

SELECTION D'EXPERIENCES CRAC
DE REFERENCE POUR LA QUALIFICATION DES CODES
D'ACCIDENTS DE CRITICITE
DAM/Département de Recherche sur les Matériaux Nucléaires/SRNC
Note Technique SRNC 02 - 07

*	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 :	selcrac.doc		Date fichier : 10/10/02 09:12			

SOMMAIRE

I. PRESENTATION DU PROGRAMME C.R.A.C.	4
I.1. Description et principe de fonctionnement.....	4
I.1.1. Géométrie	4
I.1.2. Nature du milieu.....	4
I.2. Diagnostic des expériences.....	5
I.2.1. Nombre total de fissions	5
I.2.2. Suivi de la puissance et des débits de rayonnements.....	5
I.2.3. Mesure de température et de pression.....	5
I.2.4. Mesure du niveau de solution fissile.....	5
 II. EXPERIENCES AVEC LA CUVE DE 300 MM	 5
II.1. Description des expériences avec la cuve de 300 mm	5
II.2. Caractéristiques des expériences avec la cuve de 300 mm	6
II.3. Résultats des expériences avec la cuve de 300 mm	7
 III. EXPERIENCES AVEC LA CUVE DE 800 mm.....	 7
III.1. Description des expériences avec la cuve de 800 mm	7
III.2. Caractéristiques des expériences avec la cuve de 800 mm	8
III.3. Résultats des expériences avec la cuve de 800 mm	9
 IV. DETERMINATION DES LONGUEURS AXIALES ET RADIALES D'EXTRAPOLATION	 9
POUR CHAQUE EXPERIENCE	
 V. CONCLUSION	 10
 REFERENCES	 11

Figure 1 : Photographie de l'installation CRAC 12

Figure 2 : Schéma de l'ensemble Cuve-Enceinte de sécurité 13

Figure 3 : Schéma de la cuve expérimentale de 300 mm 14

Figure 4 : Schéma de la cuve expérimentale de 800 mm 15

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

Annexe 1 : CRAC.01 16

Annexe 2 : CRAC.05 21

Annexe 3 : CRAC.09 26

Annexe 4 : CRAC.12 30

Annexe 5 : CRAC.20/5 34

Annexe 6 : CRAC.21 38

Annexe 7 : CRAC.37 42

Annexe 8 : CRAC.38 46

Annexe 9 : CRAC.39 50

PREAMBULE

Le programme C.R.A.C. (CRiticité ACcidentelle ou Conséquences Radiologiques d'un Accident de Criticité) s'est déroulé sur plus de 70 expériences au Service de Recherches en Neutronique et Criticité de novembre 1968 à la fin de l'année 1972.

Le but de ce programme était l'étude expérimentale des accidents de criticité pouvant se produire dans un milieu fissile liquide. Les situations accidentelles étaient provoquées volontairement dans une cuve contenant une solution fissile de nitrate d'uranyle enrichi à 93 %. 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 couvrent une gamme de concentrations s'étendant de 21 g/litre à 218 g/litre en uranium total et comportent deux géométries différentes de diamètres 300 et 800 mm.

I. PRESENTATION DU PROGRAMME C.R.A.C.

I.1. DESCRIPTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT (Références 1 - 2 - 3 - 4)

La plupart des expériences étaient provoquées par l'addition continue de solution fissile dans une cuve expérimentale cylindrique jusqu'à une hauteur finale supérieure à la hauteur critique de solution. Cette cuve expérimentale est contenue dans une enceinte étanche de sécurité placée au centre d'une salle en béton de grandes dimensions appelée « cellule ». La solution fissile est préparée dans un laboratoire situé dans le sous-sol de la cellule. L'ensemble du dispositif expérimental est représenté sur les figures n°1 et n°2.

Le principe de fonctionnement d'une expérience C.R.A.C. est le suivant :

- la solution fissile, ajustée au préalable à la concentration de fonctionnement dans une cuve annulaire est introduite à l'aide d'une pompe dans la cuve expérimentale jusqu'à un niveau surcritique prédéterminé ;
- le débit de la pompe réglable de 0 à 1800 litres/heure permet d'avoir des rampes de réactivité différentes
- une fois l'expérience terminée, la solution fissile chargée de produits de fission radioactifs est vidangée dans une cuve annulaire placée dans une casemate, ce qui autorise un accès rapide dans la cellule.

I.1.1. Géométrie

Deux cuves cylindriques expérimentales en acier inoxydable ont été utilisées :

- une cuve de 300 mm de diamètre extérieur, d'épaisseur 3 mm et de hauteur 1090 mm sur laquelle on peut fixer selon les expériences des éléments de 1000 mm de hauteur jusqu'à obtenir une hauteur totale de 4090 mm (figure 3), dans certains cas un couvercle était présent au sommet du dernier élément ;
- une cuve de 800 mm de diamètre extérieur, d'épaisseur 4 mm et de hauteur 1130 mm (figure4).

I.1.2. Nature du milieu

La solution fissile utilisée est du nitrate d'uranyle avec la composition isotopique pondérale suivante :

- ²³⁴ U	:	0.57 ± 0.01 %
- ²³⁵ U	:	92.74 ± 0.1 %
- ²³⁶ U	:	0.25 ± 0.01 %
- ²³⁸ U	:	6.44 ± 0.1 %

Les expériences sélectionnées comportent des concentrations en uranium total variant entre 21.4 et 218 g/litre ainsi qu'une acidité H^+ de 2 moles/litre.

I.2. DIAGNOSTIC DES EXPERIENCES

I.2.1. Nombre total de fissions

Le nombre total de fissions au cours de l'expérience a été déterminé par spectrométrie gamma sur les produits de fissions formés au cours de l'expérience. 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.

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

Pour suivre l'évolution de la puissance au cours de l'expérience, différents types de détecteurs ont été utilisés (chambres à fissions, chambres à ionisation) et étalonnés en puissance à partir d'une comparaison entre leur signal et le nombre total de fissions déterminé par spectrométrie gamma.

I.2.3. Mesure de température et de pression

La mesure de la température est réalisée par des thermocouples à faible temps de réponse (de l'ordre de 1 milliseconde). Un ou plusieurs thermocouples plongent dans la solution fissile, un autre est fixé sur la paroi de la cuve. La précision sur les températures est de +/- 1°C. La pression au cours de l'accident est mesurée à l'aide de capteurs à jauge piezorésistive (temps de réponse de l'ordre de 1 milliseconde). Un capteur est installé dans la phase liquide (sur le fond de la cuve), un autre est placé sur la virole (au sommet de la cuve).

I.2.4. Mesure du niveau de solution fissile

Le niveau de la solution fissile dans la cuve expérimentale est suivi par une sonde à ultrasons (figures 3 et 4). Une pointe de mesure de grande précision (+/- 0.1mm) est utilisée pour suivre le niveau pendant les expériences préliminaires (approches sous-critiques).

II. EXPERIENCES AVEC LA CUVE DE 300 MM

II.1. Description des expériences avec la cuve de 300 mm

La cuve expérimentale est un cylindre de diamètre intérieur 294 mm. Le volume de solution fissile V en litre est relié à la hauteur de la solution H en cm par la formule $V = 0.676 \times H + 0.45$ (fond de cuve bombé). Pour chaque concentration en uranium, des expériences préliminaires de type divergence ont été effectuées afin de déterminer le poids en réactivité du cm de solution au voisinage de la hauteur critique. Ces expériences de divergence consistent à introduire une faible hauteur de solution au dessus de la hauteur critique puis à mesurer la période stable minimum de la puissance. L'application de l'équation de Nordheim permet de déterminer la réactivité introduite en fonction de la hauteur de solution ajoutée au dessus de la hauteur critique. Les expériences sélectionnées ont été effectuées sans source externe de neutron. L'addition de solution est effectuée à débit constant à partir d'une hauteur initiale sous-critique jusqu'à une hauteur finale surcritique. La précision sur le temps d'apparition du premier pic de puissance est de +/- 1 seconde.

II.2. CARACTERISTIQUES DES EXPERIENCES AVEC LA CUVE DE 300 MM

Les caractéristiques principales des expériences sont données dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	01	05	09	12	20/5	21
concentration en uranium total en g/litre	52	61.1	78.3	77.9	218	80.2
acidité en moles/litre	2	2.1	2	1.95	2.32	2.03
béta effectif en pcm	777	774	814	814	841	814
hauteur critique en cm	191.3	69.05	42.90	43.53	27.10	41.85
hauteur finale en cm	371.4	100.45	55.3	62.83	33	63.3
poids en réactivité du cm de solution en pcm/cm	5	93	340	340	980	340
vitesse d'introduction de la solution en cm/seconde	0.592	0.616	0.653	0.0428	0.536	0.206
durée d'introduction de la solution en seconde	304	51	19	451	11	104
durée de l'expérience en seconde	15600	1140	360	1020	180	300
température initiale en °C	21	21	21	21	21	21

Remarques : 1 pcm = 10⁻⁵

Le poids en réactivité du cm de solution est donné à la hauteur critique, il n'est pas constant et diminue au cours de l'introduction de solution

II.3. RESULTATS DES EXPERIENCES AVEC LA CUVE DE 300 MM

Les résultats des expériences sont donnés dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	01	05	09	12	20/5	21
ω en (seconde) ⁻¹	0.24	11.6	46	2.52	120	21.6
puissance maximum au sommet du premier pic en fissions/seconde	1.1×10^{16}	6.3×10^{16}	2.9×10^{17}	1×10^{16}	5.8×10^{17}	7.6×10^{16}
nombre de fissions intégré jusqu'au premier minimum	2.7×10^{17}	6.3×10^{16}	4.4×10^{16}	3.7×10^{16}	2.2×10^{16}	3.1×10^{16}
instant du sommet du premier pic en seconde	232	21.5	6.4	65	2.53	16.96
température finale en °C	30	60	75	100	98	97
nombre total de fissions	5×10^{17}	3.8×10^{17}	2.9×10^{17}	4.8×10^{17}	2.7×10^{17}	4.9×10^{17}
instant de l'apparition des bulles de gaz de radiolyse en seconde		21.4	6.7	65.5		

Remarque : ω est l'inverse de la période minimum stable de la puissance avant le premier pic
l'origine des temps correspond au passage de l'état critique

III. EXPERIENCES AVEC LA CUVE DE 800 MM

III.1. DESCRIPTION DES EXPERIENCES AVEC LA CUVE DE 800 MM

La cuve expérimentale est un cylindre de diamètre intérieur 792 mm. Le volume de solution fissile V en litre est relié à la hauteur de solution H en cm par la formule $V = 4.931 \times H$.

Des expériences préliminaires de type divergence ont été effectuées afin de déterminer le poids en réactivité du cm de solution.

Les expériences sélectionnées ont été effectuées sans source externe de neutron. L'addition de solution est effectuée à débit constant à partir d'une hauteur initiale sous-critique jusqu'à une hauteur finale surcritique. La précision sur le temps d'apparition du premier pic de puissance est de +/- 1 seconde.

Cette cuve a été utilisée pour réaliser des expériences à caractère « hétérogène » (milieu diphasique) mais ces expériences ne font pas l'objet du présent document.

III.2. CARACTERISTIQUES DES EXPERIENCES AVEC LA CUVE DE 800 MM

Les caractéristiques principales des expériences sont données dans le tableau ci-dessous :

N° expérience	37	38	39
concentration en uranium total en g/litre	21.8	21.4	30.6
acidité en moles/litre	2	2.08	1.92
béta effectif en pcm	711	711	748
hauteur critique en cm	45	46.75	27.25
hauteur finale en cm	52.1	52.5	28.95
poids en réactivité du cm de solution en pcm/cm	410	410	1320
vitesse d'introduction de la solution en cm/seconde	0.025	0.074	0.077
durée d'introduction de la solution en seconde	282	78	22
durée de l'expérience en seconde	420	240	180
température initiale en °C	21	21	21

Remarque : Le poids en réactivité du cm de solution est donné à la hauteur critique, il n'est pas constant et diminue au cours de l'introduction de solution

III.3. RESULTATS DES EXPERIENCES AVEC LA CUVE DE 800 MM

Les résultats des expériences sont donnés dans le tableau ci dessous :

N° expérience	37	38	39
ω en (seconde) ⁻¹	2.01	6.80	22.4
puissance maximum au sommet du premier pic en fissions/seconde	8.6×10^{16}	2.8×10^{17}	8.8×10^{17}
nombre de fissions intégré jusqu'au premier minimum	3.4×10^{17}	2.8×10^{17}	1.8×10^{17}
instant du sommet du premier pic en seconde	72.8	30.4	11
température finale en °C	100	100	100
nombre total de fissions	3.2×10^{18}	2.7×10^{18}	1.6×10^{18}
instant de l'apparition des bulles de gaz de radiolyse en seconde	72.8	30.52	11

Remarque : ω est l'inverse de la période minimum stable de la puissance avant le premier pic l'origine des temps correspond au passage de l'état critique

IV. DETERMINATION DES LONGUEURS AXIALE ET RADIALE D'EXTRAPOLATION POUR CHAQUE EXPERIENCE

L'objectif de ce paragraphe est de proposer une méthode de calcul des longueurs d'extrapolation. Ces paramètres peuvent être utiles pour la simulation des expériences CRAC à l'aide d'un code d'accident de criticité.

Dans un code d'accident, la réactivité ρ peut-être calculée au moyen de la formule du Buckling qui est $k_{eff} = k_{inf} / (1 + M^2 \times Bg^2)$ avec k_{eff} étant le coefficient de multiplication effectif des neutrons.

La réactivité ρ est donnée par la formule $\rho = (k_{eff}-1) / k_{eff}$.

Dans la formule du Buckling apparaissent les variables suivantes :

- k_{inf} est le coefficient de multiplication en milieu infini des neutrons ;
- M^2 est l'aire de migration des neutrons ;
- Bg^2 est le Buckling géométrique des neutrons donné par la formule :

$$Bg^2 = \pi^2 / (H + 2\lambda Z)^2 + (2.4049)^2 / (R + \lambda R)^2 ;$$

- H est la hauteur de solution dans la cuve expérimentale ;
- R est le rayon de la cuve expérimentale ;

- λZ est la distance axiale d'extrapolation ;
- λR est la distance radiale d'extrapolation.

Le Buckling matière Bm^2 est donné par la formule :

$$Bm^2 = \pi^2 / (Hc + 2\lambda Z)^2 + (2.4049)^2 / (R + \lambda R)^2 ;$$

- Hc étant la hauteur critique de solution.

La rampe de réactivité $\Delta\rho / \Delta H \approx \Delta k_{eff} / \Delta H$ au voisinage de la hauteur critique est obtenue en dérivant la formule du Buckling soit :

$$\Delta k_{eff} / \Delta H = (2 \times \pi^2 \times M^2 / k_{inf}) / (Hc + 2\lambda Z)^3.$$

L'évaluation de λR et λZ est donc nécessaire afin que la formule du Buckling donne une addition de réactivité représentative de celle de l'expérience.

Pour effectuer cette évaluation on propose la méthode suivante :

- la valeur de k_{inf} est fournie par le code d'accident ou par un code de calcul de neutronique comme APOLLO1 (code de calcul du CEA/DEN) ;
- la valeur de Bm^2 est donnée par le code APOLLO1 ;
- la rampe de réactivité $\Delta k_{eff} / \Delta H$ a été mesurée expérimentalement au voisinage de la hauteur critique Hc ;
- l'aire de migration M^2 est calculée par la formule $M^2 = (k_{inf} - 1) / Bm^2$
- la distance axiale d'extrapolation est déterminée par la formule :

$$(Hc + 2\lambda Z)^3 = (2 \times \pi^2 \times M^2 / k_{inf}) / (\Delta k_{eff} / \Delta H)$$

- la distance radiale d'extrapolation est déterminée par la formule :

$$(R + \lambda R)^2 = (2.4049)^2 / (Bm^2 - \pi^2 / (Hc + 2\lambda Z)^2)$$

V. CONCLUSION

Cette note décrit 9 expériences de référence du programme expérimental C.R.A.C. pour la qualification des codes d'accidents de criticité :

- 6 expériences ont été effectuées dans une cuve cylindrique de 300 mm de diamètre ;
- 3 expériences ont été effectuées dans une cuve cylindrique de 800 mm de diamètre ;
- les concentrations en uranium total varient de 21 à 218 g/litre.

L'insertion de réactivité se fait sous la forme d'une addition de solution fissile au-dessus de la hauteur critique. La vitesse d'addition de solution varie de 0.025 à 0.653 cm/seconde.

