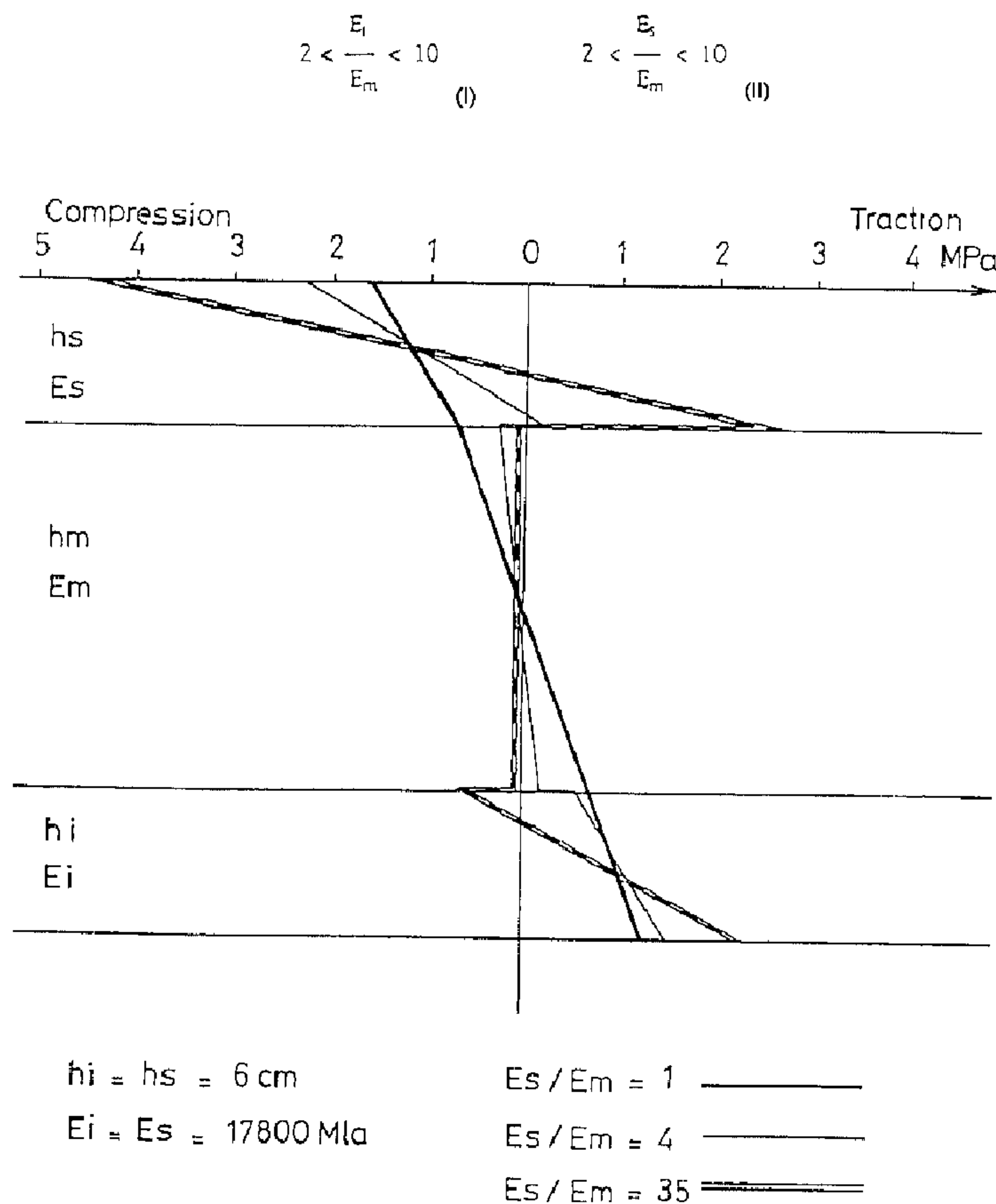




(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 1997/10/02
(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 1998/04/09
(45) Date de délivrance/Issue Date: 2004/12/14
(85) Entrée phase nationale/National Entry: 1999/03/31
(86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 1997/001740
(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 1998/014663
(30) Priorité/Priority: 1996/10/02 (96/12001) FR

