

NOTE TECHNIQUE SRSC N° 87.96

ACCIDENTS DE CRITICITE EN SOLUTION

Synthèse des expériences de mesure d'onde  
de pression sur SILENE

F. BARBRY

décembre 1987

## R E S U M E

-----

Ce document récapitule les résultats expérimentaux obtenus avec le réacteur SILENE sur les ondes de pression qui accompagnent les pics de puissance à cinétique rapide.

Ces mesures, réalisées à partir d'un capteur de pression placé au sein de la solution fissile, ont permis de mettre au point une relation entre l'amplitude maximum de l'onde de pression  $\Delta p$  et certaines données caractéristiques du 1er pic ( $\omega$  inverse de la période et  $\hat{E}$  énergie intégrée jusqu'au maximum du pic).

L'examen des résultats montre que le signal de pression est initié avant le maximum du pic de puissance et que selon toute vraisemblance les gaz de radiolyse apportent une contribution négative en réactivité sur la cinétique de l'excursion, contribution qui vient s'ajouter à l'effet de température.

Enfin, il est permis de dire que pour qu'une onde de pression significative soit générée au cours d'une excursion de puissance dans une solution fissile, il faut que la cinétique du phénomène soit rapide c'est-à-dire inférieure à 10 ms.

## Accidents de criticité en solution.

### Synthèse des expériences de mesure d'onde de pression sur SILENE

#### 1. FINALITE DES MESURES DE PRESSION REALISEES DANS LE REACTEUR SILENE

Au cours des années 1980 et 1981, un certain nombre d'expériences à caractère spécifique ont été réalisées dans le réacteur SILENE (réf. 1) pour améliorer la connaissance des mécanismes de production d'une onde dynamique de pression au sein de la solution fissile lors d'une excursion accidentelle de criticité.

Ces mesures, obtenues à partir d'un capteur de pression placé dans le plan médian de la solution fissile, avaient comme objectifs :

1. En premier lieu l'élaboration, dans le cadre des études de sûreté pour lesquelles les expériences de criticité sont menées à Valduc, de modèles simples correlant l'onde de pression aux caractéristiques cinétiques de l'excursion de puissance (période, puissance, énergie...) et ceci en vue d'une utilisation pratique pour l'analyse de sûreté.
2. L'application de ce modèle au réacteur SILENE proprement dit pour garantir la tenue de la cuve de coeur pour des "steps" de réactivité élevés, l'onde maximale de pression autorisée au niveau de la paroi de la cuve de coeur étant de 8 bars (valeur absolue).
3. A terme, à partir des résultats fournis par les expériences sur la formation des gaz de radiolyse (réf. 2), essayer de comprendre et de modéliser les phénomènes physico-chimiques régissant la formation de gaz de radiolyse et la génération d'une onde de pression.

La sûreté nucléaire est en effet concernée par ces phénomènes pour les raisons suivantes :

- l'onde de pression peut mettre en cause l'intégrité de la première barrière,

- la formation d'hydrogène par radiolyse peut induire un risque d'inflammation ou d'explosion,

- la modélisation précise d'une excursion accidentelle de criticité dans une solution fissile ( $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4\text{UO}_2\text{F}_2$ ) nécessite la connaissance et l'introduction dans un code de calcul de modèles rendant compte de la radiolyse et de la formation de bulles.

Il s'agit bien évidemment là d'un travail de plus longue haleine pour lequel les USA ont déjà proposé à l'occasion du programme KEWB certains modèles pouvant constituer une base de départ.

L'effort consacré par le CEA/IPSN/SRSC jusqu'à présent a porté uniquement sur la réalisation d'essais avec le réacteur SILENE en vue d'élaborer des modèles simples et c'est ce que nous nous proposons de récapituler dans le présent document.

## 2. CONFIGURATION SILENE ET DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le réacteur SILENE qui utilise comme combustible une solution de nitrate d'uranyle présente l'originalité de pouvoir réaliser des transitoires de puissance correspondant à des cinétiques représentatives d'une excursion accidentelle de criticité.

Le fond de la cuve de coeur est doté d'un capteur de pression (type CEC BELL) qui permet de contrôler en permanence que l'on ne dépasse pas les limites de fonctionnement autorisées pour le réacteur (8 bars absolu).

Pour les besoins de la présente étude un capteur de pression d'un autre type (capteur KISTLER) a été introduit au sein du milieu fissile

dans le plan médian de la solution soit au maximum de flux axial. Ce dispositif est schématisé sur la figure n° 2.

Le capteur de pression de fond de cuve est du type à fil tendu. Quant au capteur de pression ayant permis les mesures à coeur, il s'agit d'un KISTLER piézoresistif, les difficultés dans le choix d'un capteur ayant résidé dans le fait qu'il doit résister en milieu acide, ne pas dériver en température, être aussi peu sensible que possible aux rayonnements nucléaires et enfin avoir un temps de réponse le plus rapide possible !

Des informations plus précises sont données dans la référence 3.

### 3. RESULTATS DES EXPERIENCES

Les principaux résultats sont consignés dans le tableau 1.

Les figure 3 à 19 illustrent l'évolution des différents capteurs lors des transitoires de puissance.

Les notations utilisées sont les suivantes :

$C_{U_t}$  Concentration en  $U_{total}$  (en  $g.l^{-1}$ ) (Uranium enrichi à 92,7 % en  $^{235}U$ ).

$V_f$  Volume final (en l)

$\Delta k_{eff1}$  Réactivité effective présente au moment du 1er pic

$T_2$  Temps de doublement (en ms)

$\omega$  Inverse de la période (en  $s^{-1}$ )

$\dot{E}$  Puissance maximum au sommet du 1er pic (en fissions/s)

$t_1$  temps correspondant au maximum de puissance lors du 1er pic

$t_0$  instant correspondant au début du signal de pression au sein de la solution

$t_p$  instant correspondant au maximum du signal de pression au sein de la solution

$\Delta p$  Onde de pression dynamique sur le fond de la cuve de coeur durant le 1er pic (valeur relative).

$\hat{E}$  énergie intégrée jusqu'à  $t_1$ , instant du maximum de puissance.

#### 4. RELATION PROPOSEE POUR L'ONDE DE PRESSION $p$ EN PHASE LIQUIDE

Conformément au formalisme établi dans la référence 3, les résultats obtenus permettent de proposer la relation suivante liant  $\Delta p$ , variation relative de pression, aux caractéristiques de l'excursion de puissance à savoir  $\omega$  l'inverse de la période et  $\hat{E}$  l'énergie intégrée jusqu'au maximum de puissance :

$$\Delta p = 1,14 \cdot 10^{-19} (\omega \hat{E} - 6,2 \cdot 10^{17})$$

$$\omega = \frac{1}{T_e} \text{ en s}^{-1}$$

avec  $\Delta p$  en bars

$$\hat{E} \text{ en fissions}$$

C'est ce qu'illustre la figure n° 20.

#### 5. PREMIERS ENSEIGNEMENTS DECOULANT DE CES ESSAIS

Grâce à ces expériences, nous disposons d'un modèle simple permettant, dans le cadre de l'analyse de sûreté, de donner une estimation de l'amplitude de l'onde de pression susceptible d'être générée lors d'une excursion de puissance et de s'assurer ainsi par exemple que l'intégrité du conteneur de solution ne risque pas d'être remise en cause.

La relation liant  $\Delta p$  à  $\omega$  et  $\hat{E}$  traduit bien par ailleurs le fait que l'onde de pression dépend à la fois de la rapidité du transitoire de puissance caractérisée par  $\omega$  (inverse de la période) et de l'énergie libérée dans le pic  $\hat{E}$ . c'est-à-dire en quelque sorte de la vitesse de production de bulles de radiolyse.

Sur un plan plus concret, le graphe n° 21 qui illustre l'évolution de l'onde de pression  $\Delta p$  en fonction du temps de doublement  $T_2$  de l'excursion de puissance met en évidence qu'une onde de pression significative ne commence à se manifester dans les solutions fissiles que pour des temps de doublement  $T_2$  inférieurs à 10 ms.

Un autre phénomène intéressant mérite notre attention. Sur certaines figures ont en effet volontairement été reproduites les évolutions du capteur de pression placé au sein de la solution fissile ainsi que celle du capteur de pression placé sur le fond de la cuve de coeur. On peut observer qu'il existe un décalage en temps et en amplitude bien compréhensible entre les deux capteurs compte tenu de leurs positions respectives et de la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu. Mais alors que jusqu'à ce jour on pensait que l'onde de pression apparaissait consécutivement au pic de puissance (en raison de la seule information disponible, à savoir celle du capteur "fond de cuve"), il est maintenant mis en évidence qu'un champ de pression important est créé en même temps que le pic de puissance et qu'il joue probablement un rôle sur la cinétique du pic. Le tableau 1 donne précisément les temps correspondant au début du signal de pression  $t_0$ , au maximum de pression  $t_p$  et au pic de puissance  $t_1$ .

Toutes les hypothèses et théories récemment proposées laissent cependant entendre que les gaz de radiolyse n'apparaissent qu'après le premier pic et que par conséquent seuls les effets liés à l'expansion thermique jouent un rôle dans la limitation du 1er pic.

Les présents résultats laisseraient penser qu'il n'en est rien et mettent également en évidence que la technique que nous avons utilisé pour détecter ce qui a été appelé "seuil d'apparition des gaz de radiolyse" à partir des détecteurs à ultra-sons (réf. 2) est imparfaite. Cette méthode, rappelons-le, consiste à supposer que les ondes ultra-soniques sont perturbées dès que des bulles apparaissent dans la solution fissile et cet instant est donc considéré comme correspondant au seuil de formation des gaz de radiolyse. En fait ce que nous avons détecté par ce procédé est l'apparition de bulles d'une certaine taille c'est-à-dire après croissance ou coalescence puisque le temps d'apparition des bulles mesuré par cette technique est toujours postérieur à celui du maximum du 1er pic de puissance.

L'onde de pression mesurée dans les présentes expériences par le capteur de pression en phase liquide représente donc sans aucun doute la réponse la plus correcte du champ de pression créé localement par l'apparition rapide de microbulles de gaz de radiolyse, lesquelles ne sont détectées par le dispositif à ultra-sons qu'après accroissement de leur taille ou coalescence avec d'autres microbulles.

Il est raisonnable de dire qu'à la lumière des résultats obtenus sur SILENE de nouveaux modèles pourraient être proposés pour expliquer les mécanismes physico-chimiques régissant la formation par radiolyse de radicaux libres le long des trajectoires des fragments de fission, la formation de microbulles et ensuite leur évolution (croissance, coalescence, migration...).

Il serait certainement intéressant sur un plan purement scientifique d'étudier ce qui pourrait être désigné sous le vocable d'"équation d'état des solutions fissiles" mais l'effort à y consacrer par rapport à un objectif purement "sûreté" ne peut être envisagé sauf si des partenaires étrangers disposant de moyens plus importants s'avéraient intéressés dans une telle aventure.