REFERENCES

- 1 - Rapport S.E.E.C. n°54
C.R.A.C. - Description générale
MANGIN - NOVAT - REVOL - ROUSSEL

- 2 - Rapport S.E.E.S.N.C. n°115
C.R.A.C. - Note de synthèse concernant les observations effectuées sur la formation de gaz de radiolyse et de leurs conséquences
F. BARBRY - Mai 1973
Référence AQ : INB010QINP9101ET**232

- 3 - Rapport S.E.E.S.N.C. n°116
C.R.A.C. - Récapitulation des résultats expérimentaux
F. BARBRY - D. MANGIN - H. REVOL - Août 1973
Référence AQ : INB010QINP9101ET**054

- 4 - Rapport S.E.E.S.N.C. n°117
C.R.A.C. - Essais de synthèse partielle des résultats expérimentaux
F. BARBRY - Septembre 1973
Référence AQ : INB010QINP9101ET**053



Photo 1 : Installation CRAC

Figure 1 : Photographie de l'installation CRAC

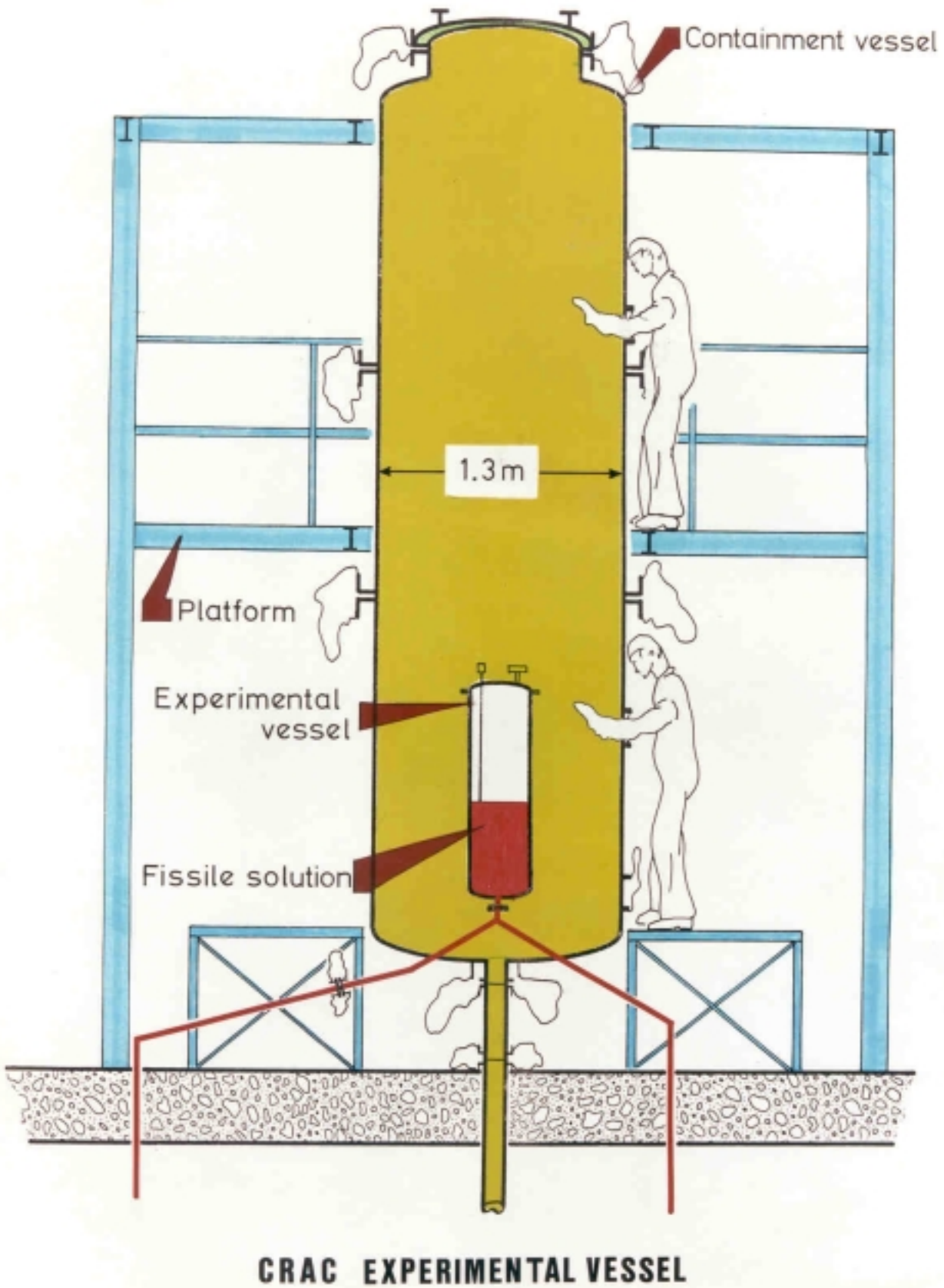


Figure 2 : Schéma de l'ensemble Cuve - Enceinte de Sécurité

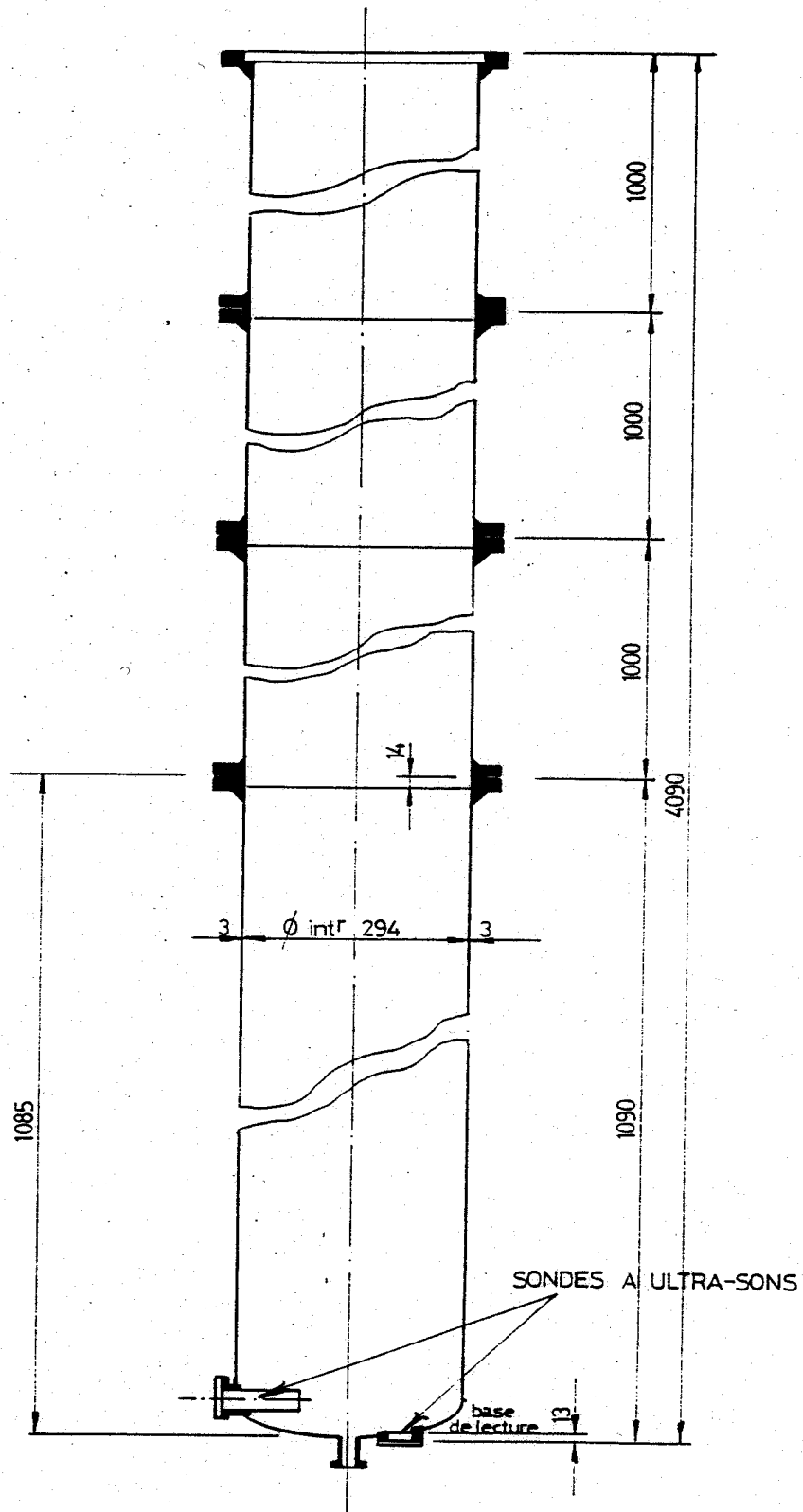


Figure 3 : Schéma de la cuve expérimentale de 300 mm

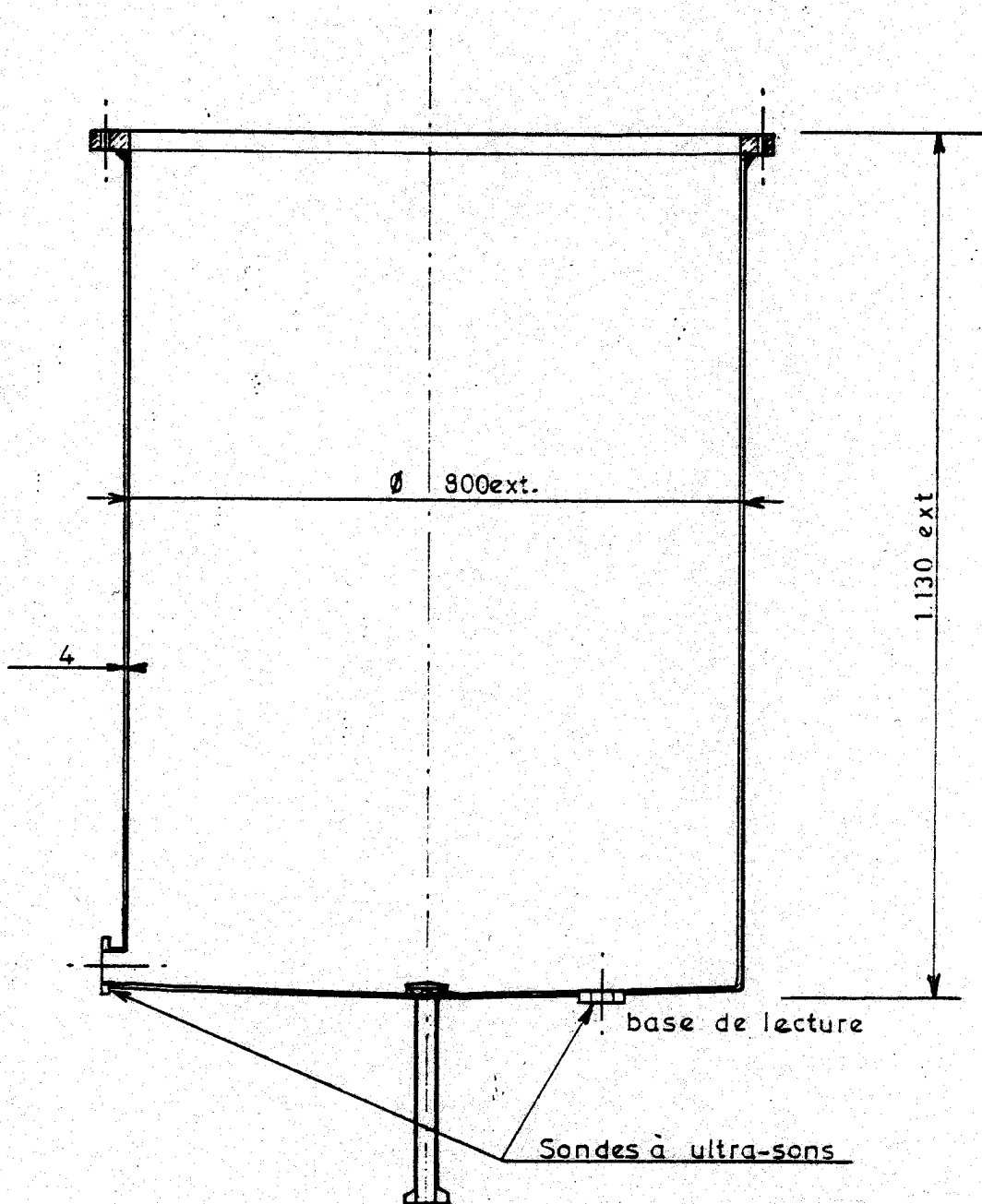


Figure 4 : Schéma de la cuve expérimentale de 800 mm

ANNEXE 1 : CRAC – 01

Fig. 4 - Puissance - Nombre de fissions intégré
Temps de doublement. (échelle dilatée)

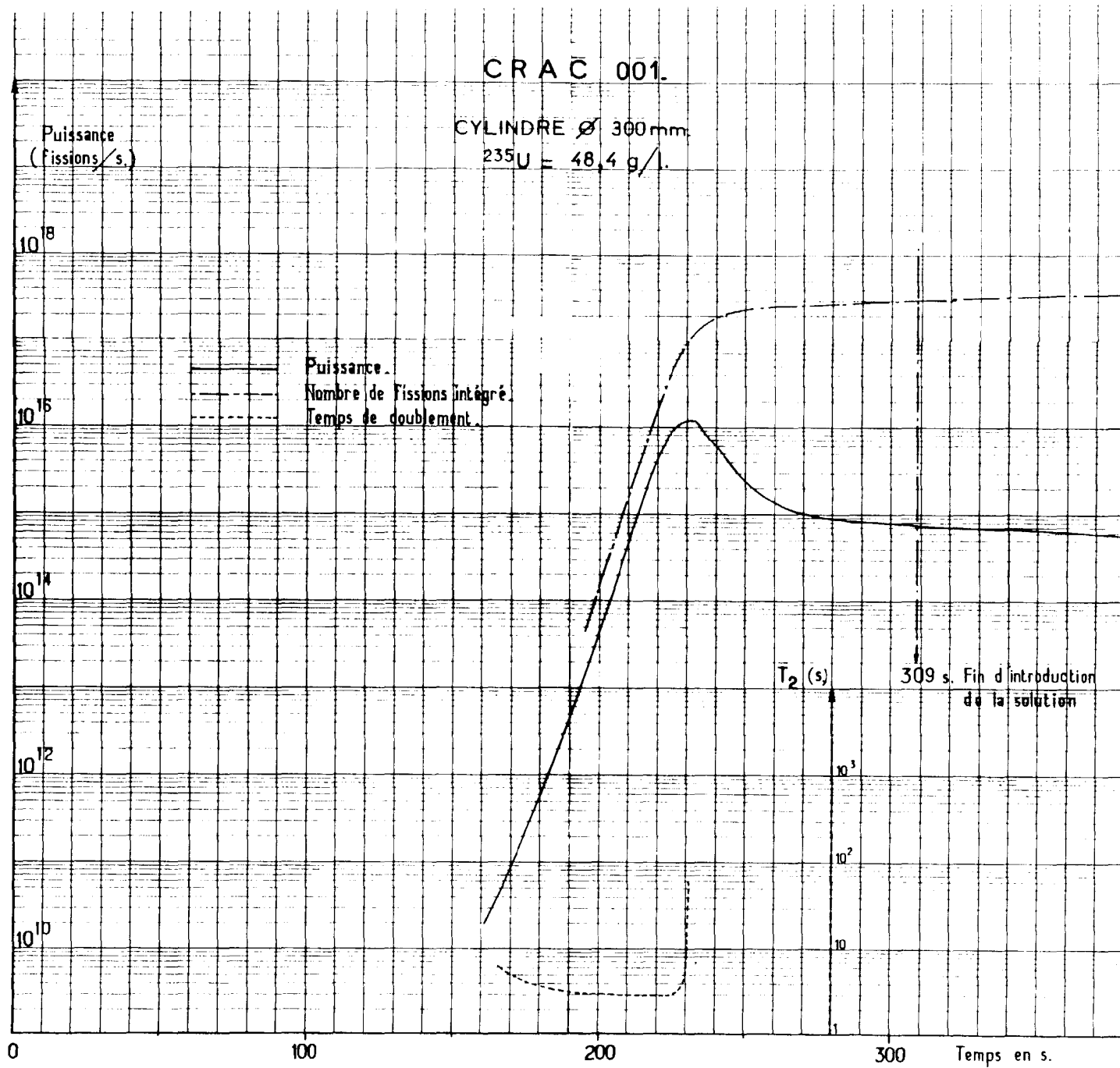
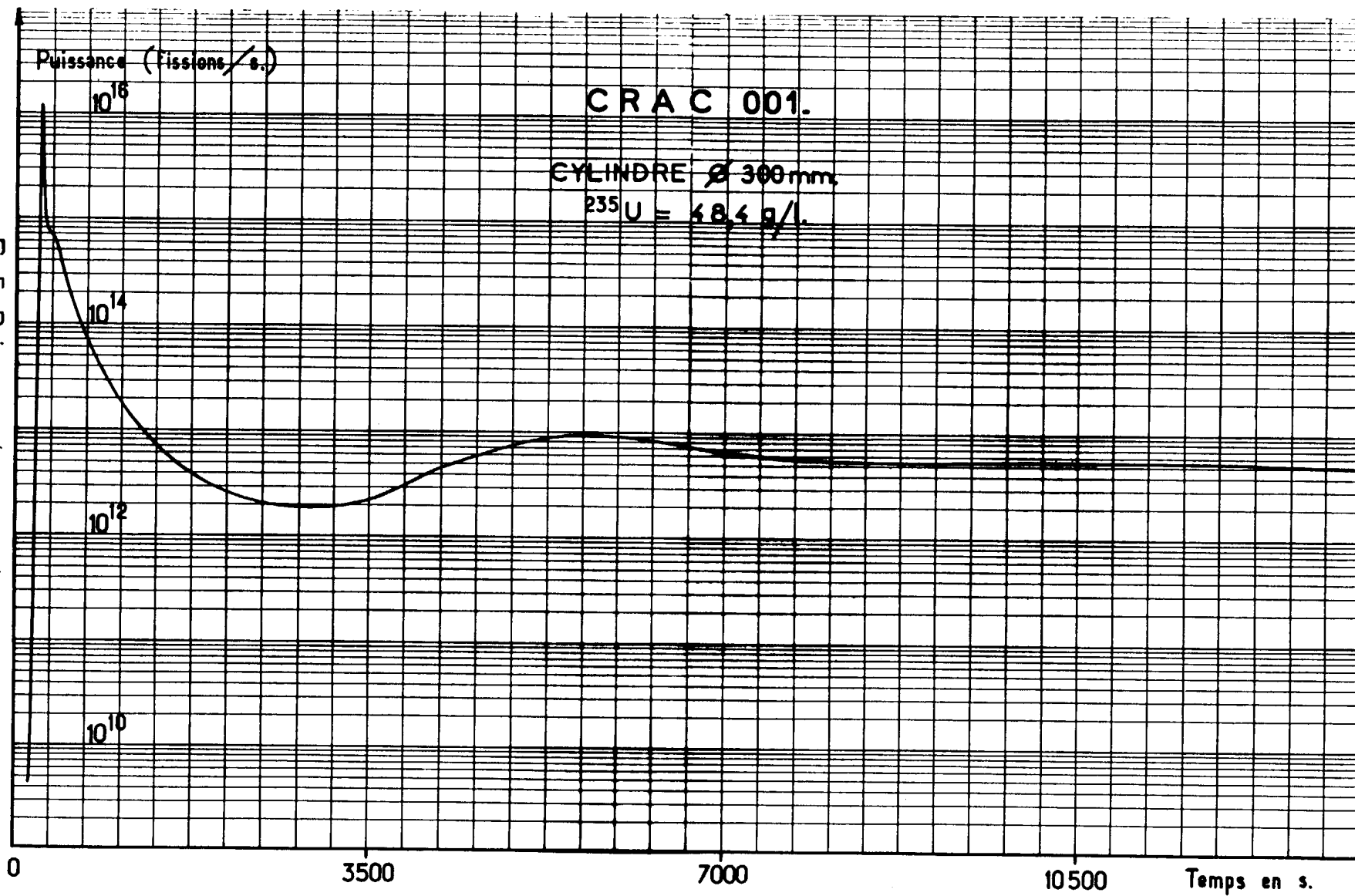


