

CEA-R 2576 - BOUDOURESQUE Bernard, COURCON Pierre,
LESTIBOUDOIS Guy

ETUDE DE LA TENUE DE LA GAINÉ INTERNE POUR ÉLÉMENT COMBUSTIBLE A REFROIDISSEMENT INTERNE ET EXTERNE D'UN REACTEUR GRAPHITE-GAZ

Sommaire. - La cartouche d'un élément combustible annulaire, à refroidissement interne et externe pour réacteur graphite-gaz, est composée d'un tube combustible en uranium, d'une gaine externe et d'une gaine interne en alliage de magnésium.

Pour que l'échange thermique entre la gaine interne et le combustible soit bon, il faut que la gaine reste appliquée sur l'uranium quel que soit le régime de température.

Cette note a pour but de montrer comment, d'après une étude théorique, le jeu combustible-gaine interne varie au cours des opérations de gainage, de chargement dans le réacteur, et des cyclages thermiques.

Les paramètres suivants sont étudiés : diamètres de tube, pression du gaz caloporteur, température d'entrée du gaz, plasticité de l'alliage de gaine.

.../

CEA-R 2576 - BOUDOURESQUE Bernard, COURCON Pierre,
LESTIBOUDOIS Guy

STUDY OF THE STRENGTH OF THE INTERNAL CAN FOR INTERNALLY AND EXTERNALLY COOLED FUEL ELEMENTS INTENDED FOR GAS-GRAPHITE REACTORS

Summary. - The cartridge of an internally and externally cooled annular fuel element used in gas-graphite reactors is made up of an uranium fuel tube, an external can and an internal can made of magnesium alloy.

For the thermal exchange between the internal can and the fuel to be satisfactory, it is necessary for the can to stay in contact with the uranium under all temperature conditions.

This report, based on a theoretical study, shows how the internal can-fuel gap varies during the processes of canning, charging into the reactor and thermal cycling.

The following parameters are considered : tube diameter, pressure of the heat-carrying gas, gas entry temperature, plasticity of the can alloy.

It is shown that for all operating conditions the internal can of a 77 x 95 element, planned for a gas-graphite reactor with a 40 kg/cm² gas

.../

Il est montré que, quel que soit le régime de fonctionnement, la gaine interne d'un élément 77 x 95, en projet pour un réacteur graphite-gaz sous pression de 40 kg/cm², doit rester appliquée sur le combustible.

1964

34 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

pressure, should remain in contact with the fuel.

1964

34 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

**ETUDE DE LA TENUE DE LA GAINÉ INTERNE POUR ÉLÉMENT
COMBUSTIBLE A REFROIDISSEMENT INTERNE ET EXTERNE
D'UN REACTEUR GRAPHITE-GAZ**

par

Bernard BOUDOURESQUES , Paul COURCON

Guy LESTIBOUDOIS

Rapport C E A - R 2576

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

Services de Technologie

ETUDE DE LA TENUE DE LA GAINÉ INTERNE POUR ÉLÉMENT
COMBUSTIBLE A REFROIDISSEMENT INTERNE ET EXTERNE
D'UN REACTEUR GRAPHITE-GAZ

par

Bernard BOUDOURESQUES, Paul COURCON, Guy LESTIBOUDOIS

SOMMAIRE

- I - INTRODUCTION
- II - CONSIDERATIONS THEORIQUES SUR LA TENUE DE LA GAINÉ INTERNE
- III - APPLICATIONS NUMÉRIQUES A DIFFÉRENTS TYPES D'ÉLÉMENTS
- IV - VALEUR DE LA PRESSION DE CONTACT ENTRE URANIUM ET GAINÉ
- V - INFLUENCE DES DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURE ENTRE LE COMBUSTIBLE ET LA GAINÉ
- VI - INFLUENCE DE LA PLASTICITÉ
- VII - CONCLUSIONS

ETUDE DE LA TENUE DE LA GAINÉ INTERNE POUR ÉLÉMENT
COMBUSTIBLE A REFROIDISSEMENT INTERNE ET EXTERNE
D'UN REACTEUR GRAPHITE-GAZ

par MM. Bernard BOUDOURESQUES
Paul COURCON
Guy LESTIBOUDOIS

I - INTRODUCTION.

La cartouche d'un élément combustible annulaire à refroidissement interne et externe en projet pour les réacteurs "graphite-gaz" est essentiellement composée d'un tube de combustible en Uranium faiblement allié, d'une gaine externe et d'une gaine interne en alliage de Magnésium, et à chaque extrémité d'un bouchon soudé aux deux gaines.

Les dimensions du tube peuvent être assez grandes : leur section pouvant être de 15 - 20 ou 25 cm² (par exemple tube 54x70 - 66x83 - 77x95).

Le gaz caloporteur est du gaz carbonique sous pression pouvant atteindre 60 kg/cm². Le combustible est usiné sur les faces internes et externes de façon à créer des gorges circulaires de largeur de 5 à 8 mm et de profondeur de 0,3 à 0,4 mm par exemple.

Les gaines externes et internes sont appliquées par gainage hydraulique et par thermofrettage sur le combustible. La tenue de la gaine externe, au cours des montées en température et des cyclages thermiques ne pose pas de problème spécifique. Les résultats des études effectuées pour la définition des cartouches des réacteurs G2, EDF 1, EDF 2 peuvent être utilisées.

Mais pour la gaine interne, le problème est différent : en effet, au cours des diminutions de température, lors du cyclage thermique, la gaine interne a tendance à décoller ; la pression du gaz, si elle est assez grande, peut la maintenir appliquée. Les conditions de bon contact varient beaucoup avec les dimensions du tube, la pression du gaz caloporteur, la plasticité du métal, et la température.

Dans ce rapport, nous étudierons, d'abord, le comportement théorique de la gaine interne au cours des différentes opérations de gainage, puis au cours de la mise en pile, pour les cartouches les plus chaudes et les plus froides d'un canal. Nous étudierons spécialement le cas des cartouches ayant un jeu préalable uranium-gaine avant l'entrée dans le réacteur. Nous appliquerons les considérations théoriques précédentes à différents types d'éléments.

Puis nous estimerons les valeurs de la pression de contact de la gaine interne suivant son régime de température.

Enfin, nous étudierons l'influence de la plasticité de l'alliage de gaine, et d'un gradient thermique entre l'uranium et la gaine.

En conclusion, nous verrons que dans les conditions en projet pour les réacteurs français type EDF, la gaine interne devrait bien se comporter, quel que soit le régime de température.

II - CONSIDERATIONS THEORIQUES SUR LA TENUE DE LA GAINE INTERNE.

II.1 - Hypothèses.

Nous prendrons les hypothèses suivantes :

- Le combustible est en uranium, la gaine est en alliage de magnésium. Le coefficient de dilatation de la gaine est plus élevé que celui du combustible.
- Au cours des montées et descentes en température, la gaine et le combustible restent à la même température.
- La gaine se déforme peu par fluage.

L'influence des deux dernières hypothèses sera étudiée dans les paragraphes 5 et 6.

- Le tracé du diagramme des contraintes en fonction de la température est expliqué dans le rapport C. E. A. n° 2.573.

II.2 - Etude des différentes techniques de gainage.

II.2.1 - Gainage hydraulique.

Ce gainage peut s'effectuer sous 2000 ou 3000 kg/cm² par exemple à la température ambiante.

Cette technique qui n'est du reste qu'un préancrage a pour but, de déformer la gaine (rattrapage du jeu de montage U-gaine) et de commencer l'ancrage de la gaine dans les gorges de l'uranium.

Mais l'air résiduel entre U et gaine ne pouvant être absorbé à température ambiante, la gaine ne peut pas rentrer complètement à fond de gorge. Il reste donc un jeu U-gaine à fond de gorges qui n'est pas un décollement. Les contraintes dans la gaine interne sont nulles après gainage.

II.2.2 - Gainage hydraulique + gainage thermopneumatique + refroidissement à la pression atmosphérique.

C'est le type de gainage pratiqué pour les éléments de type EDF 1 ou EDF 2 : par exemple gainage hydraulique à 2000 kg/cm² suivi d'un gainage thermopneumatique à 400°C sous 200 kg/cm² avec refroidissement de l'élément hors de la gaineuse.

Le diagramme des contraintes dans la gaine est celui représenté sur la figure 1. La variation du jeu U-gaine est donné sur la figure 2.

Donc après gainage - les contraintes dans la gaine interne sont nulles

- il y a un jeu U-gaine qui peut être de l'ordre de 0,4% à 20°C

Notons que si on effectue ce gainage, en utilisant des bouchons à queusot et en faisant le vide avant préancrage hydraulique, le résultat sera le même.

II. 2. 3 - Gainage hydraulique + gainage thermopneumatique avec refroidissement de la cartouche sous pression.

Le diagramme des contraintes naissant dans la gaine est représenté sur la figure 3. Au cours de la montée en température IA la gaine est frettée sur l'élément. Au cours de la diminution de température AB la pression continue à appliquer la gaine sur l'uranium. Quand on supprime la pression en B, la contrainte dans la gaine devient nulle. Au cours de cette opération de gainage le jeu U-gaine reste toujours nul sauf à la fin où, du fait du retrait élastique, on peut considérer qu'il y a un très léger jeu (figure 4).

Notons que cette opération de gainage nécessite, si on ne veut pas utiliser trop longtemps la gaineuse, d'y adjoindre une chambre sous pression où on fera refroidir les cartouches (une pression de 100 kg/cm² est sûrement suffisante).

II. 2. 4 - Gainage hydraulique + gainage thermopneumatique avec refroidissement à la pression atmosphérique + gainage hydraulique.

C'est l'opération décrite en II. 2. 2., mais suivie d'un nouveau gainage hydraulique qui doit, en principe, supprimer le jeu U-gaine.

Après cette opération : les contraintes dans la gaine interne sont nulles
le jeu U-gaine est nul

II. 2. 5 - Remarques sur ces méthodes de gainage.

La technique décrite en II. 2. 1 doit être éliminée, car on introduirait dans le réacteur une gaine externe non frettée qui risquerait de décoller au cours de la première montée en température, notamment pour des faibles pressions.

Seules les techniques décrites en II. 2. 2 et II. 2. 3 et II. 2. 4 peuvent être envisagées. Elles se caractérisent toutes les trois par un état de contrainte nul dans la gaine interne, et par un jeu nul ou de l'ordre de 0,4%. Notons que les techniques habituelles par radiographie de vérification de bon gainage ne s'appliquent pas à la gaine interne. Des métrologies précises peuvent nous renseigner sur l'état du gainage, mais sont difficiles à mettre en oeuvre. Aussi nous étudierons dans la suite de cette note pour la tenue au cyclage, les deux cas extrêmes : jeu nul ou jeu important de l'ordre de 0,4%.

II. 3 - Etude du comportement des éléments dans les parties les plus froides du canal.

II. 3. 1 - Différents modes de chargement.

L'entrée de l'élément combustible dans le réacteur peut se faire de deux manières suivant le mode de chargement, et le mode de circulation du gaz.

2.3.1.1. - L'élément le plus froid du canal ne passe pas au cours du chargement par des températures supérieures à sa température de fonctionnement (Fig. 5). Par exemple :

- Irradiation expérimentale dans des piles (EDF 2 chargement pile à l'arrêt
avec sens de circulation par le bas (EDF 3
- Cas du projet INCA - sens de circulation (chargement par le haut pile en marche
par le haut (ou pile à l'arrêt

2.3.1.2. - L'élément le plus froid du canal passe au cours du chargement par des températures supérieures à sa température de fonctionnement (Fig. 6) :

- Cas d'irradiation dans EDF 2 chargement pile en marche
EDF 3

Etudions en détail le premier cas. Nous verrons ensuite comment dans le second se comporte la gaine.

II. 3.2 - Etude quand il n'y a aucun jeu U-gaine.

2.3.2.1. - Soit θ_1 °C la température de l'élément le plus froid du canal. Cette température est voisine de la température d'entrée du gaz.

Quand la température monte de 20°C à θ_1 °C la gaine interne se frette sur l'uranium, la contrainte de compression varie de 0 à n_c kg/mm² (Fig. 7).

2.3.2.2. - Si on maintient cet élément longtemps à la température θ_1 , les contraintes se relaxent en partie. La contrainte n_c diminue et devient n_D .

2.3.2.3. - Etude des cyclages $\theta_1 \longleftrightarrow 20^\circ\text{C}$.

Au cours de la descente en température $\theta_1 \longrightarrow 20^\circ\text{C}$ la valeur de la contrainte suit un diagramme DEFG ou DEFH suivant la valeur de la pression externe et les dimensions de l'élément. En effet, à partir de la température θ_E la gaine n'est appliquée que par la pression du gaz. Suivant les cas la gaine reste liée à l'uranium jusqu'à 20°C (point H), ou elle décolle à partir de θ_F (ensuite la contrainte reste constante).