Configuration SILENE	n° expé- rience	Vf $\rho$	T <sub>2</sub> 10 <sup>-3</sup> s	$\omega$ s <sup>-1</sup>	$\dot{E}_{\text{max}}$ fission.s <sup>-1</sup>	$\hat{E}$ fissions	$\Delta p$ bars	$\Delta k = k - 1$ $\frac{\text{eff}_2}{\text{p.c.m}}$	$\frac{\text{eff}_1}{\text{\$}}$	t <sub>1</sub> ler pic	t <sub>0</sub>	t <sub>p</sub>
Ecran de plomb Cu <sub>t</sub> =61 g.l <sup>-1</sup>	S1-152	39,46	2,3	301	1,63 10 <sup>19</sup>	8,83 10 <sup>16</sup>	3,22	1975	2,54	1,6285	1,618	1,6305
	S2-152	40,24	1,75	396	2,74 10 <sup>19</sup>	1,23 10 <sup>17</sup>	5,37	2350	3,02	1,3015	1,1940	1,3030
	S1-153	38,17	5,4	128	3,38 10 <sup>18</sup>	5,02 10 <sup>16</sup>	0,57	1290	1,66	1,585	1,568	1,594
	S2-153	40,50	1,56	444	3,32 10 <sup>19</sup>	1,27 10 <sup>17</sup>	6,35	2540	3,26	1,2025	1,1915	1,2040
sans écran Cu <sub>t</sub> =71 g.l <sup>-1</sup>	S1-169	40,42	2,2	315	1,38 10 <sup>19</sup>	7,55 10 <sup>16</sup>	2,7	1941	2,44	1,1205	1,1190	1,1230
	S2-169	41,01	1,8	385	2,11 10 <sup>19</sup>	9,47 10 <sup>16</sup>	4,17	2195	2,76	1,3245	1,3210	1,3265
	S3-169	39,43	4,3	161	3,88 10 <sup>18</sup>	4,6 10 <sup>16</sup>	0,64	1382	1,74	6,3400	6,342	6,3480
	S4-169	41,02	1,8	392	2,19 10 <sup>19</sup>	9,6 10 <sup>16</sup>	4,28	2195	2,76	1,3370	1,3355	1,3390
	S5-169	38,16	80	8,66	2,44 10 <sup>16</sup>	6,4 10 <sup>15</sup>	-	798	1,00	4,80	-	-
	S2-173	41,09	1,6	442	2,71 10 <sup>19</sup>	1,13 10 <sup>17</sup>	5,47	2370	2,98	1,2570	1,2550	1,2580

TABLEAU 1

Dispositif de commande  
de la barre

Barre de réactivité

Canal axial

Solution fissile

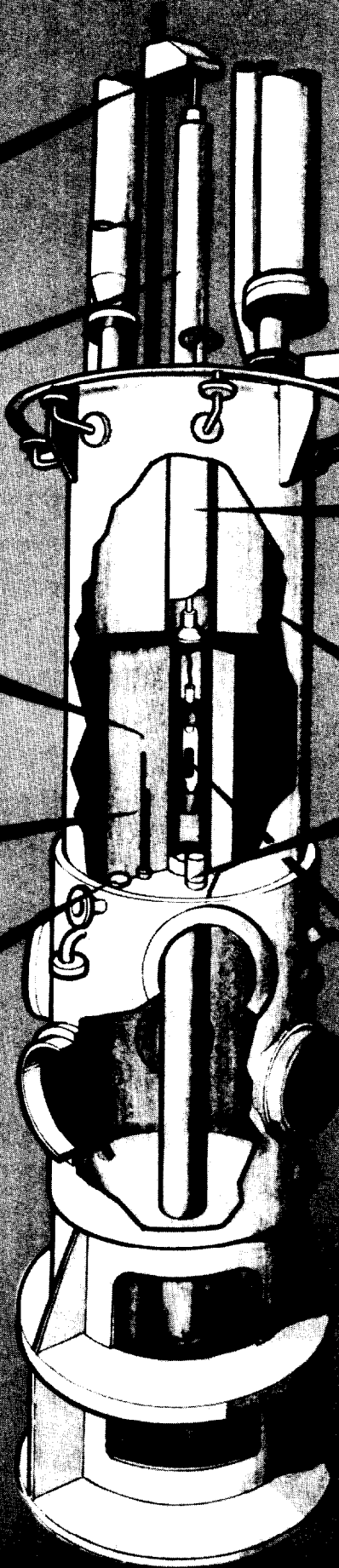
Dispositif  
de mesure  
de niveau

Thermocouples

Capteur  
de pression

Capsule d'essai  
sous fourreau  
de polyéthylène

Schéma du cœur de SILENE



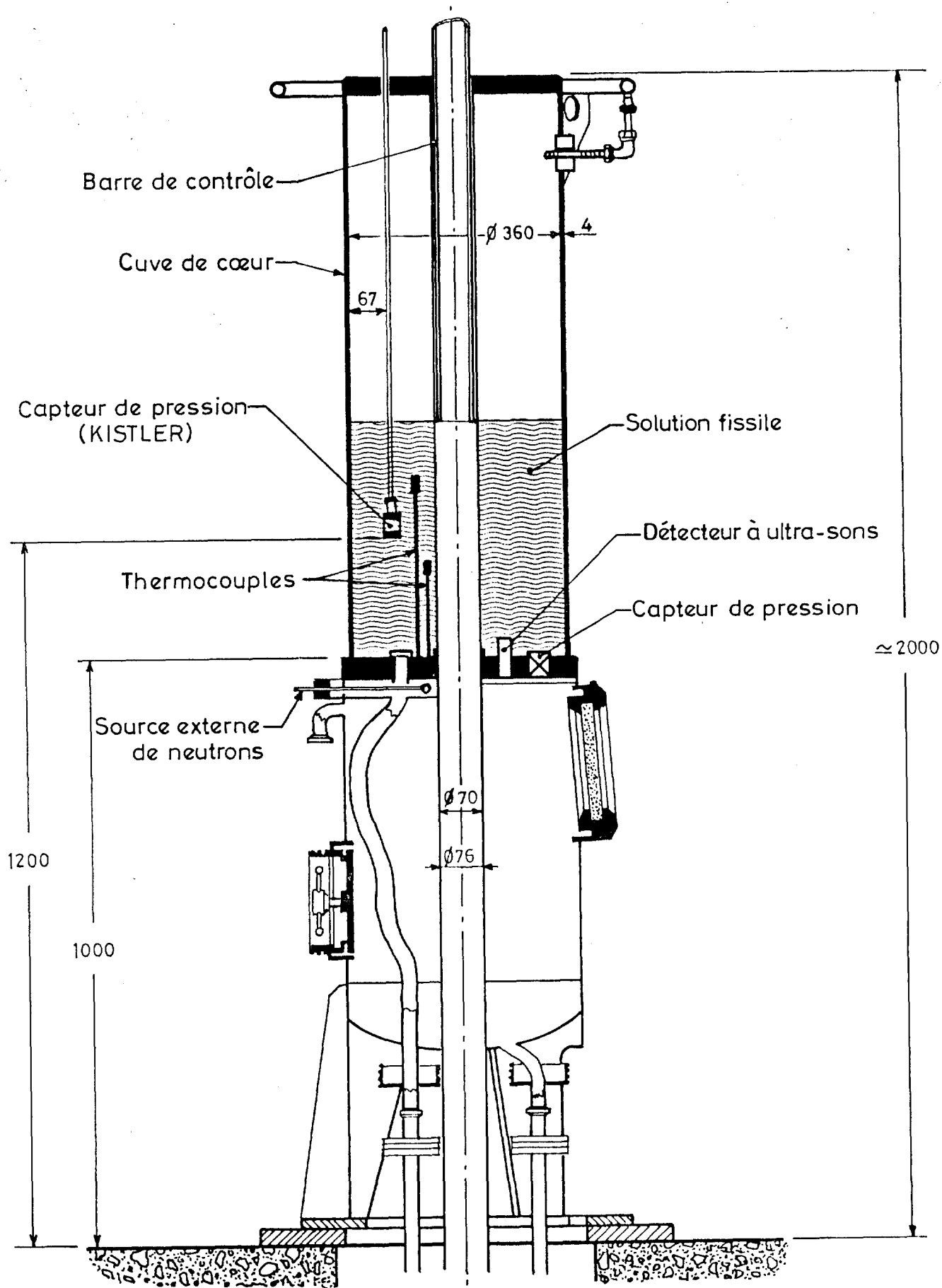


FIG. 2 : SILENE - Dispositif expérimental

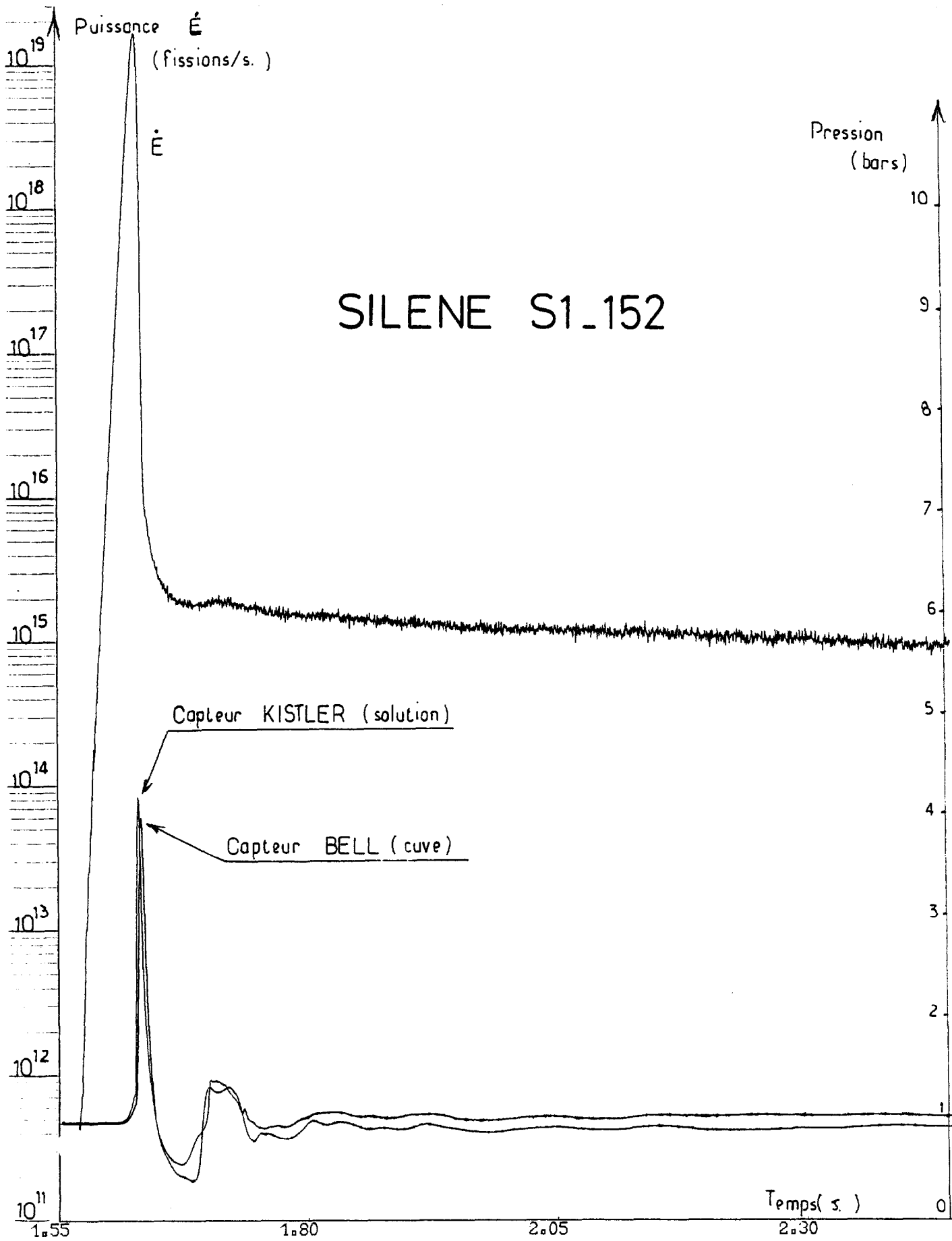


FIG. 3 - SILENE - Enregistrement des signaux de pression

- capteur KISTLER au sein de la solution
- capteur BELL sur le fond de la cuve de coeur