Fig.5_Puissance: (échelle normale)



SPEC/CRAC

Fig.6_Températures (échelle normale)

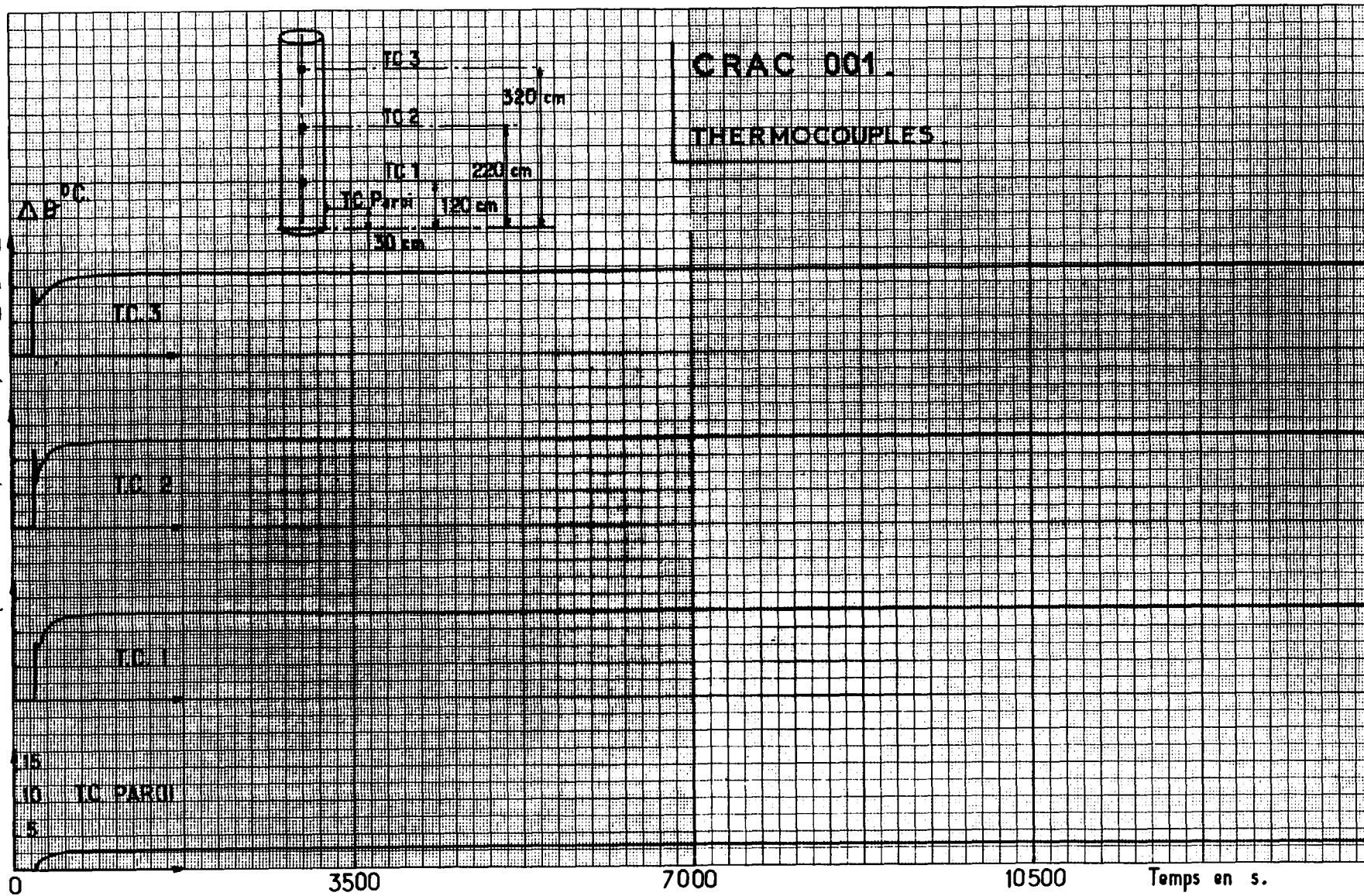
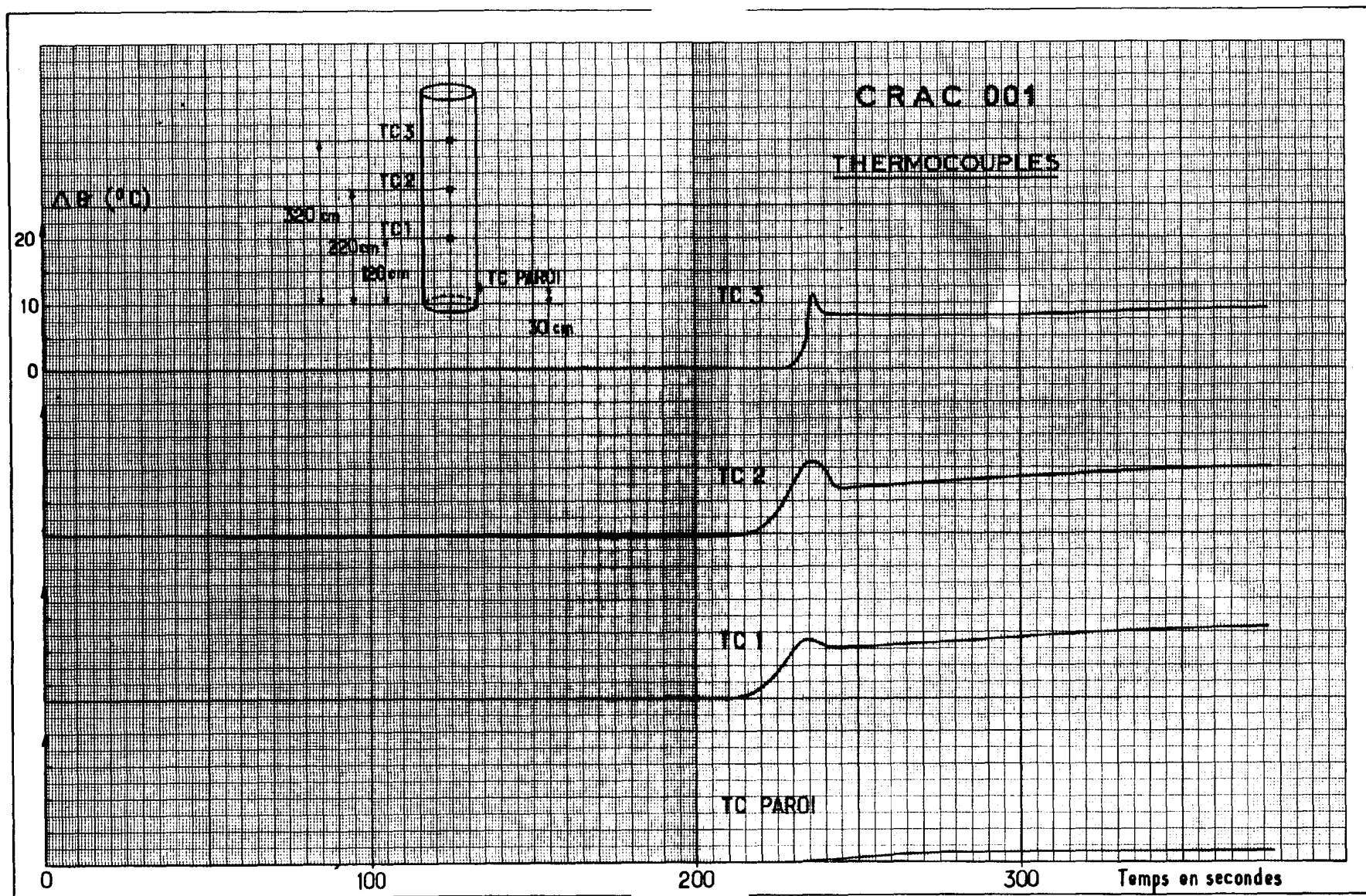


Fig:7_Temperatures (échelle dilatée)



ANNEXE 2 : CRAC – 05

Fig. 3 - Evolution de la Puissance

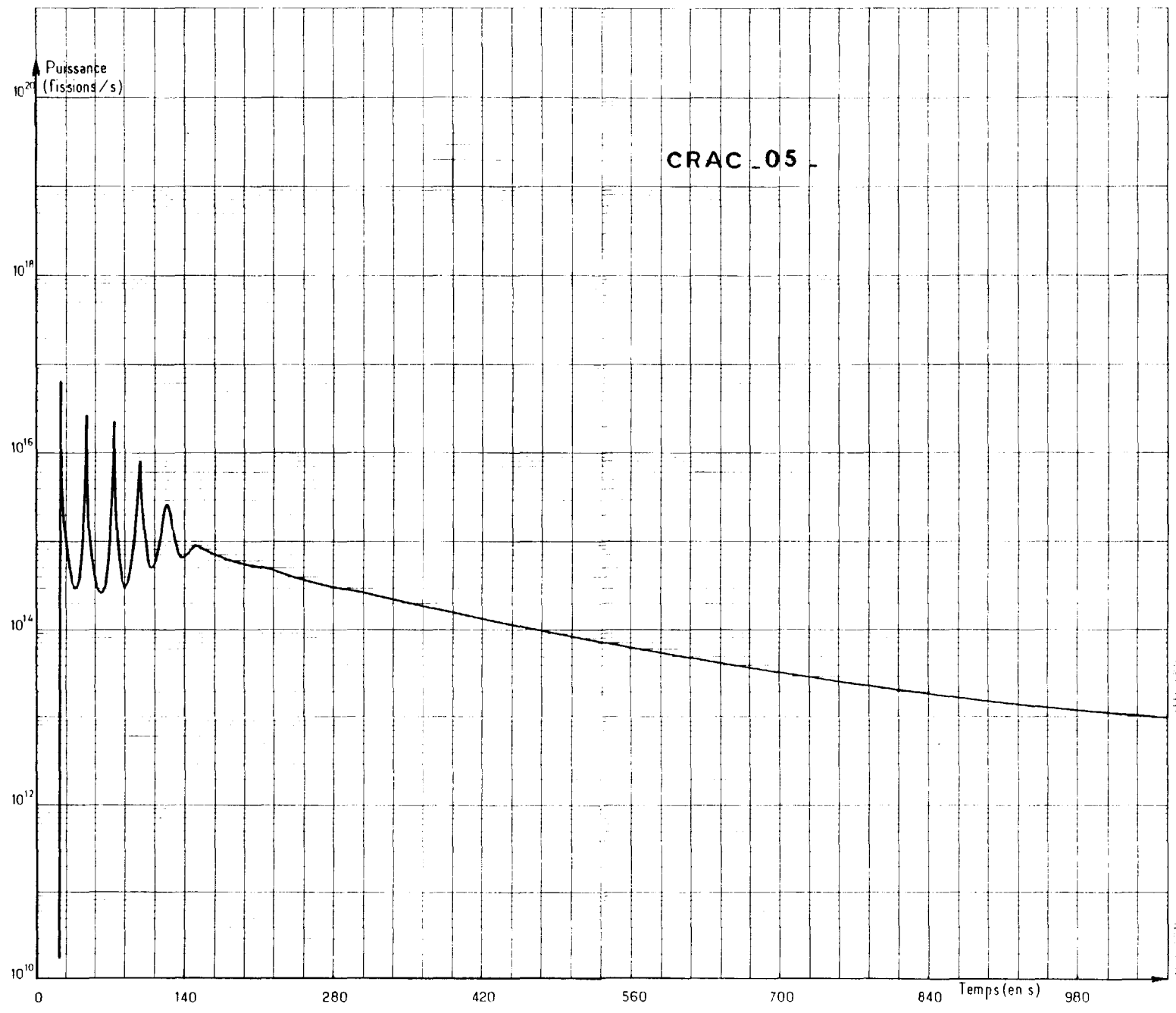


Fig. 4 - Puissance, Nombre de fissions intégré, Temps de doublement.

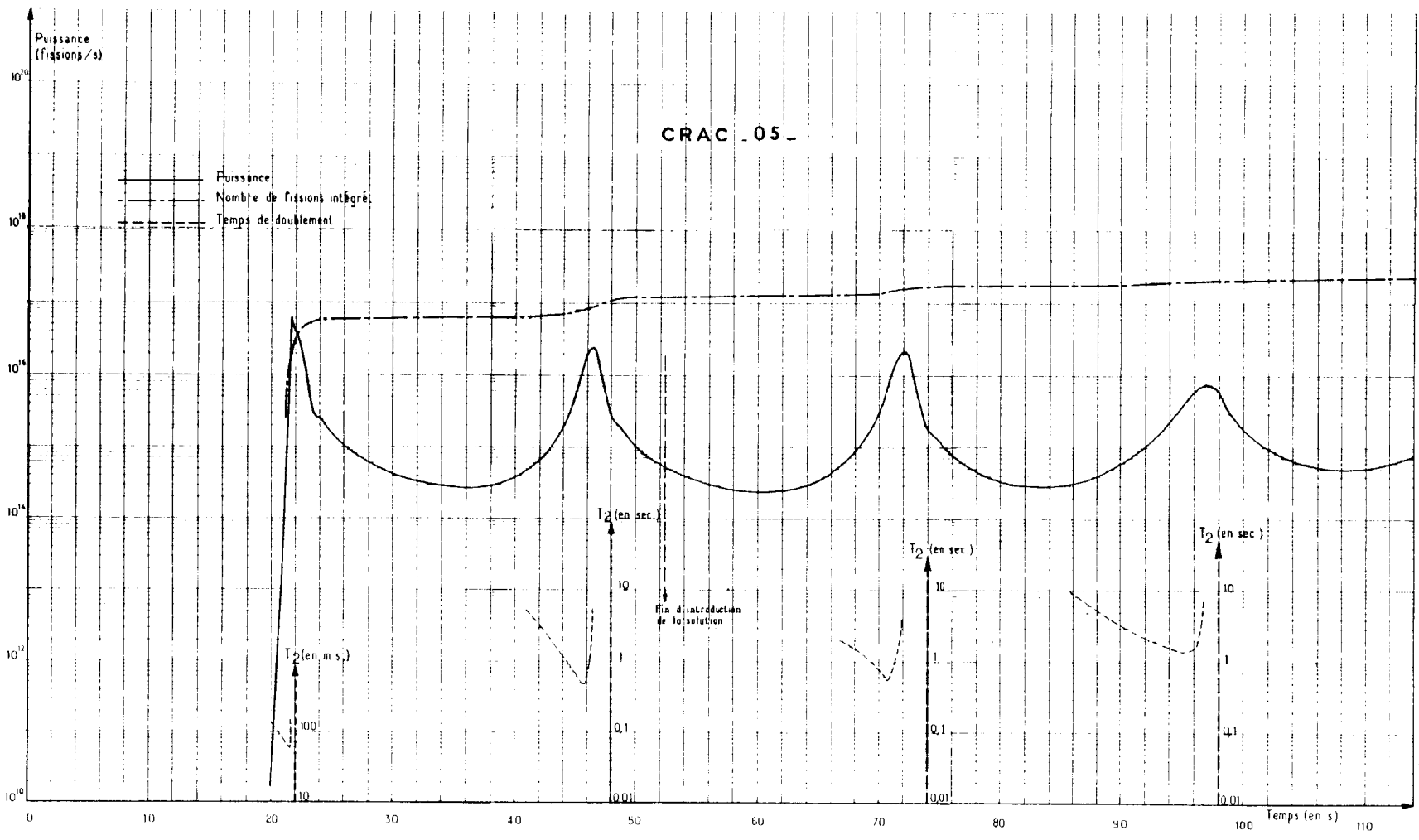
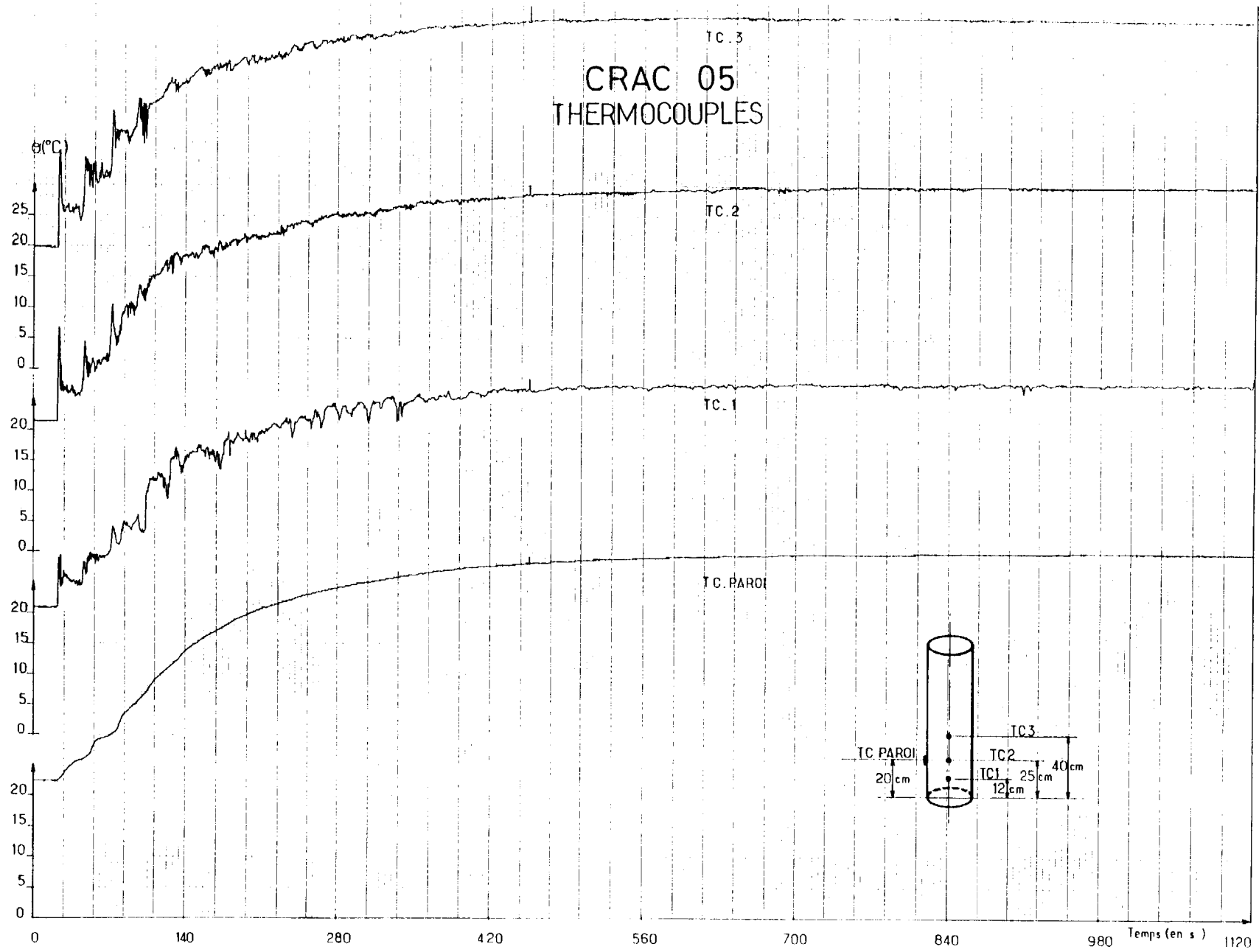