Le moment où la gaine décolle est obtenu quand la pression $p = \frac{2 ne}{d}$ n'est plus capable de contrarier les déformations dues à la dilatation différentielle U-gaine. Plus les pressions et diamètres sont faibles plus la température θ_F sera élevée.

Au cours de la remontée en température on suit approximativement un diagramme en sens inverse GFED ou HFED.

2.3.2.4. - La figure 8 représente la valeur du jeu U-gaine au cours de ce cycle de température. De 20°C à θ_1 le jeu est nul. De θ_1 à 20°C le jeu reste nul ou bien il prend des valeurs croissantes de θ_F à 20°C (trajet F'G').

2.3.2.5. - En résumé on peut dire que dans l'hypothèse de départ : jeu nul entre uranium et gaine interne, et suivant les caractéristiques de la pile et de l'élément combustible, on aura :

- en régime permanent une cartouche avec gaine interne liée
- en régime de cyclage une cartouche liée ou non dans une plage de température variable.

II. 3. 3 - Etude quand il y a jeu U-gaine.

2. 3. 3. 1. - Soit comme précédemment θ_1 la température de l'élément le plus froid du canal.

Au cours de la montée en température $20^\circ\text{C} \longrightarrow \theta_1$ deux cas peuvent se présenter.

2. 3. 3. 1. 1. - La pression du gaz est suffisante pour faire recoller à la température ambiante, la gaine sur l'uranium. La contrainte prend les valeurs suivant le trajet IA. Dès qu'on augmente la température, la contrainte va suivre le diagramme AB d'une gaine liée (Fig. 9). La contrainte de traction va décroître. Au cours de cette opération, le jeu diminue pour devenir nul (diagramme I'A'B') (Fig. 10).

2. 3. 3. 1. 2. - La pression du gaz n'est pas suffisante à la température ambiante pour faire recoller la gaine sur l'uranium. La contrainte dans la gaine suivra alors le diagramme ICDB. Le jeu U-gaine suivra le diagramme I'C'D'B'.

2. 3. 3. 1. 3. - On voit que suivant la pression et les dimensions de l'élément il y a une zone de température $20^\circ\text{C} \longleftrightarrow \theta_D$ plus ou moins étalée où la gaine est décollée de l'uranium. Peut-être même dans certains cas θ_D peut être supérieure à θ_1 . Et, théoriquement, il n'est donc pas impossible que la gaine soit décollée à la température θ_1 .

2. 3. 3. 2. - Si on reste en régime stable à θ_1 du fait du fluage, il est possible que si le jeu existe il disparaisse au bout d'un certain temps.

2. 3. 3. 3. - Cyclage $\theta_1 \longleftrightarrow 20^\circ\text{C}$.

En première approximation on suit les mêmes diagrammes que dans le paragraphe précédent c'est-à-dire soit $\overleftrightarrow{\text{BDC}}$ ou $\overleftrightarrow{\text{BDA}}$.

2. 3. 3. 4. - En résumé, on peut dire que ce cas : jeu U-gaine au départ, est plus grave que le cas précédent.

Suivant les cas on peut avoir :

- un élément avec gaine interne qui reste liée quelle que soit la température,
- un élément avec gaine interne qui reste décollée quelle que soit la température,
- un élément avec gaine interne qui reste liée dans une certaine plage de température.

II. 3. 4 - Cas du mode de chargement où l'élément le plus froid passe par des températures supérieures à sa température de fonctionnement.

Le fait pour l'élément de passer par une température de 400°C par exemple, fait qu'au retour à la température θ_1 la gaine peut décoller. La figure 11 représente schématiquement le diagramme des contraintes dans un tel cas. Le diagramme des contraintes peut être IABCD ou IABCE. Le jeu U-gaine est donné sur la figure 12. Il est soit nul, soit a une valeur D'E' suivant le cas.

Au cours du cyclage la gaine peut rester complètement décollée ou bien décoller à partir d'une certaine température.

Ce qu'il faut surtout remarquer, c'est que pour un même élément dans les mêmes conditions de pression, la température à partir de laquelle la gaine décolle est plus élevée.

Ce mode de chargement n'est donc pas à conseiller car il est théoriquement plus défavorable que le premier.

II. 4 - Etude du comportement des éléments dans les parties les plus chaudes du canal.

II. 4.1 - Il n'y a pas de différence à faire comme précédemment entre les deux modes de chargement, la montée en température se faisant par palier ou directement.

II. 4.2 - Cas où il n'y a aucun jeu U-gaine avant l'entrée dans le réacteur.

Soit θ_2 la température de fonctionnement de cet élément.

2.4.2.1. - Au cours de la première montée en température de 20°C à θ_2 la gaine se frette sur l'uranium, le diagramme des contraintes est IA (Fig. 13). Il n'y a pas de problème.

2.4.2.2. - Si on maintient la température à θ_2 les contraintes se relâchent et on arrive en B à contrainte nulle et jeu nul (Fig. 13 et 14).

2.4.2.3. - Si on cycle de θ_2 à 20°C c'est maintenant la pression qui intervient pour fretter la gaine sur l'uranium. Et comme précédemment, il y a plusieurs cas : par exemple :

Diagramme BCD - à partir de θ_C la gaine décolle

Diagramme BEF - à partir de θ_E la gaine décolle

Diagramme BG - la gaine ne décolle pas

Les jeux U-gaine sont représentés sur la figure 14 ; suivant les cas le jeu est nul ou bien égal à I'F' ou I'D'.

II. 4.3 - Cas où il y a un jeu initial U-gaine.

2.4.3.1. - Au cours de la montée en température le diagramme des contraintes est un peu plus compliqué. On suit le trajet ITSR si la pression et les dimensions sont telles qu'elles permettent de rattraper le jeu initial dès la température ambiante ; ou bien on suit un trajet IPSR si on rattrape le jeu à une certaine température (Fig. 15).

Le jeu au cours de cette montée en température est représenté sur la figure 16.

On se retrouve à la température θ_2 avec une gaine interne frettée dans le même état que dans le cas précédent avec un jeu initial nul.

2.4.3.2. - Au cours du cyclage on suit le même diagramme que celui d'une gaine avec jeu initial nul.

II. 4.4 - En résumé, on voit théoriquement :

- Pour l'élément le plus chaud d'un canal, excepté la première montée en température les conditions de fonctionnement ne dépendent pratiquement pas de la valeur du jeu initial.

- Les valeurs de pression et de dimension déterminent la plage de température de décollement au cours du cyclage.

- Les plages de températures de décollement sont à peu près les mêmes que pour l'élément le plus froid.

III - APPLICATION NUMERIQUE A DIFFERENTS TYPES D'ELEMENTS.

III.1 - Nous allons appliquer les résultats théoriques précédents à divers types d'éléments :

- Des éléments de dimensions 54 x 70 pouvant être irradiés dans un réacteur type EDF 2 sous 25 kg/cm², la θ° entrée du gaz étant de 200°C.

- Des éléments de dimensions 77 x 95 pouvant être irradiés dans un réacteur type EDF 3 sous 25 kg/cm², la θ° entrée du gaz étant de 240°C.

Des éléments de dimensions 77 x 95 pouvant être irradiés dans un réacteur futur sous 25 à 60 kg/cm² la θ° entrée de gaz étant de 240°C, le sens de circulation du gaz étant de haut en bas.

III.2 - Pour essayer de chiffrer l'étendue des plages de température où la gaine peut décoller d'après l'étude théorique précédente, il faut partir du diagramme des contraintes dans une gaine liée. Nous partirons de celui exposé dans le Rapport C. E. A. n° 2. 573 , c'est-à-dire réalisé à partir de courbes de déformations relevées sur éprouvettes de traction et avec les hypothèses suivantes : (Fig. 17).

- coefficient de dilatation Mg = 27×10^{-6}
- coefficient de dilatation U = 17×10^{-6}
- température gaine = température uranium
- loi de dilatation

$$\frac{\Delta l}{l} \% = 10 \times 10^{-4} (\theta^\circ \text{C} - 20)$$

- pas de fluage de magnésium.

Notons que :

- Si on prend $\theta_g = \theta_U$ cette hypothèse est plus proche de la réalité dans le cas de l'élément annulaire, le gradient dans l'anneau d'uranium étant assez faible.

- Le réseau de courbes relevées sur éprouvettes de traction est proche de celui relevé sur tubes. Quelques essais ont été effectués qui montrent peu de différence.

- Le diagramme, notamment au cours d'une descente de température 400°C \rightarrow 20°C est plutôt pessimiste. Les contraintes relevées doivent être plus faibles. En effet, ce diagramme a été tracé à partir d'éprouvettes testées à différentes températures, mais n'ayant pas séjourné à des températures de 400°C pendant des temps assez longs. Or, ce temps de séjour doit diminuer nettement la limite élastique du matériau et par suite donner une contrainte à 20°C plus faible.

Pour les éléments qui sont à la température la plus basse du canal ce diagramme est plus proche de la vérité.

III.3 - Nous avons vu dans la partie théorique que pour qu'il y ait non décollement, il faut que la contrainte de traction induite dans la gaine par la pression soit supérieure à la contrainte de la gaine liée lue sur le diagramme.

C'est-à-dire :

si p est la pression du gaz caloporteur en kg/cm^2

d le diamètre intérieur de la gaine interne en mm

e l'épaisseur de la gaine en mm

n_{Diag} la contrainte lue sur le diagramme à température $\theta^\circ\text{C}$.

il faut $\frac{p \times d}{200e} > n_{\text{Diagramme}}$

Si cette relation est observée quelle que soit la température, la gaine ne décollera jamais. Si elle est vraie seulement au-dessus d'une température θ_{Dec} la gaine décollera au cours du cyclage $\theta_{\text{Dec}} \rightarrow 20^\circ\text{C}$. On voit l'importance de bien connaître n_{Diag} dans les différents cas envisagés ci-dessus.

III. 4 - On peut calculer pour chaque élément considéré la contrainte n correspondant à la pression envisagée : le tableau ci-après donne ces valeurs pour une épaisseur de gaine de 2 mm.

Dimensions de l'élément mm	Pression		Contrainte	
	$p,$	kg / cm^2	$n,$	kg / mm^2
54 x 70		25		3,25
77 x 95		25		4,7
77 x 95		40		7,5
77 x 95		50		9,4
77 x 95		60		11,2

Le diagramme de la figure 18 est plus général et permet de calculer la contrainte pour des tubes de différents diamètres et sous différentes pressions.

III. 5 - Cartouche la plus froide - jeu initial nul.

Sur la figure 19 est reporté le diagramme des contraintes pour la cartouche la plus froide dans le cas où celle-ci est vers 200°C (irradiation dans EDF 2) ou vers 250°C . On voit que les températures de décollement au cours d'un cyclage thermique sont :

Projet 54 x 70	dans EDF 2	$\theta_{\text{Dec}} = 90^\circ\text{C}$
Projet 77 x 95	dans EDF 3	$\theta_{\text{Dec}} = 100^\circ\text{C}$
Projet 77 x 95 ($p = 40 \text{ kg/cm}^2$)		$\theta_{\text{Dec}} = 40^\circ\text{C}$
Projet 77 x 95 ($p > 40 \text{ kg/cm}^2$)		pas de décollement

III. 6 - Cartouche la plus froide - Jeu initial de l'ordre de 0,4 %.

Sur la figure 20 est représenté comme précédemment le diagramme des contraintes dans les différents cas. On voit que les températures de décollement au cours d'un cyclage thermique sont :

Projet 54 x 70	dans EDF 2	décollement de 190° à 20°C
Projet 77 x 95	dans EDF 3	décollement de 160° à 20°C
Projet 77 x 95 (p = 40 kg/cm ²)		décollement de 110° à 20°C
Projet 77 x 95 (p = 50 kg/cm ²)		décollement de 80° à 20°C
Projet 77 x 95 (p = 60 kg/cm ²)		décollement de 40° à 20°C

c'est un cas assez défavorable.

III. 7 - Cartouche la plus froide - Chargement en passant par une température supérieure à la température de fonctionnement.

Sur la figure 21 est représenté le diagramme des contraintes dans les différents cas. La température de décollement est pratiquement la même que dans le cas précédent.

Projet 54 x 70	dans EDF 2	décollement de 190°C à 20°C
Projet 77 x 95	dans EDF 3	décollement de 160°C à 20°C
Projet 77 x 95 (p = 40 kg/cm ²)		décollement de 120°C à 20°C
Projet 77 x 95 (p = 50 kg/cm ²)		décollement de 80°C à 20°C
Projet 77 x 95 (p = 60 kg/cm ²)		décollement de 40°C à 20°C

III. 8 - Cartouche la plus chaude quel que soit le jeu initial.

Sur la figure 22 est représenté le diagramme des contraintes dans les différents cas.

