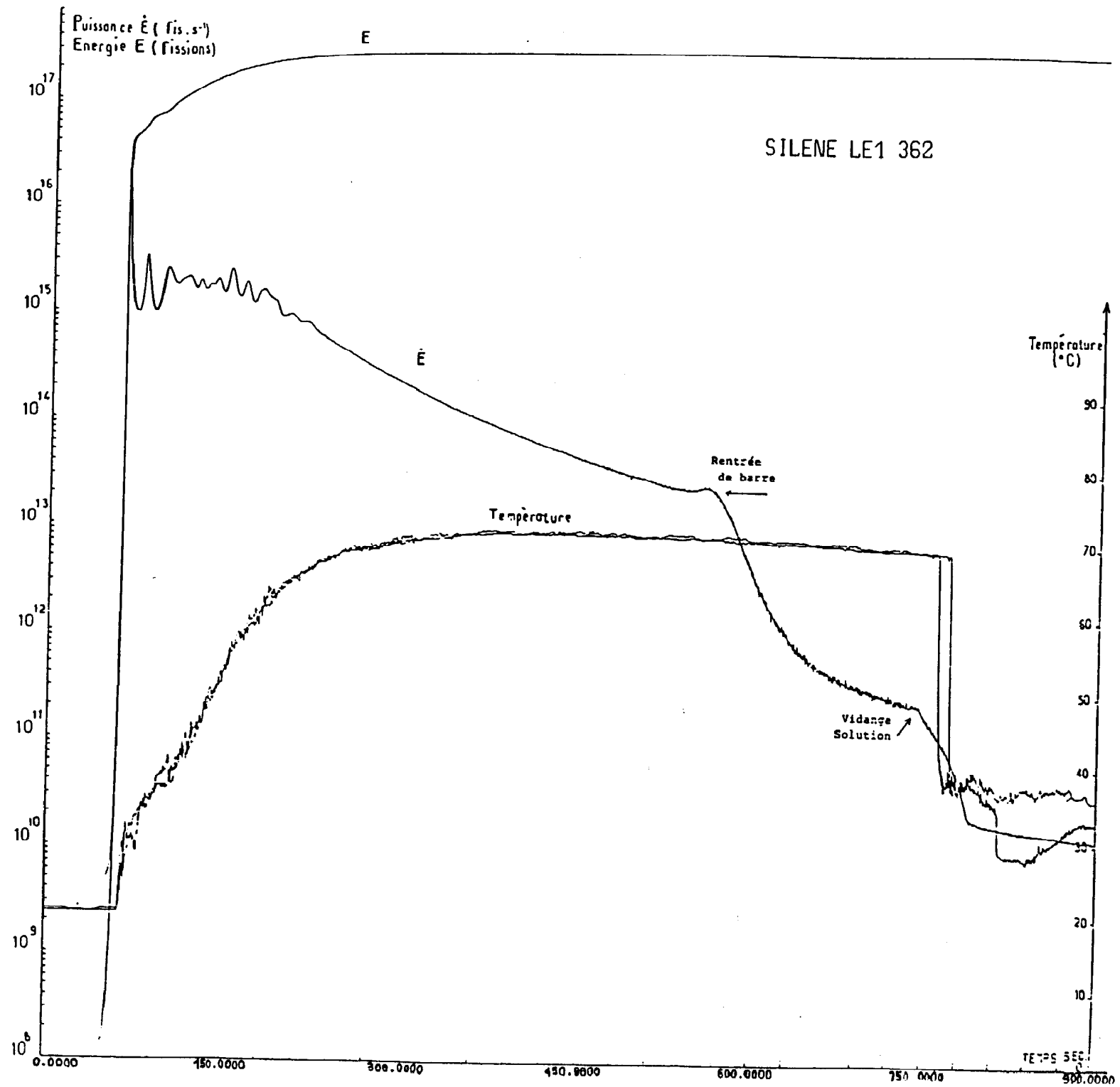


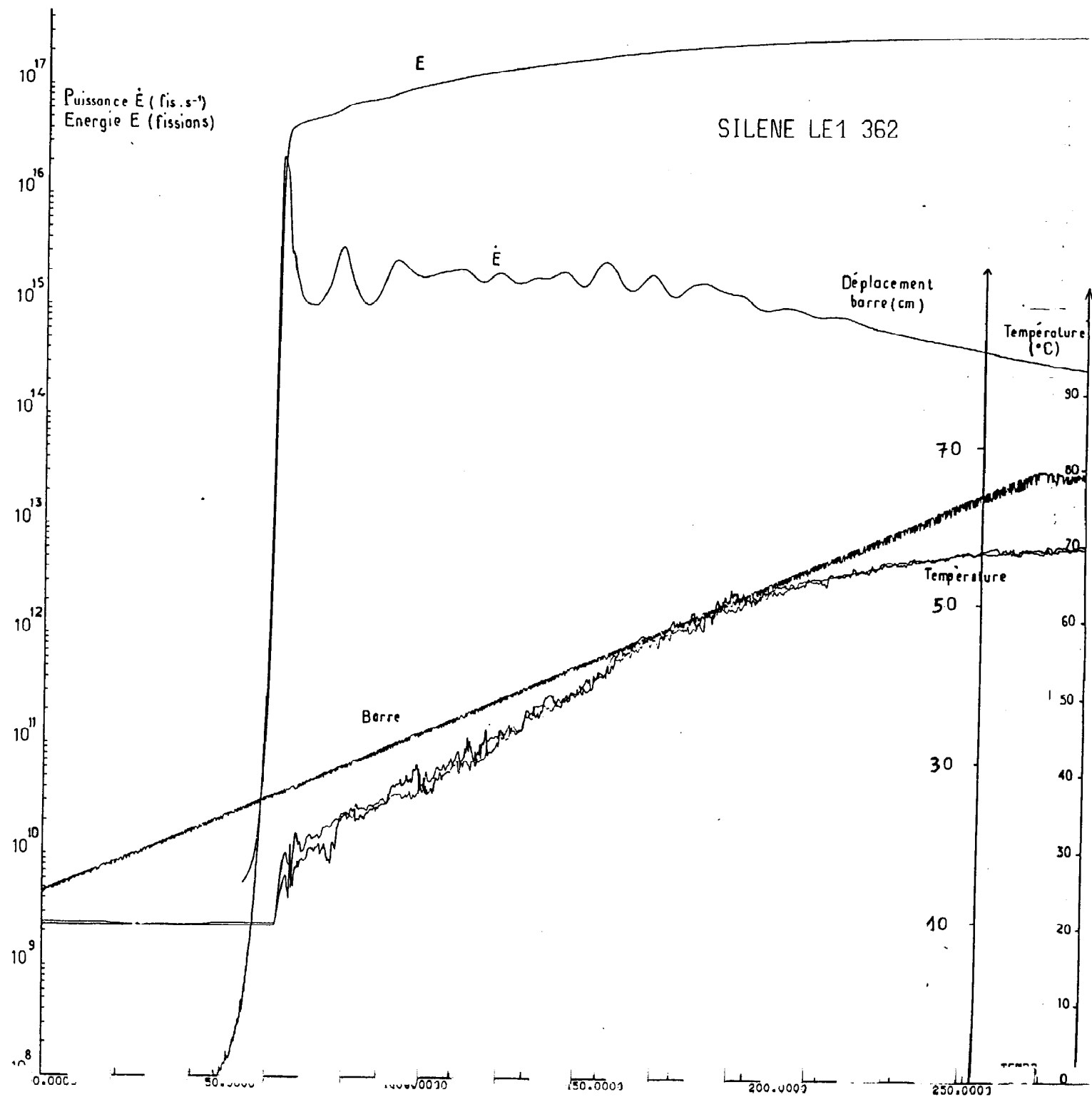
- SILENE_ (218g/l) . Evolution de la puissance , de la température , de la pression au sein du reacteur (détail)