Fig. 5 - Température



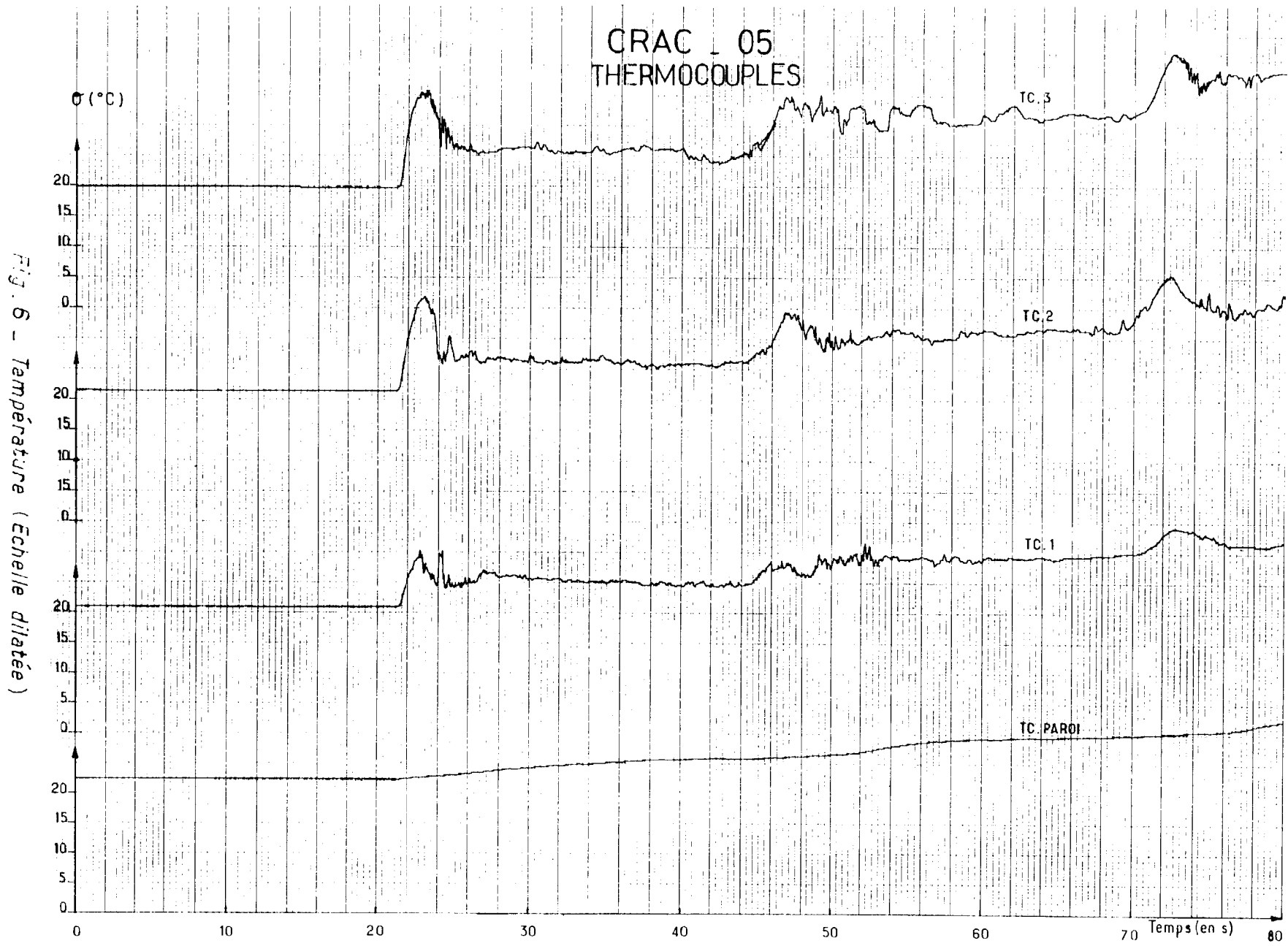


Fig. 6 - Température (Echelle dilatée)

ANNEXE 3 : CRAC – 09

Fig. 3 - Evolution de la puissance

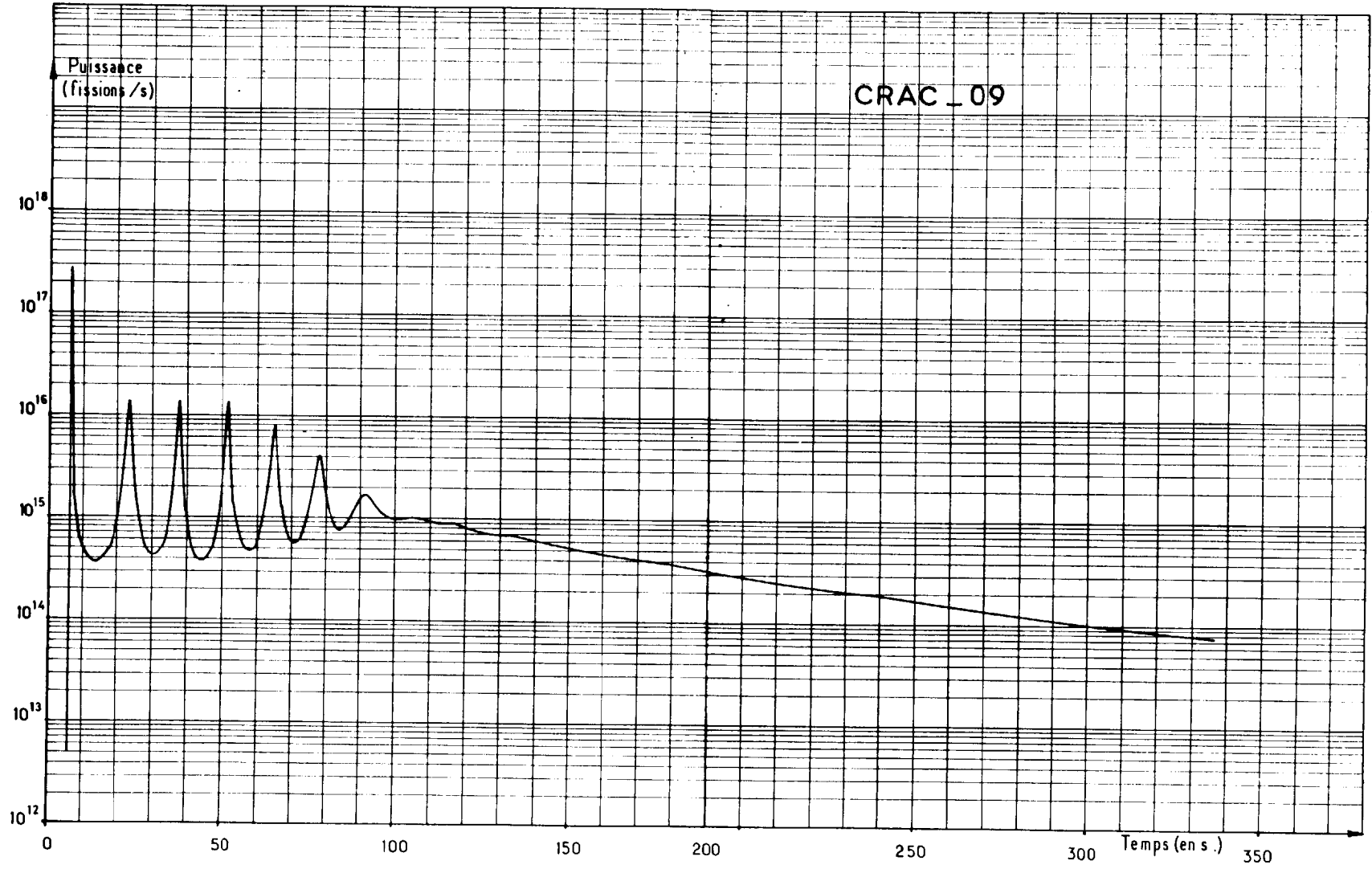


Fig. 4 - Puissance, Nombre de fissions intégré, Temps de doublement

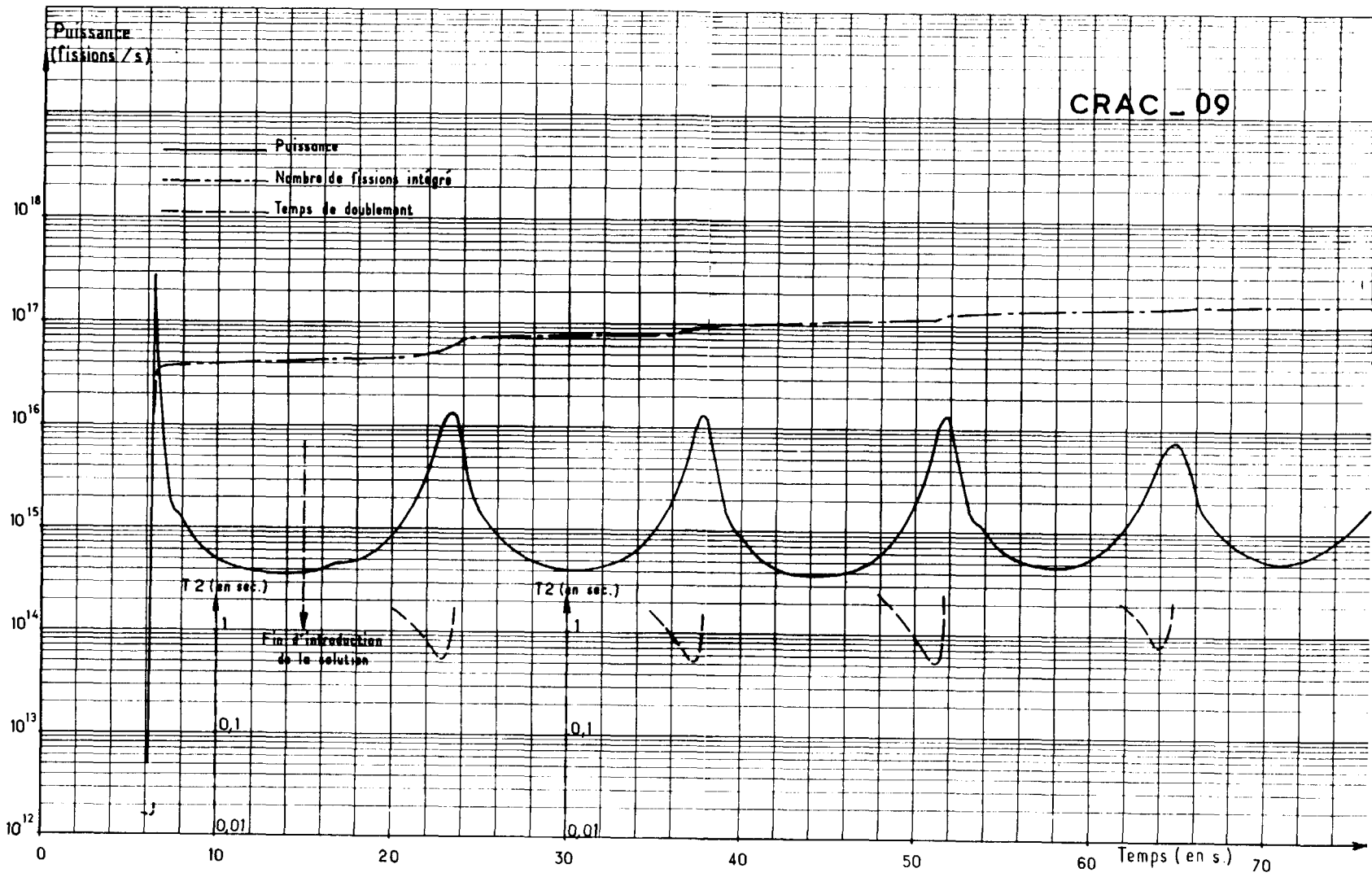
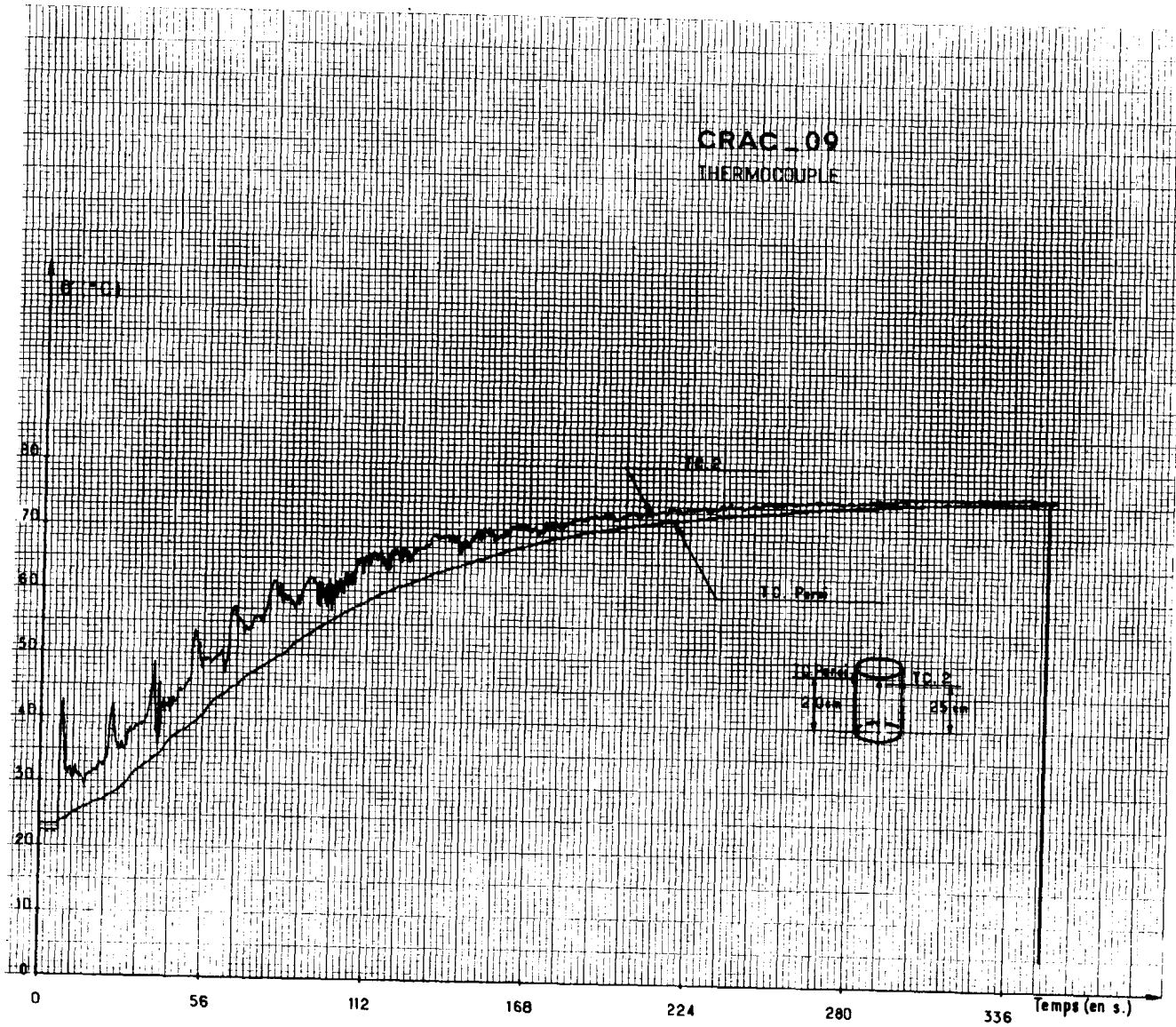


Fig. 5 - Température



ANNEXE 4 : CRAC – 12

Fig. 3 - Evolution de la puissance.