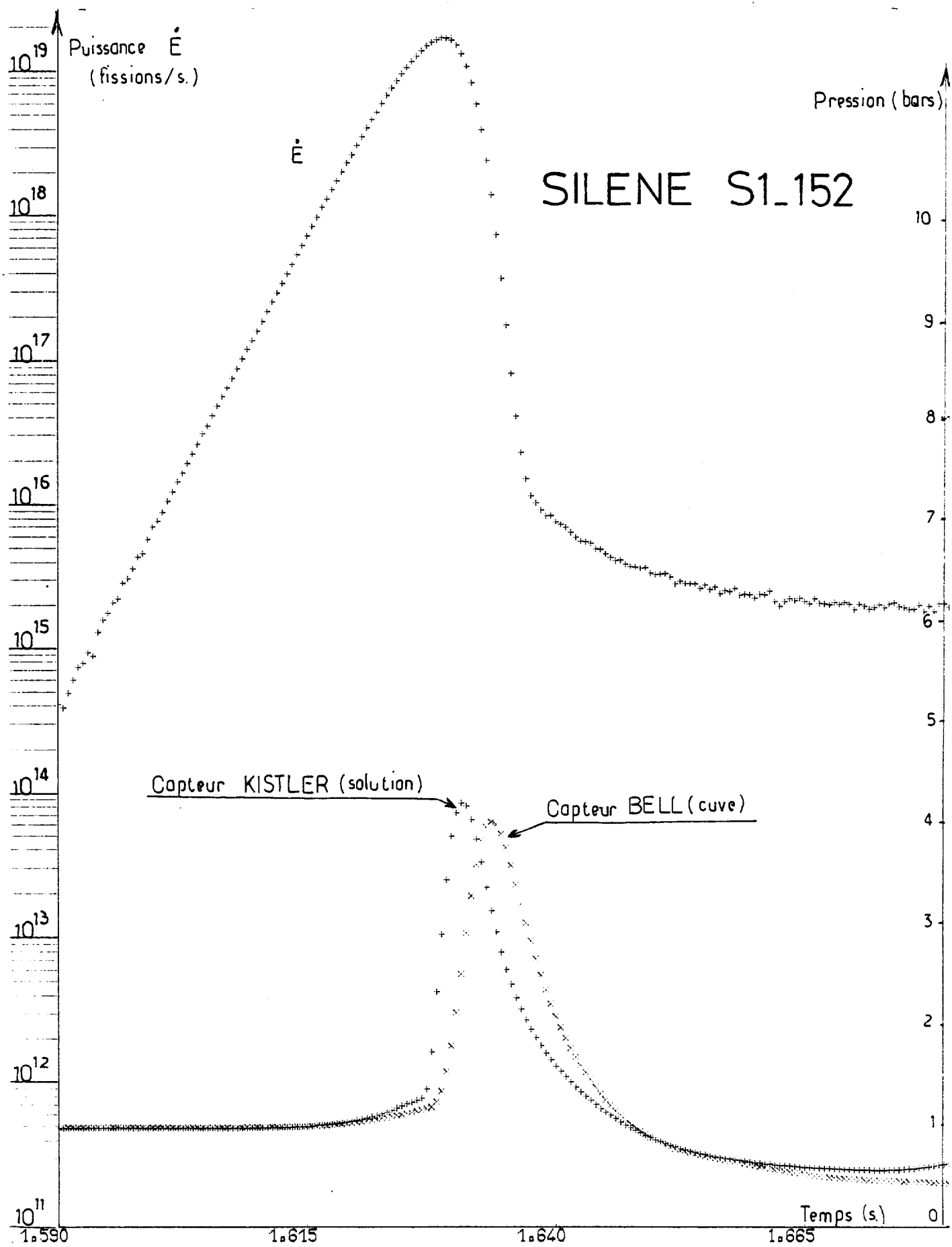


FIG. 4 - SILENE - Enregistrement des signaux de pression  
 - capteur KISTLER au sein de la solution  
 - capteur BELL sur le fond de la cuve de coeur  
 - Détail du pic -

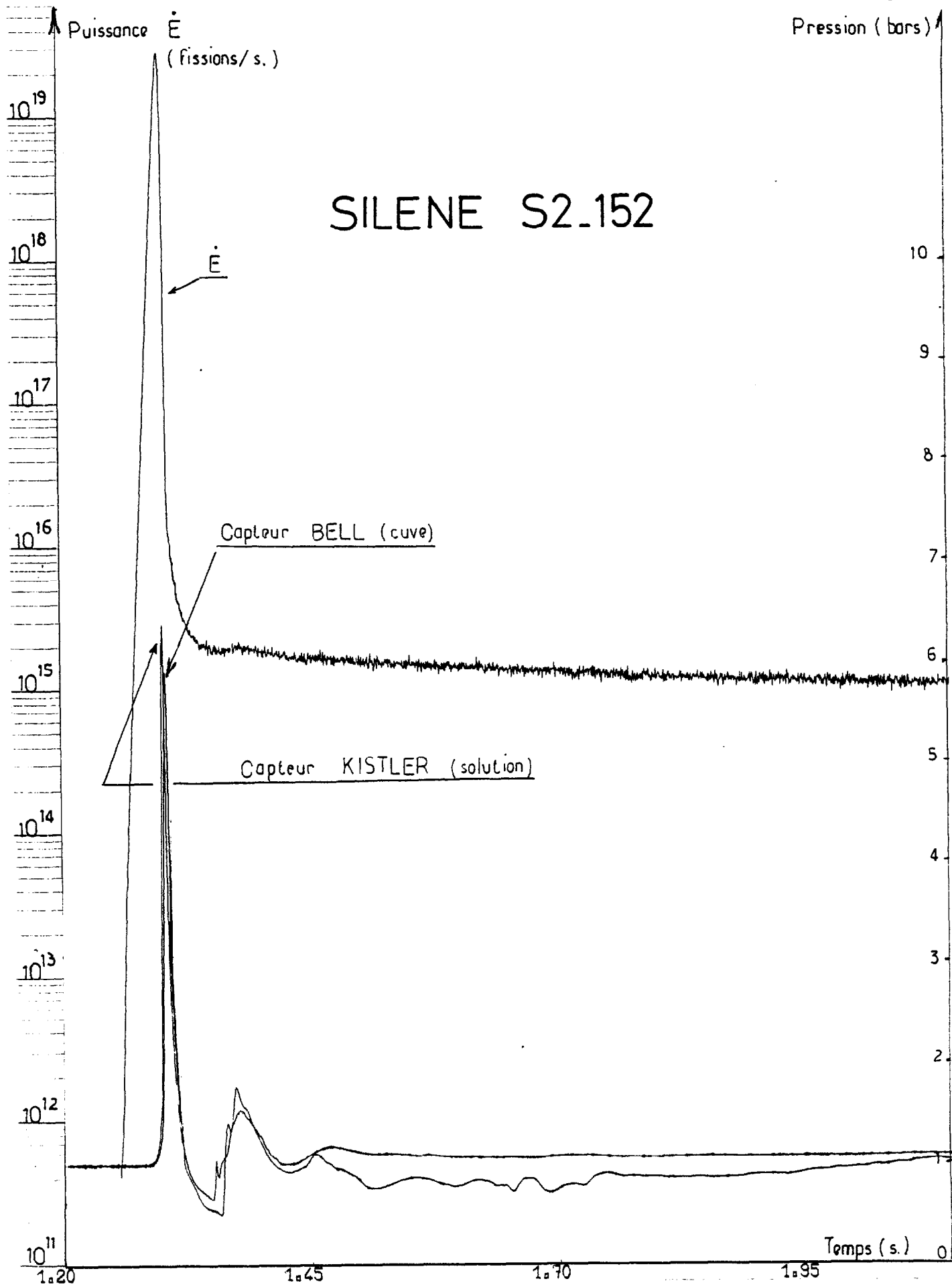


FIG. 5 - SILENE - Enregistrement des signaux de pression

- capteur KISTLER au sein de la solution
- capteur BELL sur le fond de la cuve de coeur

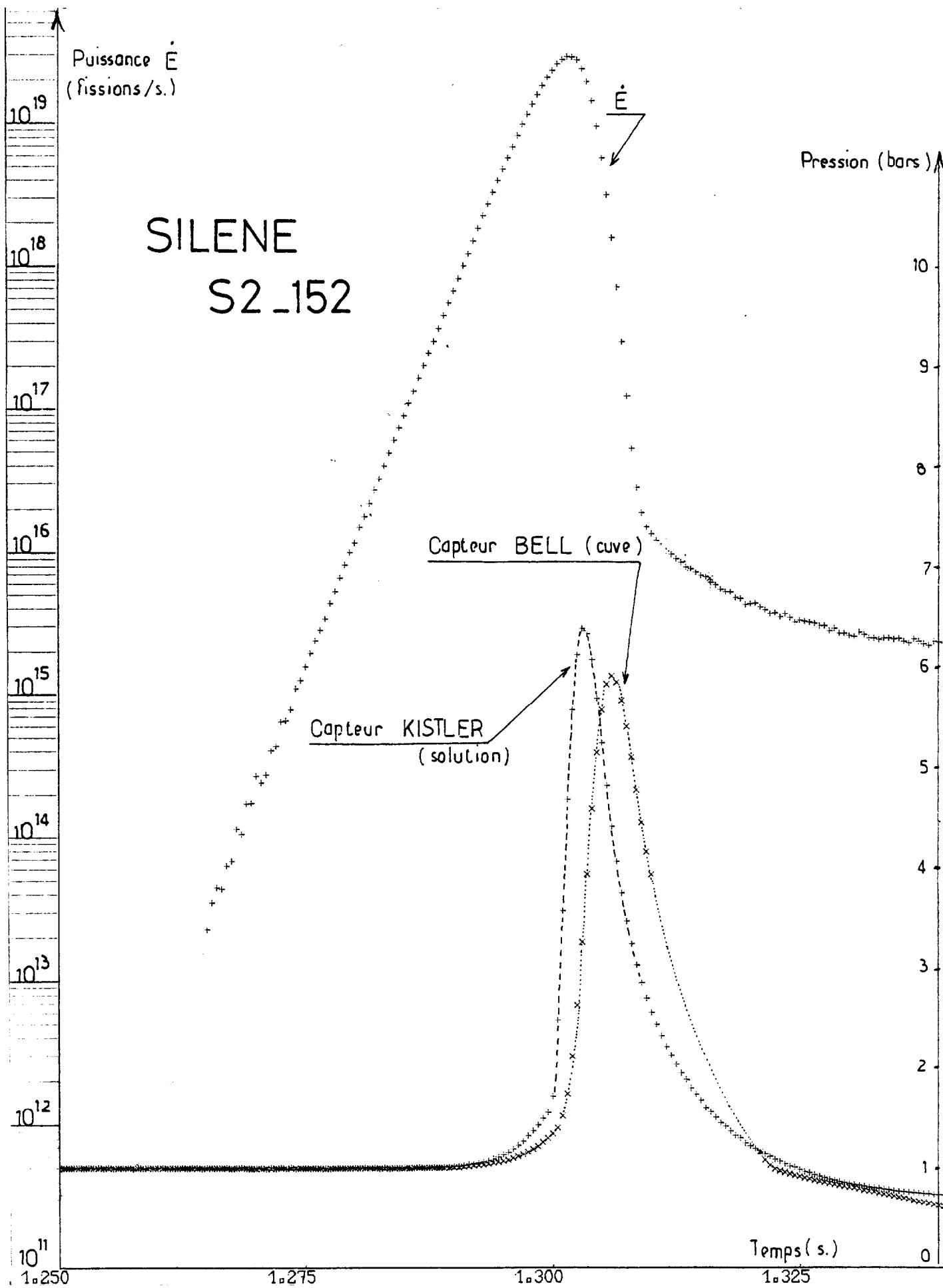


FIG. 6 - SILENE - Enregistrement des signaux de pression  
 - capteur KISTLER au sein de la solution  
 - capteur BELL sur le fond de la cuve de coeur  
 Détail du pic