Projet 54 x 70	dans EDF 2	décollement de 220°C à 20°C
Projet 77 x 95	dans EDF 3	décollement de 180°C à 20°C
Projet 77 x 95 (p = 40 kg/cm ²)		décollement de 140°C à 20°C
Projet 77 x 95 (p = 50 kg/cm ²)		décollement de 100°C à 20°C
Projet 77 x 95 (p = 60 kg/cm ²)		décollement de 40°C à 20°C

III. 9 - Remarques sur ces résultats.

On voit de grosses différences entre les irradiations d'éléments 77 x 95 à fortes pressions et l'irradiation d'un élément 54 x 70 sous 25 kg/cm². Si on suppose que les valeurs de contraintes n^{Diag} sont trop élevées, ce qui est peut être vrai pour les valeurs à basse température, on peut arriver à la conclusion que peut être les gaines du projet 77 x 95 ne décolleront pas quels que soient le cyclage et la position dans le canal.

IV - VALEURS DE LA PRESSION DE CONTACT ENTRE U ET GAINÉ.

D'après les valeurs des contraintes induites dans la gaine, et les pressions du gaz caloporteur, on peut en déduire la pression de contact de la gaine sur l'uranium. L'influence de ce facteur est très important sur la valeur de la chute du contact thermique. Des essais hors pile ont montré qu'à température d'interface équivalente, la chute thermique du contact diminuait

La pression de contact est donnée par la relation :

$$P_{\text{contact}} = P_{\text{CO}_2} + P_{\text{Diag}} \quad \text{si la gaine est frettée sur le combustible}$$

$$P_{\text{contact}} = P_{\text{CO}_2} - P_{\text{Diag}} \quad \text{si la gaine est appliquée sur le combustible par la pression du gaz caloporteur}$$

$$P_{\text{Diag}} \text{ kg/cm}^2 = \frac{200 \times n_{\text{Diag}} \text{ kg/mm}^2 \times e}{d}$$

Les courbes montrent (Fig. 23) la variation de cette pression pour un tube 54 x 70 à irradier dans EdF 2 suivant la température et le cycle. On voit qu'après le premier cycle de chauffage, la pression de contact est nulle entre 20 et 220°C et varie de 0 à 25 kg/cm² de 220 à 450°C.

Les courbes (Fig. 24) montrent les variations de cette pression pour un tube 77 x 95 à tester sous pression de 40 kg/cm². La pression de contact est nulle entre 20 et 140°C et varie de 0 à 40 kg/cm² de 120 à 450°C.

Notons que ces valeurs de pression de contact ne tiennent pas compte de la plasticité du magnésium (cf. paragraphe 6).

V - INFLUENCE DES DIFFERENCES DE TEMPERATURE ENTRE LE COMBUSTIBLE ET LA GAINE.

Dans toute cette étude, nous avons supposé que $\theta_g = \theta_u$. Or, en réalité θ_u est supérieur à θ_g ; de plus il y a un gradient à l'intérieur du tube d'uranium.

S'il y a un jeu initial à froid, celui-ci a tendance à ne pas se résorber comme le laisserait supposer l'étude théorique, si par suite d'un mauvais transfert thermique vers le centre du canal :

- l'uranium risque de se trouver à un θ° beaucoup plus élevée que la gaine interne
- le fluage du Mg-Zr n'est pas suffisamment rapide pour compenser l'évolution théorique des jeux.

Nous allons donner un exemple : celui de tube 54 x 70 dans une pile type EdF 2 sous 25 kg/cm² avec température entrée de gaz de l'ordre de 200°C.

Si on suppose que le transfert thermique ne se fait que vers l'extérieur ce qui est un cas très pessimiste, que le flux et la puissance spécifique dans un canal EdF 2 ne sont pas totalement perturbés si on met un élément annulaire à la place du barreau normal, on peut calculer que le jeu théorique supplémentaire qu'il faudrait ajouter au jeu initial est de l'ordre de 0,25%. Mais les courbes de fluage présentées au paragraphe suivant montrent que la gaine restera appliquée sur l'uranium quelle que soit la température.

VI - INFLUENCE DE LA PLASTICITE.

VI.1 - Toutes les valeurs numériques précédentes doivent être corrigées par un facteur important qui est celui de l'adaptation du métal par fluage. En effet, les valeurs de température de décollement ne sont vraies que si la chute de température au cours d'un cyclage est brutale et si le métal n'a pas eu le temps de s'adapter ; de plus, un palier à haute température permet au métal de gaine de se réadapter au combustible.

VI.2 - Pour essayer de chiffrer l'importance de ce fluage, nous avons effectué plusieurs essais de déformation de tube par fluage :

Ces essais ont été réalisés sur des gaines en Mg-Zr lisses, diamètre 49,5/53,5 (soit une épaisseur de 2 mm).

Un dispositif permet d'admettre une pression connue de gaz à l'intérieur de la gaine et de suivre les déformations en fonction du temps à l'aide de deux comparateurs.

On relève ainsi les courbes déformation - temps à différentes pressions et différentes températures.

La figure 25 montre le diagramme pression - température obtenu à partir de ces courbes. Nous nous sommes placés dans le cas d'une déformation de 0,4%, soit dans le cas du jeu maximum qui peut exister théoriquement.

Dans le cas de la géométrie (élément 54/70 dans la pile EdF 2), si un décollement existe, il est résorbé très rapidement sous la pression de 25 kg/cm^2 . Le temps est de l'ordre de 3 minutes pour l'élément le plus froid du canal.

Si nous extrapolons ces résultats à la géométrie définitive (élément 77 x 95), les risques de décollement deviennent très faibles. En effet, les temps nécessaires pour obtenir une déformation de l'ordre de 0,4% sont très inférieurs à 1 minute pour la pression de 40 kg/cm^2 envisagée (Fig. 26).

Ajoutons que les essais ont été réalisés sur des gaines à l'état brut de filage. Le maintien en température avant essai ne peut que diminuer encore ces temps.

VII - CONCLUSIONS.

Nous avons vu dans cette note comment doit, théoriquement, se déformer une gaine interne d'un élément annulaire à refroidissement interne et externe au cours des différents cyclages possibles en pile.

Plus les diamètres du tube sont grands, plus la pression du gaz caloporteur est forte, plus la température théorique de décollement est basse.

Du fait de la déformation rapide par fluage de la gaine, et des valeurs élevées des températures d'entrée du gaz, il est probable que la gaine restera toujours appliquée à l'uranium.

Entre les gaines interne et externe, il subsiste une différence entre les pressions de contact U-gaine. On peut s'attendre à des différences de chute au contact thermique U-gaine interne et U-gaine externe.

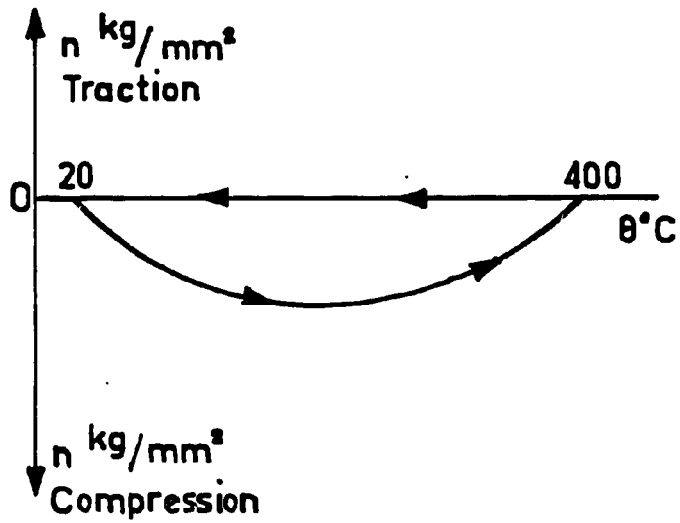
REMERCIEMENTS.

Nous tenons à remercier spécialement Monsieur St-GENES, stagiaire universitaire et Monsieur HAOND, stagiaire EdF, qui ont participé aux essais.

LISTE DES FIGURES

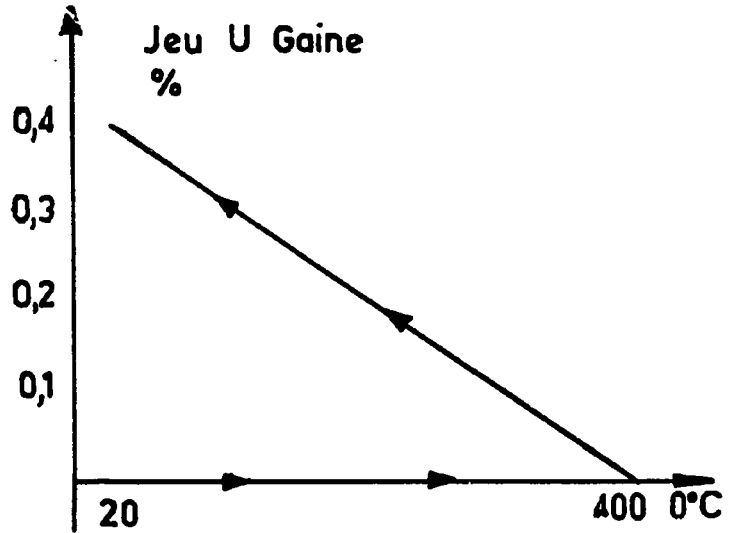
- Figure 1 - Contraintes dans la gaine interne au cours du gainage thermo-pneumatique
- Figure 2 - Jeu U-gaine interne au cours du gainage thermo-pneumatique
- Figure 3 - Contraintes dans la gaine interne au cours du gainage thermo-pneumatique
- Figure 4 - Jeu U-gaine interne au cours du gainage thermo-pneumatique
- Figure 5 - Type de chargement dans le cas où l'élément le plus froid ne passe pas par des températures supérieures à sa température de fonctionnement
- Figure 6 - Type de rechargement où l'élément le plus froid passe par des températures supérieures à sa température de fonctionnement
- Figure 7 - Contraintes dans la gaine interne (jeu initial nul-élément le plus froid sans passage à haute température)
- Figure 8 - Jeu U-gaine interne (jeu initial nul-élément le plus froid sans passage à haute température)
- Figure 9 - Contraintes dans la gaine interne (jeu initial entre U et gaine élément le plus froid sans passage à haute température)
- Figure 10 - Jeu U-gaine interne (jeu initial entre U et gaine élément le plus froid sans passage à haute température)
- Figure 11 - Contraintes gaine interne (jeu initial nul - élément le plus froid passant préalablement à 400 °C)
- Figure 12 - Jeu U-gaine interne (jeu initial nul - élément le plus froid passant préalablement à 400 °C)
- Figure 13 - Contraintes gaine interne (jeu initial nul - élément le plus chaud)
- Figure 14 - Jeu U-gaine interne (jeu initial nul - élément le plus chaud)
- Figure 15 - Contraintes gaine interne (jeu initial U-gaine - cartouche la plus chaude)
- Figure 16 - Jeu U-gaine (jeu initial U-gaine - cartouche la plus chaude)
- Figure 17 - Contraintes dans une gaine liée
- Figure 18 - Diagramme donnant la contrainte induite dans la gaine pour différentes pressions et différentes dimensions

- Figure 19 - Diagramme des contraintes (jeu initial nul - cartouche la plus froide sans passage à haute température)
- Figure 20 - Diagramme des contraintes (jeu initial U-gaine de l'ordre de 0,4% - cartouche la plus froide - pas de passage à haute température)
- Figure 21 - Diagramme des contraintes (cartouche la plus froide après passage à 400 °C - jeu initial nul)
- Figure 22 - Diagramme des contraintes (cartouche la plus chaude)
- Figure 23 - Pression de contact élément 54 x 70 mm
- Figure 24 - Pression de contact élément 77 x 95 mm
- Figure 25 - Température et pression pour lesquelles on atteint 0,4% de fluage - gaine interne 45 x 53,5 non recuite
- Figure 26 - Température et pression pour lesquelles on atteint 0,4% de fluage - gaine interne 73 x 77 non recuite



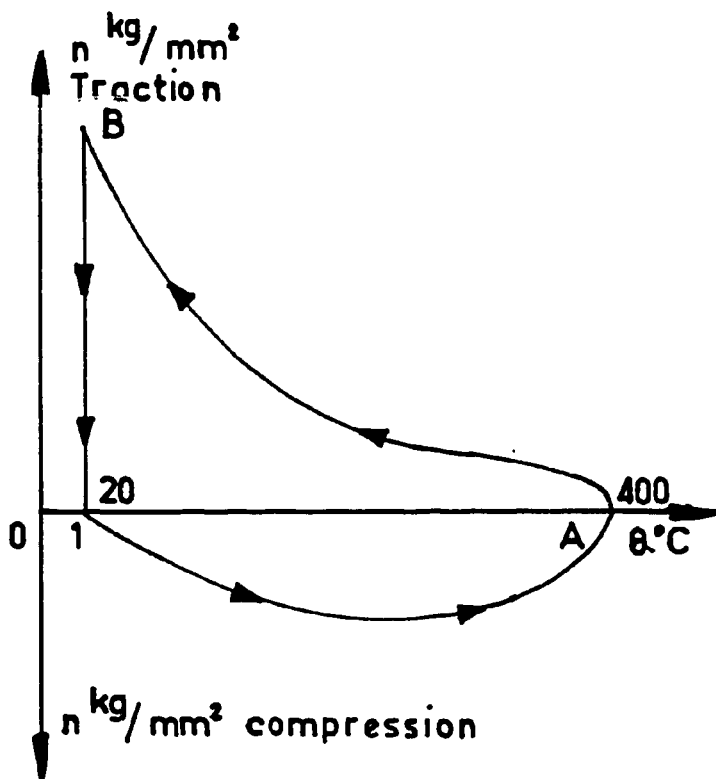
CONTRAINTES DANS LA GAINÉ INTERNE AU COURS DU GAINAGE THERMO - PNEUMATIQUE (Refroidissement (p.at m))