(51) Cl.Int.⁶/Int.Cl.⁶ E01C 7/18
(72) Inventeur/Inventor:
GOACOLOU, HONORE, FR
(73) Propriétaire/Owner:
ENTREPRISE JEAN LEFEBVRE, FR
(74) Agent: ROBIC

(54) Titre : STRUCTURE TRICOUCHE DE CHAUSSEE
(54) Title: THREE-LAYERED ROAD STRUCTURE



(57) Abrégé/Abstract:

La présente invention concerne une nouvelle structure de chaussée dont la partie portante surmontant un sol comprend trois couches successives de matériaux bitumineux collées entre elles, à savoir: - une couche inférieure qui repose sur le sol avec



(57) Abrégé(suite)/Abstract(continued):

interposition éventuelle d'une couche de forme, d'épaisseur H_i telle que: $4 \text{ cm} \leq H_i \leq 10 \text{ cm}$ et de module élastique : E_i - une couche médiane d'épaisseur H_m telle que: $4 \text{ cm} \leq H_m \leq 20 \text{ cm}$ et de module élastique E_m tel que: $2\,000 \text{ MPa} < E_m < 8\,000 \text{ MPa}$ - une couche supérieure d'épaisseur H_s telle que: $4 \text{ cm} \leq H_s \leq 10 \text{ cm}$ et de module élastique E_s , lesdits modules élastiques desdites couches répondant aux relations d'inégalité suivantes: (voir formule ci-haut).

ABREGE DESCRIPTIF

La présente invention concerne une nouvelle structure de chaussée dont la partie portante surmontant un sol comprend trois couches successives de matériaux bitumineux collées entre elles, à savoir :

- une couche inférieure qui repose sur le sol avec interposition éventuelle d'une couche de forme, d'épaisseur H_i telle que :

$$4 \text{ cm} \leq H_i \leq 10 \text{ cm}$$

et de module élastique : E_i

- une couche médiane d'épaisseur H_m telle que :

$$4 \text{ cm} \leq H_m \leq 20 \text{ cm}$$

et de module élastique E_m tel que :

$$2\,000 \text{ MPa} < E_m < 8\,000 \text{ MPa}$$

- une couche supérieure d'épaisseur H_s telle que :

$$4 \text{ cm} \leq H_s \leq 10 \text{ cm}$$

et de module élastique E_s ,

lesdits modules élastiques desdites couches répondant aux relations d'inégalité suivantes :

$$2 < \frac{E_i}{E_m} < 10 \quad \text{et} \quad 2 < \frac{E_s}{E_m} < 10 .$$

STRUCTURE TRICOUCHE DE CHAUSSEE

- 5 La présente invention concerne une nouvelle structure de chaussée dont la partie portante surmontant un sol comprend trois couches successives de matériaux bitumineux collées entre elles.

10 Les structures de chaussées ont été pendant longtemps construites avec des granulats naturels ou concassés, mais d'abord sans incorporation de liants destinés à augmenter leur cohésion. Aujourd'hui, les deux techniques, avec ou sans incorporation de liants, sont utilisées indépendamment ou de manière combinée.

- 15 Avec une telle technologie faisant appel à des structures en matériaux non traités, la règle principale pour leur conception est la progressivité des modules de rigidité. Les matériaux les moins performants sont mis en sous-couche, en contact avec le sol avec interposition éventuelle d'une couche de forme ; ce sont en général des matériaux de faible portance. Viennent
20 ensuite des matériaux plus élaborés et enfin la couche de roulement qui seule est réalisée avec un liant bitumineux.