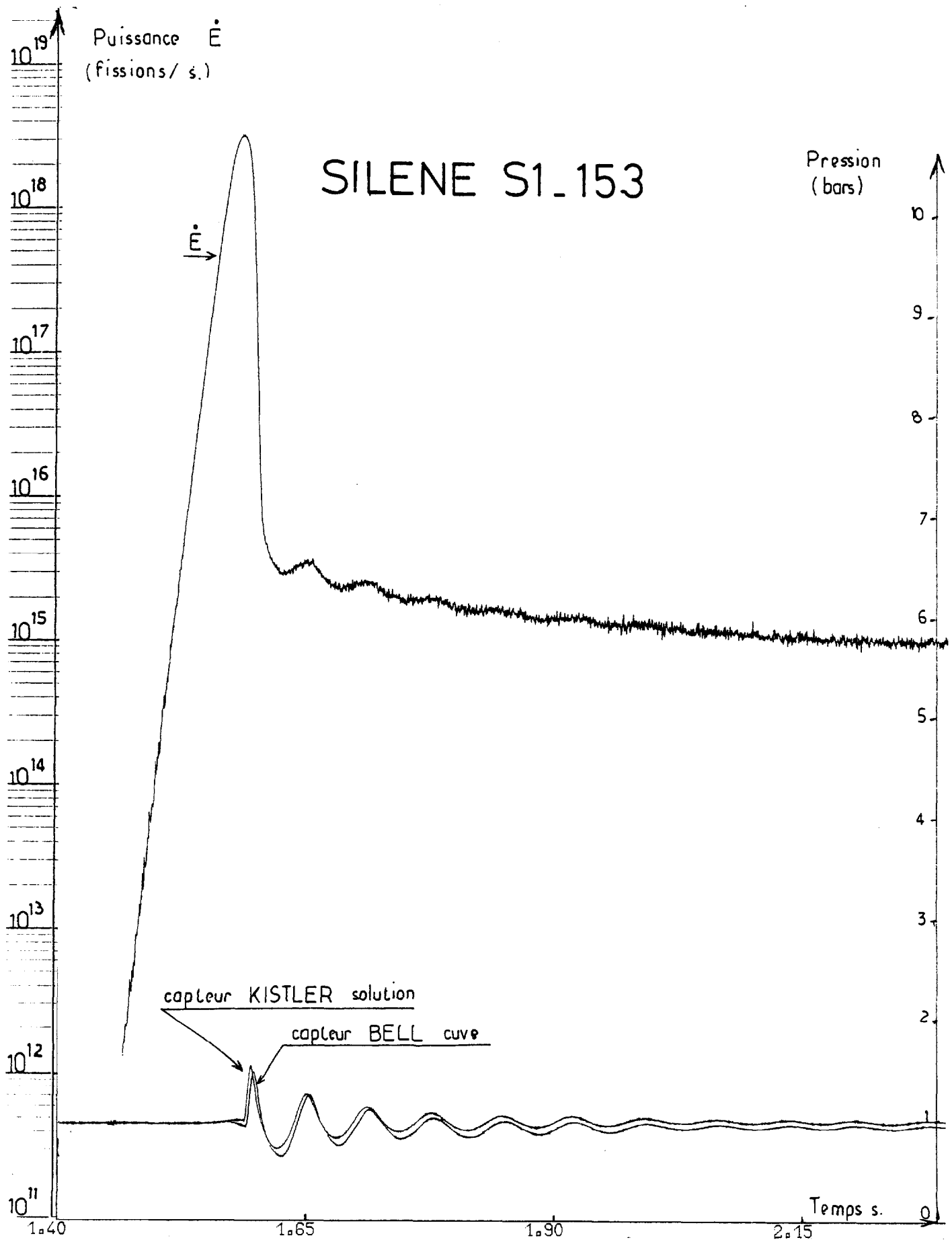


FIG. 7 - SILENE - Enregistrement des signaux de pression

- capteur KISTLER au sein de la solution
- capteur BELL sur le fond de la cuve de coeur

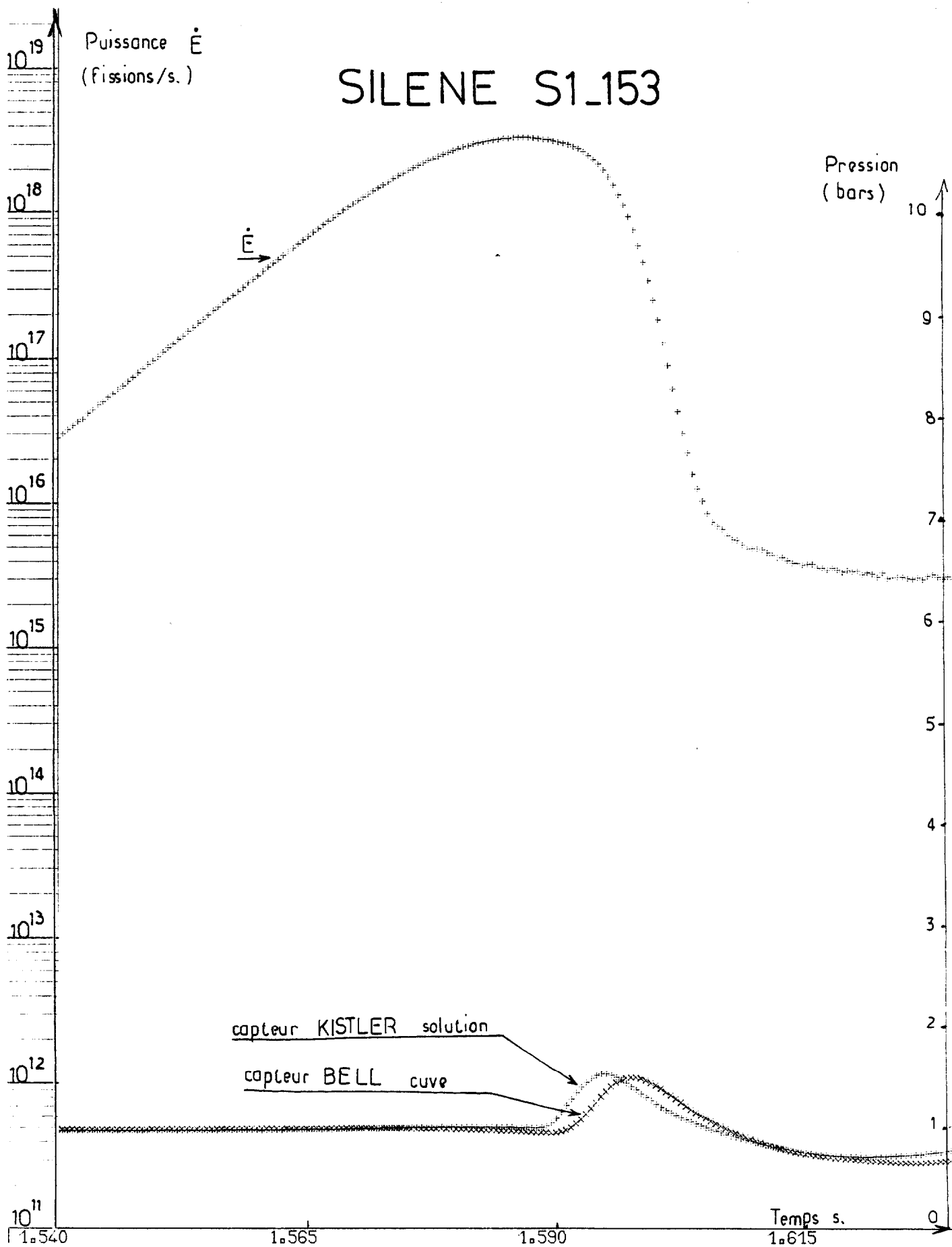


FIG. 8 - SILENE - Enregistrement des signaux de pression

- capteur KISTLER au sein de la solution
  - capteur BELL sur le fond de la cuve de coeur
- Détail du pic

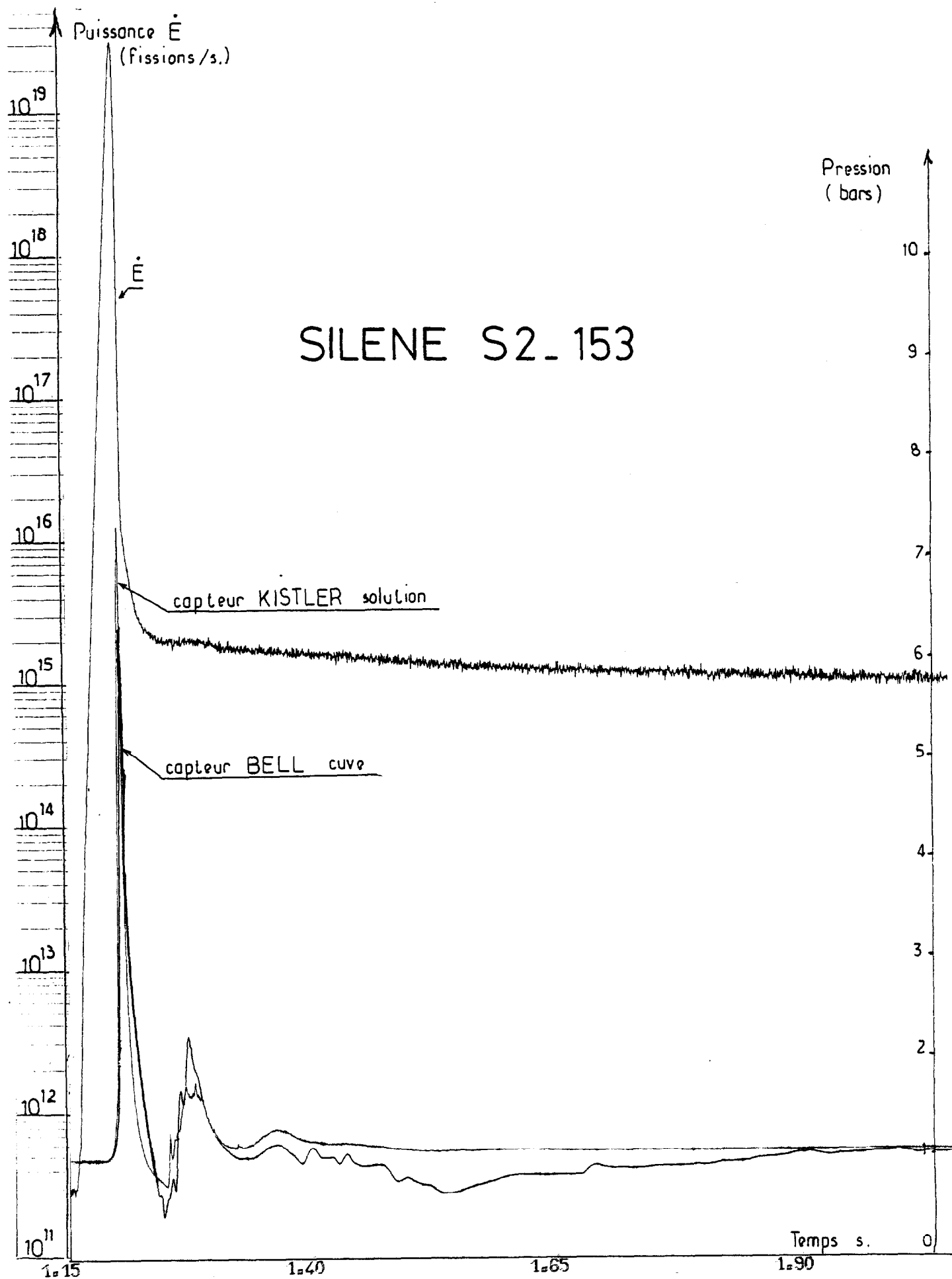


FIG. 9 - SILENE - Enregistrement des signaux de pression  
 - capteur KISTLER au sein de la solution  
 - capteur BELL sur le fond de la cuve de coeur