Fig.1



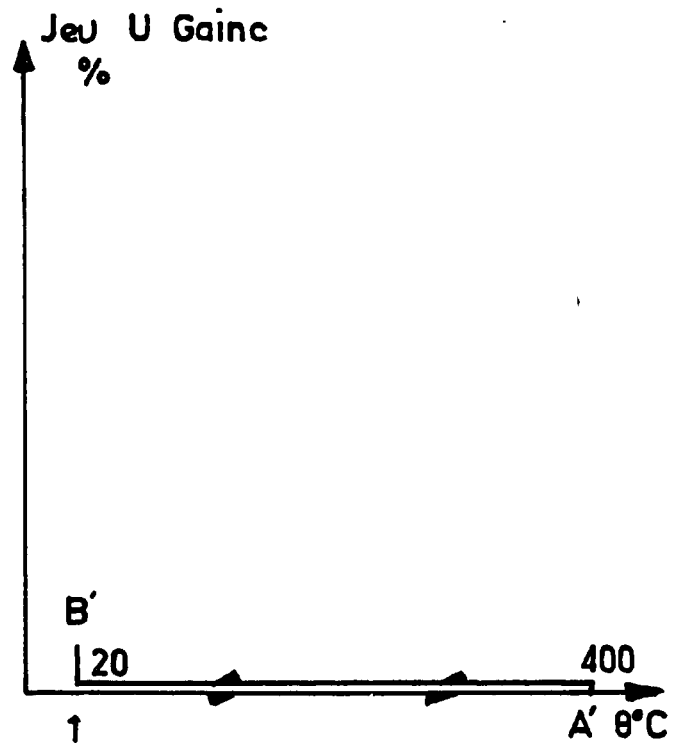
JEU U - GAINÉ INTERNE AU COURS DU GAINAGE THERMO PNEUMATIQUE (Refroidissement p. atm)

Fig.2



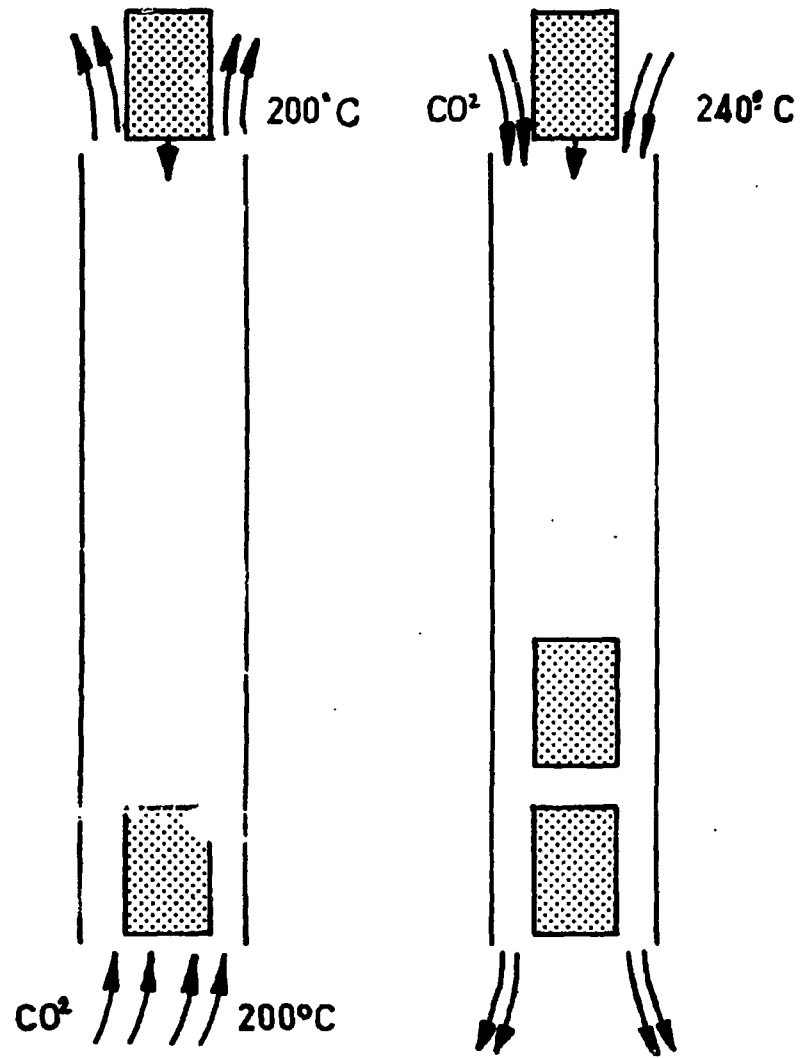
CONTRAINTES DANS LA GAINÉ INTERNE AU COURS DU GAINAGE THERMO - PNEUMATIQUE (Refroidissement sous pression)

Fig.3



JEU U. GAINÉ INTERNE AU COURS DU GAINAGE THERMO - PNEUMATIQUE (Refroidissement sous pression)

Fig.4

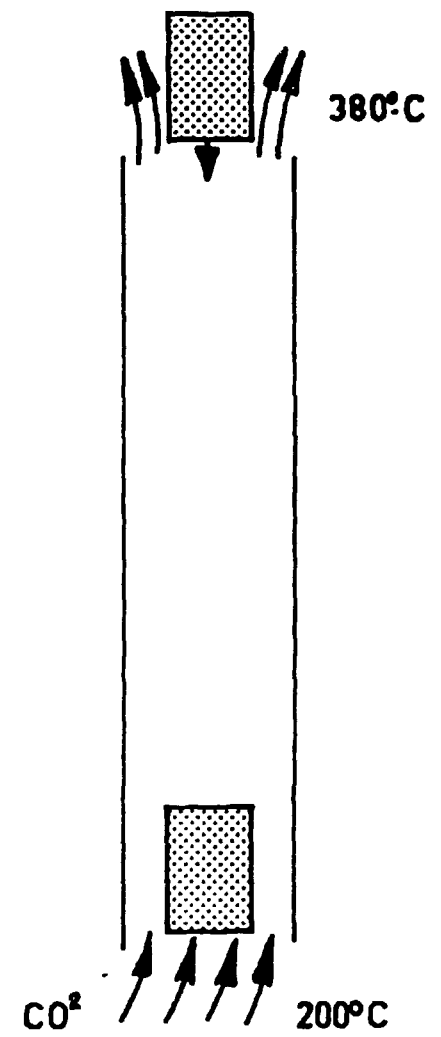


EDF 2 } Chargement pile
EDF 3 } A l'Arrêt .

EDF 4 } Pile en marche
INCA } ou arrêt

TYPE DE CHARGEMENT DANS LE CAS OU L'ÉLÉMENT LE PLUS FROID NE PASSE PAR DES θ° SUPÉRIEURES A SA θ° DE FONCTIONNEMENT

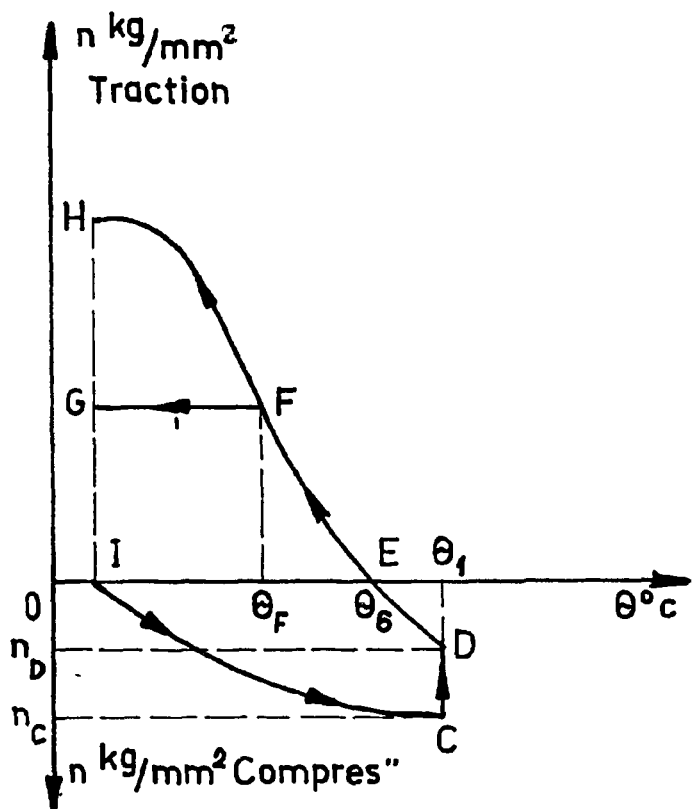
Fig.5



EDF 2 } pile en
EDF 3 } marche

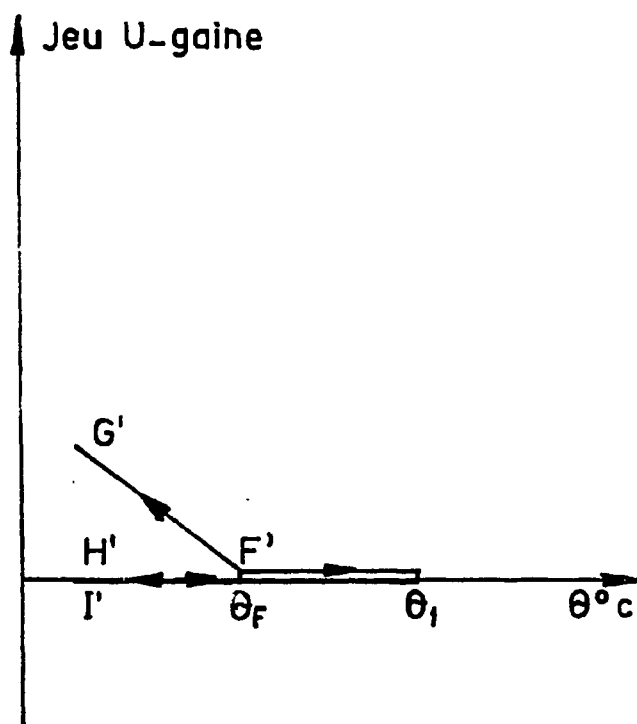
TYPE DE RECHARGEMENT OU L'ÉLÉMENT LE PLUS FROID PASSE PAR DES θ° SUPÉRIEURES A SA θ° DE FONCTIONNEMENT

Fig.6



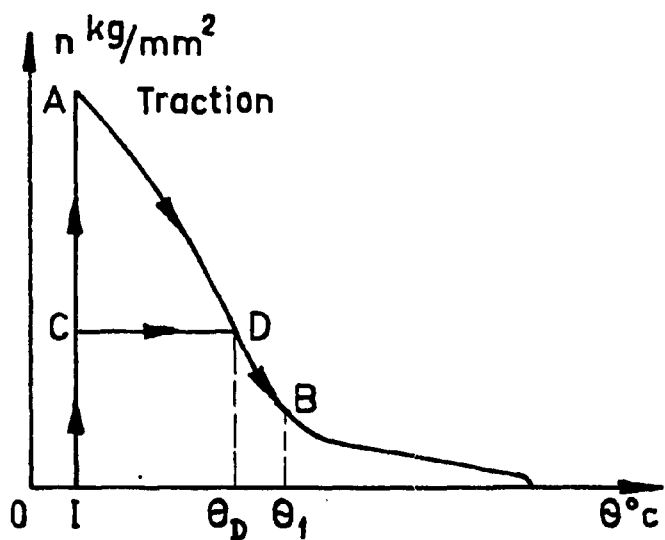
CONTRAINTES DANS LA GAINÉ INTERNE
(Jeu initial nul - Élément le plus froid)
(sans passage à haute θ)