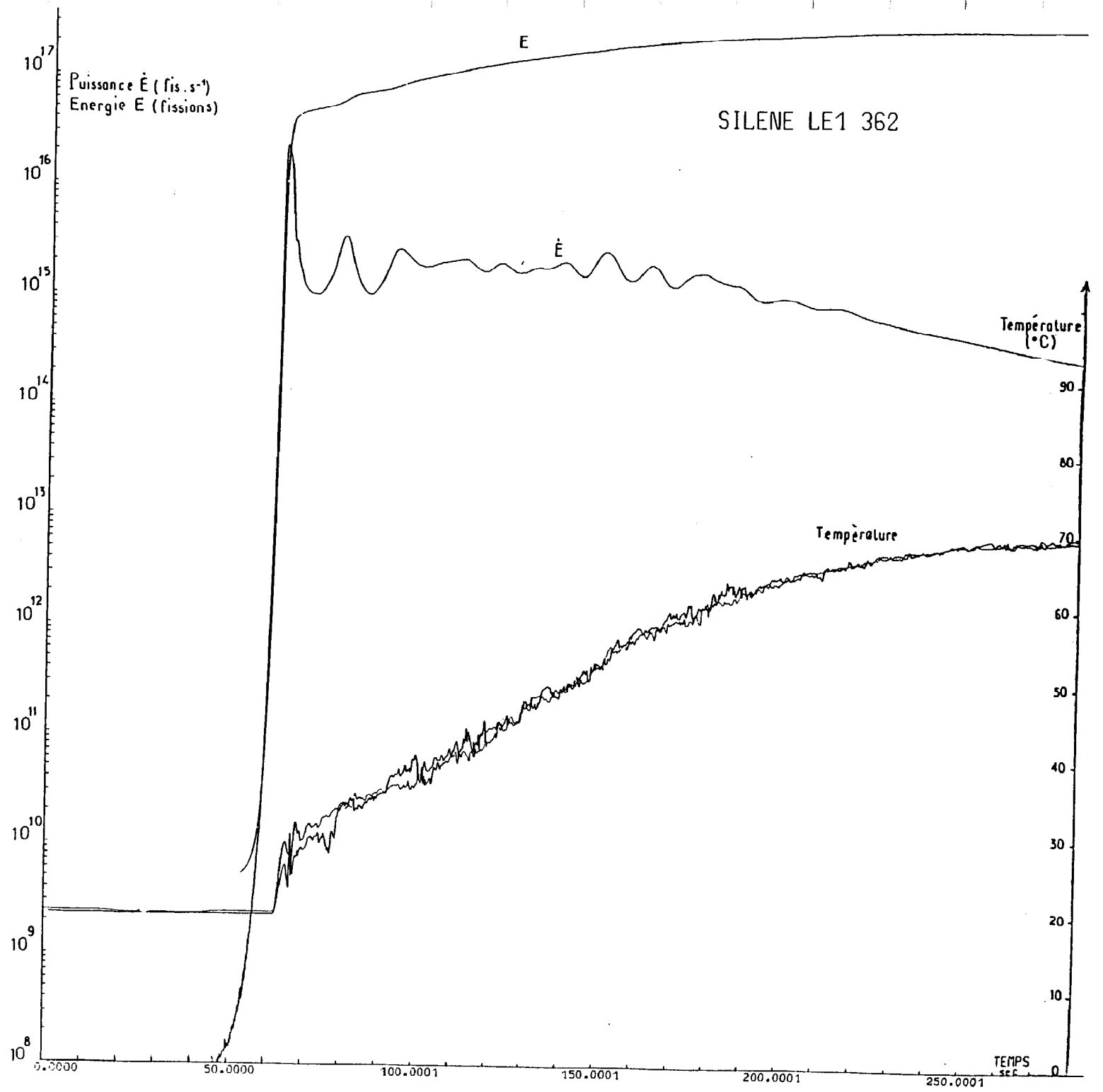
SILENE
- Expérience du type "Salve"
Evolution de la température au sein du réacteur