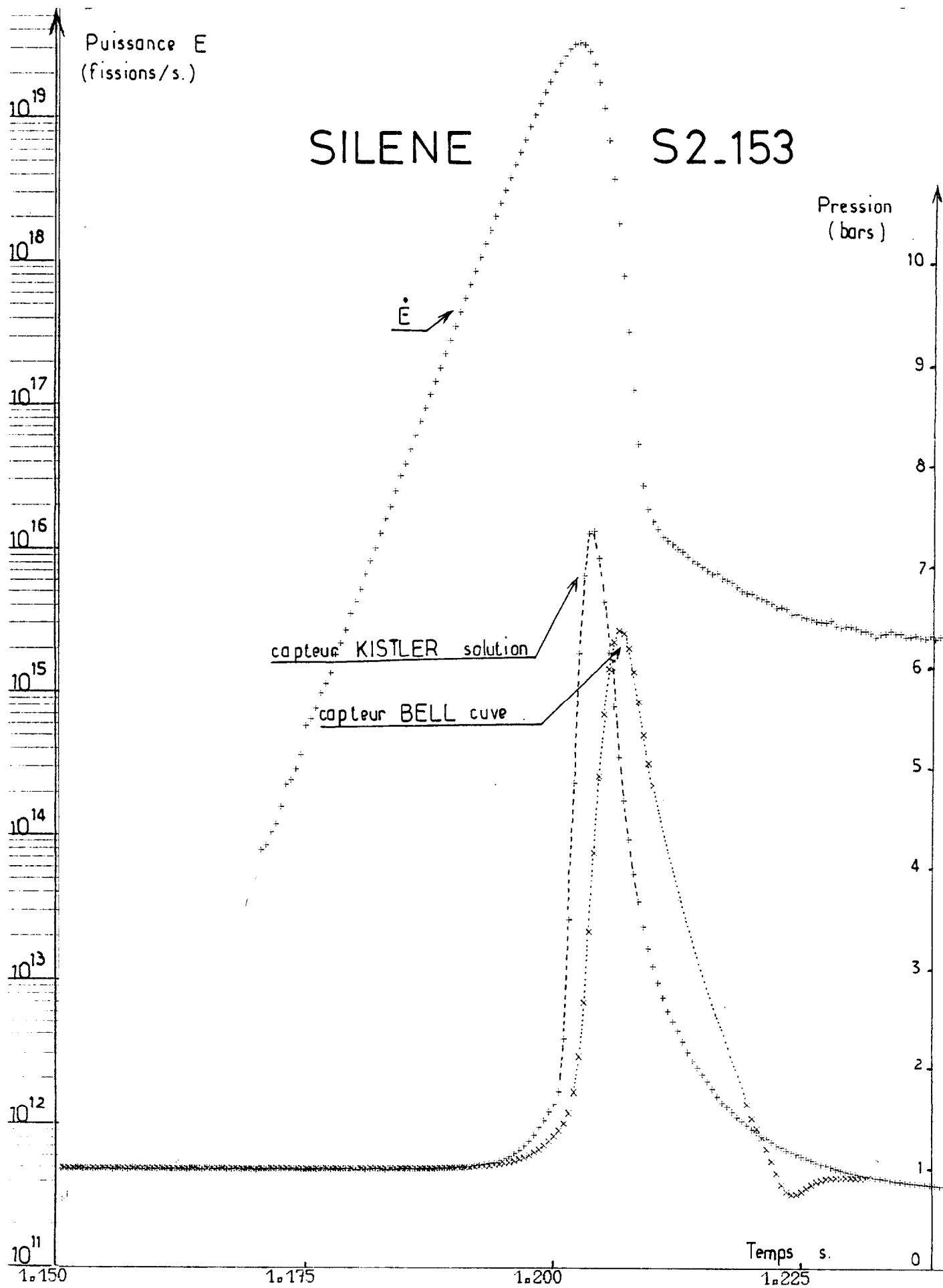


FIG. 10 - SILENE - Enregistrement des signaux de pression

- capteur KISTLER au sein de la solution
- capteur BELL sur le fond de la cuve de coeur

Détail du pic

Puissance E  
fissions.sec<sup>-1</sup>

SILENE S1\_169

Pression  
(bars)

8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

Temps (sec)

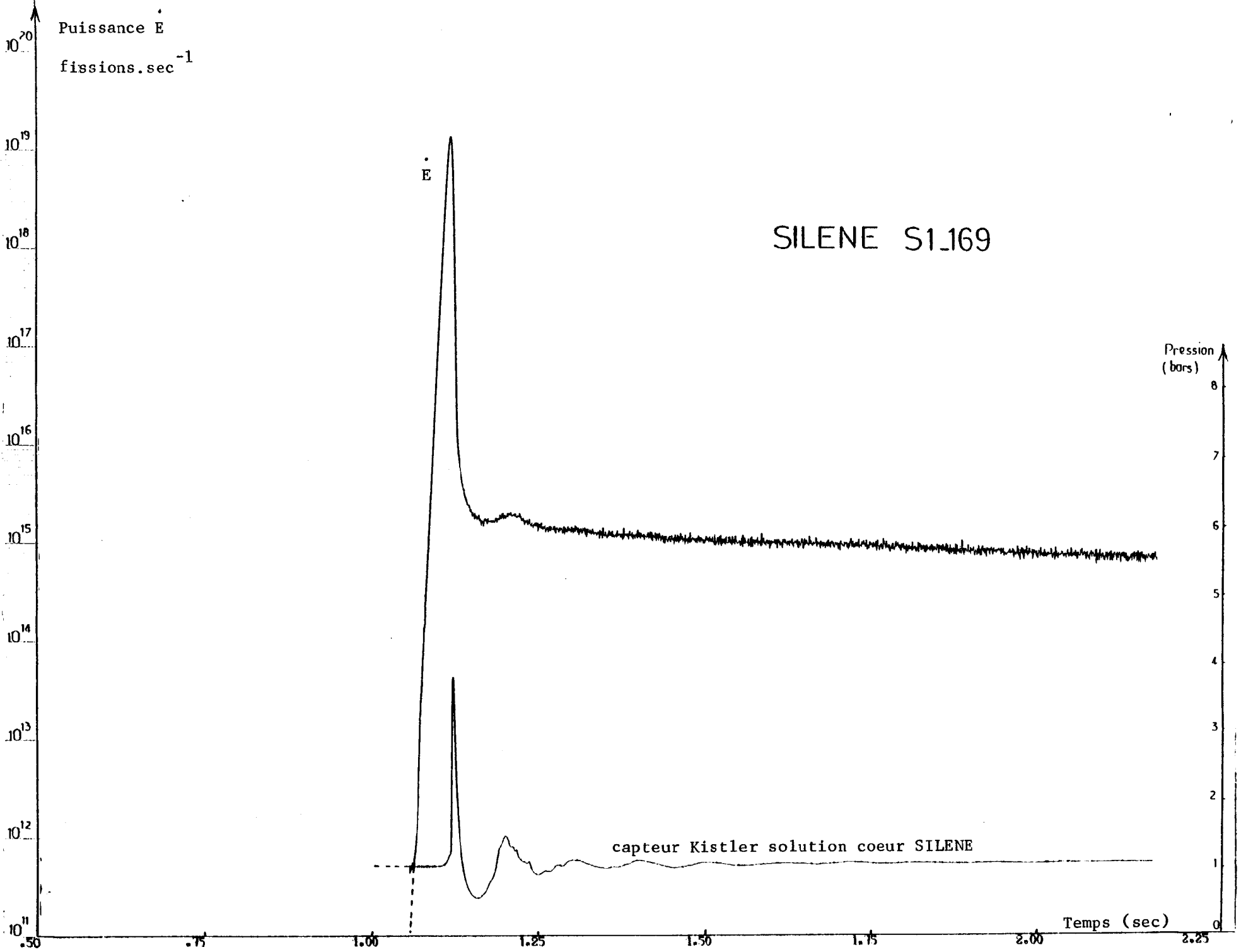


FIG.11 - SILENE

Evolution de la puissance réacteur et du signal de pression  
au sein de la solution fissile (capteur KISTLER)

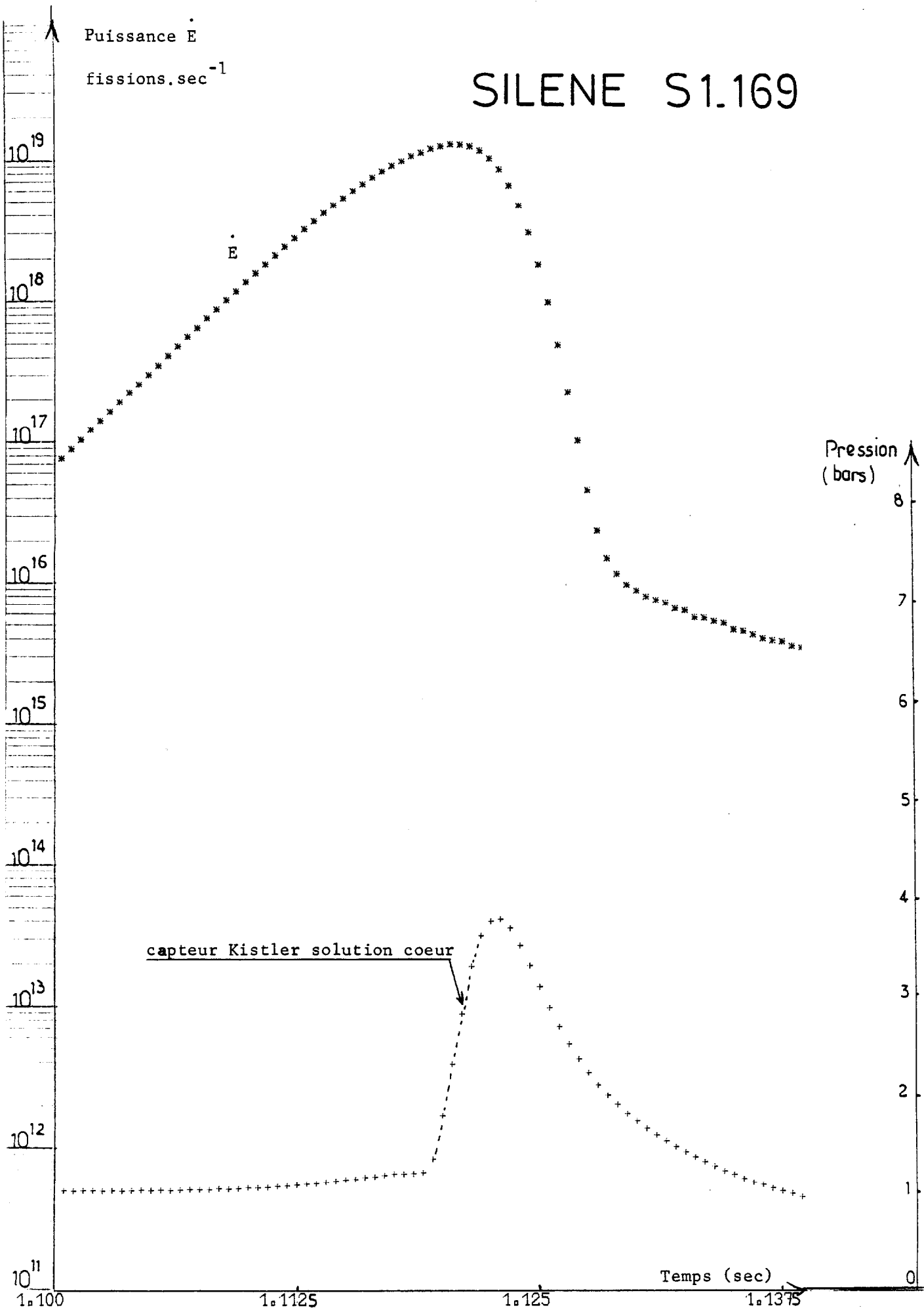
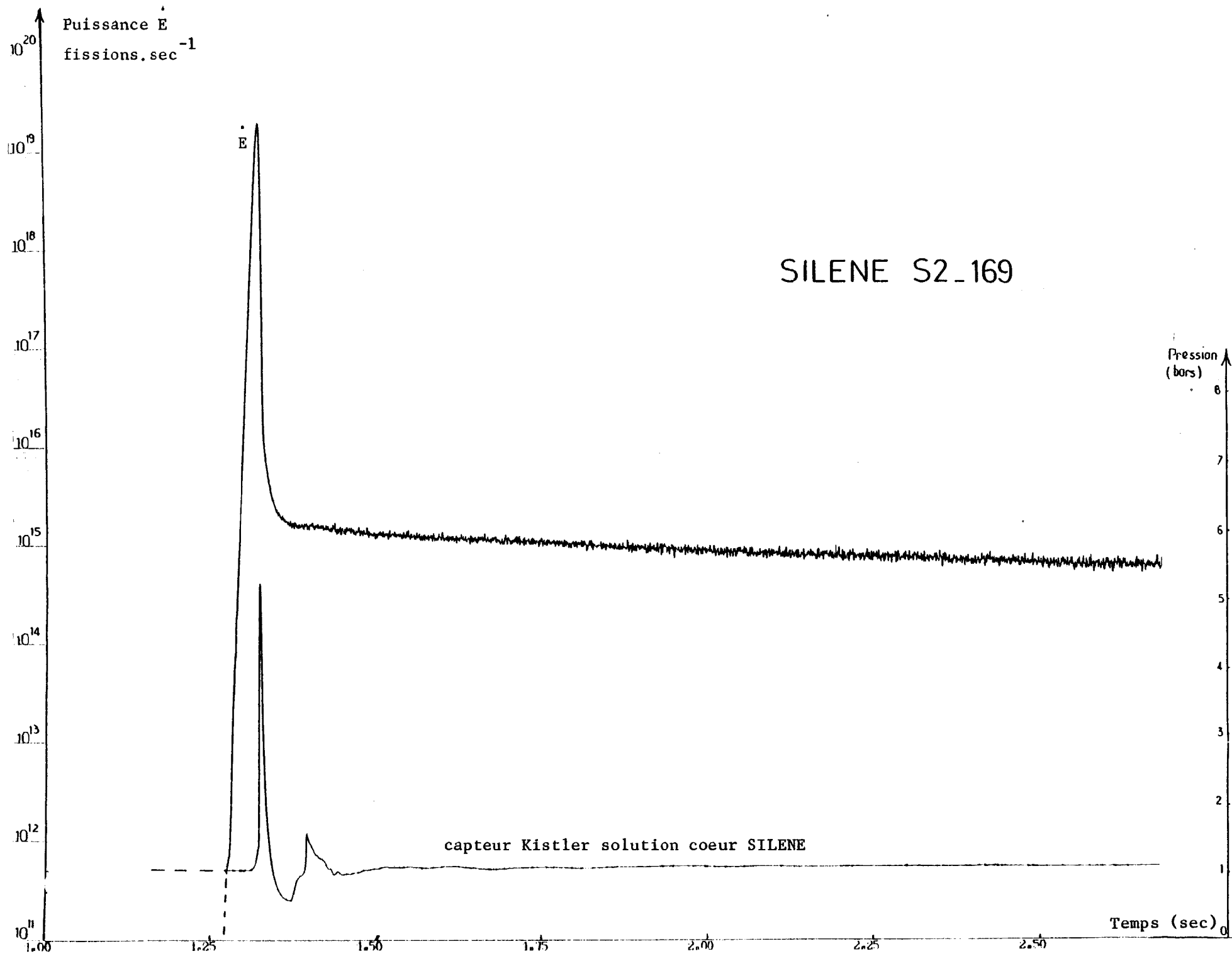