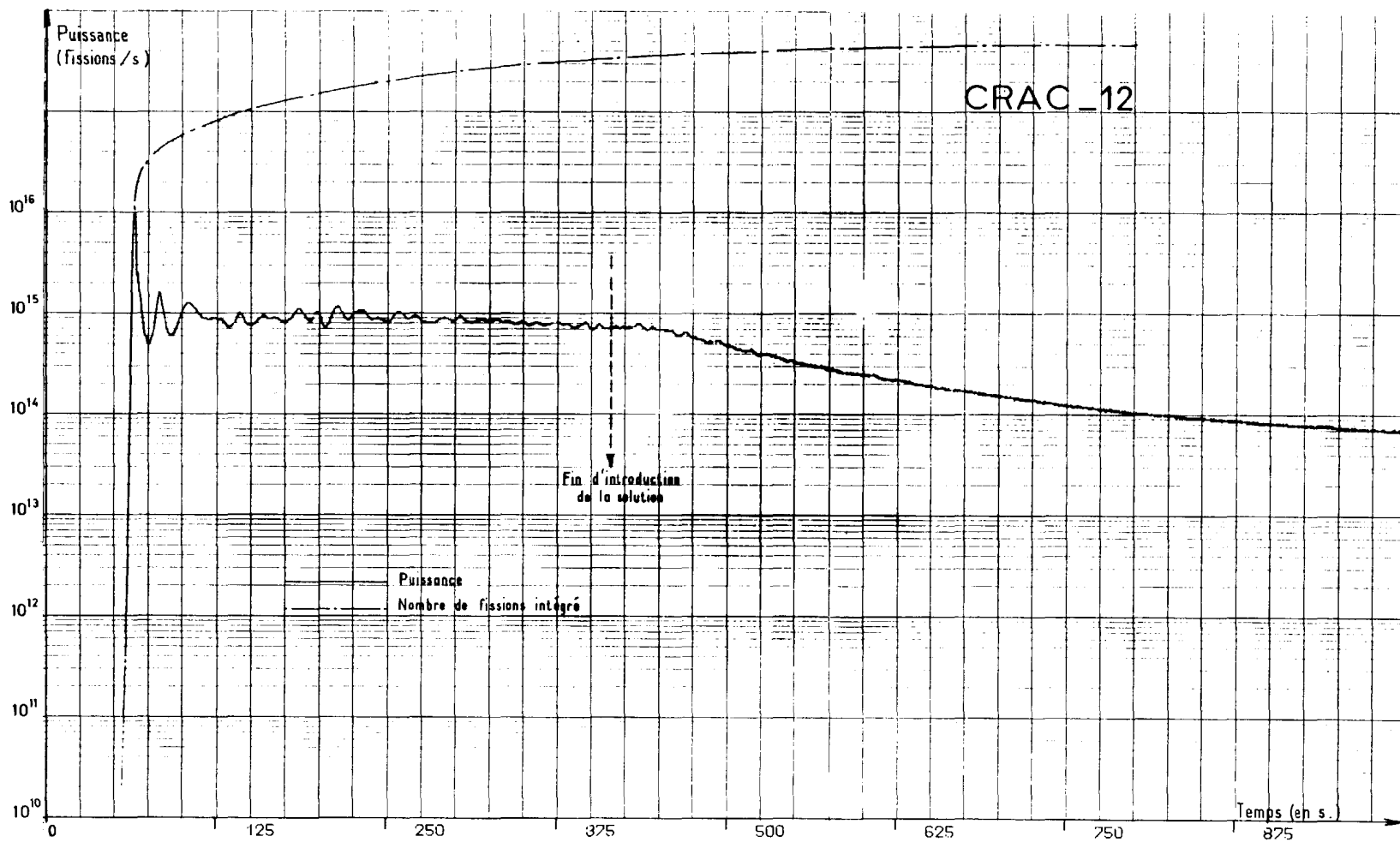


Fig. 4 - Evolution de la puissance - 1er pic -

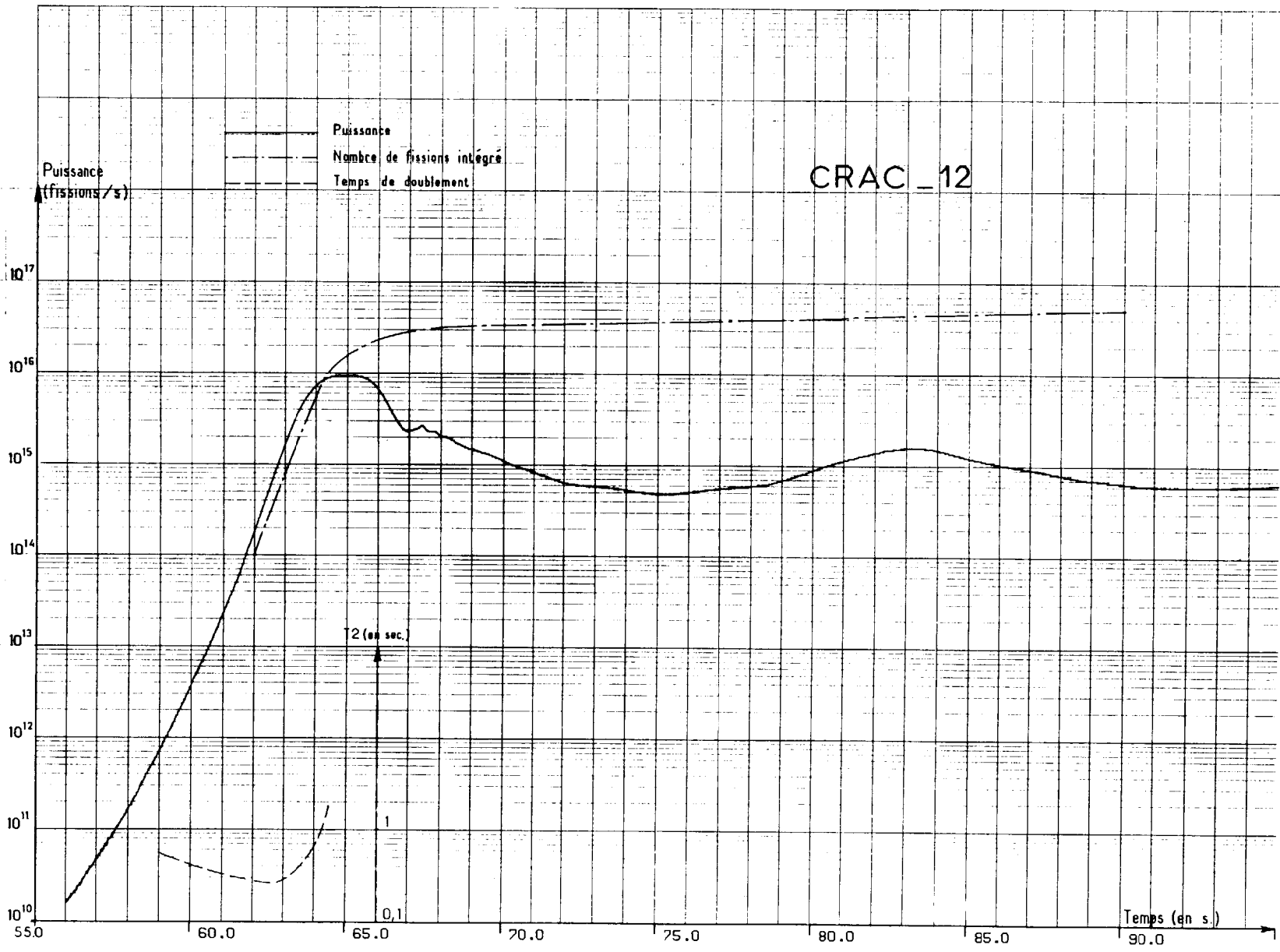
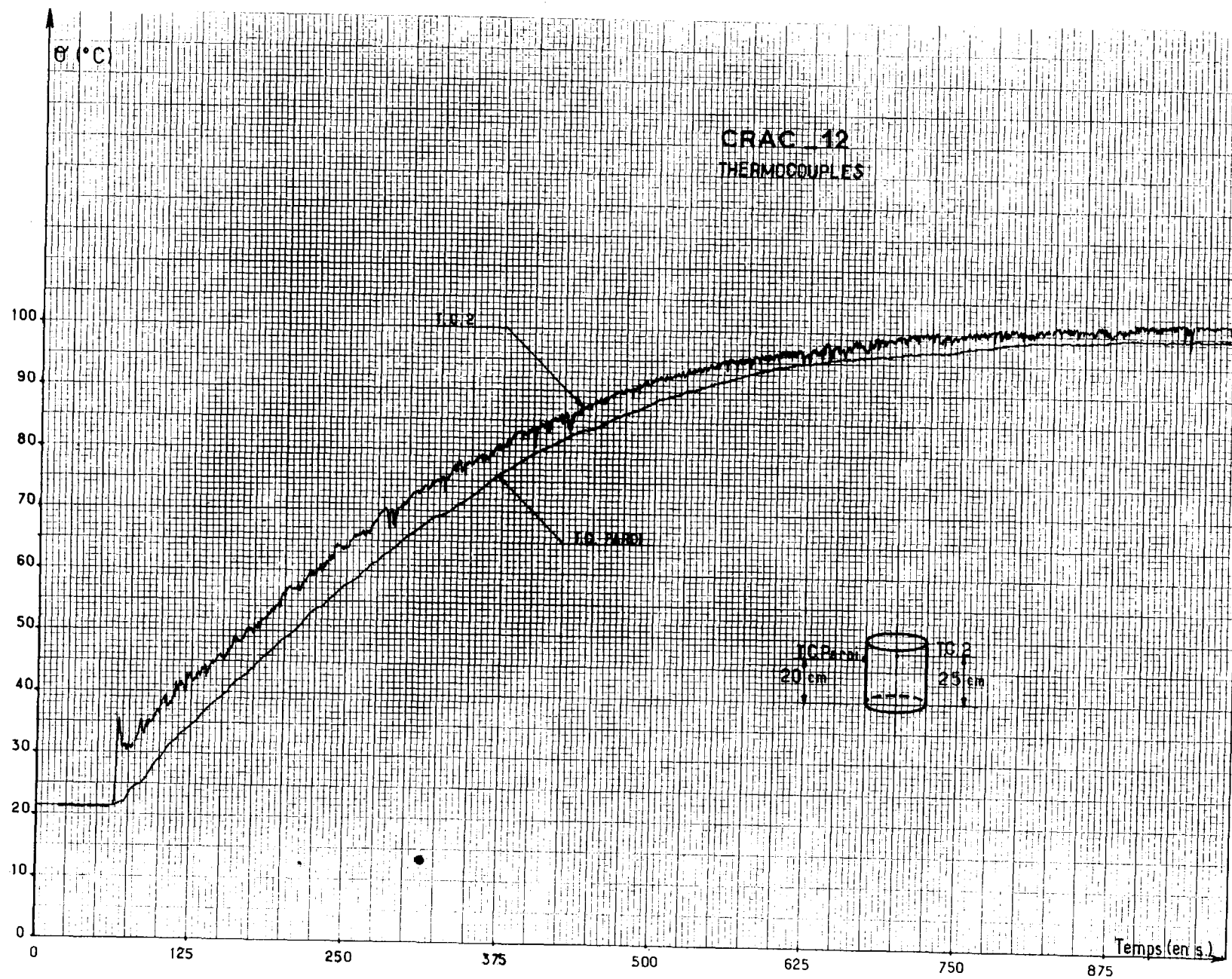
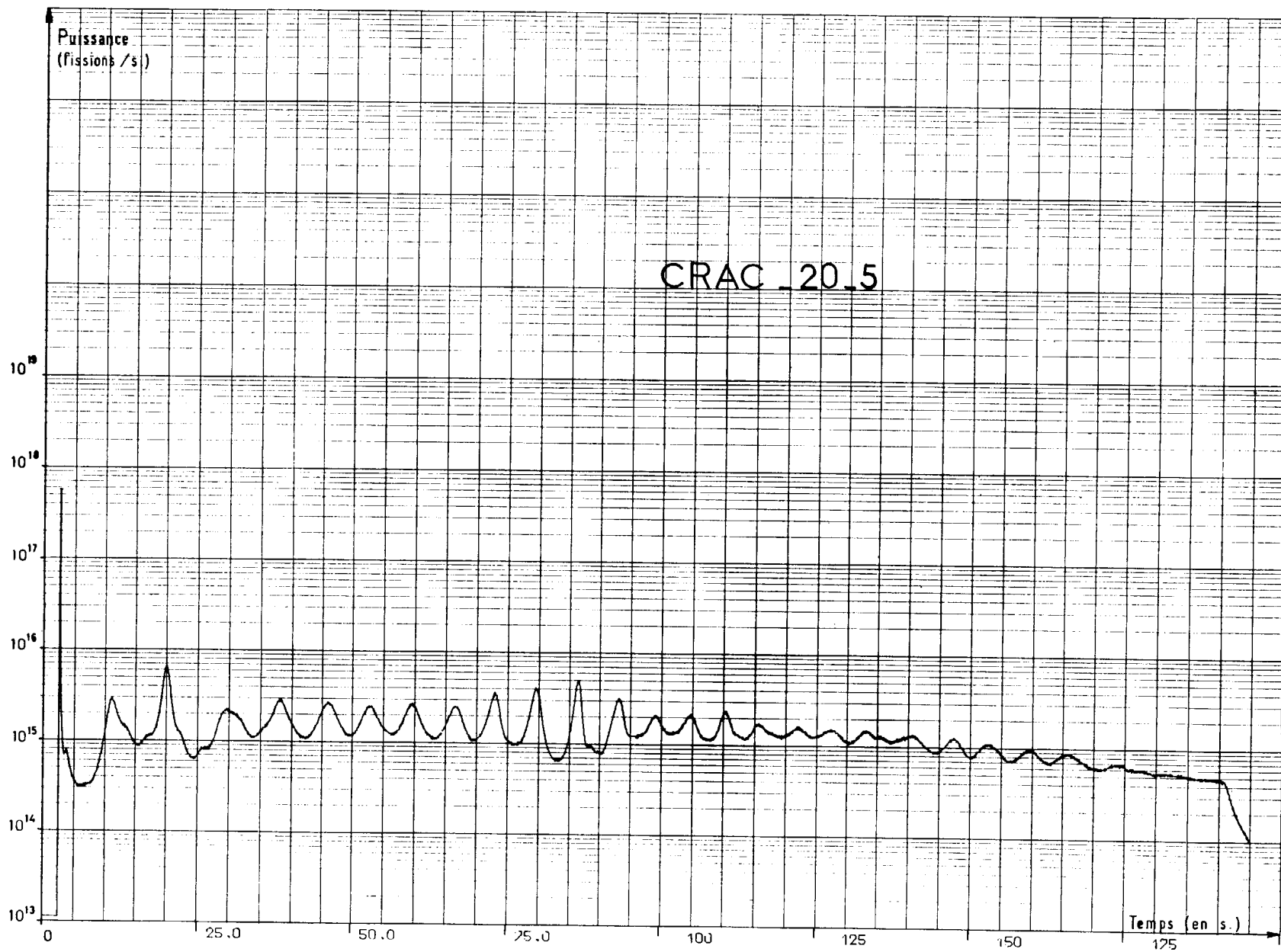


Fig.5_Temperatures.