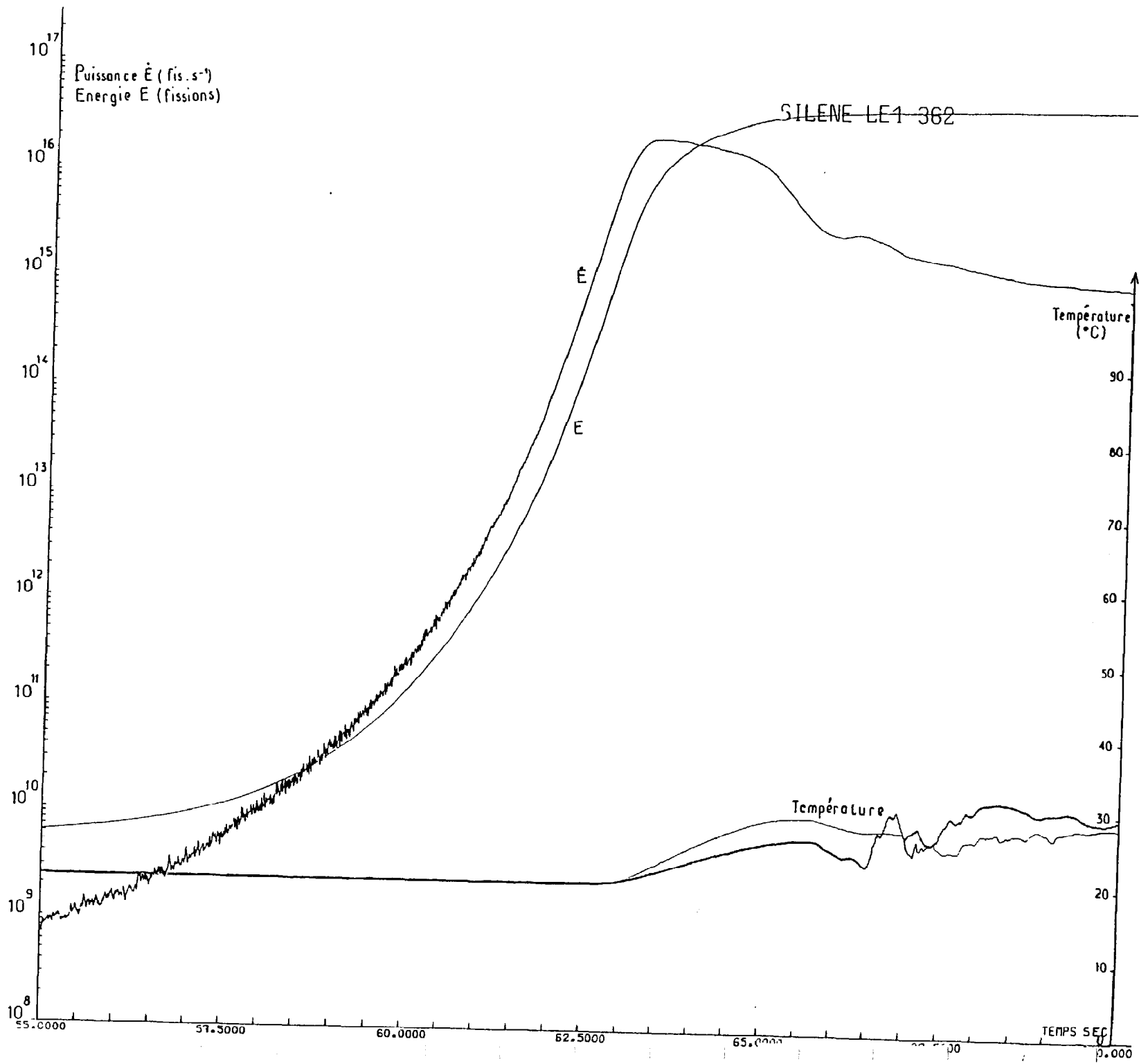


ANNEXE 7 : LE1-362



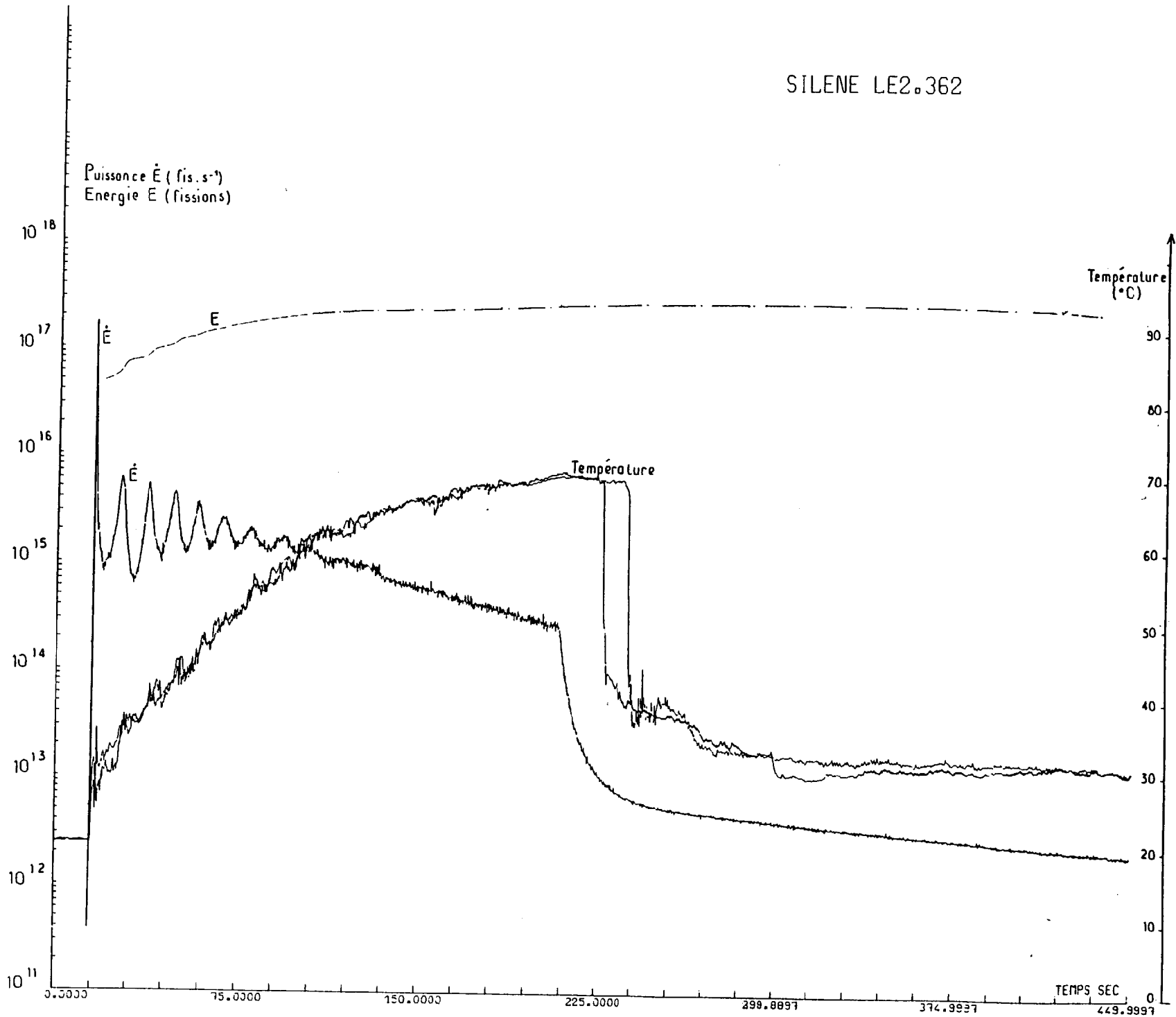




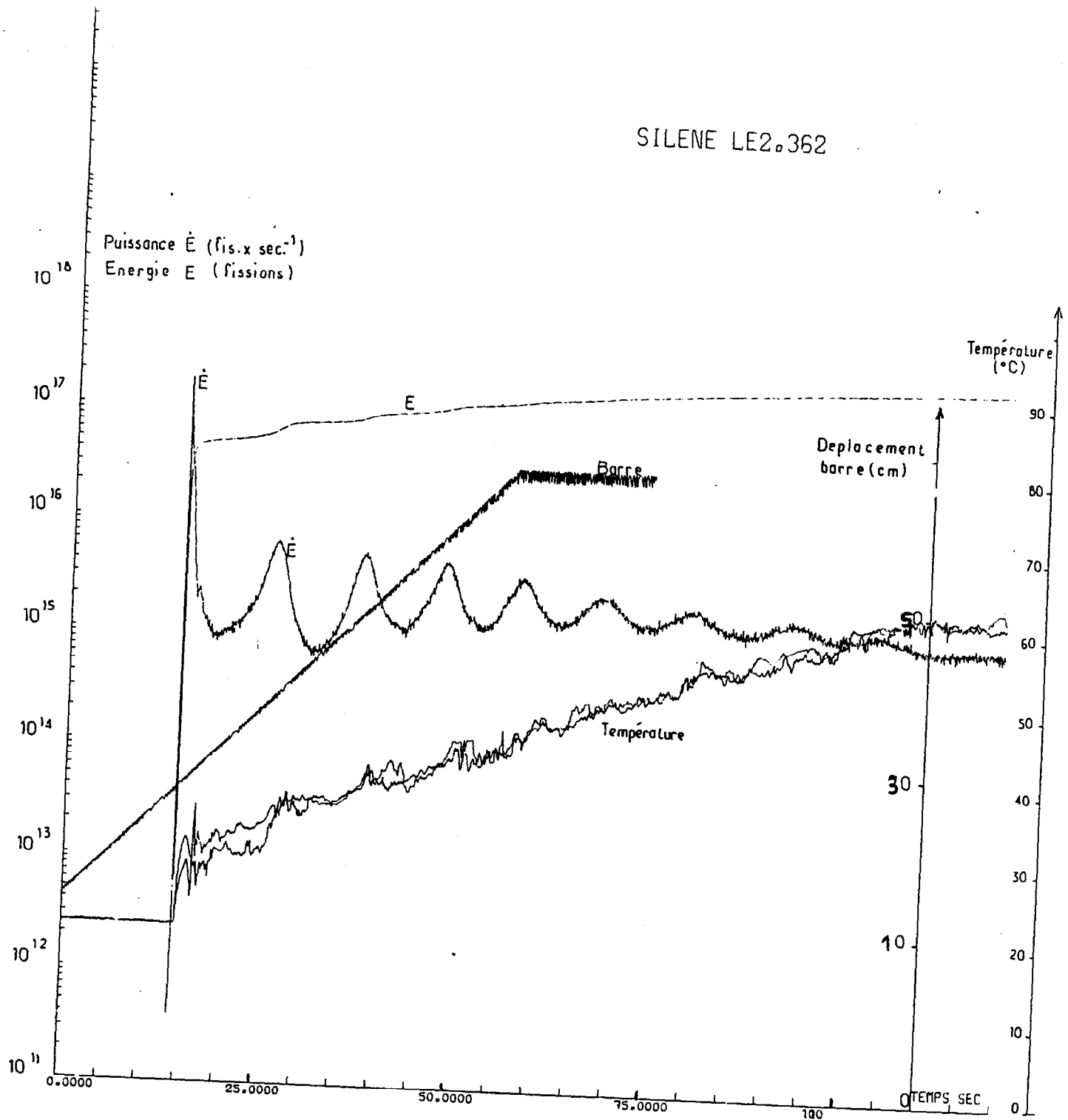


ANNEXE 8 : LE2-362