On indiquera dans le tableau I ci-dessus un exemple de structure classique en matériaux non traités qui illustre la règle de progressivité des modules.

TABLEAU I

	COUCHES	EPAISSEUR	MATERIAUX	MODULE ELASTIQUE
5	Roulement	6 cm	Enrobés	5400 MPa
	Base	20 cm	Grave Reconstituée Humidifiée 0/20	360 MPa
	Fondation	25 cm	Grave non traitée 0/31,5	120 MPa
	Sol	-	sol	20 MPa

10 Avec l'augmentation du trafic, sont apparues les structures en matériaux traités. Ces matériaux sont des graves ou des sables traités soit au ciment, ou avec un liant hydraulique apparenté, soit au bitume.

Ces structures sont conçues pour travailler en flexion et calculées en conséquence.

15

Dans pareil cas, la progressivité des modules entre les couches de fondation et de base peut encore exister mais n'est pas la règle générale, bien au contraire.

20 Dans la pratique, on distingue :

25 • des structures (famille F1 du tableau II ci-après) ayant des couches de base et de fondation de même rigidité. Ce sont en général les mêmes matériaux ou des matériaux semblables qui composent les deux couches, et

• des structures (famille F2 du tableau II ci-après) dont la couche de base est nettement moins rigide que la couche de fondation. Dans ce cas, la couche de base joue un rôle contre la remontée des fissures

transversales de retrait qui se développent inévitablement dans les couches en MTLH (Matériau Traité aux Liants Hydrauliques).

- 5 Du point de vue structurel, les couches de base et de fondation sont les couches les plus épaisses et assurent la pérennité de la structure. La couche de surface, quant à elle, assure à l'utilisateur sécurité et confort.

TABLEAU II

10	Type de structure	Semi rigide	Béton	Bitumineuse épaisse	Mixte	Inverse
	Couche de roulement	Enrobés	Béton de ciment	Enrobé	Enrobé	Enrobé
15	Couche de base	MTLH	Béton de ciment	Grave bitume	Grave bitume	GRH
	Couche de fondation	MTLH	Béton maigre	Grave bitume	MTLH	MTLH
20	Fonctionnement	F1	F1	F1	F2	F2

GRH : Grave Reconstituée Humidifiée

F1 : Structure avec $E_{CB} \geq E_{CF}$

F2 : Structure avec $E_{CB} \leq E_{CF}$

25

L'endommagement des structures de chaussées peut se produire selon deux processus distincts :

- a) par fatigue due à des flexions répétées de la couche traitée la plus sollicitée, en général la couche de fondation, et/ou
- 30 b) par déformation permanente qui résulte d'une pression verticale excessive sur les matériaux non traités, en particulier sur le sol.

Pour éviter sa rupture, le dimensionnement d'une structure de chaussée consiste donc à limiter ces sollicitations en deçà des valeurs admissibles qui dépendent des performances du matériau et du trafic qu'elle devra subir, en augmentant l'épaisseur des couches constitutives de ladite structuré.

5

En remplacement d'un système bi-couche classique, tel qu'il était connu dans l'état antérieur de la technique, composé d'une couche de base et d'une couche de fondation, l'objet de la présente invention propose une nouvelle structure de chaussée dont la partie portante est constituée par un système
10 tricouche particulier.

Il comprend de façon générale deux couches extérieures minces réalisées en matériaux à hautes performances, et une couche médiane en matériau aux performances plus modestes mais peu coûteux. L'adaptation d'une telle
15 structure au trafic se fait par augmentation du moment fléchissant admissible en augmentant le bras de levier du système, c'est-à-dire en augmentant l'épaisseur de la couche centrale, c'est-à-dire celle faisant appel au matériau le moins coûteux.