ANNEXE 5 : CRAC - 20/5

Fig. 16 - Puissance



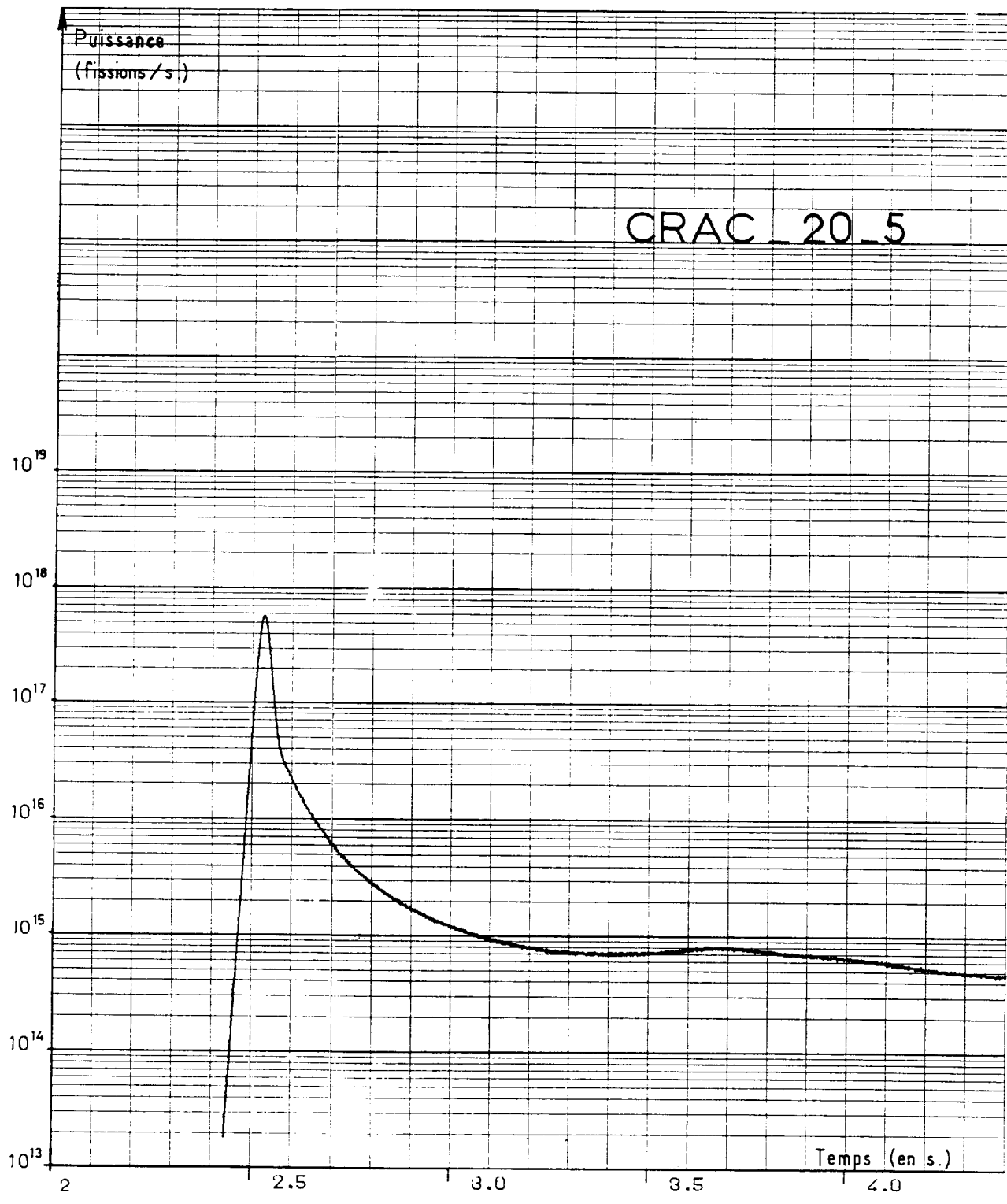
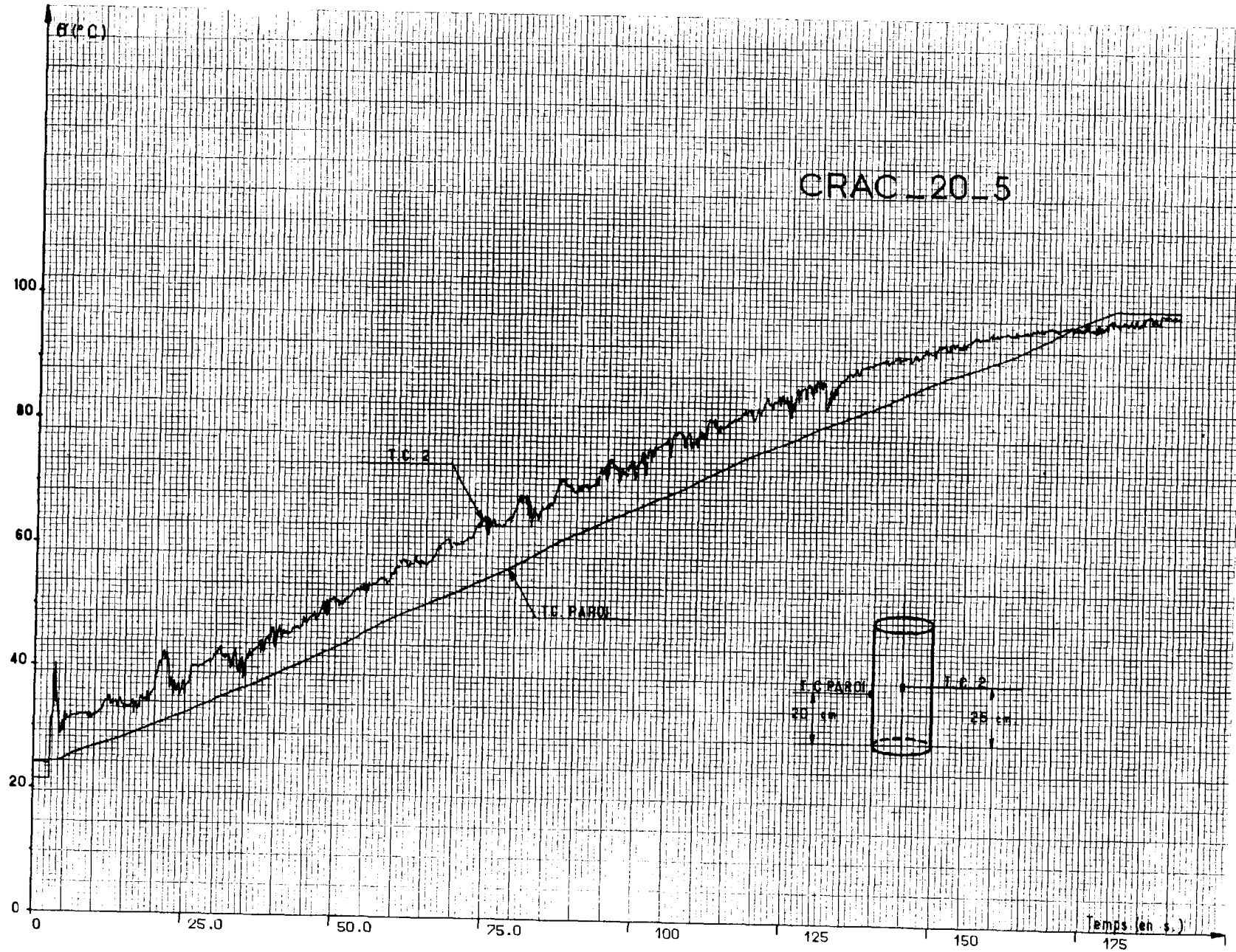


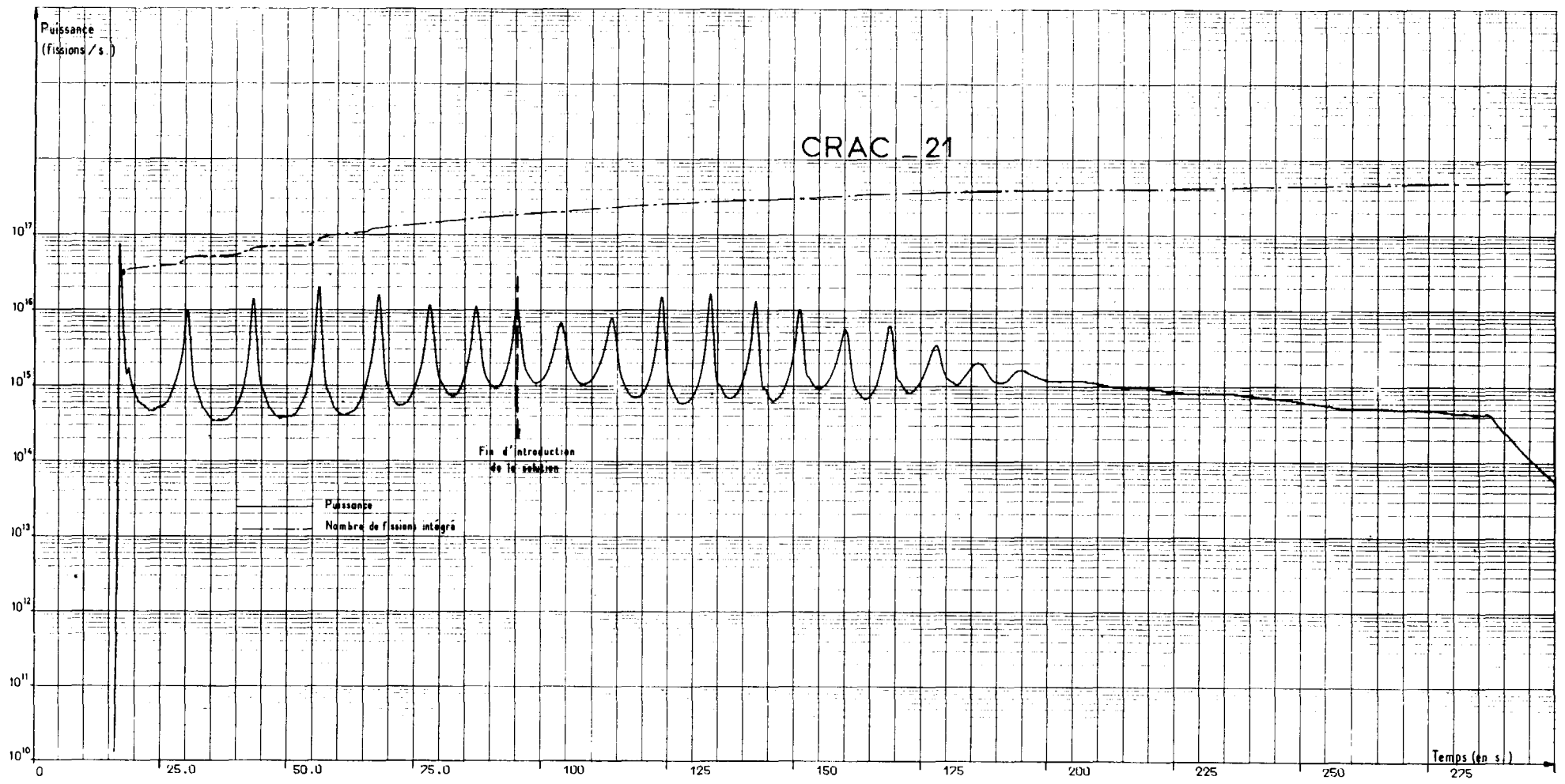
Fig.17 - Puissance (1^{er} pic)

Fig. 18 - Températures



ANNEXE 6 : CRAC – 21

CRAC_21



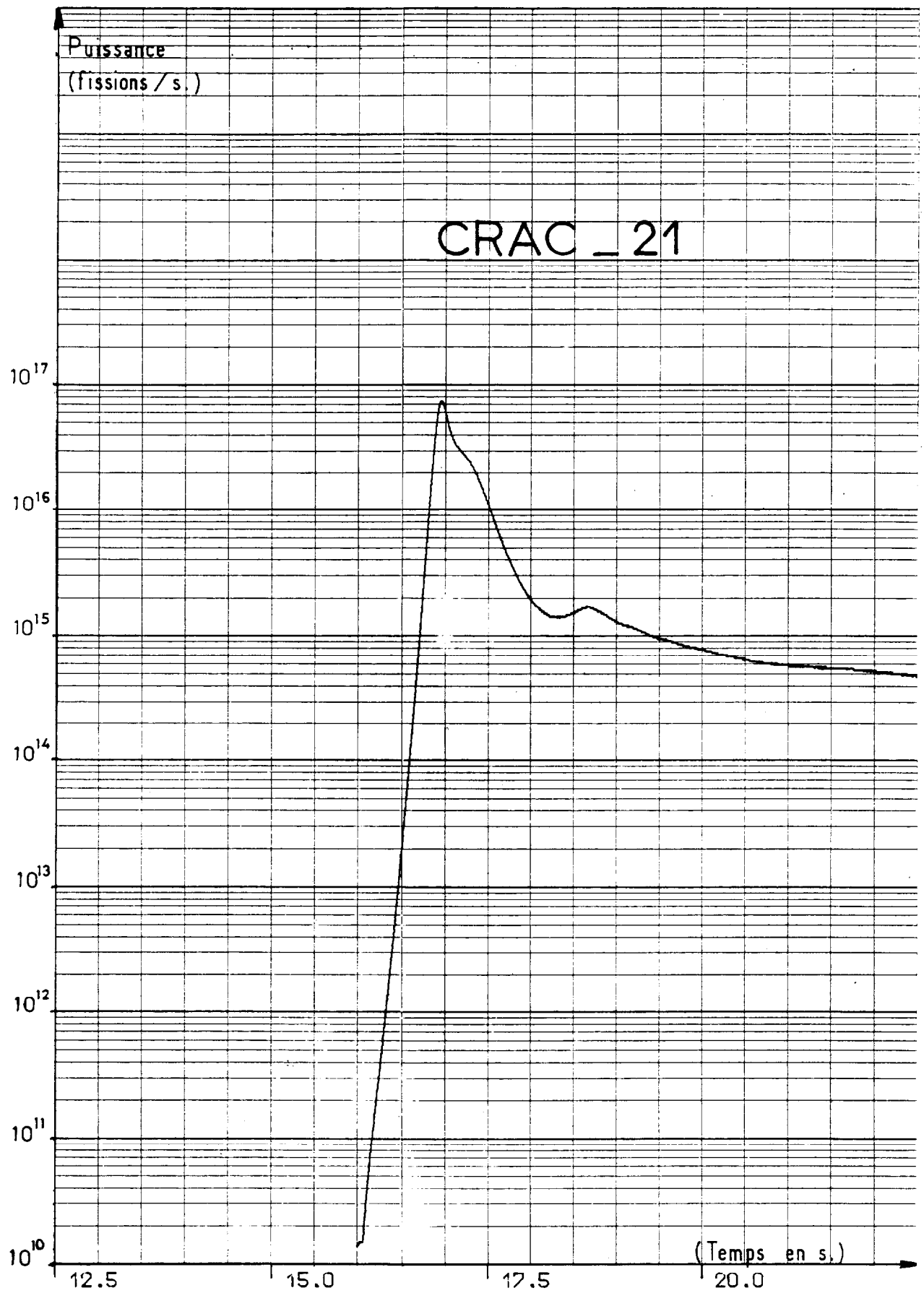
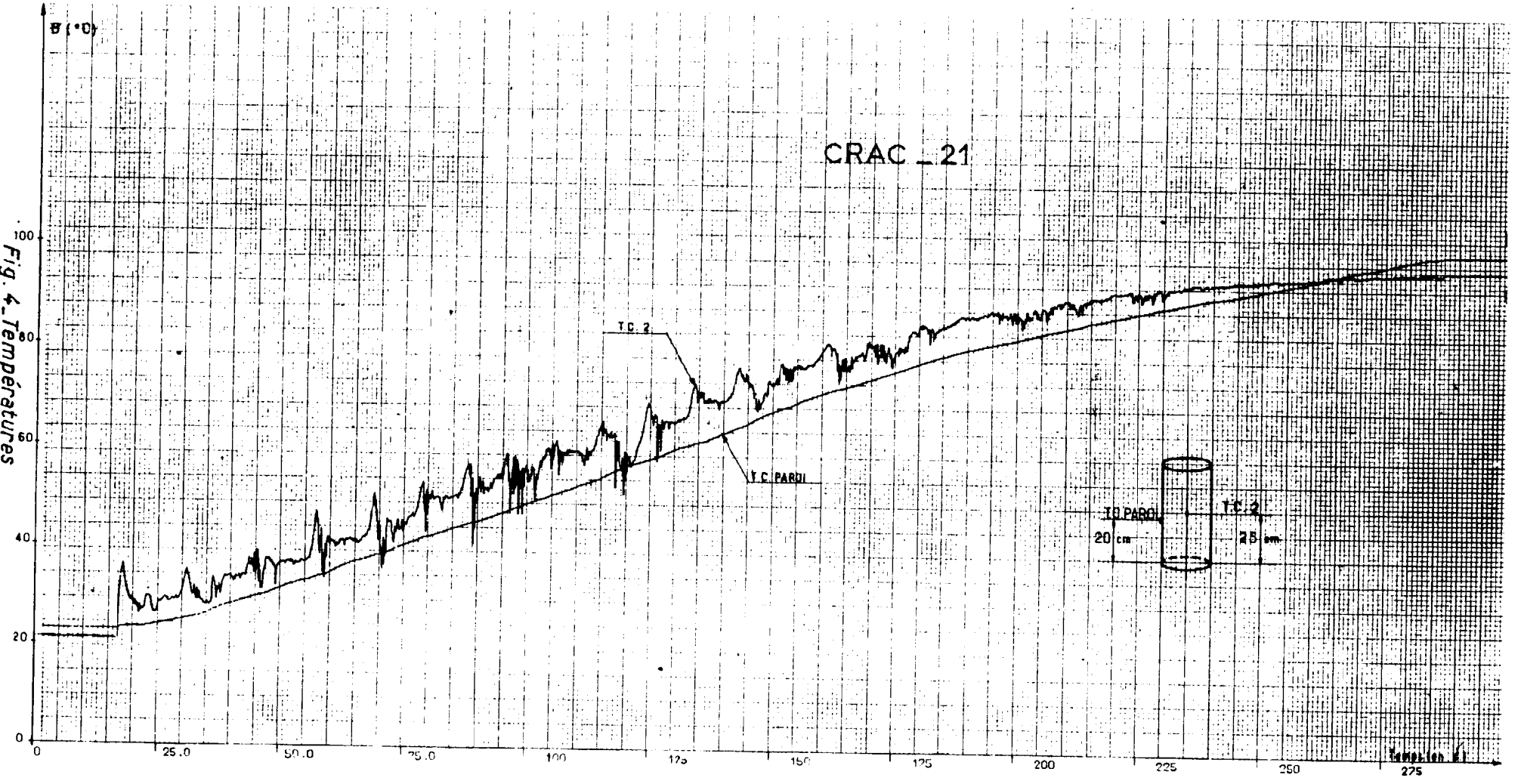


Fig. 3^{bis} Puissance (1^{er} pic)