FIG. 12 - SILENE  
 Evolution de la puissance réacteur et du signal de pression  
 au sein de la solution fissile (capteur KISTLER)  
 - détail 1<sup>er</sup> pic

FIG. 13 - SILENE  
Evolution de la puissance réacteur et du signal de pression  
au sein de la solution fissile (capteur KISTLER)



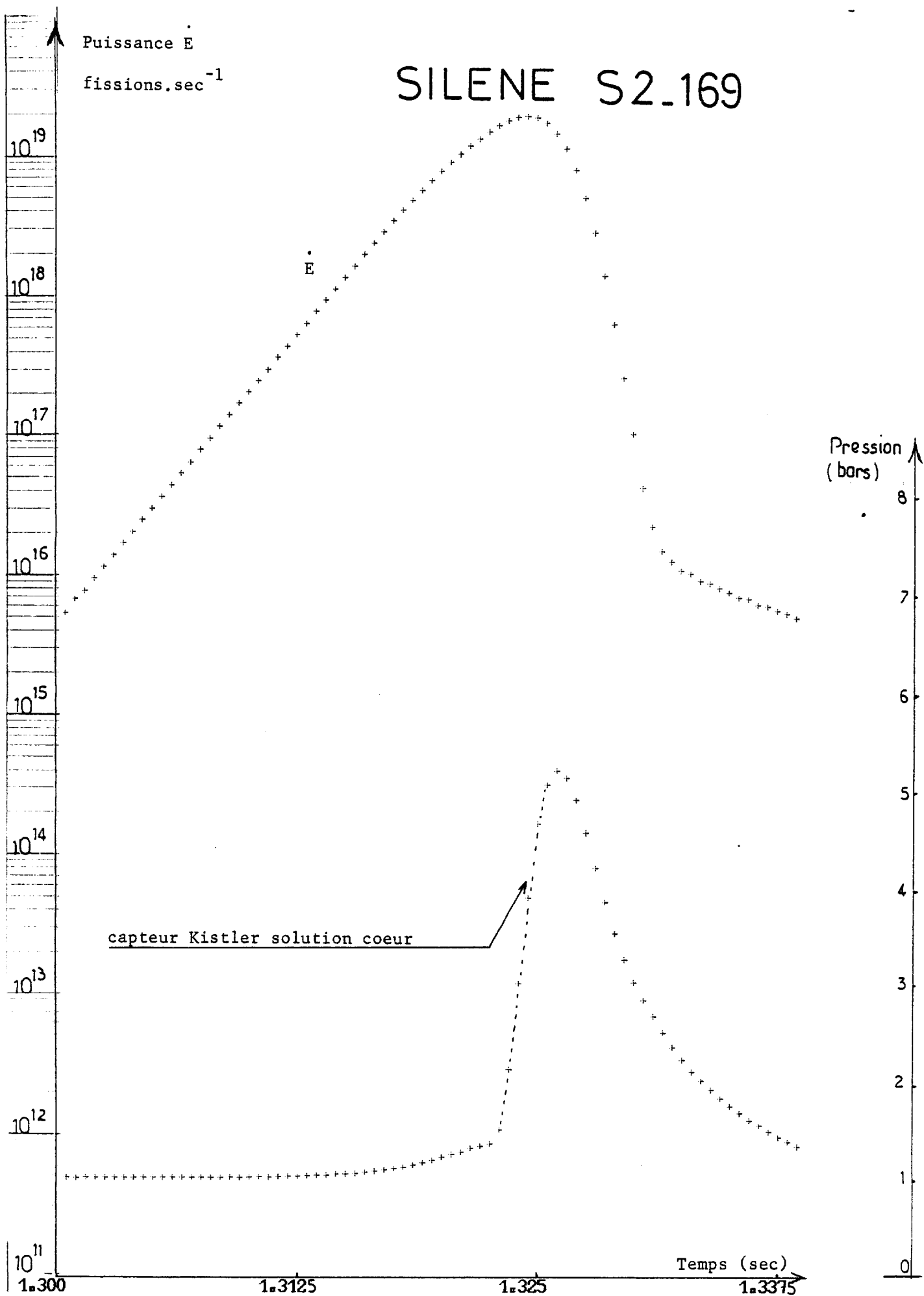


FIG. 14 - SILENE

Evolution de la puissance réacteur et du signal de pression  
 au sein de la solution fissile (capteur KISTLER)  
 - détail 1<sup>er</sup> pic

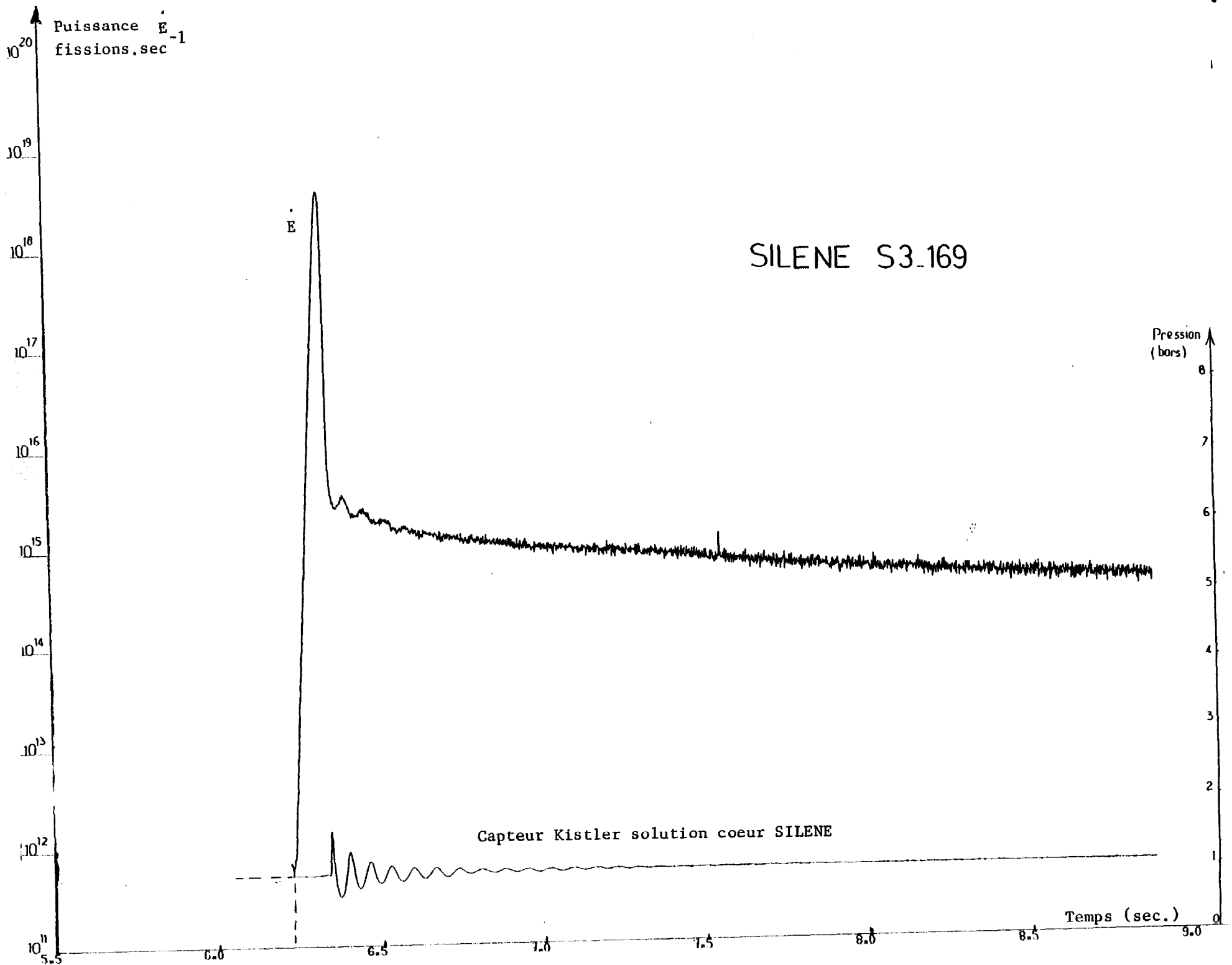
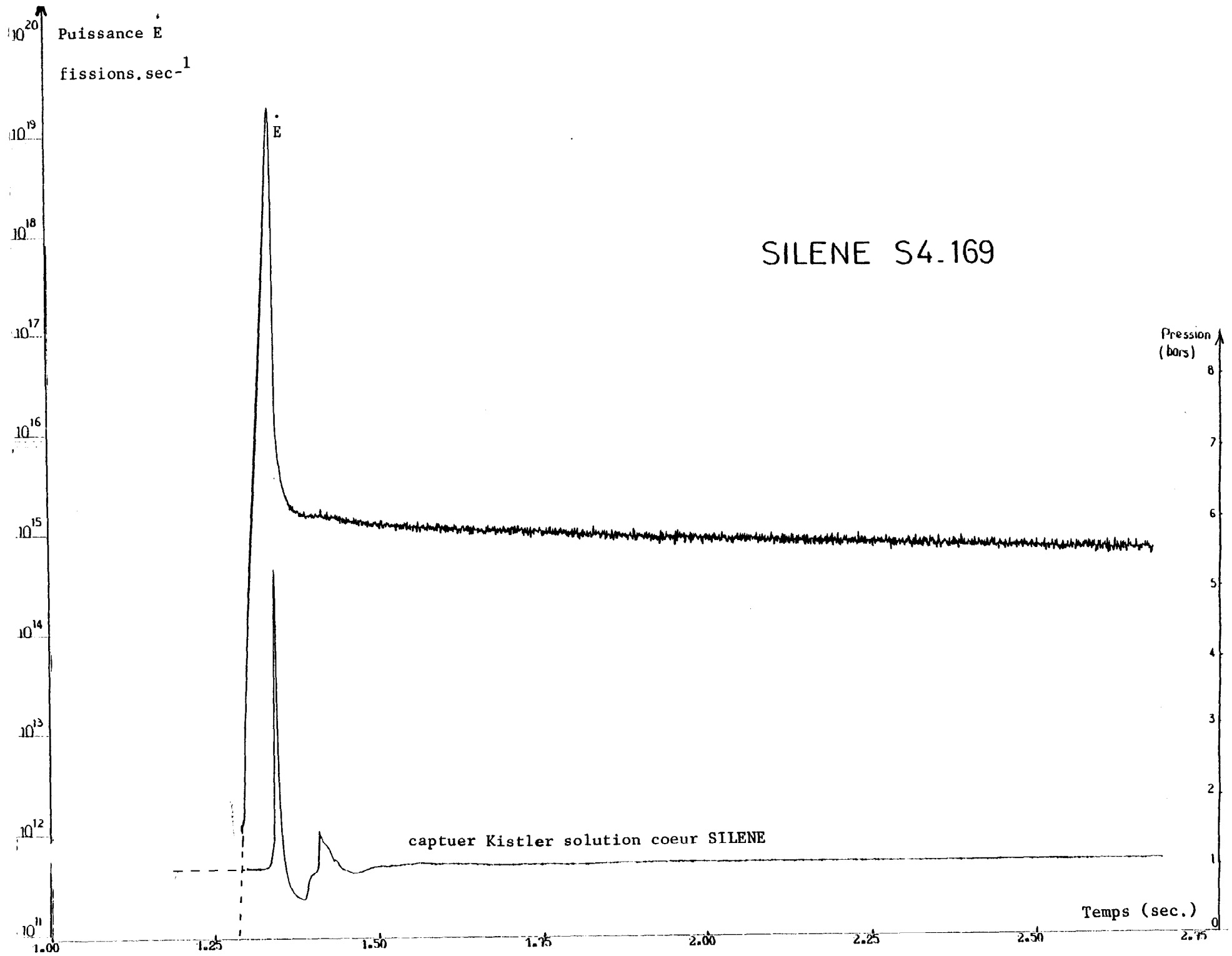