Fig. 7



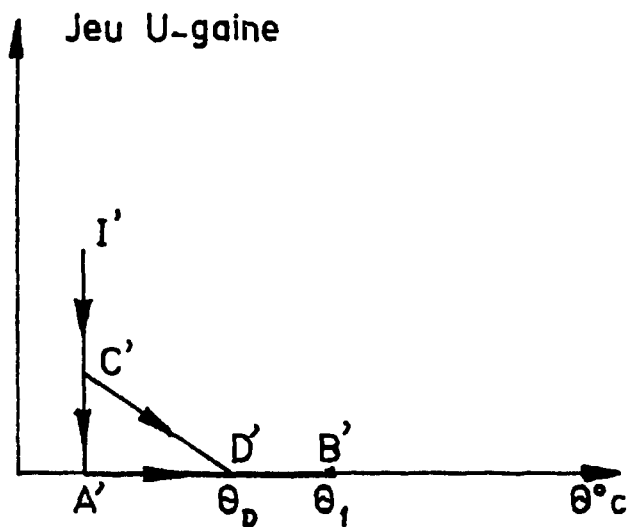
JEU U - GAINÉ INTERNE
(Jeu initial nul - Élément le plus froid)
(sans passage à haute θ)

Fig. 8



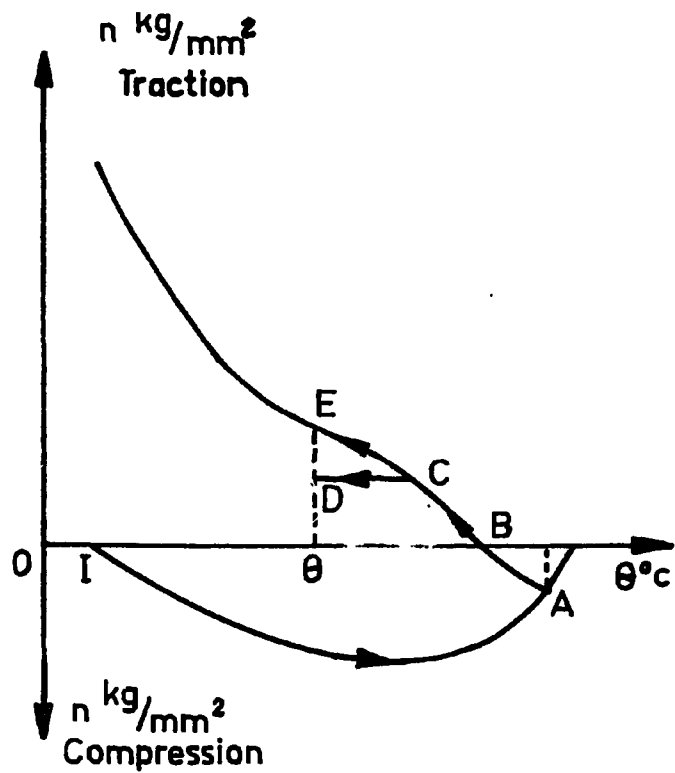
CONTRAINTES DANS LA GAINÉ INTERNE
(Jeu initial entre U et gaine)
(Élément le plus froid sans passage)
à haute θ)

Fig. 9

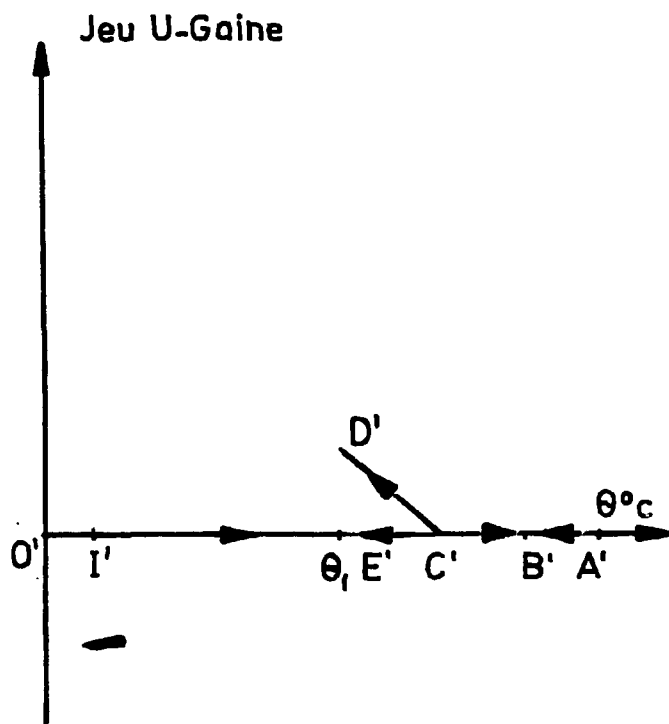


JEU U - GAINÉ INTERNE
(Jeu initial entre U et gaine)
(Élément le plus froid sans passage)
à haute θ)

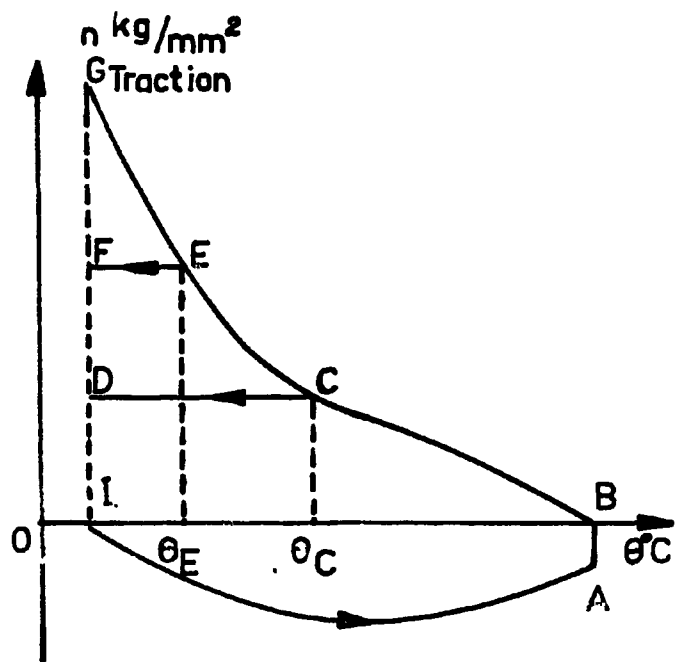
Fig. 10



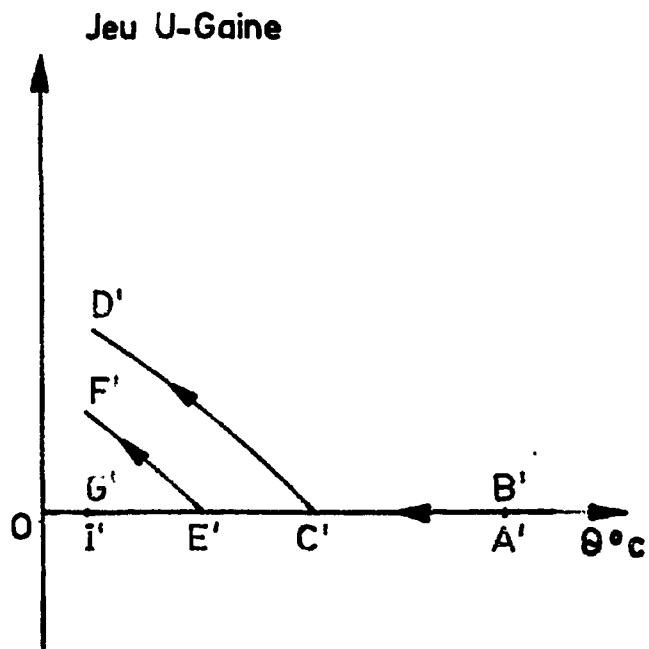
CONTRAINTES GAINÉ INTERNE
 (Jeu initial nul -Élément le plus froid)
 (passant préalablement à 400°C)
 Fig.11



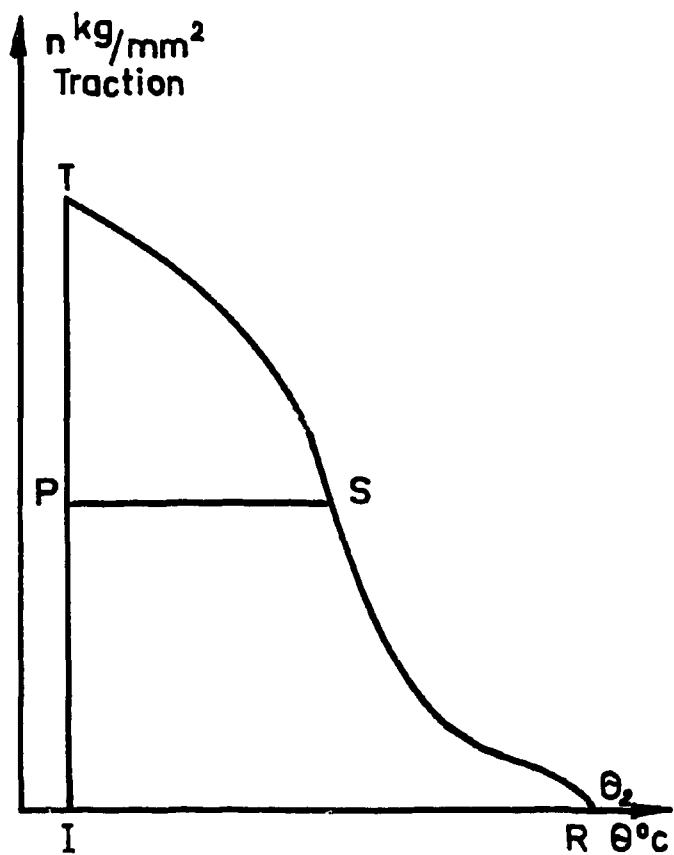
JEU U-GAINÉ INTERNE
 (Jeu initial nul -Élément le plus froid)
 (passant préalablement à 400°C)
 Fig.12



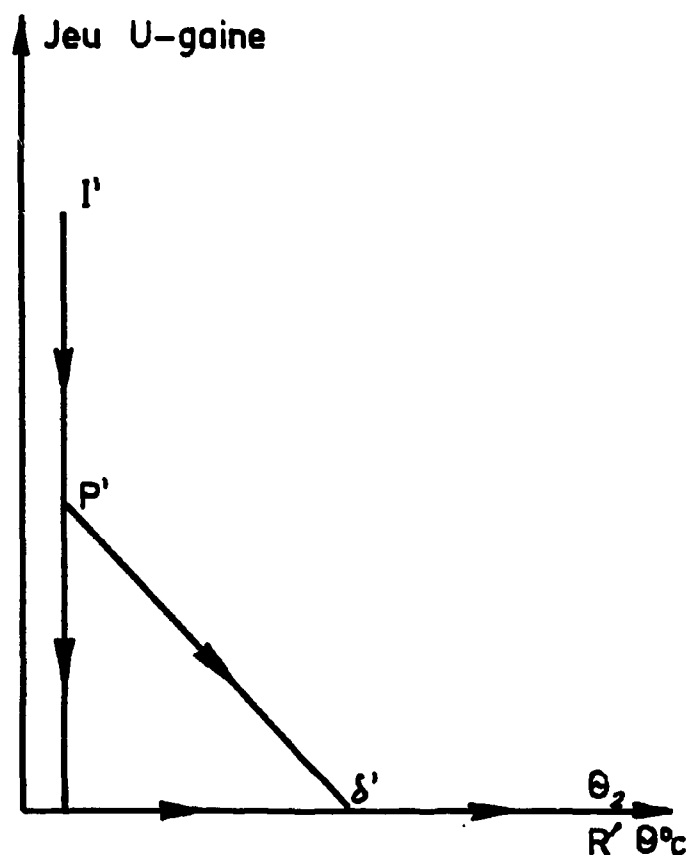
CONTRAINTES GAINÉ INTERNE
 (Jeu initial nul -Élément le plus chaud)
 Fig.13