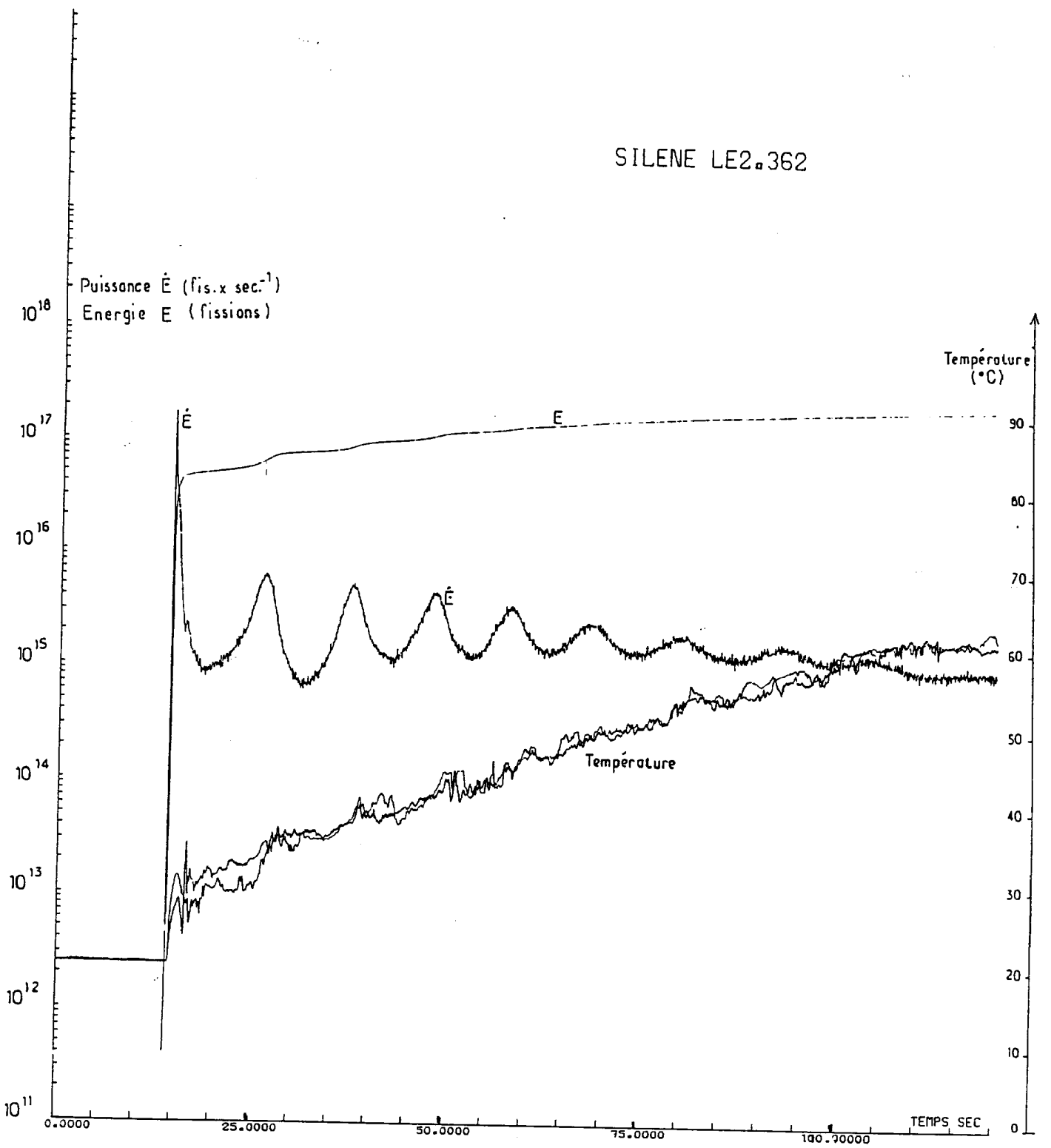
SILENE LE2.362



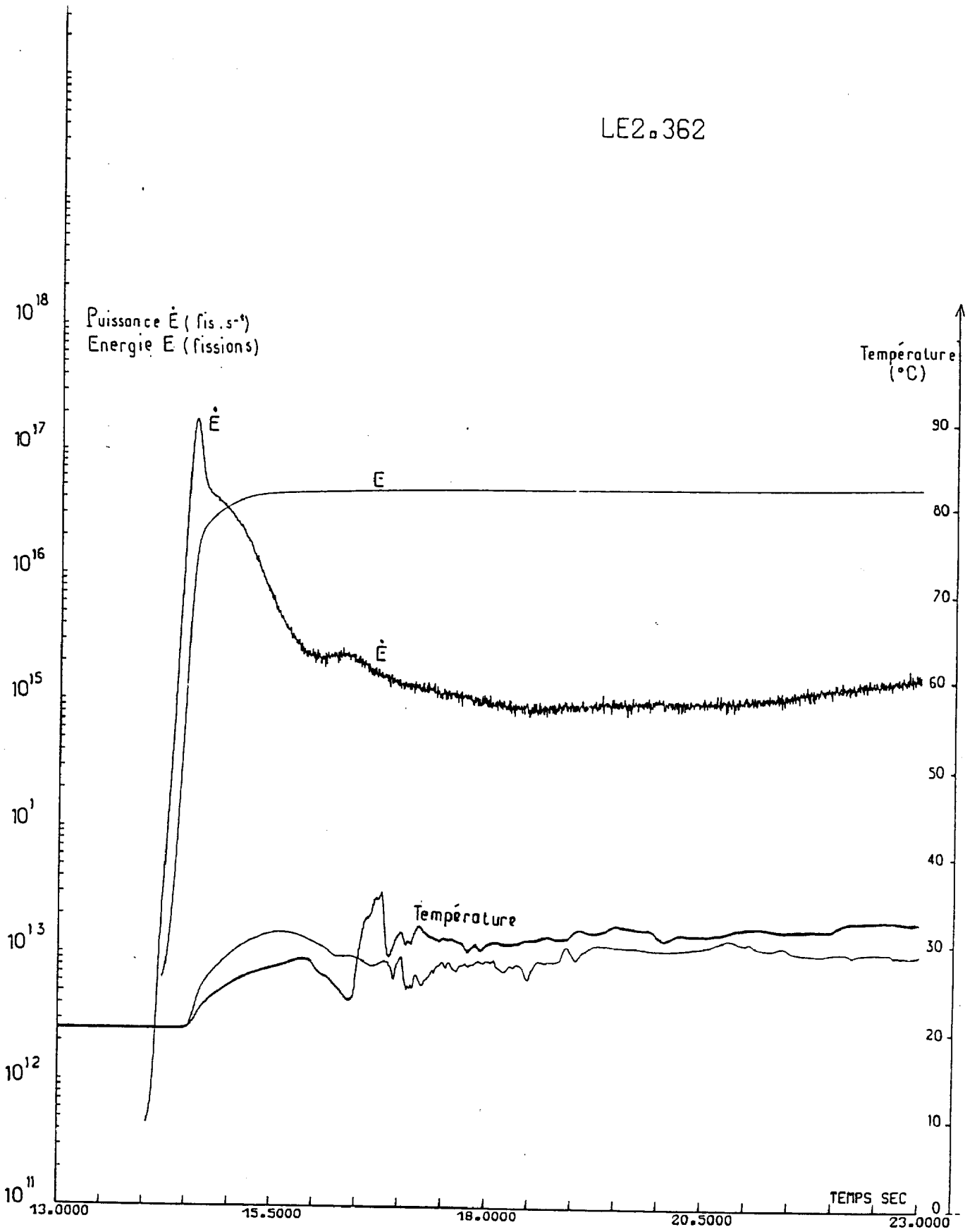
SILENE LE2.362



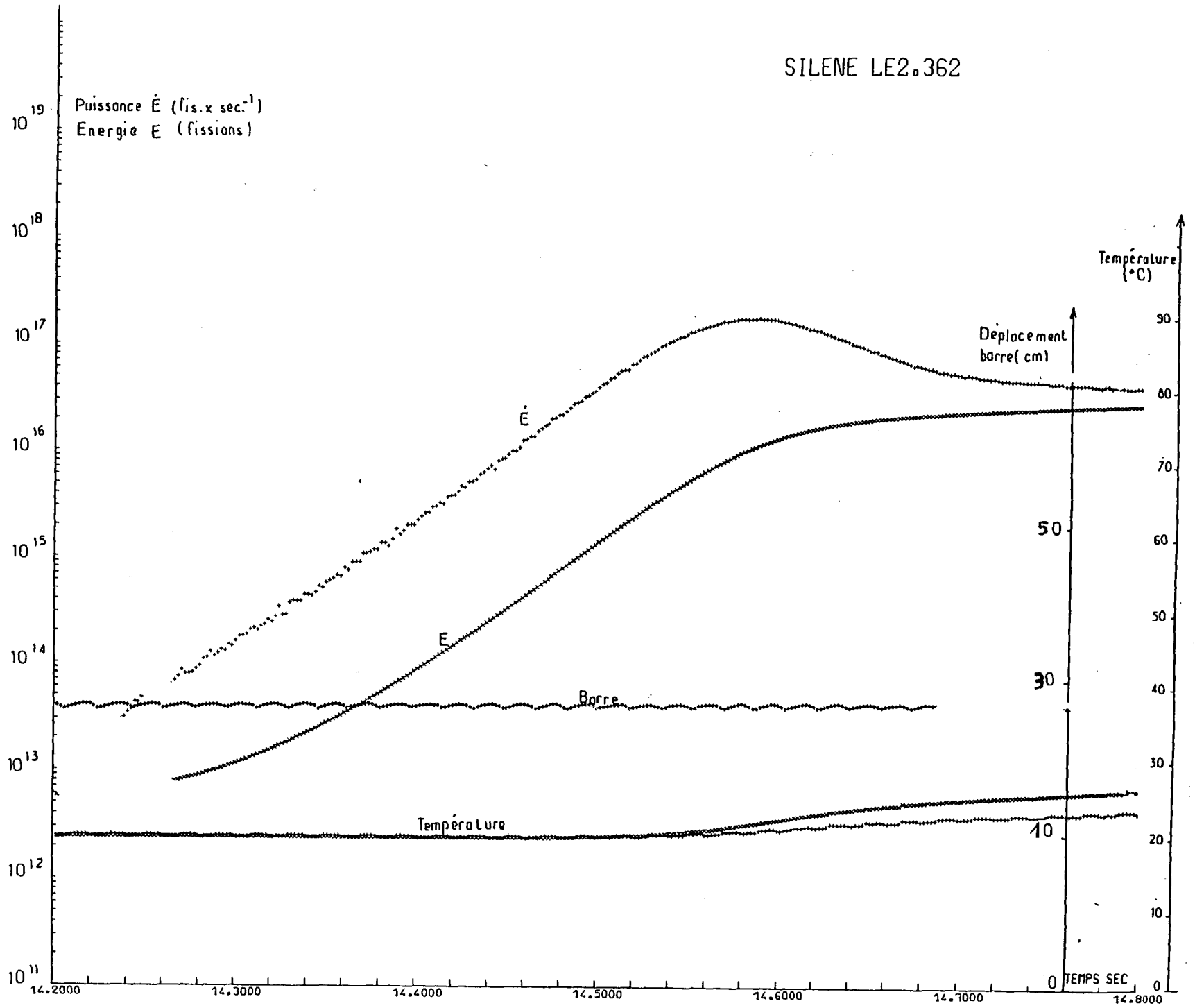
SILENE LE2.362