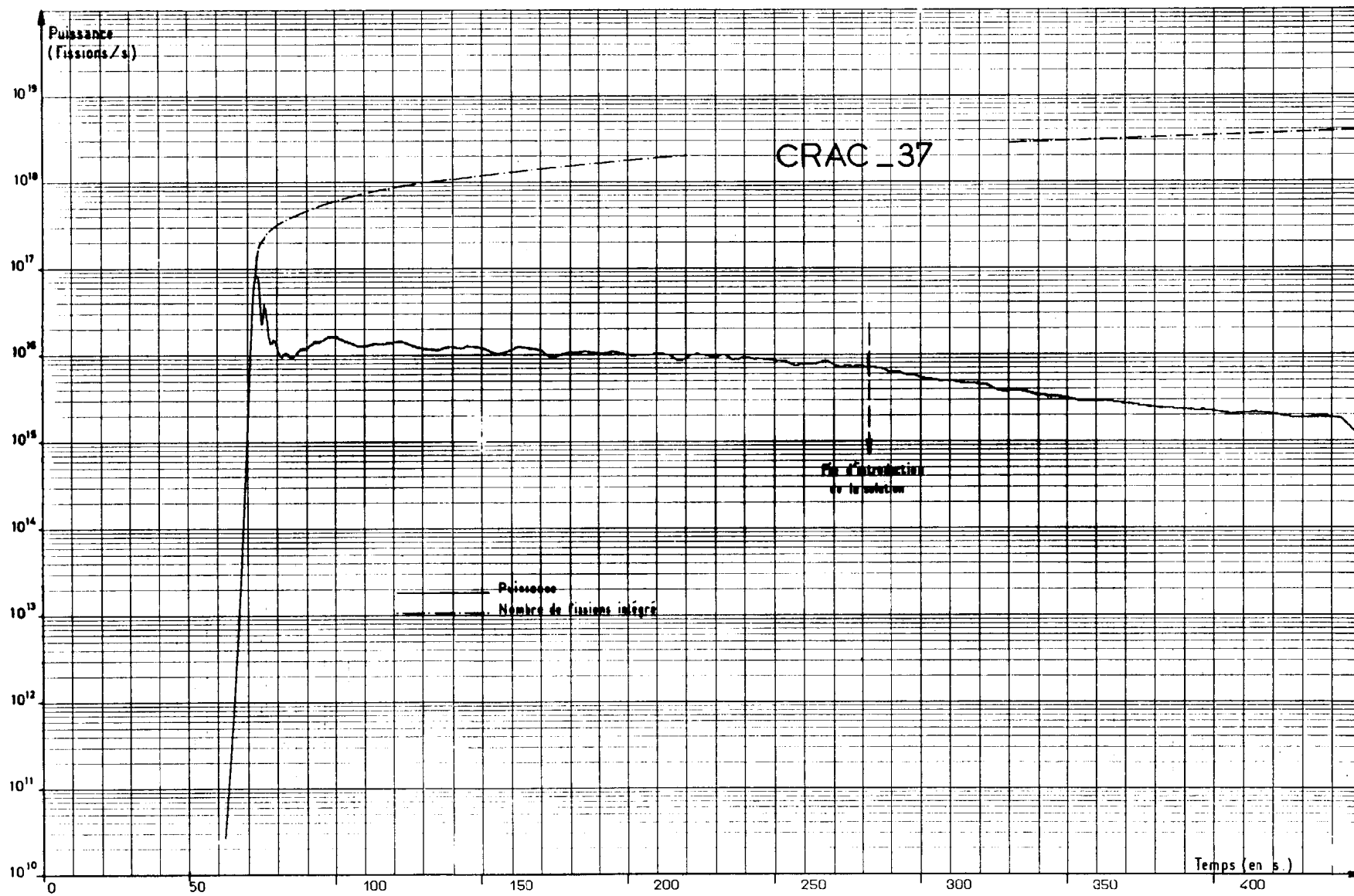
Fig. 4. Températures

CRAC - 21



ANNEXE 7 : CRAC – 37

Fig. 4 - Puissance



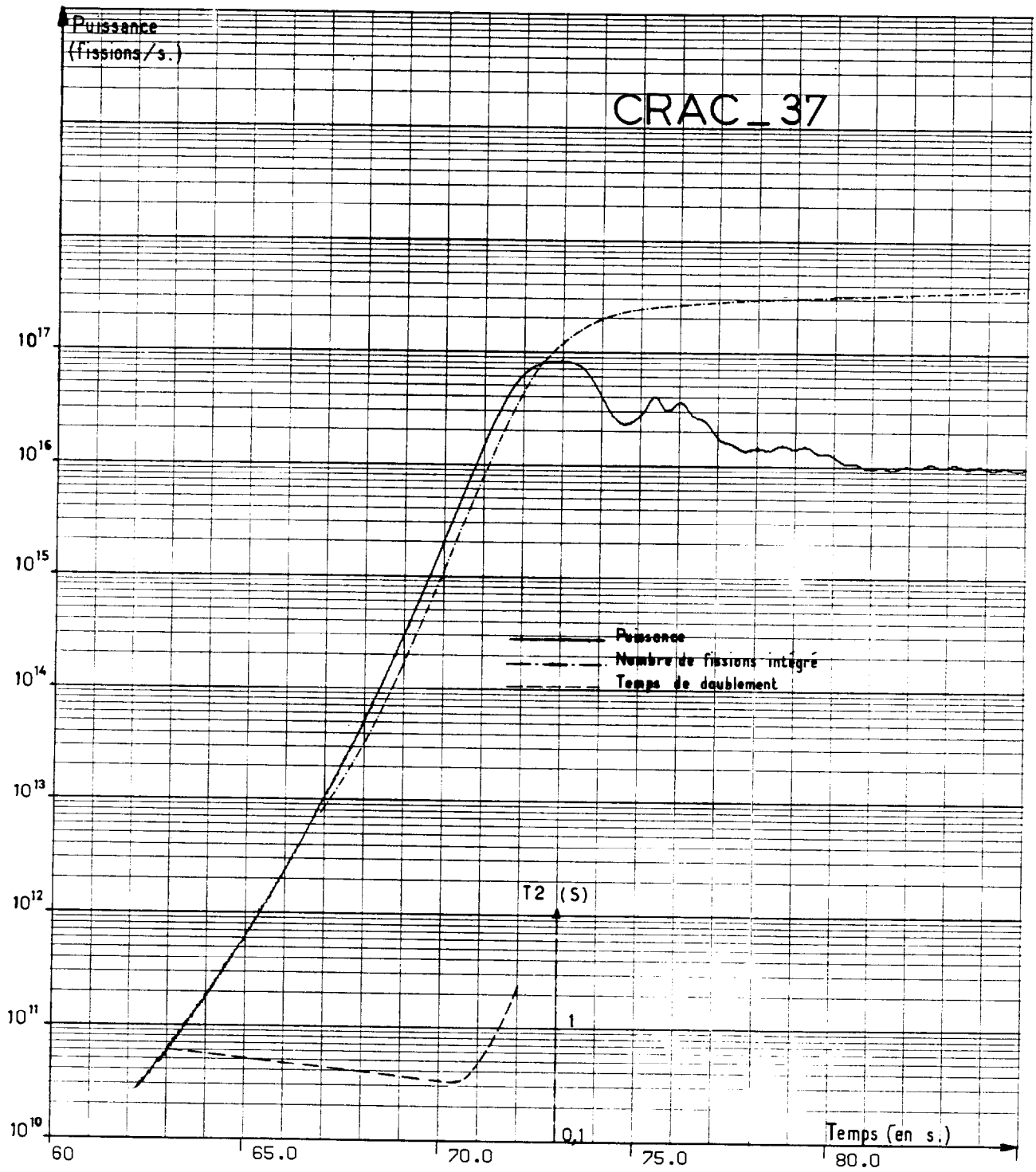
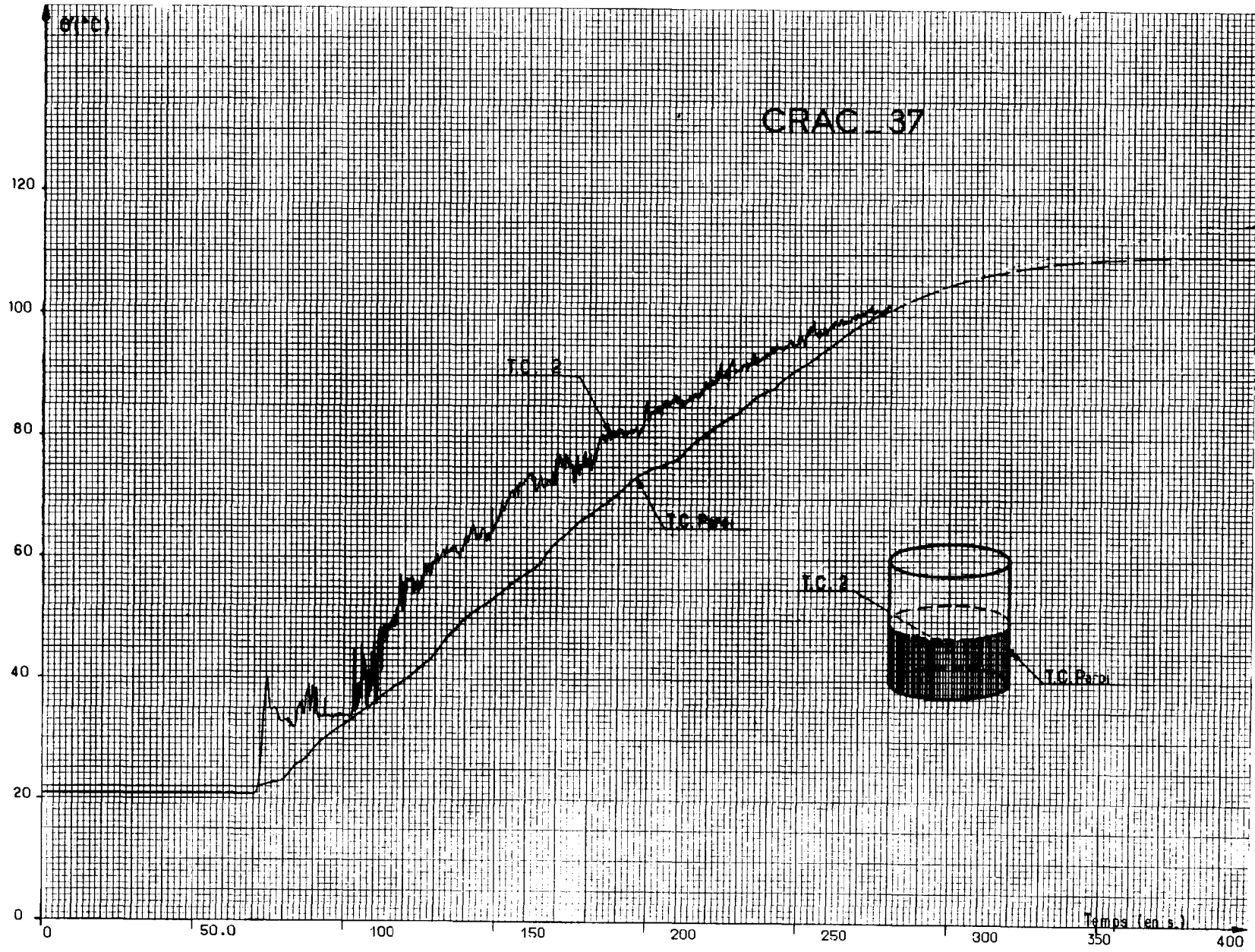


Fig.5 - Puissance (1^{er} pic)

Fig. 8 : Températures



ANNEXE 8 : CRAC – 38

Fig. 10 - Puissance

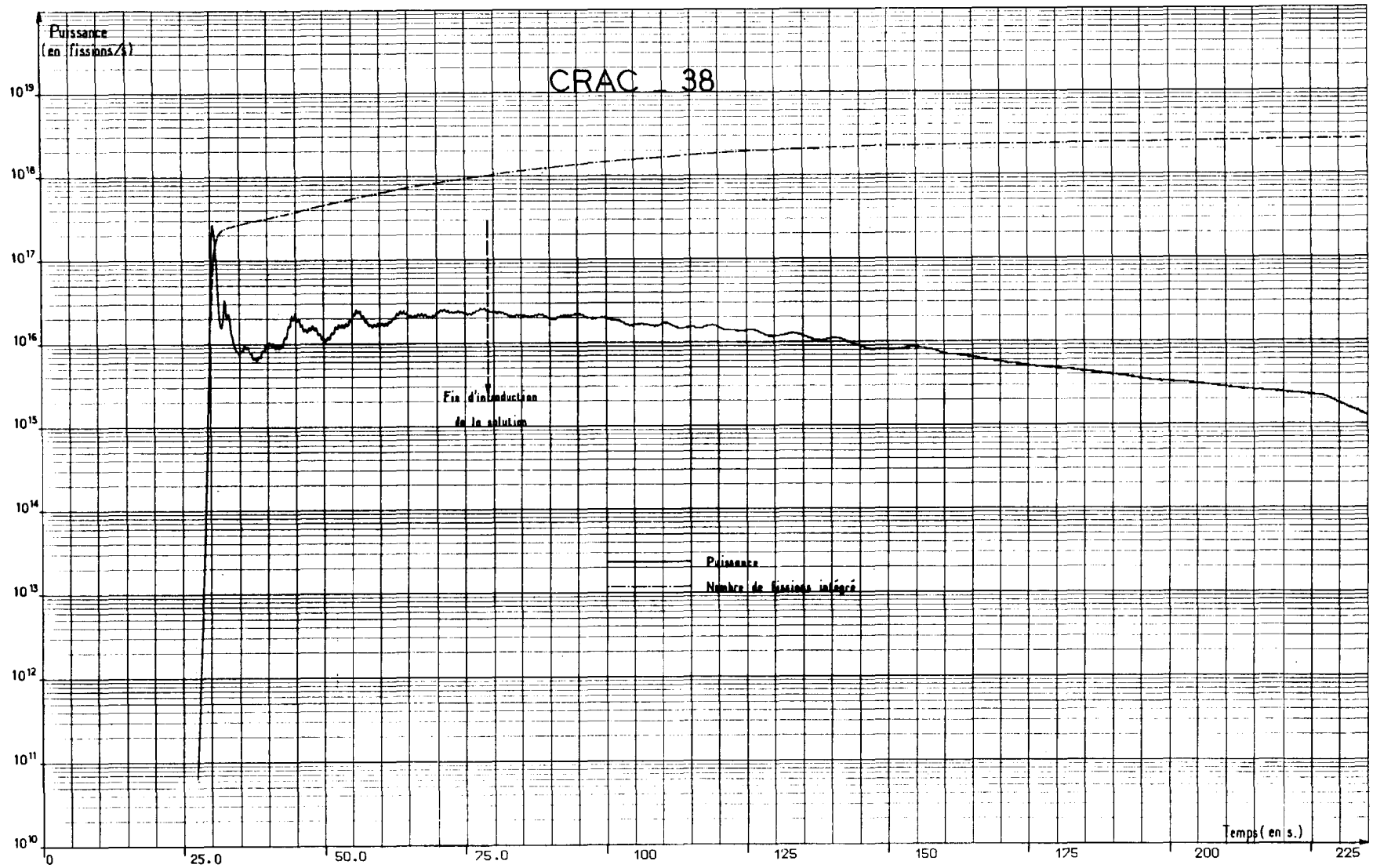


Fig. 11 - Puissance (1er pic)

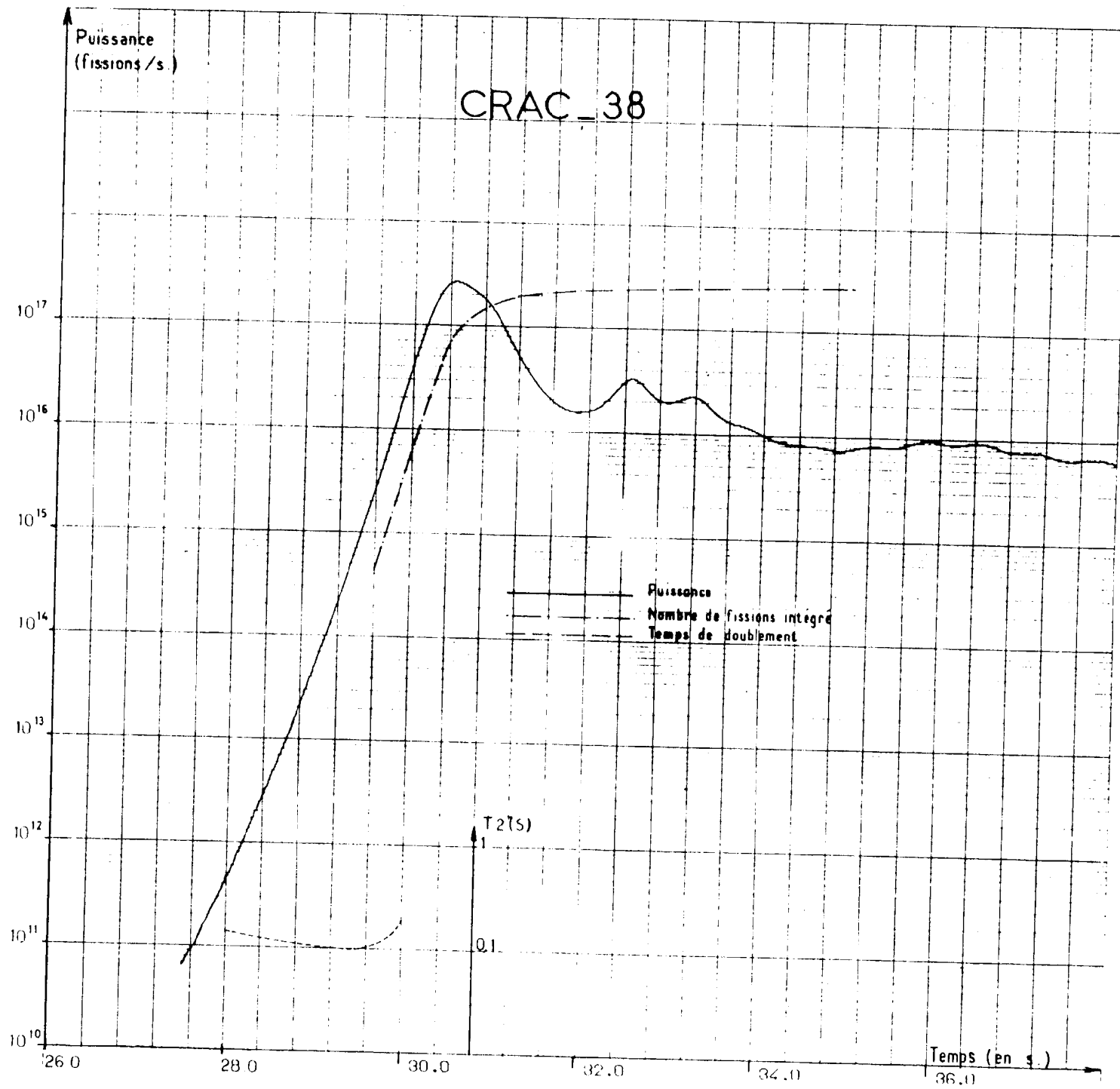
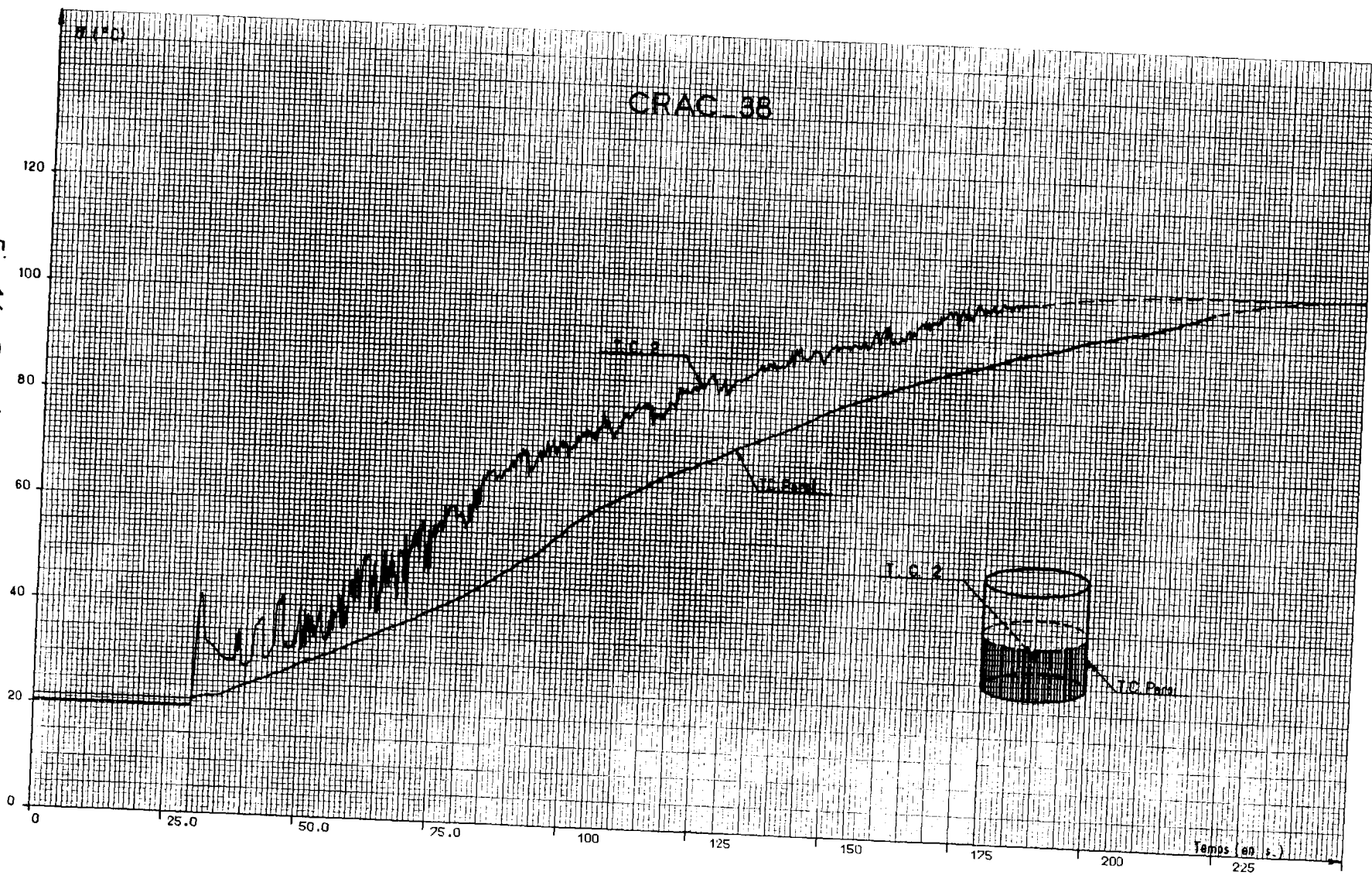