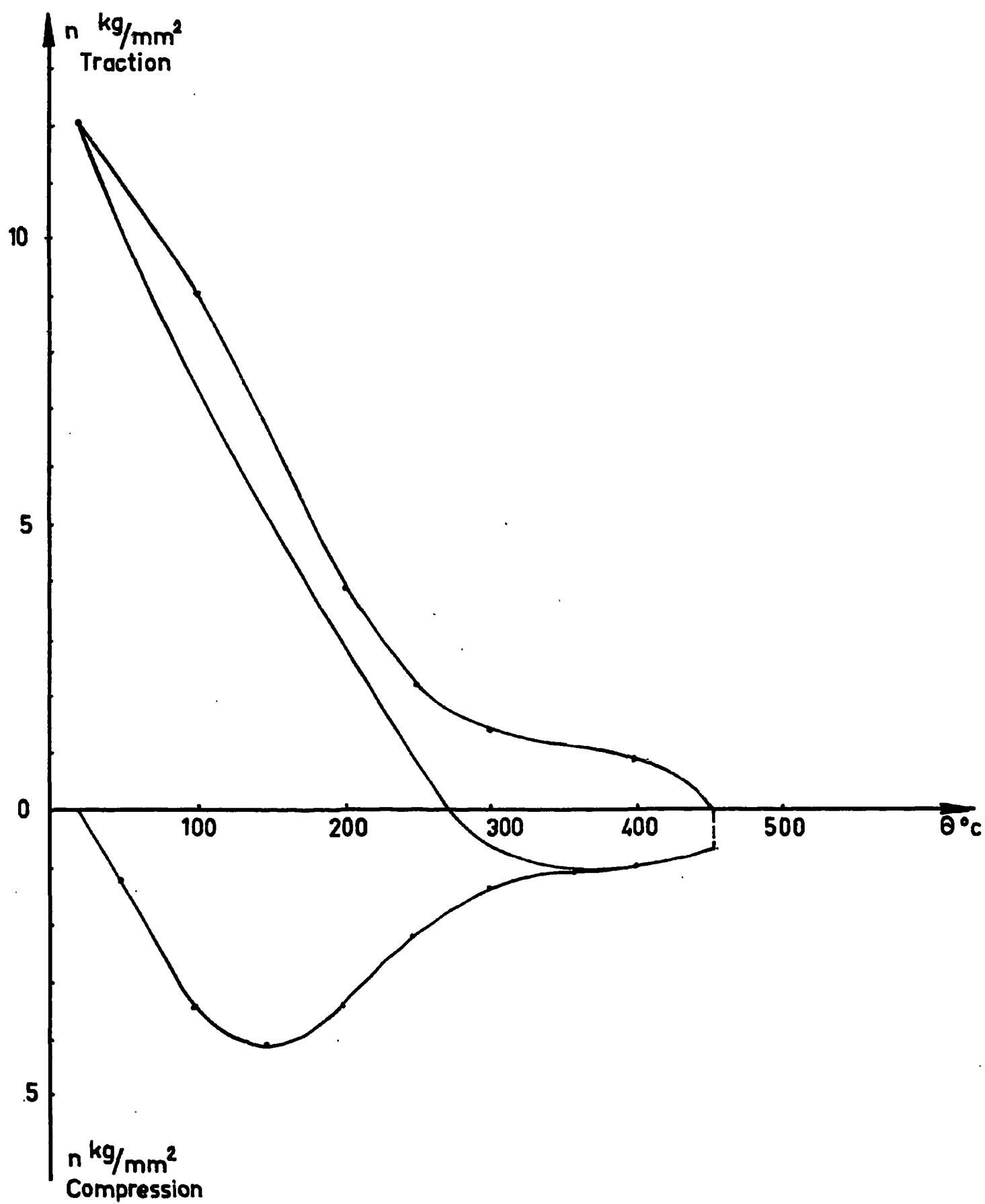
JEU U-GAINÉ INTERNE
 (Jeu initial nul -Élément le plus chaud)
 Fig.14



CONTRAINTES GAINÉ INTERNE
 (Jeu initial U-gaine
 (Cartouche la plus chaude) Fig.15



JEU U-GAINÉ
 (Jeu initial U-gaine
 (Cartouche la plus chaude) Fig.16



CONTRAINTES DANS UNE GAINÉ LIÉE

Fig.17

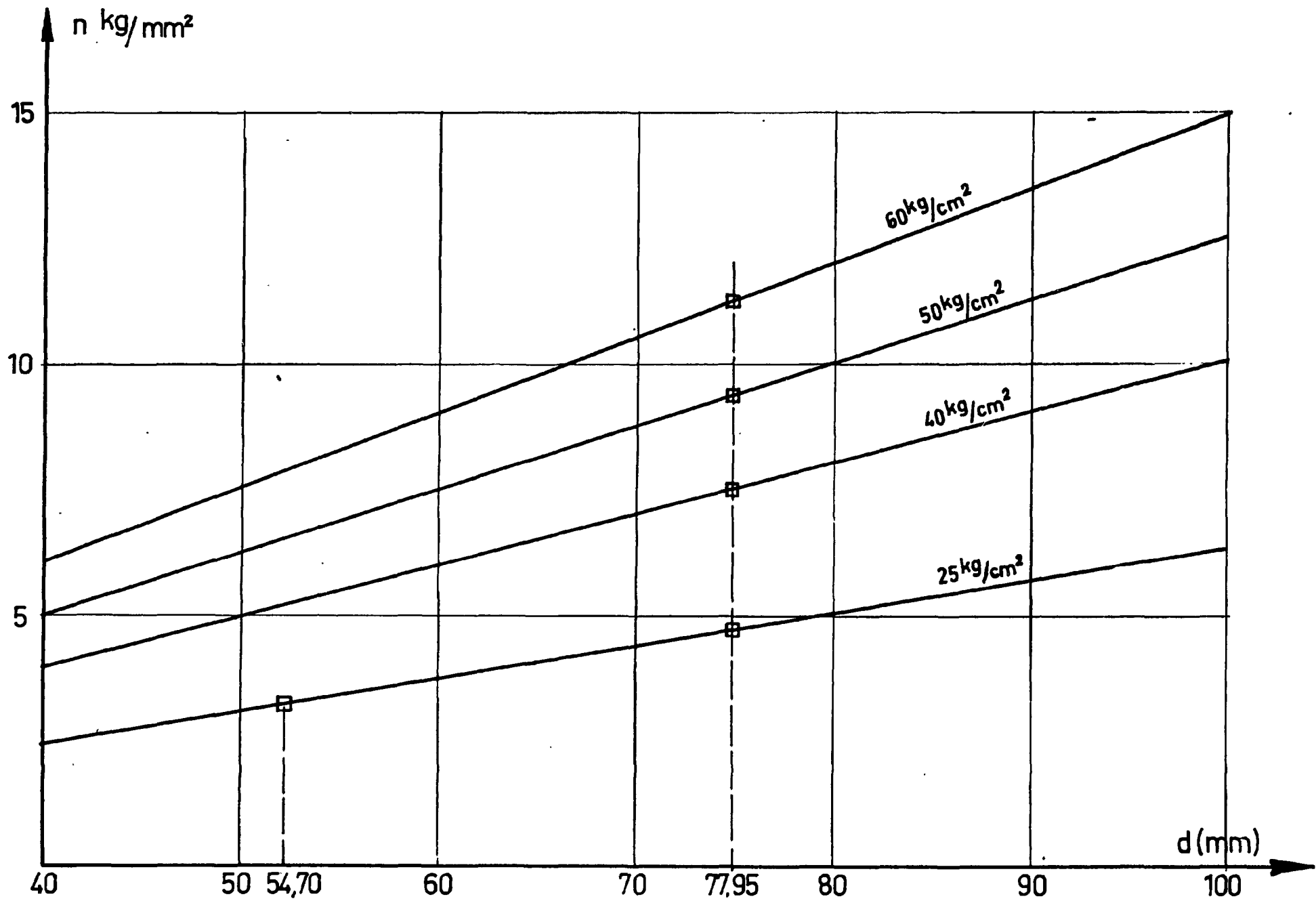


DIAGRAMME DONNANT LA CONTRAINTE INDUITE DANS LA GAINÉ POUR DIFFÉRENTES PRESSIONS ET DIFFÉRENTES DIMENSIONS

Fig. 18

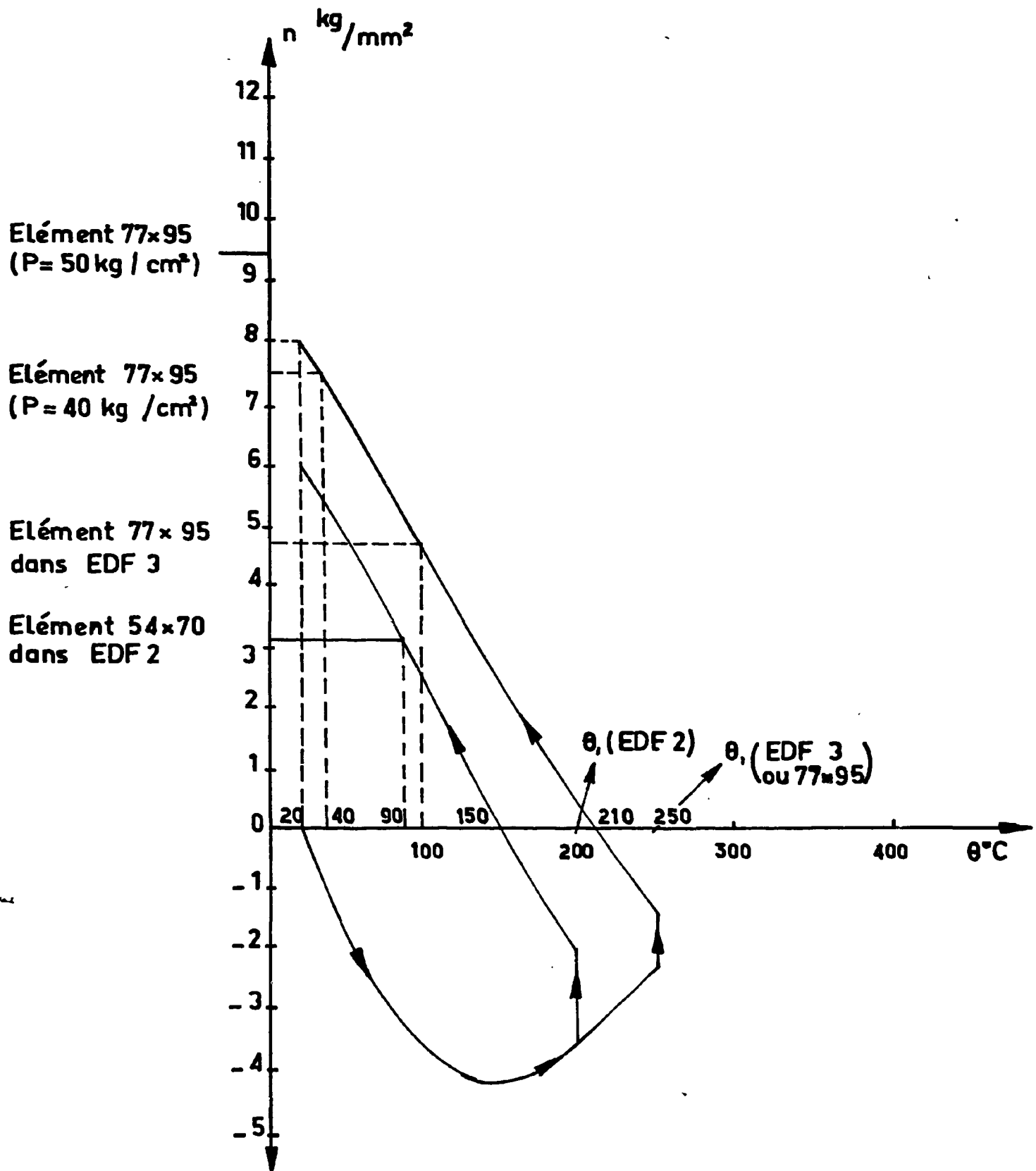


DIAGRAMME DES CONTRAINTES

(Jeu initial nul Cartouche la plus froide)
 (sans passage à haute θ)