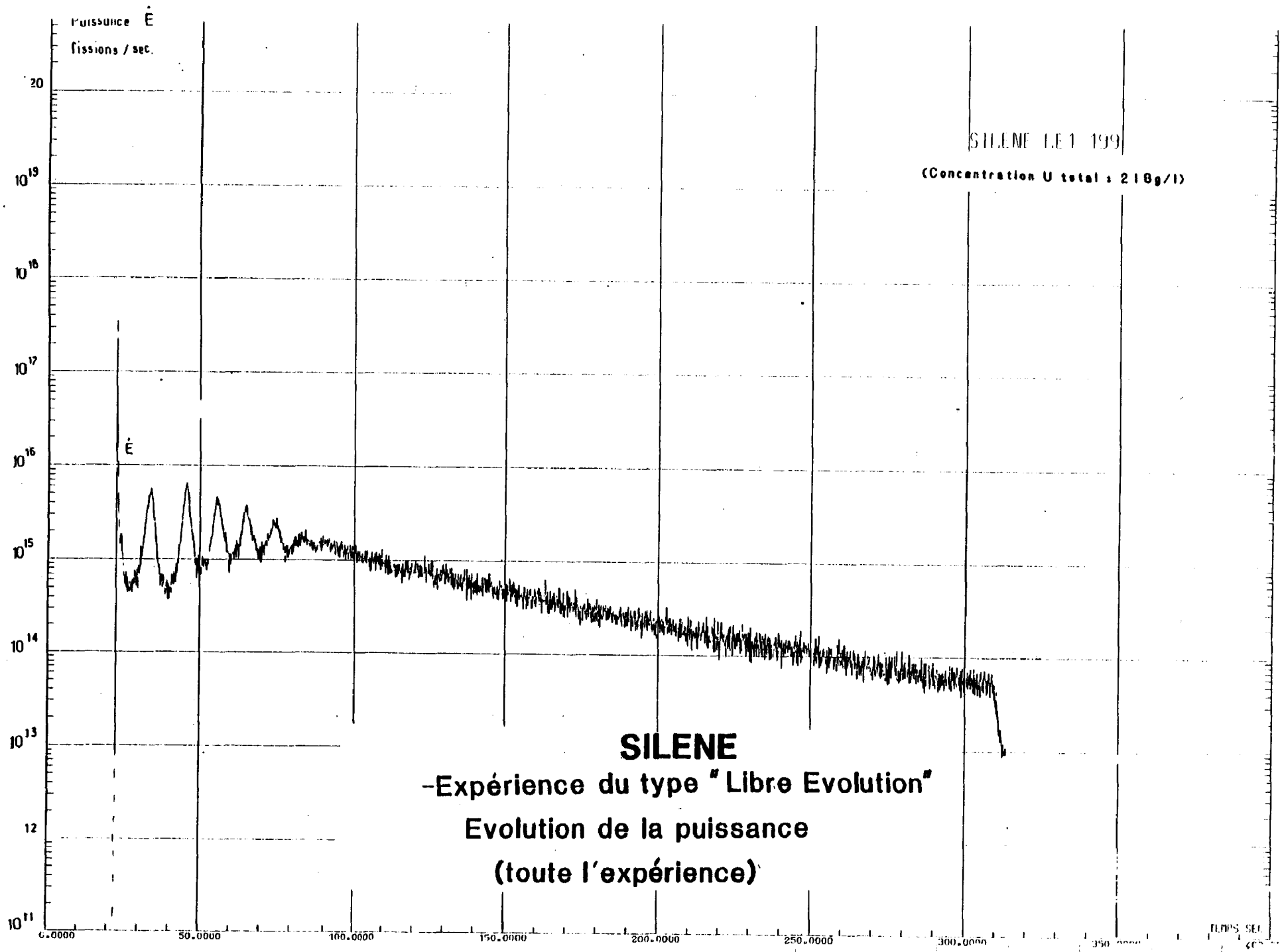
LE2.362

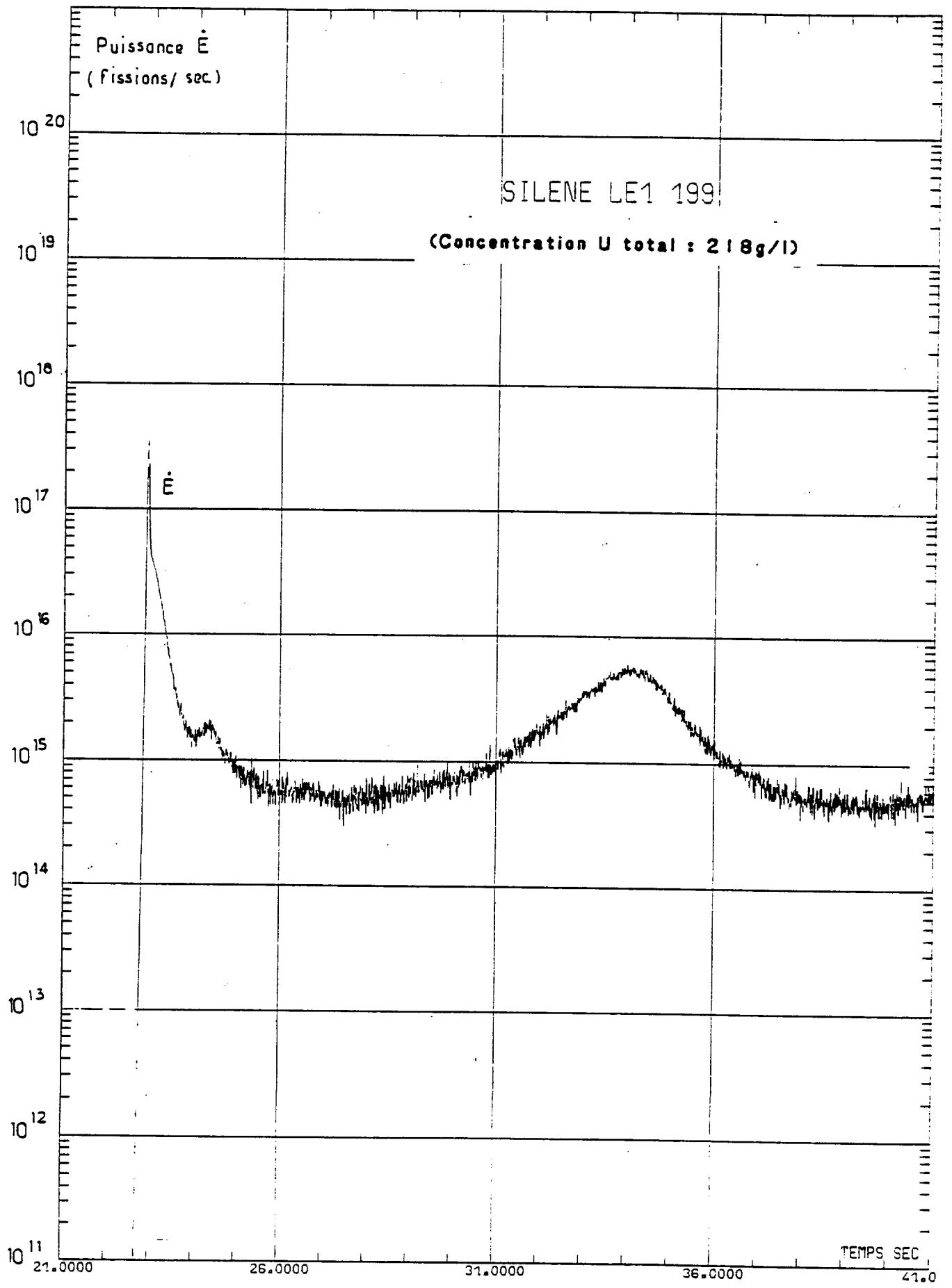


SILENE LE2.362

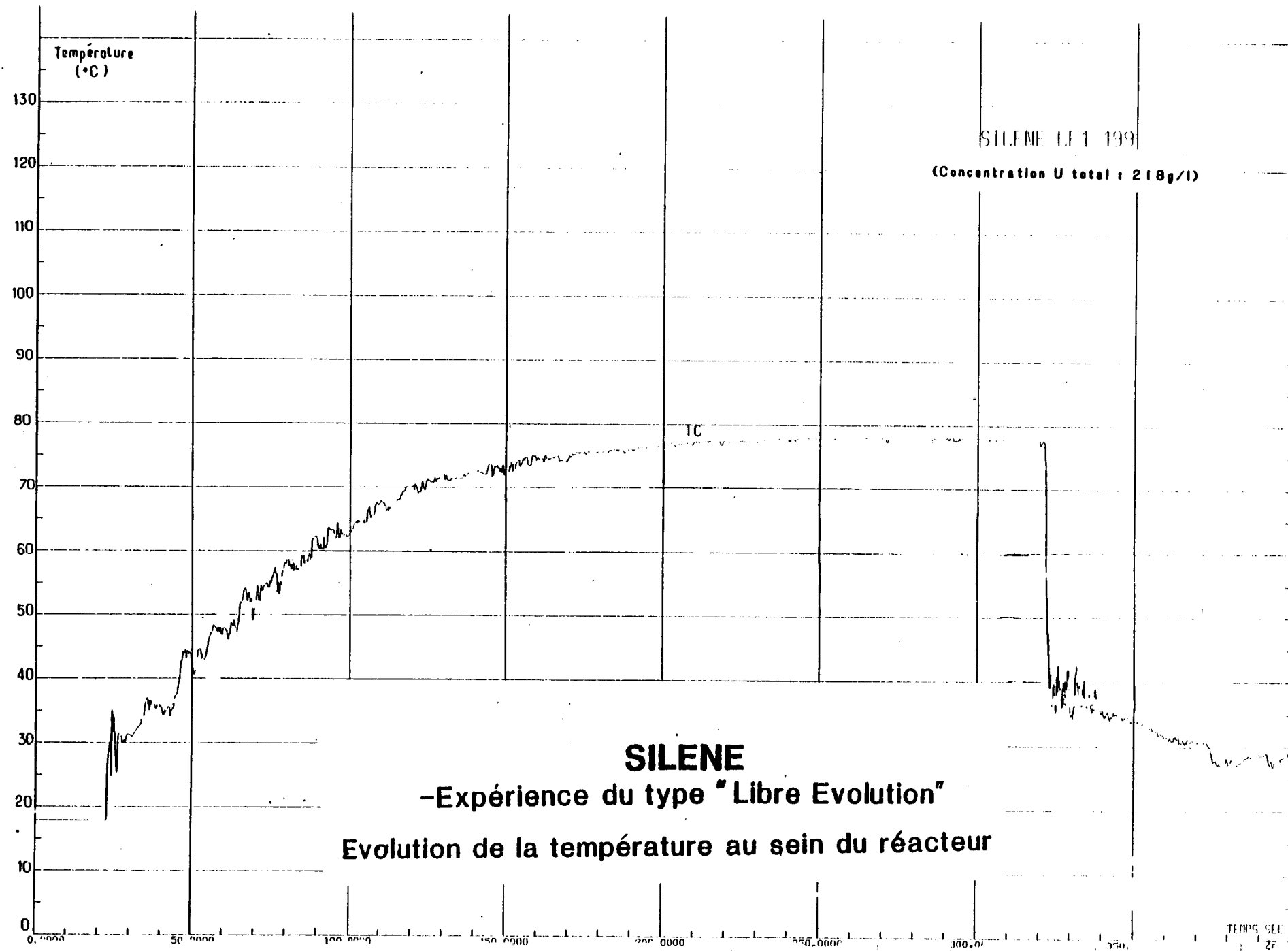


ANNEXE 9 : LE1-199