Fig. 14 - Températures



ANNEXE 9 : CRAC – 39

Fig. 1 - Evolution de la puissance

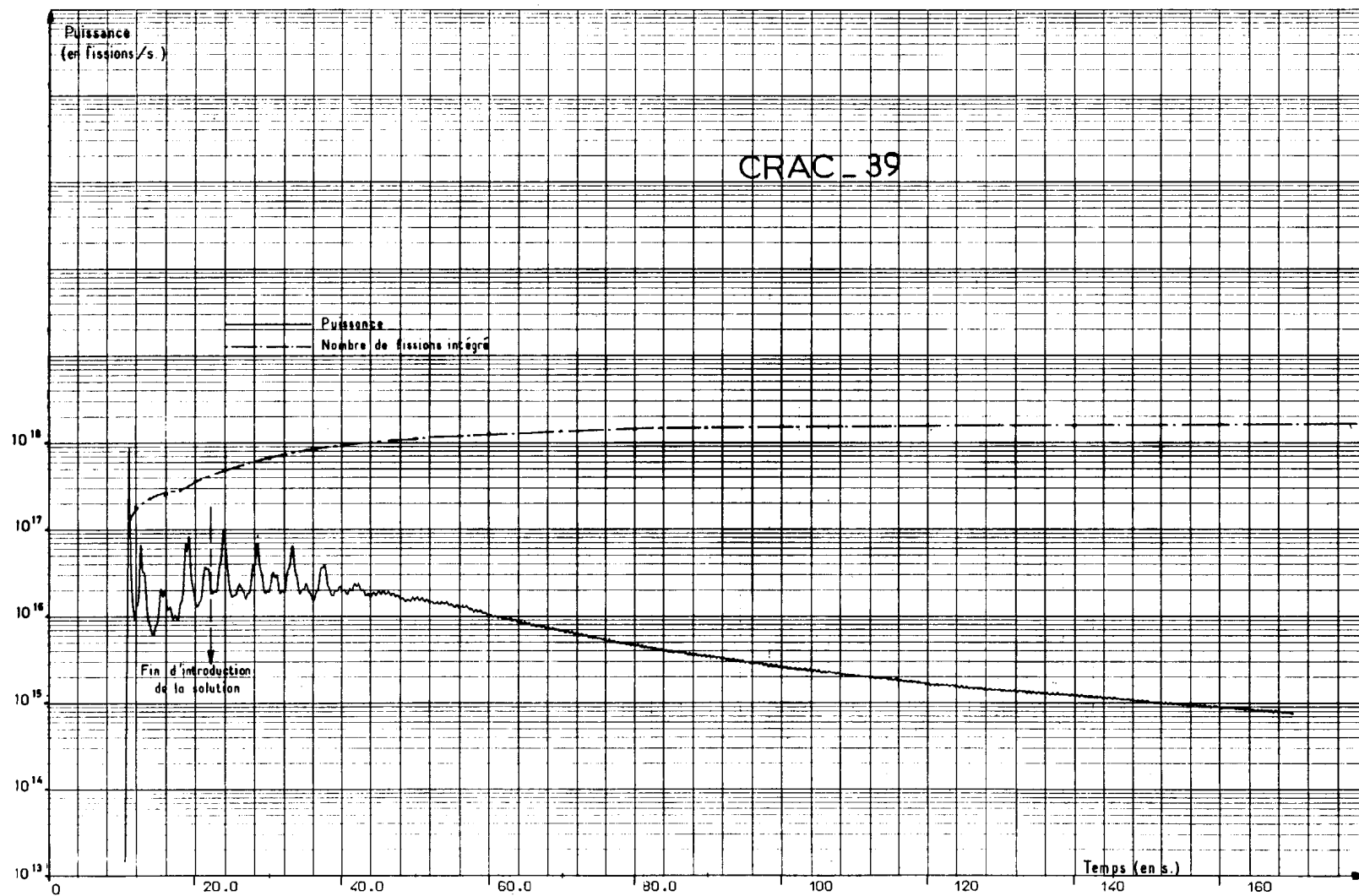
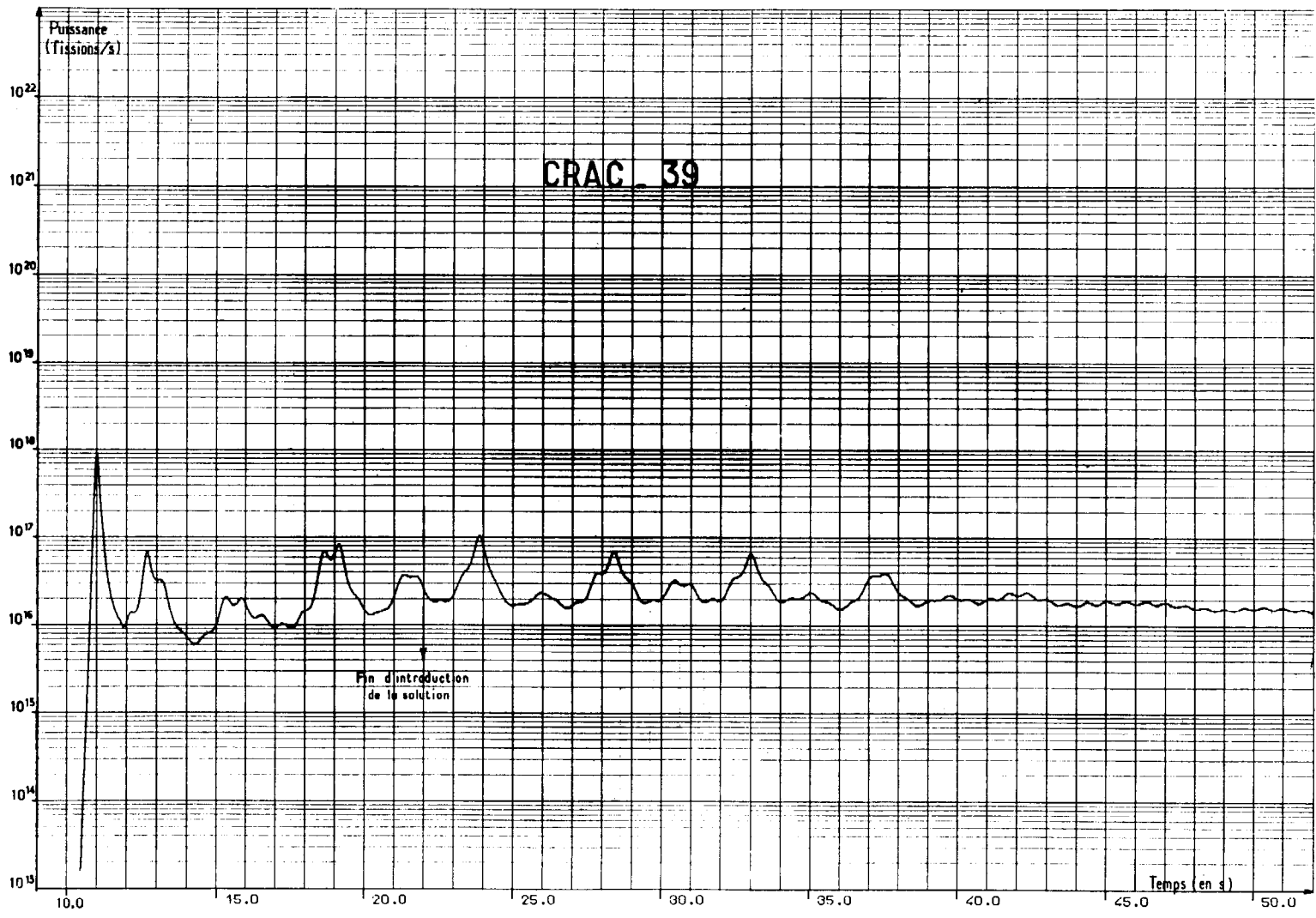


Fig. 2 - Puissance (détail)



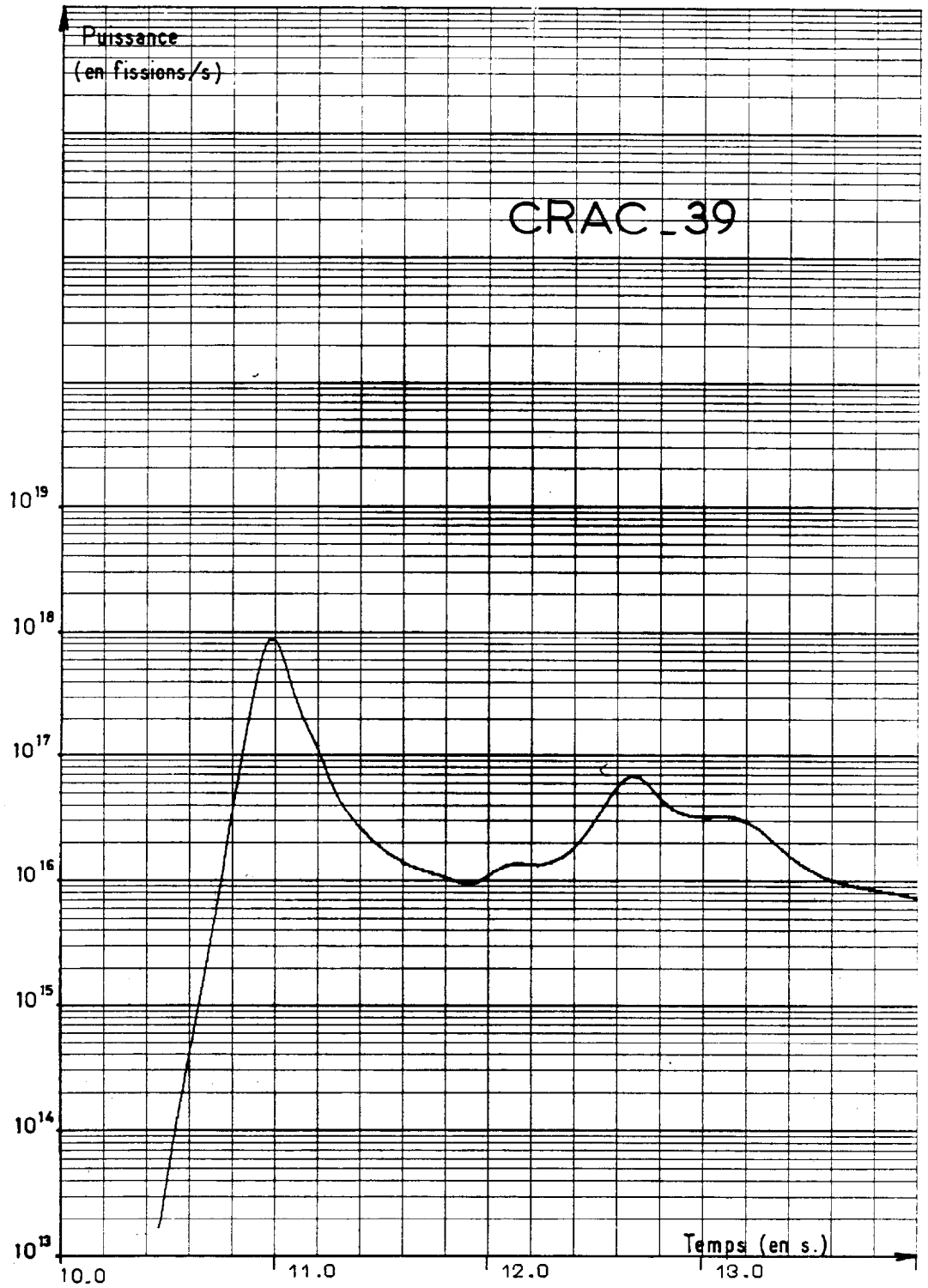


Fig. 3 - Puissance (1^{er} pic)

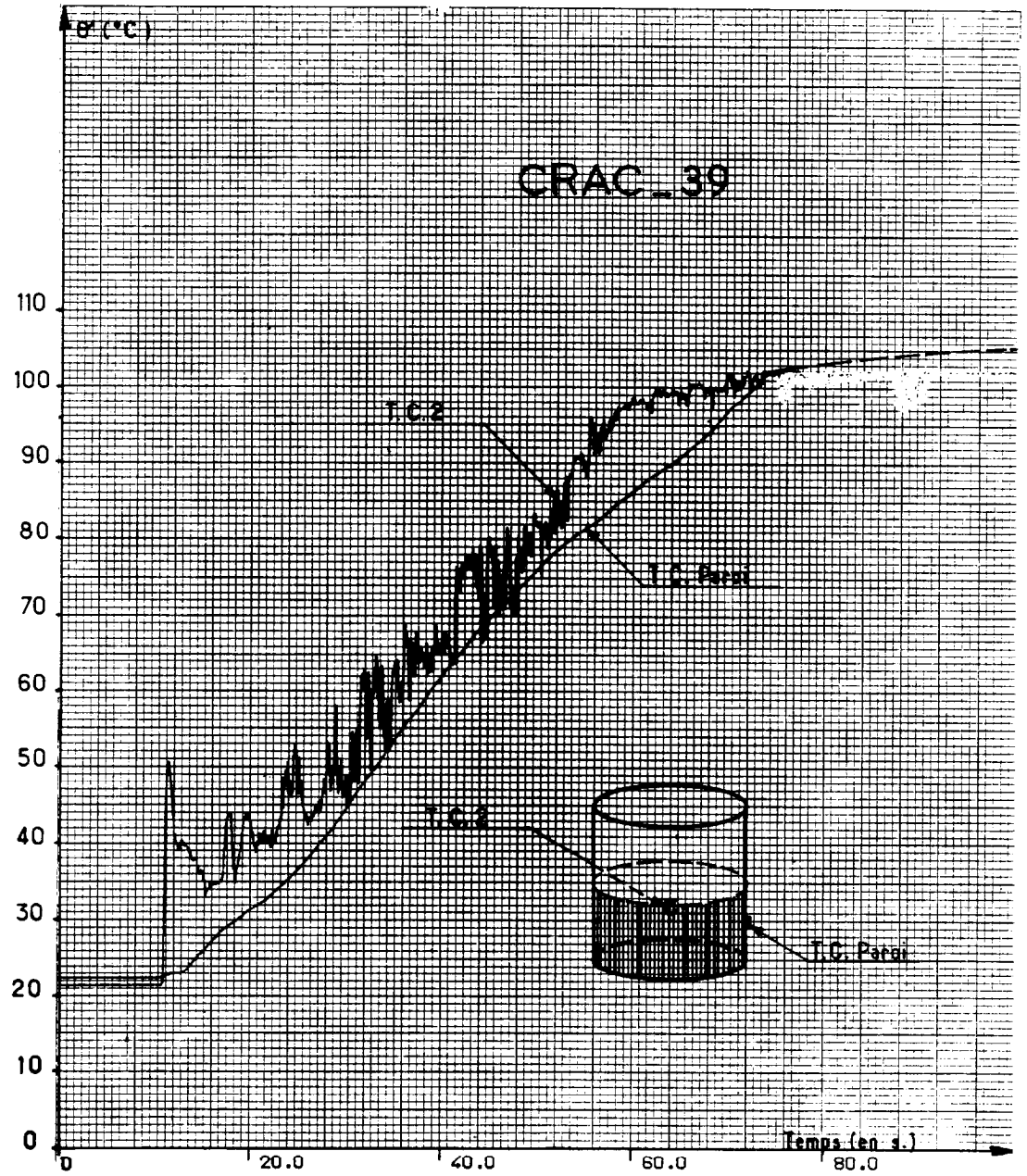


Fig. 7 - Température