Fig.19

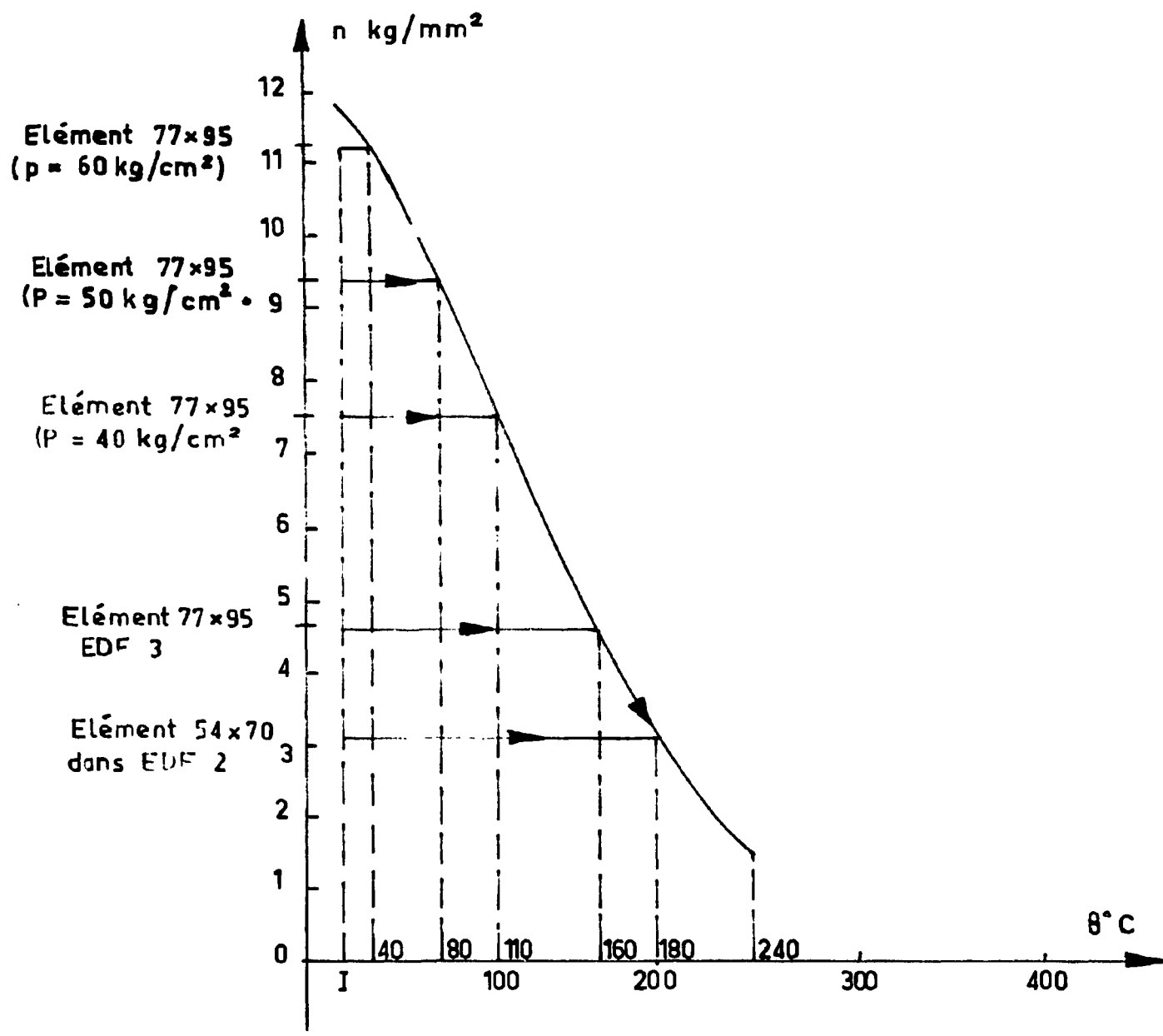


DIAGRAMME DES CONTRAINTES

(Jeu initial U.gaine de l'ordre de 0,4%)
 Cartouche la plus froide
 Pas de passage à haute θ

Fig. 20

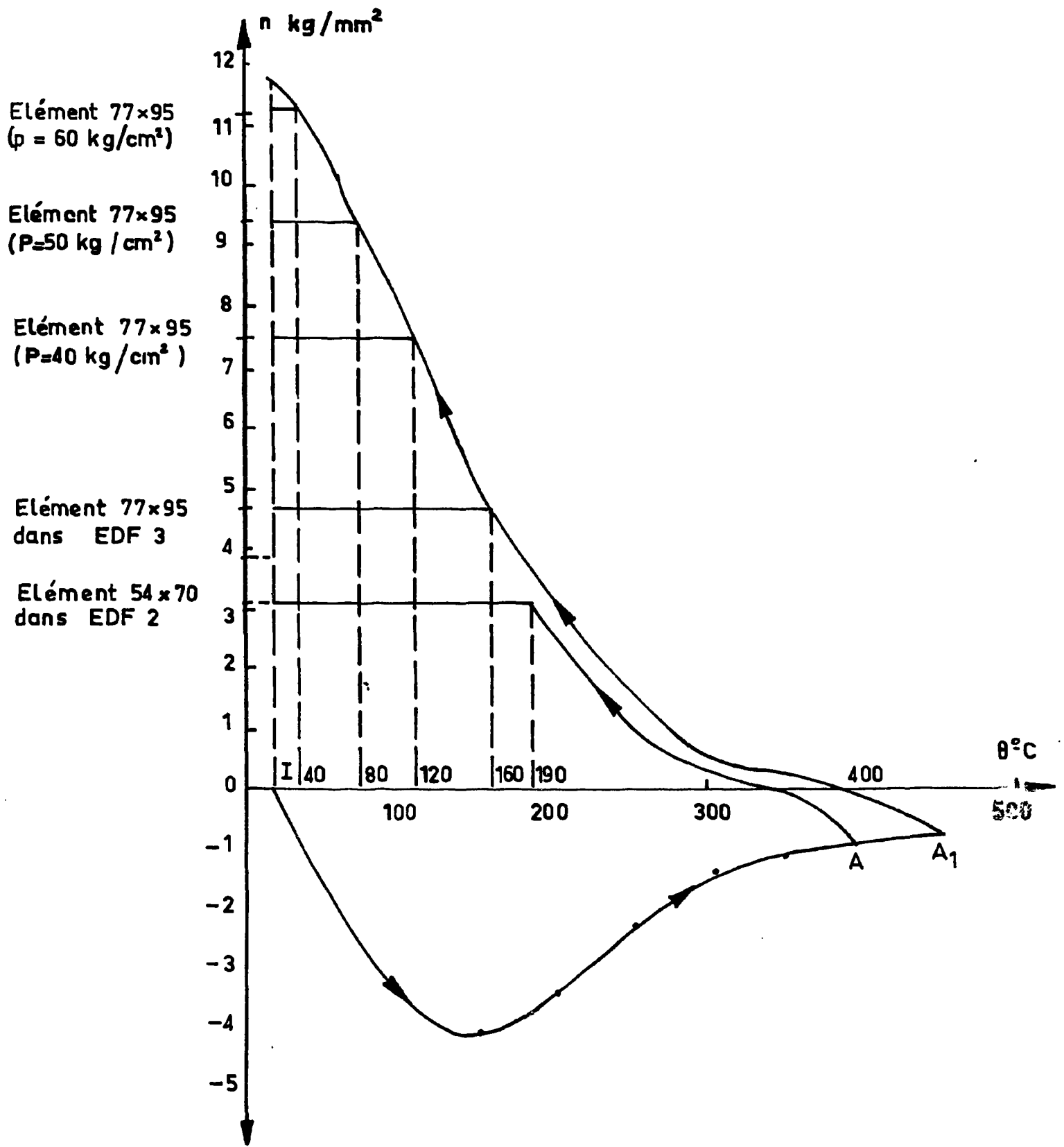


DIAGRAMME DES CONTRAINTES

(Cartouche la plus froide après passage)
 à 400°C jeu initial nul

Fig.21

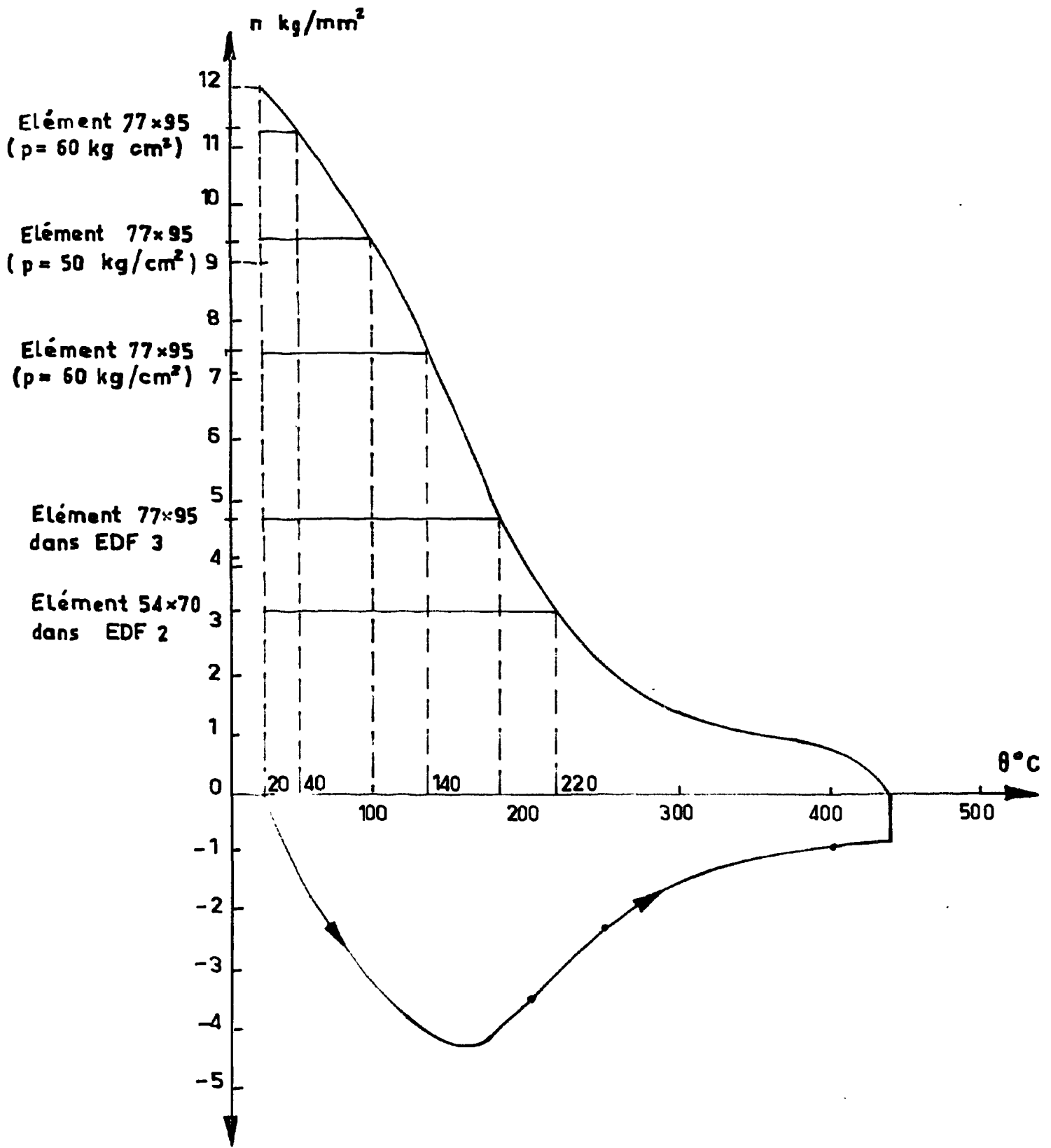
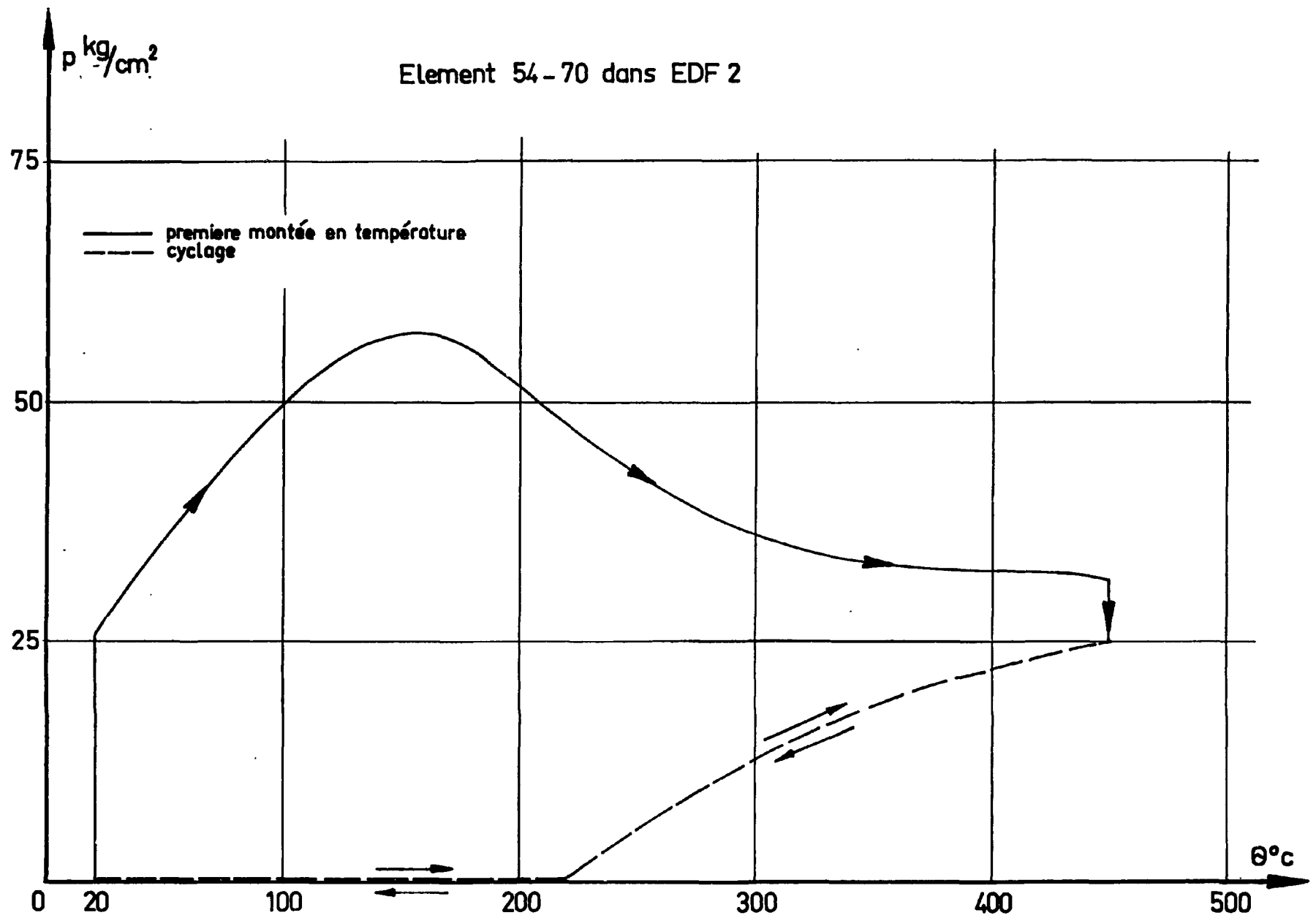