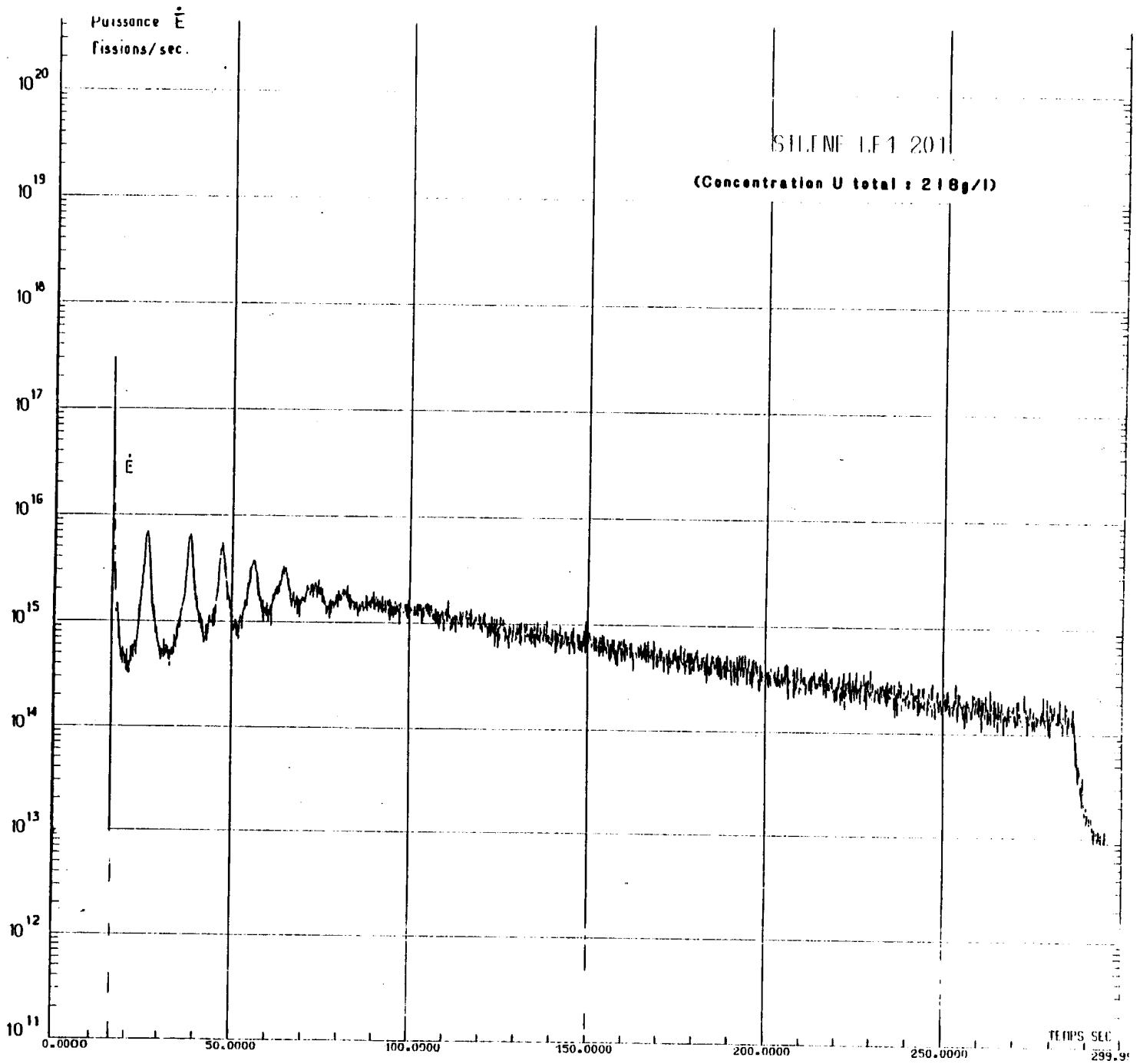


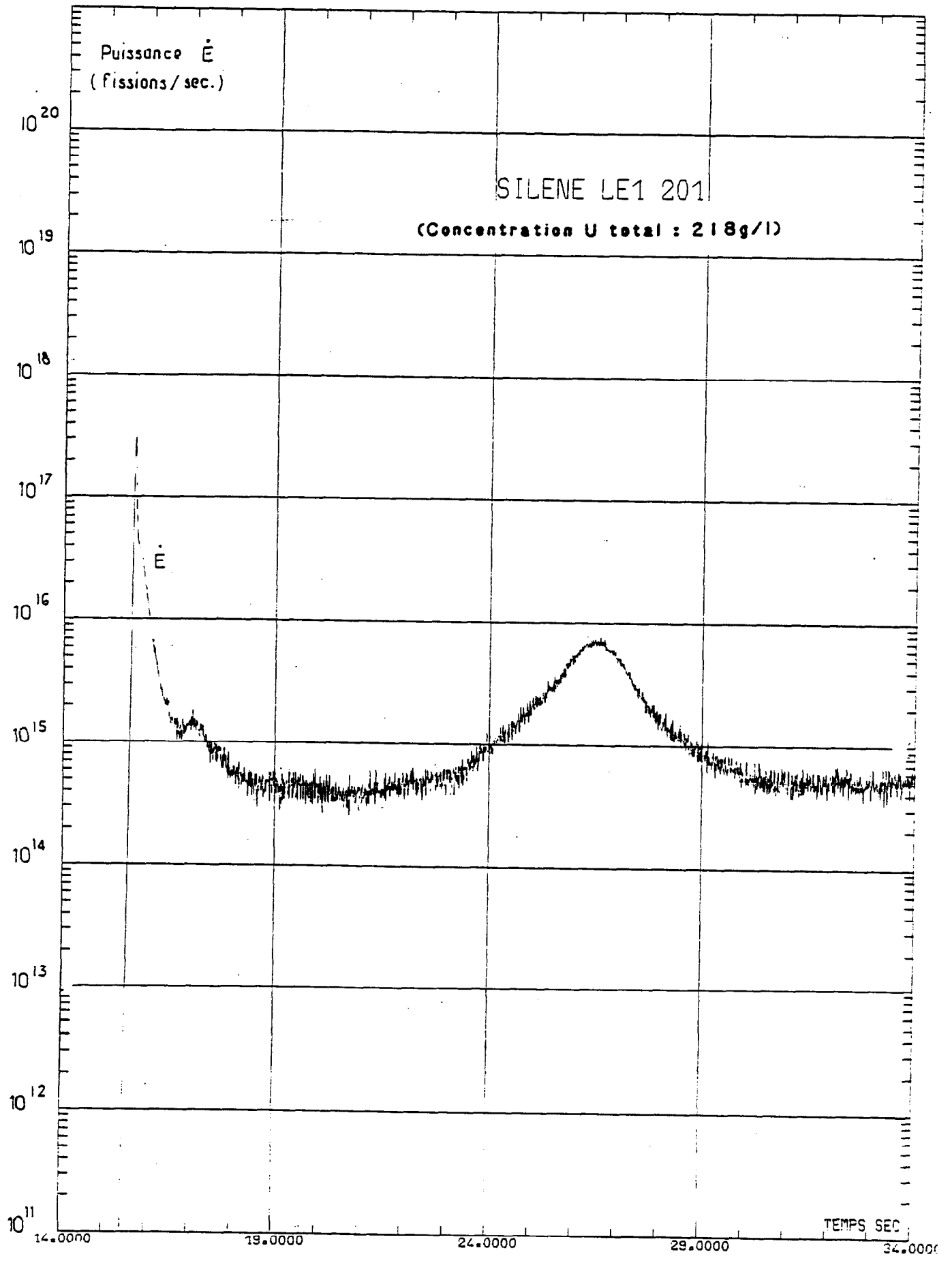
SILENE
-Expérience du type "Libre Evolution"
Evolution de la puissance
(premier pic)