FIG. 15 - SILENE

Evolution de la puissance réacteur et du signal de pression  
au sein de la solution fissile (capteur KISTLER)

FIG. 16 - SILENE  
Evolution de la puissance réacteur et du signal de pression  
au sein de la solution fissile (capteur KISTLER)



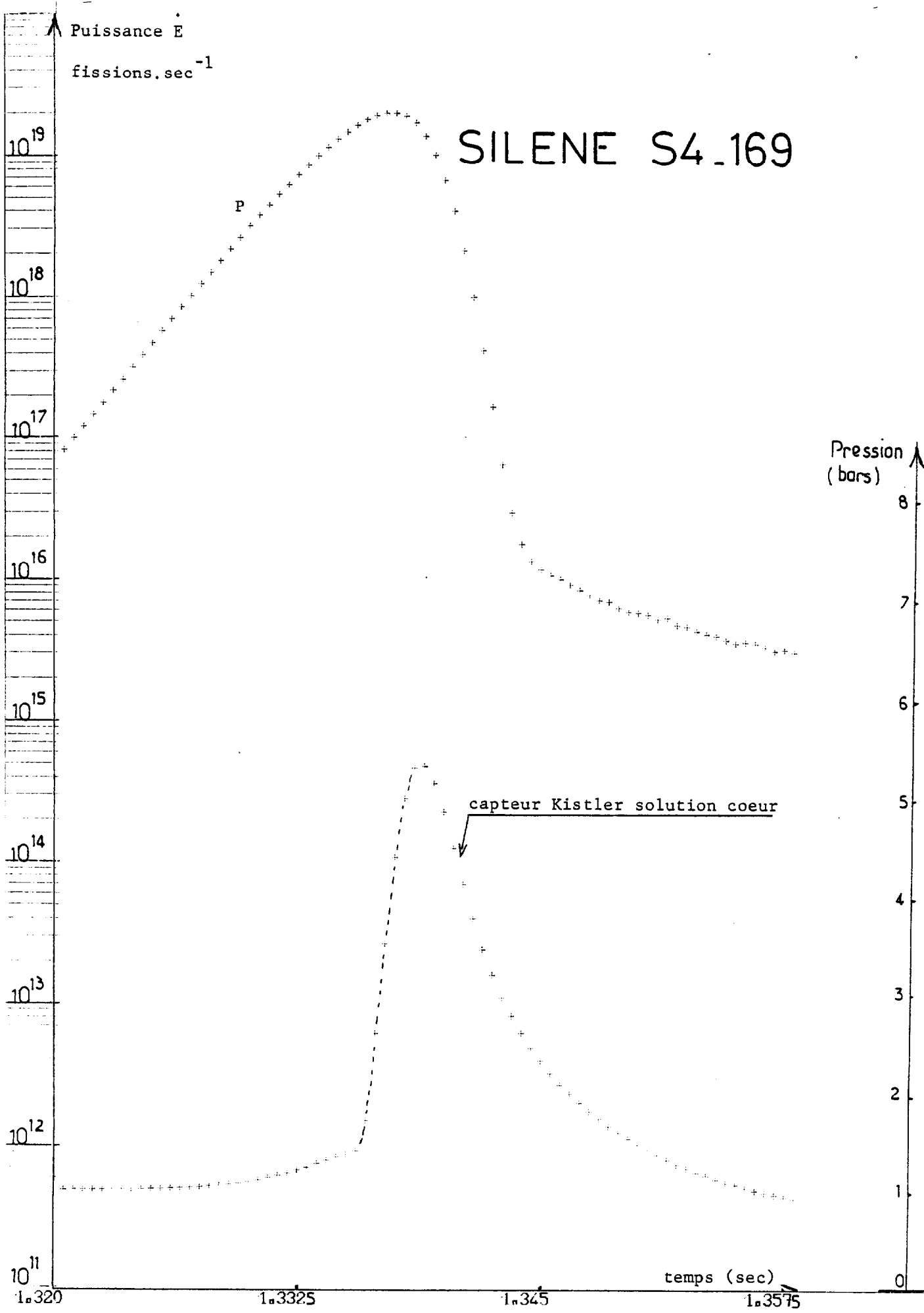


FIG. 17 - SILENE  
 Evolution de la puissance réacteur et du signal de pression  
 au sein de la solution fissile (capteur KISTLER)  
 - détail 1<sup>er</sup> pic

# SILENE S2.173

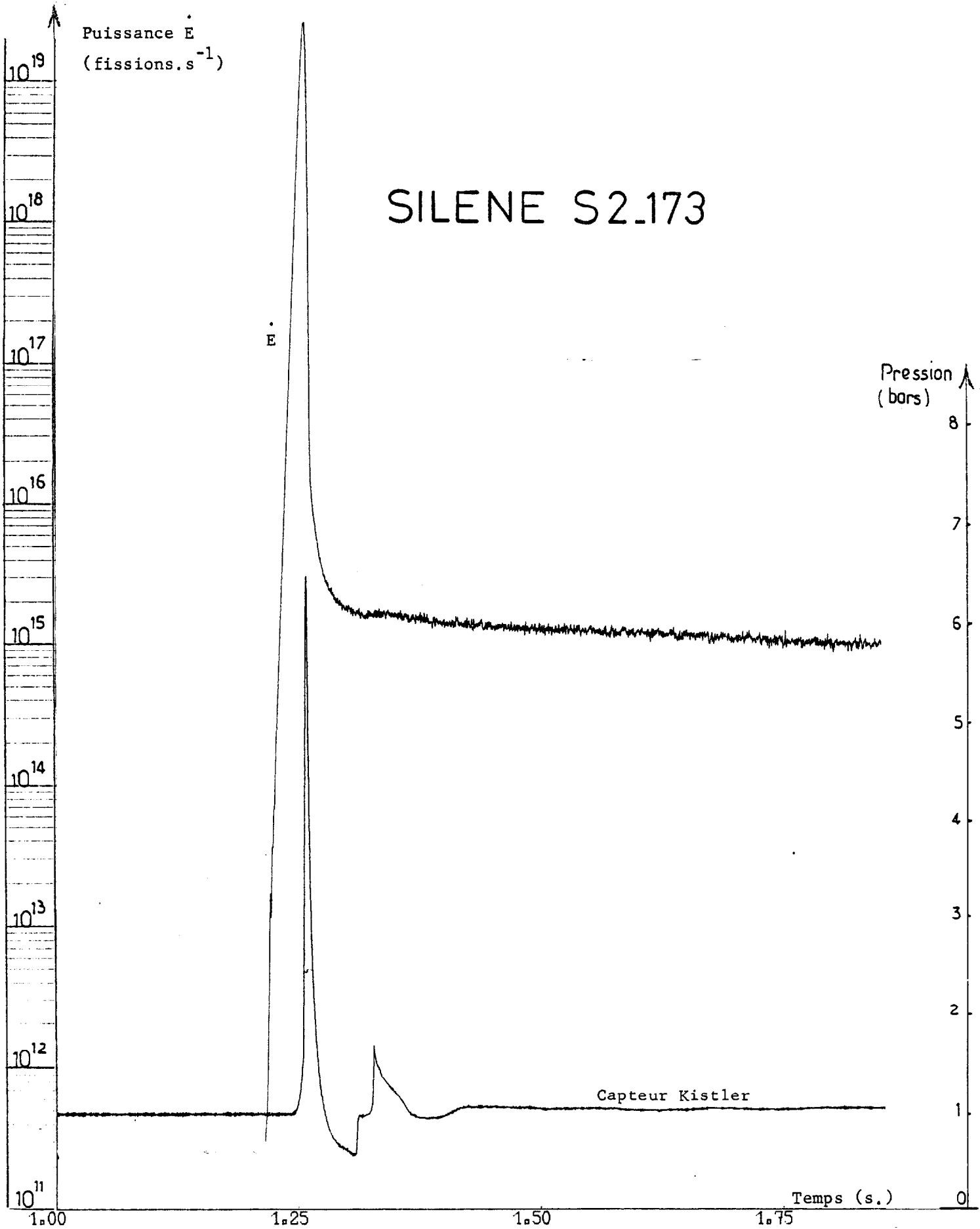


FIG. 18 - SILENE

Evolution de la puissance réacteur et du signal de pression  
au sein de la solution fissile (capteur KISTLER)