DIAGRAMME DES CONTRAINTES

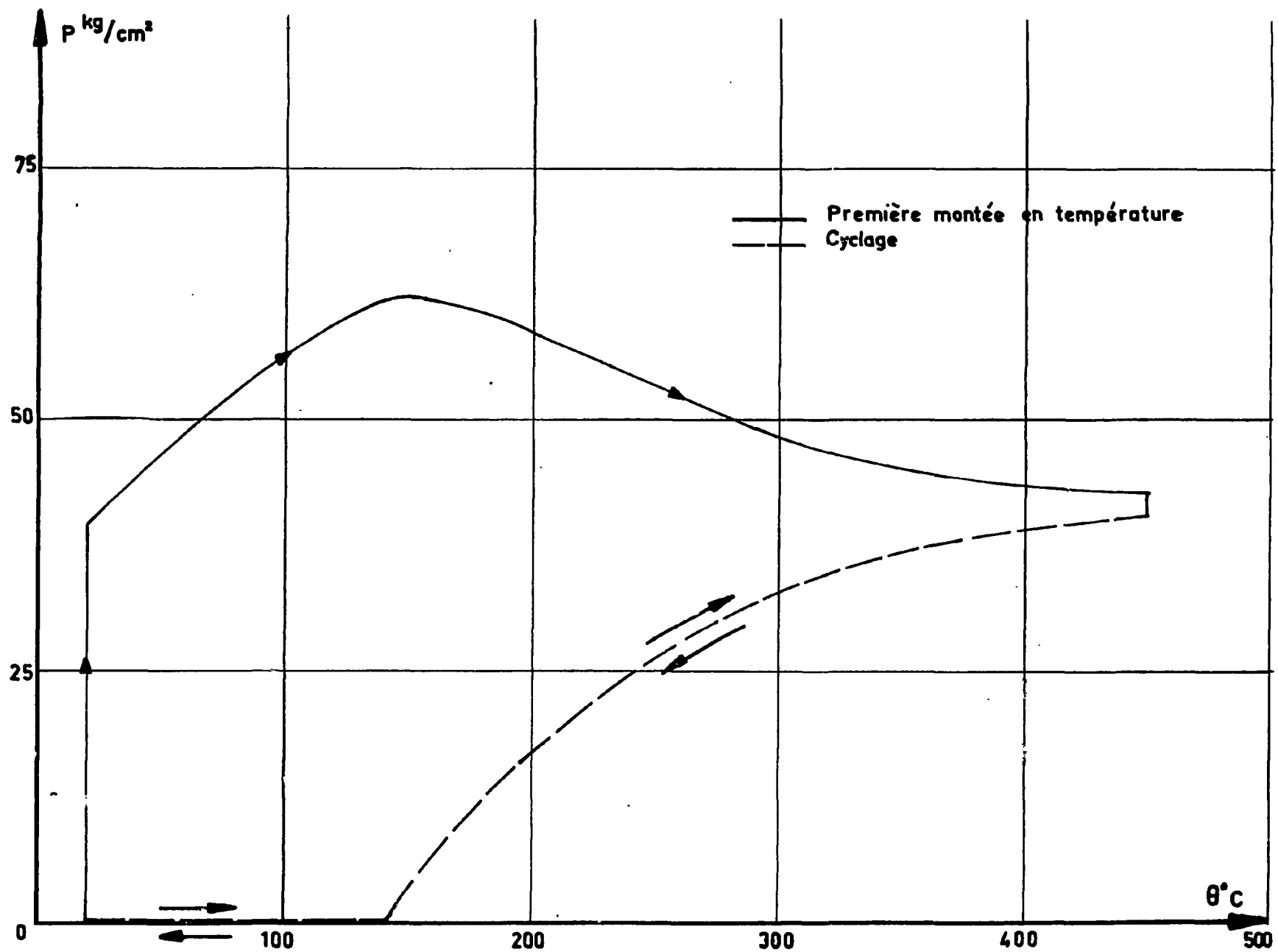
Cartouche la plus chaude

Fig. 22



PRESSION DE CONTACT
(Jeu initial nul - cartouche la plus chaude)

Fig. 23

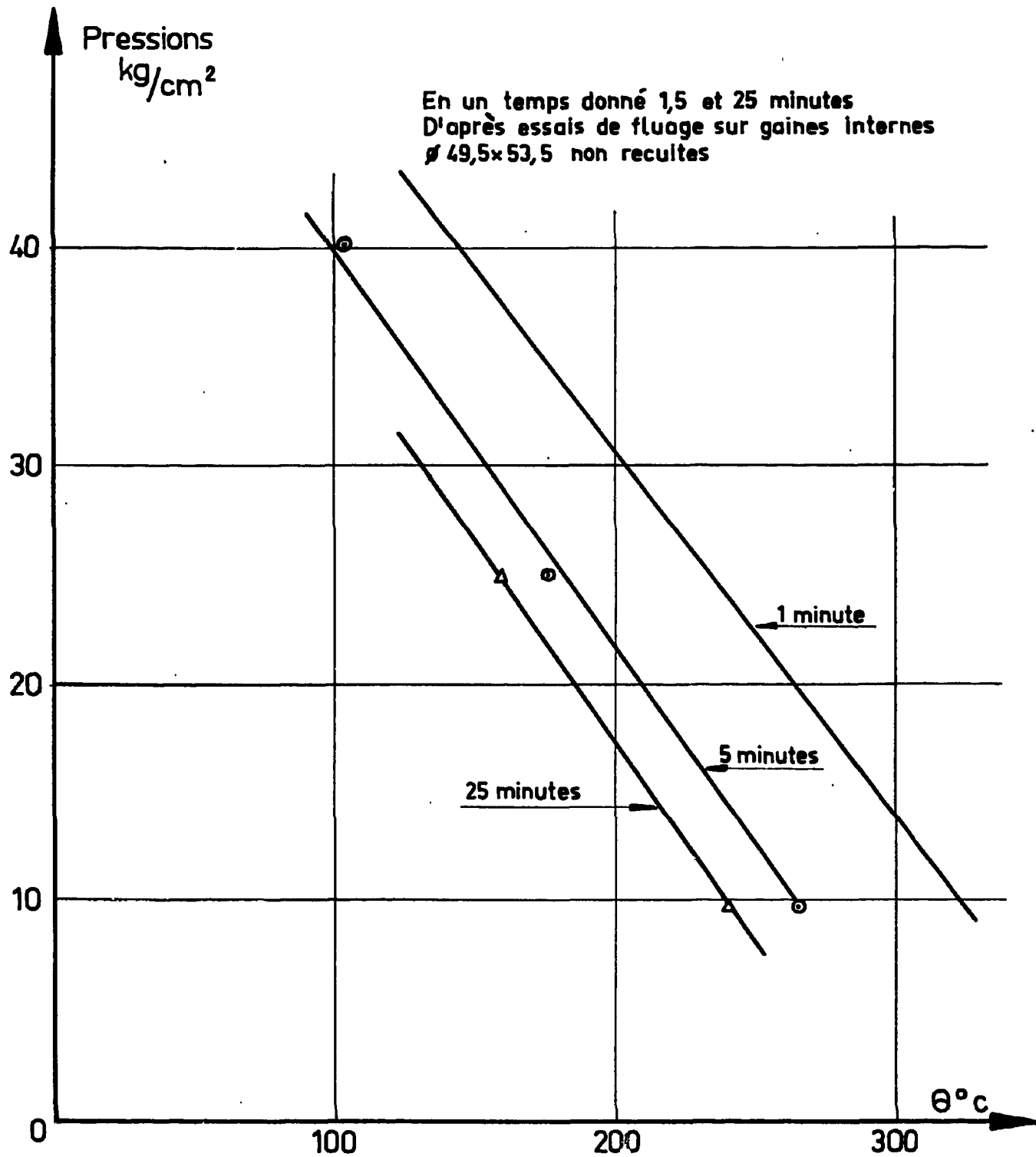


PRESSIION DE CONTACT

JEU INITIAL NUL - CARTOUCHE LA PLUS CHAUDE

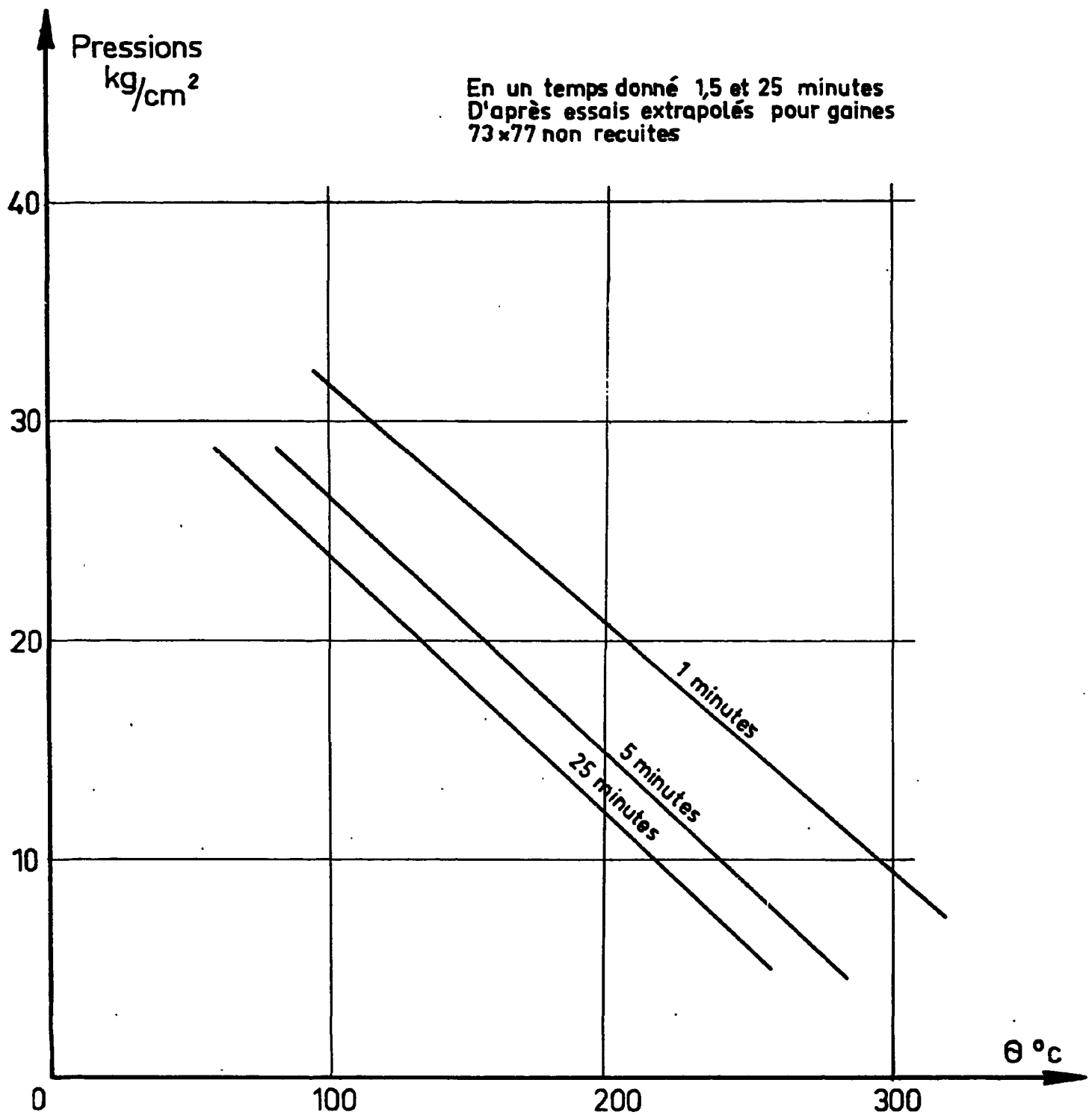
Elément 77_95 pression = 40 kg/cm^2

Fig. 24



TEMPERATURES ET PRESSIONS POUR LESQUELLES
ON ATTEINT 0,4% DE FLUAGE

Fig. 25



TEMPERATURES ET PRESSIONS POUR LESQUELLES
ON ATTEINT 0,4% DE FLUAGE

Fig. 26

FIN