20 Ainsi la présente invention concerne une structure de chaussée dont la partie portante, surmontant un sol, comprend trois couches successives de matériaux bitumineux collées entre elles, à savoir :

- une couche inférieure qui repose sur le sol avec interposition
25 éventuelle d'une couche de forme, d'épaisseur H_i telle que :

$$4 \text{ cm} \leq H_i \leq 10 \text{ cm}$$

et de module élastique : E_i

- une couche médiane d'épaisseur H_m telle que :

30 $4 \text{ cm} \leq H_m \leq 20 \text{ cm}$

et de module élastique E_m tel que :

$$2\,000 \text{ MPa} < E_m < 8\,000 \text{ MPa}$$

5

- une couche supérieure d'épaisseur H_s telle que :

$$4 \text{ cm} \leq H_s \leq 10 \text{ cm}$$

et de module élastique E_s ,

5 lesdits modules élastiques desdites couches répondant aux relations d'inégalité suivantes :

10
$$2 < \frac{E_i}{E_m} < 10 \quad \text{et} \quad 2 < \frac{E_s}{E_m} < 10$$

15 Il convient de préciser que dans tout le texte de la description et des revendications, on entendra par matériaux bitumineux de façon très générale tous types de matériaux routiers, naturels, artificiels ou de recyclage, en particulier des graves et/ou des sables traités par des liants hydrocarbonés ou éventuellement des liants hydrauliques ainsi que des mélanges de tels liants. A titre d'exemples de liants bitumineux, on mentionnera les bitumes purs ou modifiés, sous forme d'émulsion ou de mousse de bitume ou encore sous forme fluidisée, avec ou sans additifs.

20 On précisera également que tous les modules élastiques s'entendent comme étant déterminés dans des conditions moyennes d'utilisation, c'est-à-dire aux températures et aux vitesses de circulation ordinaires.

25 D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture faite ci-après en référence à l'étude détaillée du fonctionnement d'une telle structure de chaussée, objet de la présente invention.

30 Selon une caractéristique additionnelle de la présente invention, les couches inférieure et supérieure présentent des modules élastiques au moins sensiblement identiques, et avantageusement égaux entre eux.

Selon une autre caractéristique de la présente invention, l'épaisseur H_i et l'épaisseur H_s des couches inférieure et supérieure sont au moins sensiblement identiques et avantageusement égales entre elles.

- 5 Selon une caractéristique particulièrement avantageuse de la présente invention, les couches inférieure et supérieure de ladite structure de chaussée sont réalisées en une grave et/ou en sable traité(s) par un liant hydrocarboné.
- 10 Pour la réalisation de telles couches inférieure et supérieure, on utilisera de préférence un béton bitumineux à module élevé, par exemple, un enrobé de type de celui commercialisé par la Demanderesse sous la désignation BBTHM®, c'est-à-dire un Béton Bitumineux à Très Haut Module.
- 15 Selon une autre caractéristique avantageuse de la présente invention, la couche médiane de ladite structure sera réalisée en une grave et/ou un sable traité(s) par un liant hydrocarboné, un liant hydraulique ou un mélange de tels liants. A titre d'exemple de liant, on mentionnera la GRAVE-MOUSSE® commercialisée par la Demanderesse.
- 20 S'il est important de préciser que les trois couches successives de matériaux bitumineux doivent être collées entre elles, il convient d'observer que cette adhérence entre couches adjacentes peut être obtenue par tout moyen. C'est ainsi que la mise en oeuvre successive des différentes couches à chaud ainsi
- 25 que la composition particulière de ces dernières peut conduire à un collage satisfaisant, sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à l'application de couches additionnelles d'autres matériaux.
- De façon avantageuse, le collage entre lesdites couches peut être effectué par
- 30 interposition d'une couche d'accrochage ou, si nécessaire, d'une couche d'imprégnation et d'une couche d'accrochage.