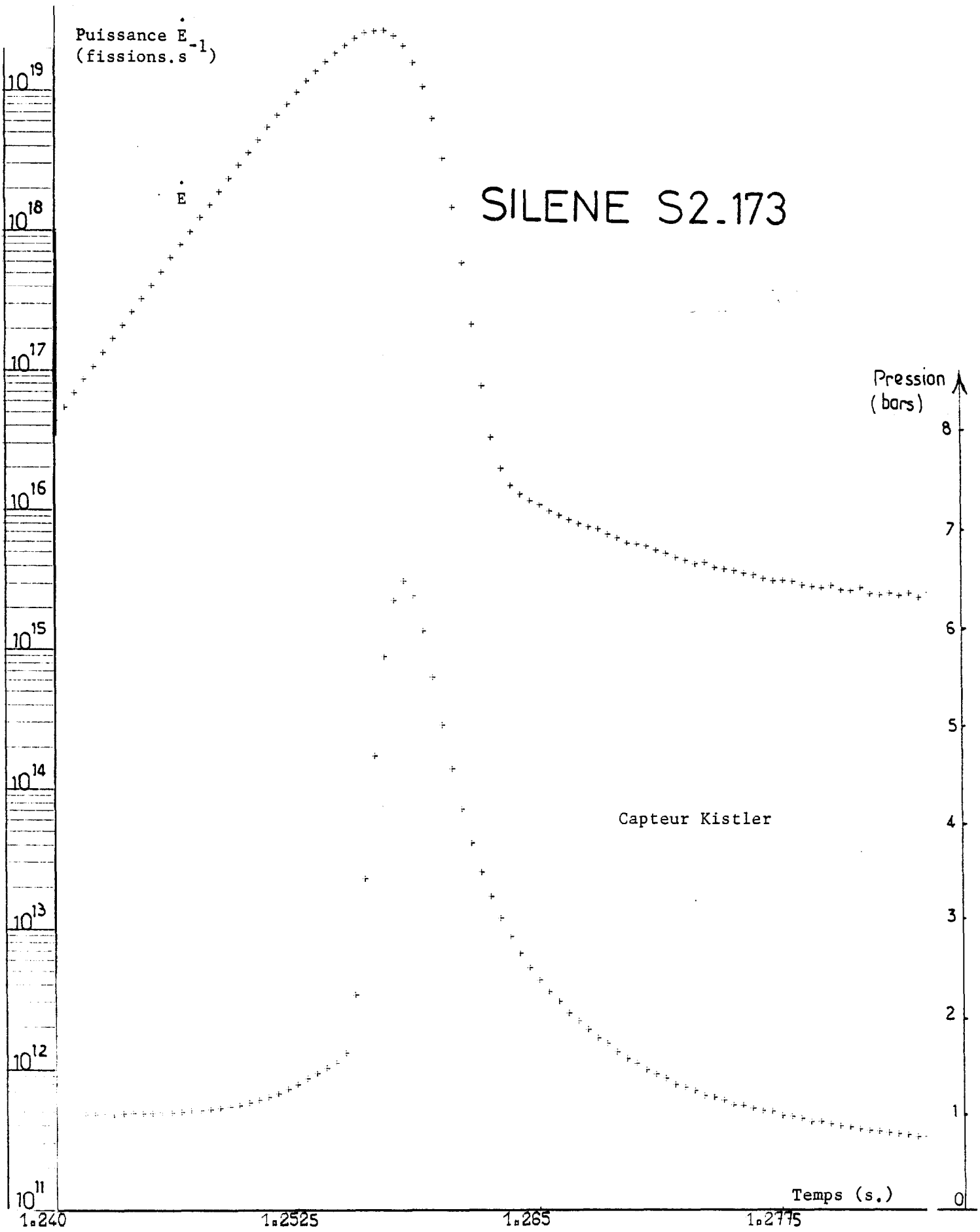


FIG. 19 - SILENE  
 Evolution de la puissance réacteur et du signal de pression  
 au sein de la solution fissile (capteur KISTLER)  
 - détail 1<sup>er</sup> pic

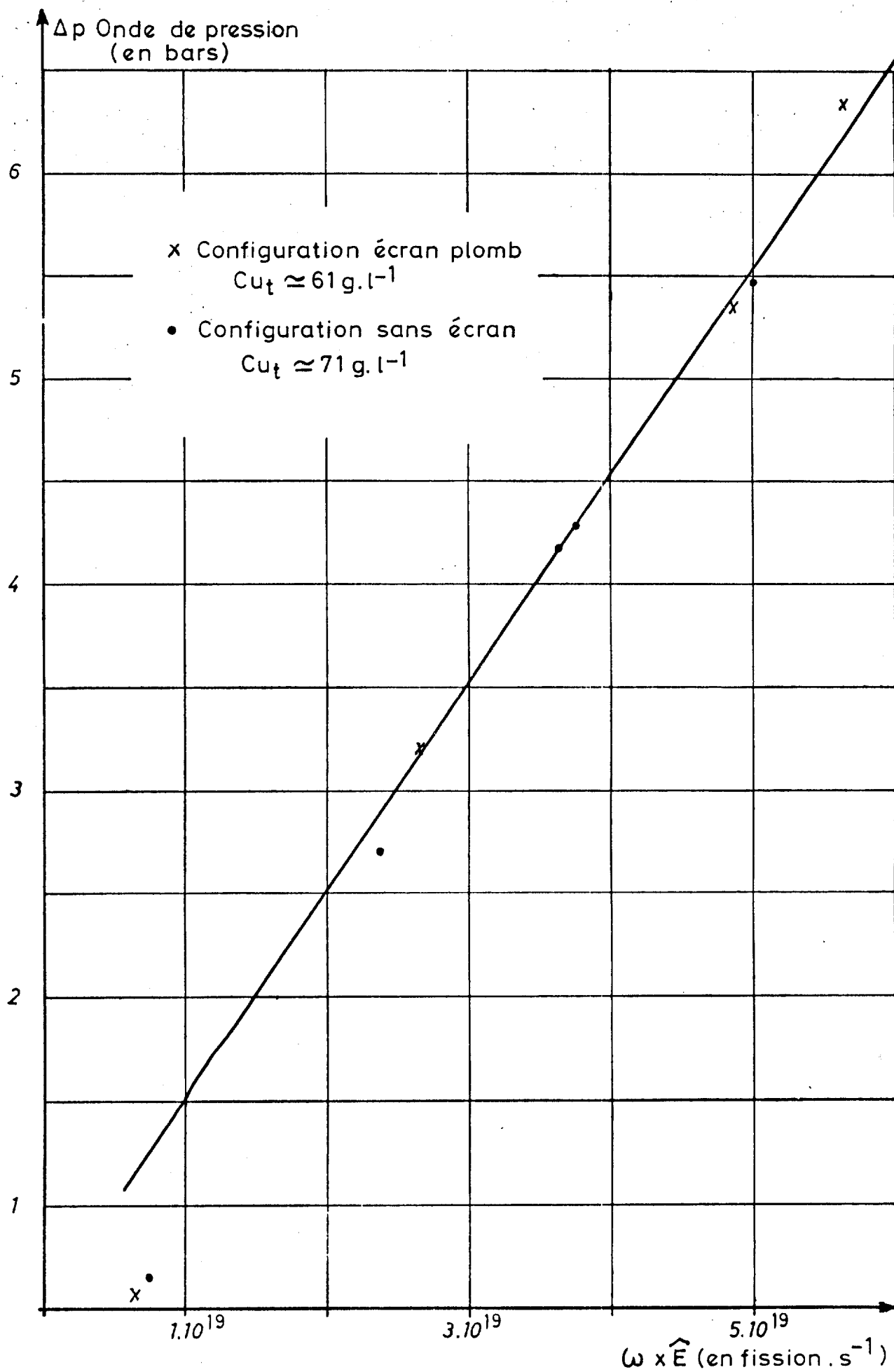


Fig. 20\_SILENE -  $\Delta p = f(\omega \times \hat{E})$

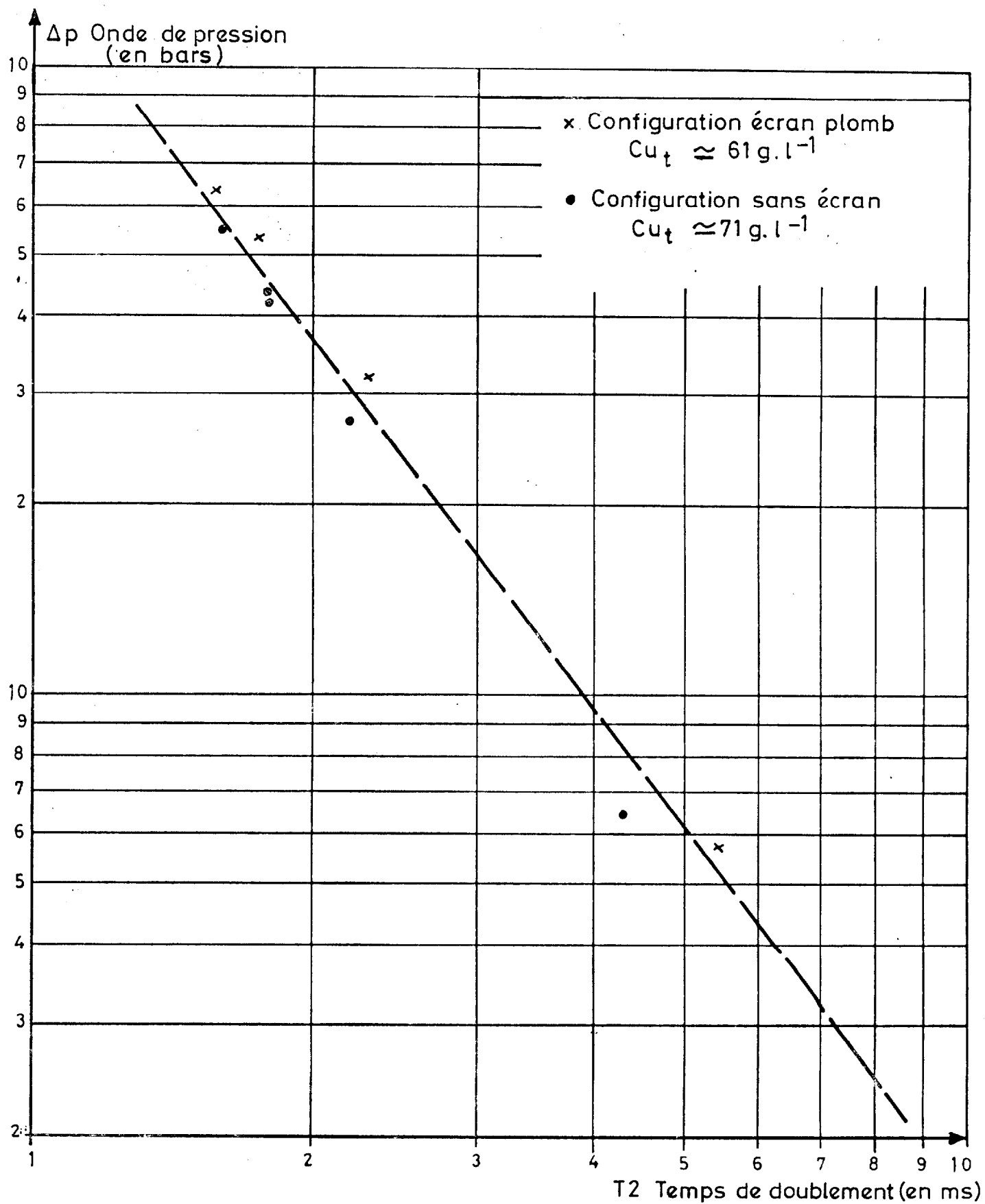


Fig.21\_SILENE\_Variation de l'onde de pression  $\Delta p$  lors du 1er pic de puissance en fonction du temps de doublement.

## REFERENCES

- [1] - SILENE : A typical solution fueled research reactor  
F. BARBRY - International Symposium on the use and  
Development of low and Medium flux research reactors.  
MIT CAMBRIDGE (USA) oct. 1983.
  
- [2] - Point sur les connaissances en matière de formation  
de gaz de radiolyse lors d'une excursion de criticité  
en solution.  
F. BARBRY note technique SRSC N° 87.83 - février 1987
  
- [3] - Etude et mesures d'ondes de pression au sein d'un  
milieu fissile divergent.  
F. BARBRY - P. CENA - Note technique SRSC N° 21 mars 1980.