ANNEXE 10 : LE1-201

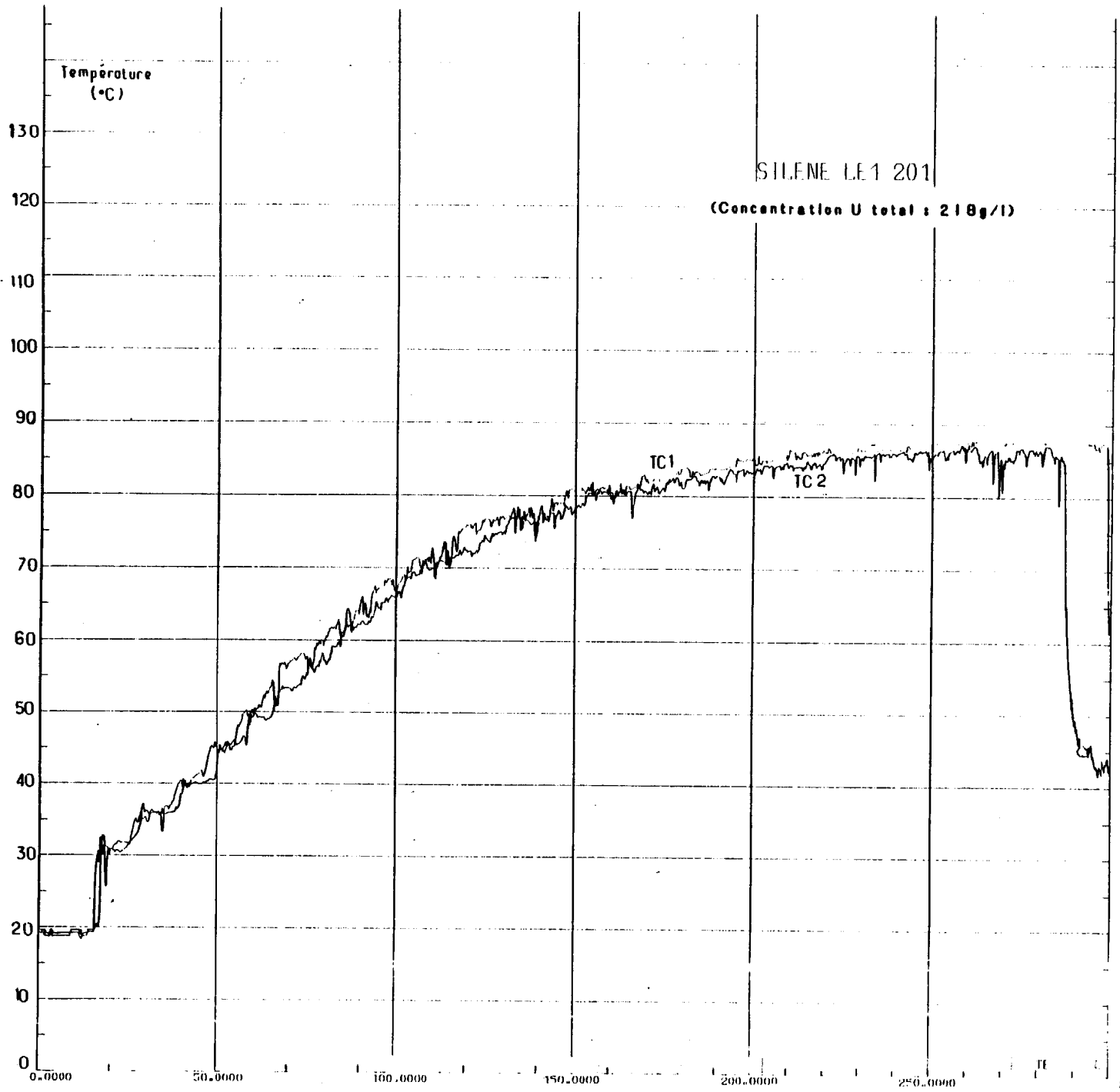
SILENE
-Expérience du type 'Libre Evolution'
Evolution de la puissance
(toute l'expérience)





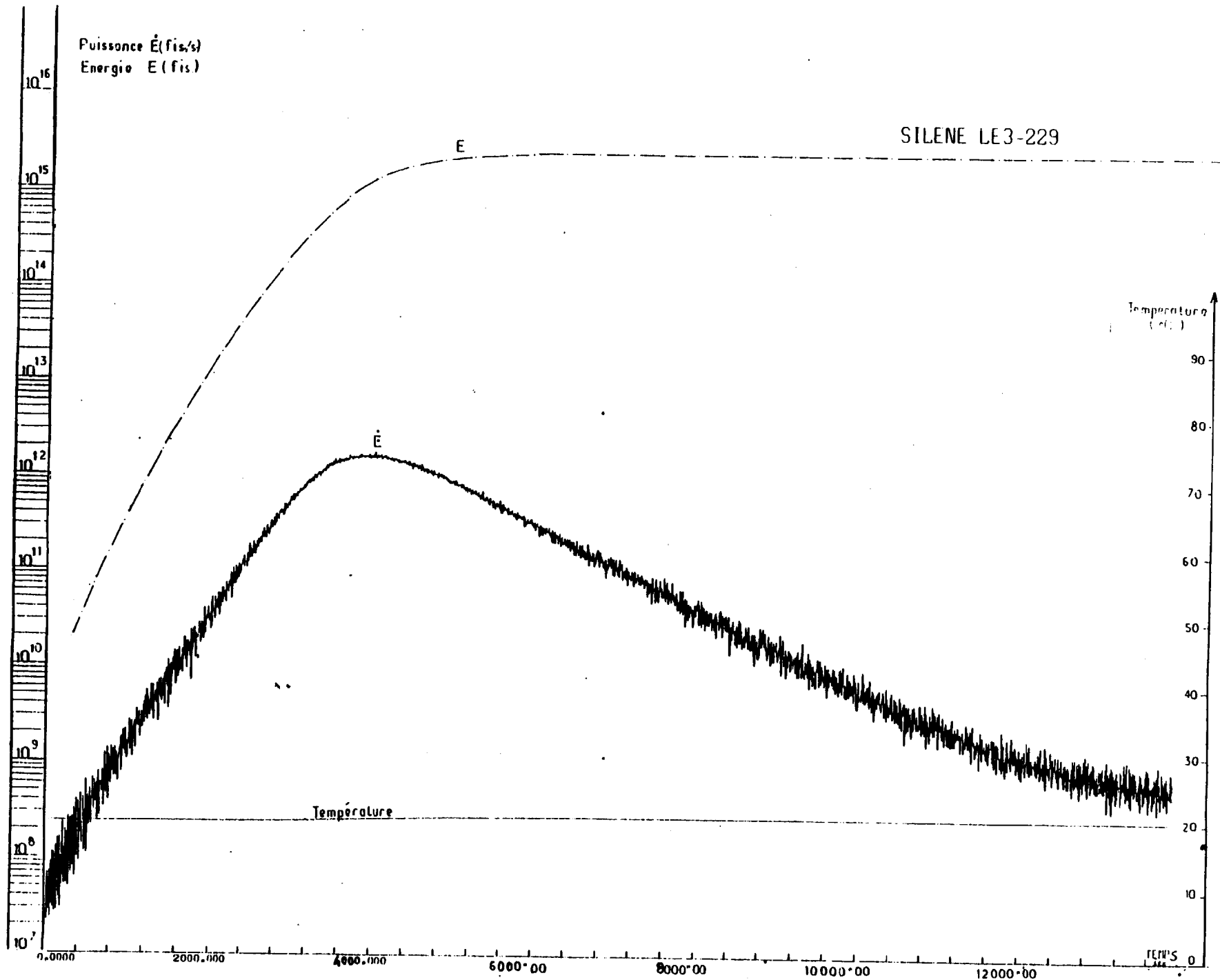
SILENE
 -Expérience du type "Libre Evolution"
 Evolution de la puissance
 (premier pic)

SILENE
-Expérience du type "Libre Evolution"
Evolution de la température au sein du réacteur



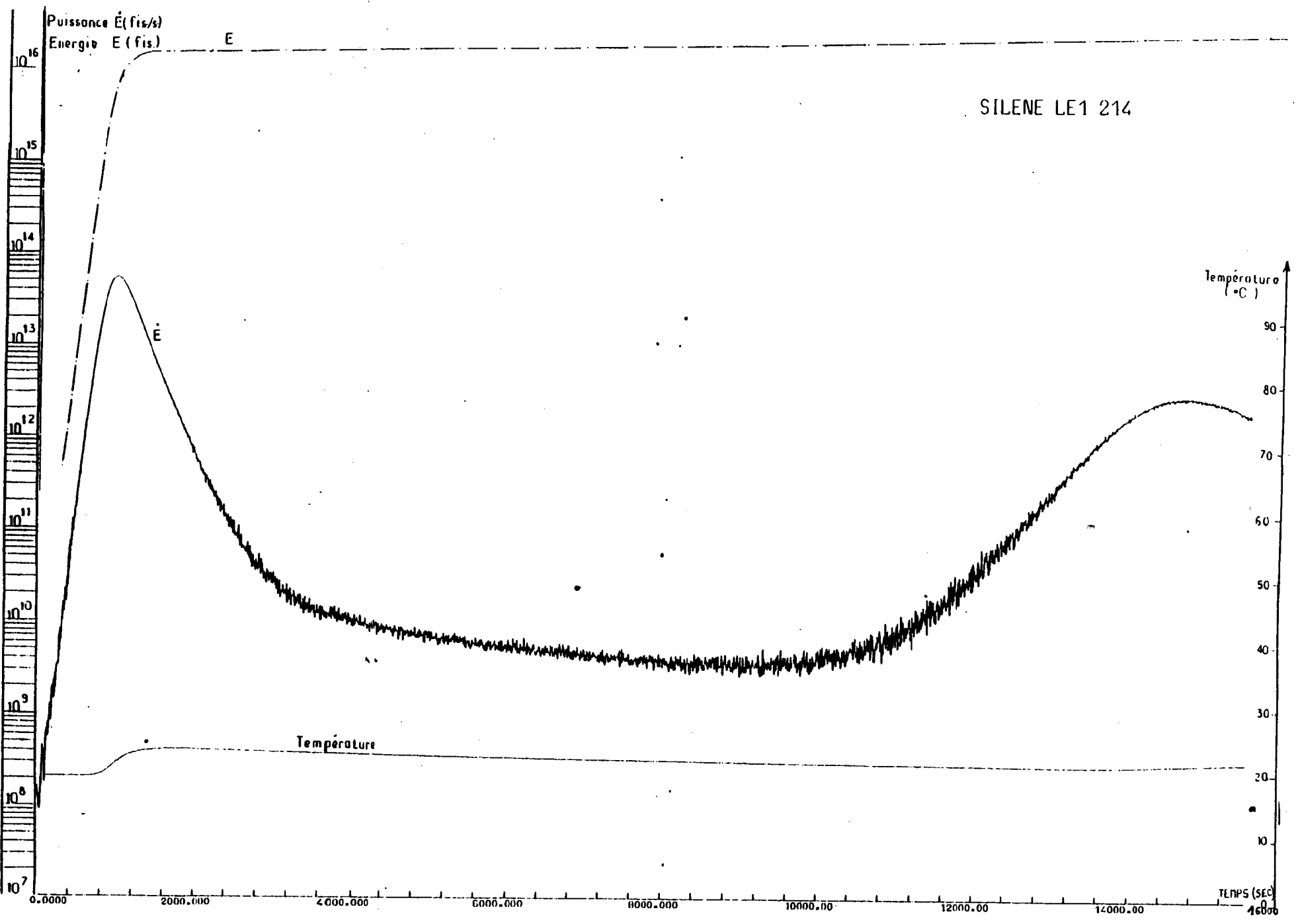
ANNEXE 11 : LE3-229

- SILENE 71 g/l configuration sans écran.
Evolution de la puissance \dot{E} , de l'énergie E et de la température solution.