La partie portante de la structure de chaussée, selon l'invention, comporte une couche inférieure qui peut reposer, soit directement sur le sol, soit avec interposition d'une couche de forme destinée à uniformiser la portance de la structure. Une telle couche de forme est de façon classique réalisée en un
5 matériau traité ou non, et peut atteindre des épaisseurs de l'ordre de 30 cm.

Une telle structure de chaussée conforme à la présente invention peut enfin, le cas échéant, surmontée d'une couche de roulement dont la nature précise sera choisie par l'homme du métier en fonction du trafic auquel ladite
10 chaussée est destinée à être soumise. Il pourra par exemple s'agir d'un enrobé superficiel classique d'une épaisseur d'environ 2,5 cm.

Il importe toutefois de relever que pour certaines applications particulières, et en raison de la nature et de la formulation de la couche supérieure, il n'est
15 pas nécessaire de faire surmonter la structure selon l'invention par une couche de roulement.

L'étude du fonctionnement d'une structure de chaussée conforme à la présente invention a tout d'abord été réalisée de manière théorique en
20 procédant à une modélisation, puis à des calculs numériques.

Le modèle utilisé est un système multicouche en élasticité linéaire soumis à un chargement correspondant à deux roues jumelées de 6,5 T. Ce cas de figure correspond à l'essieu standard français de 13 T.
25

Les paramètres de modélisation d'une structure tricouche sur un support d'épaisseur infinie sont indiquées ci-après.

- les couches inférieure et supérieure sont de faibles épaisseurs :
30 $H_s = H_i = 6 \text{ cm}$

- l'épaisseur de la couche médiane est variable en général, telle que :
 $8 \text{ cm} \leq H_m \leq 20 \text{ cm}$
- le contraste de module :

$$2 < \frac{E_s}{E_m} < 10$$

$$2 < \frac{E_i}{E_m} < 10$$

- les matériaux constituant la couche supérieure et la couche inférieure ont des caractéristiques voisines. Pour simplifier l'étude ci-après, les deux matériaux seront supposés identiques : d'où $E_i = E_s$.

De plus, on prendra pour ce matériau les caractéristiques du BBTHM®, un enrobé à module élevé de l'Entreprise Jean Lefebvre.

La figure 1 annexée montre que les diagrammes des contraintes et des déformations selon un axe vertical au droit de la charge sont différenciés en fonction du rapport E_s/E_m .

- Lorsque la structure est constituée d'un même matériau ($E_s/E_m = 1$) les diagrammes sont sensiblement linéaires. La flexion se traduit par de la compression en surface et de la traction en partie inférieure.
- Lorsque le contraste de module est élevé ($E_s/E_m = 35$), par exemple en intercalant une grave non traitée entre les deux couches d'enrobé à module élevé (BBTHM®), les deux couches, haute et basse, fléchissent indépendamment l'une de l'autre ce qui a pour conséquence :

l'apparition de traction importante à la base de la couche supérieure et l'augmentation sensible de la contrainte de flexion à la base de couche inférieure.

- La réduction du rôle joué par la couche médiane et en particulier de son épaisseur. L'augmentation de l'épaisseur de cette couche ne permet pas de réduire sensiblement la contrainte de traction à la base de la couche supérieure.
- 5
- Enfin dans le cas intermédiaire ($E_s/E_m = 4$), le diagramme des contraintes se présente sous forme de lignes brisées comme précédemment mais avec trois différences fondamentales que sont :
- 10
- la disparition de la contrainte de traction à la base de la couche supérieure (donc pas de risque d'endommagement),
 - la faible augmentation de la contrainte de traction à la base de la couche inférieure par rapport à la structure monolithique,
- 15
- conservation d'une forte dépendance entre les couches ce qui permet de mobiliser un moment de flexion plus important en augmentant l'épaisseur de la couche médiane (l'effet de bras de levier persiste).
- 20
- Les valeurs déterminantes à examiner dans une telle structure sont les déformations à chaque interface.
- Elles permettent d'évaluer le mode de sollicitation (traction ou compression)
- 25
- et d'apprécier s'il s'agit d'un niveau critique où des phénomènes d'endommagement pourraient prendre naissance.
- Les graphiques des figures 2 à 4 annexées montrent comment varient ces déformations en fonction du rapport E_s/E_m et de l'épaisseur H_m .
- 30
- La déformation à la base de la couche supérieure est illustrée à la figure 2.
- La base de cette couche est en extension pour les forts rapports de E_s/E_m .