ANNEXE 12 : LE1-214

SILENE 71 g/l configuration sans écran.
Evolution de la puissance \dot{E} , de l'énergie E et de la température solution



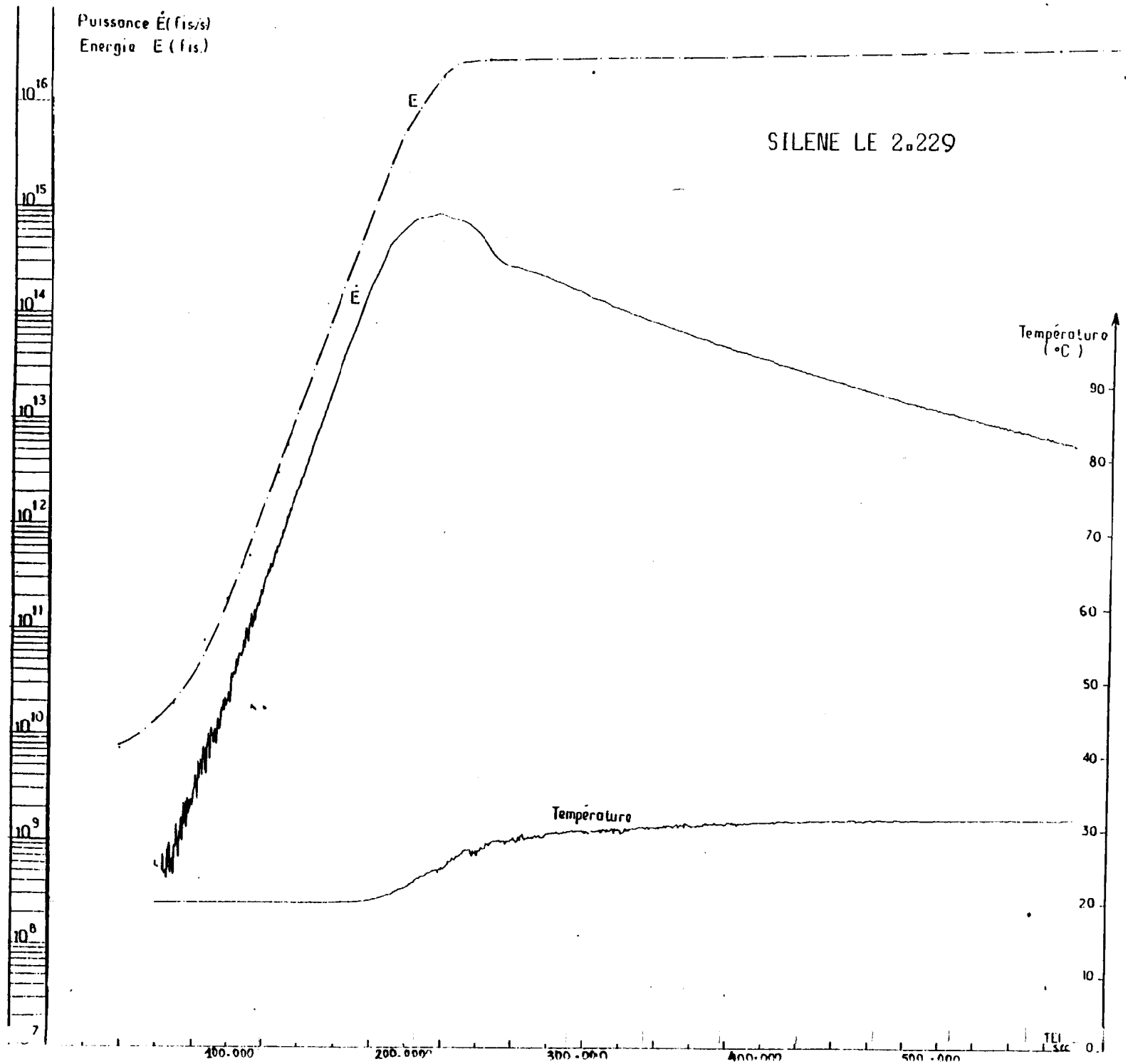
SILENE LE1 214

Température (°C)

TEMPS (SEC)

ANNEXE 13 : LE2-229

- SILENE 71 g/l configuration sans écran.
Evolution de la puissance \dot{E} , de l'énergie E et de la température solution.



SILENE LE 2.229

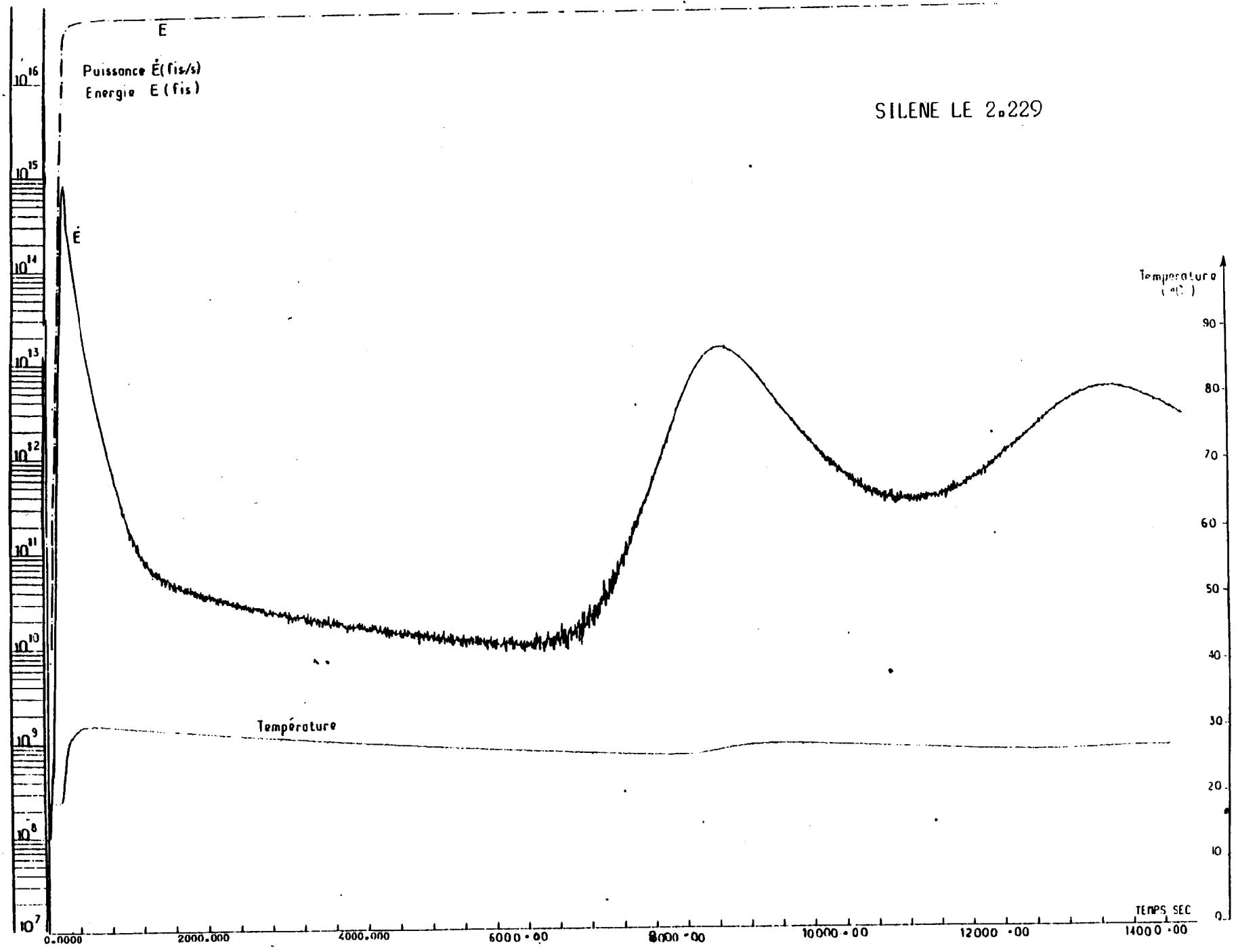
Puissance \dot{E} (fis/s)
Energie E (fis)

Température
(°C)

Température

TEI
Sec

SILENE LE 2.229



- SILENE 71 g/l configuration sans écran.
Evolution de la puissance \dot{E} , de l'énergie E et de la température solution.