Pour une valeur de $E_s = 500$ MPa (cas d'une grave non traitée d'une structure inverse par exemple) la déformation est supérieure à $100 \cdot 10^{-6}$ ce qui en fait un point critique pour le dimensionnement.

- 5 De plus, il est à noter que l'épaisseur H_m de la couche médiane a peu d'influence sur le niveau de déformation. En fait, le seul moyen pour réduire cette valeur est d'augmenter l'épaisseur de la couche supérieure. Pareille solution est onéreuse, puisqu'il s'agit du matériau le plus performant.
- 10 Pour les faibles rapports de E_s/E_m , on retrouve le comportement des structures classiques, caractérisé par des couches supérieures travaillant entièrement en compression.

- Pour les rapports intermédiaires de E_s/E_m , par exemple pour des valeurs E_m
- 15 comprises entre 2000 et 5 000 MPa, la déformation est positive, mais reste suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas de risque d'endommagement.

Les déformations dans la couche inférieure, au niveau de la fibre supérieure sont illustrées à la figure 3.

20

Cette fibre est en légère compression pour les faibles valeurs de E_m (500 à 1 500 MPa) et en traction modérée au delà.

Les déformations dans la couche inférieure, au niveau de la fibre inférieure

25 sont illustrées à la figure 4.

Cette fibre est en traction quel que soit le rapport E_s/E_m . Cette déformation est plus sensible à l'épaisseur de la couche médiane qu'à sa rigidité.

- 30 Un quadruplement du module E_m (5 000 à 2 000 MPa par exemple) peut être compensé par une augmentation de l'épaisseur (H_m) de 2 cm (8 cm à 10 cm).

Comme les couches sont collées entre elles sans risque de glissement, les déformations dans la couche médiane sont celles des couches adjacentes.

Les plages favorables du module E_m qui conduisent à des déformations par compression ou par faible traction sont :

$E_m > 2\,000$ MPa pour ce qui concerne la fibre supérieure

$E_m < 8\,000$ MPa pour ce qui concerne la fibre inférieure.

10 En conclusion, il ressort de l'analyse précédente que la plage intéressante pour le module (E_m) est comprise entre 2 000 et 8 000 MPa ou de préférence encore, entre 4 000 et 8 000 MPa.

En effet, dans ces conditions :

15

- les couches supérieure et médiane sont peu sollicitées en traction et auront une forte durabilité, et

20

- la couche inférieure est la couche la plus sollicitée et son niveau de déformation peut être ajustée à une valeur admissible dépendant du trafic, en faisant varier l'épaisseur de la couche médiane.

Le dimensionnement de la structure tri-couche peut être déterminé comme suit.

25

L'analyse du mode de fonctionnement de la structure tri-couche permet de prévoir son mode de rupture. Le processus de ruine d'une telle structure comporte trois phases qui ont été illustrées à la figure 5 :

30

- fatigue de la couche inférieure du tricouche (figure 5a) :

Au cours de cette première phase, seule la couche inférieure est sollicitée en traction. Le nombre de sollicitations que peut supporter la

structure au cours de cette phase peut être calculé en appliquant la méthode de calcul habituelle qui sera détaillée ultérieurement.

- fatigue de la couche médiane (figure 5b) :

5

Après rupture de la première couche, la structure fonctionne différemment. La couche médiane travaille cette fois-ci en traction et ce mode de fonctionnement durera jusqu'à la rupture de cette couche.

- 10 - fatigue de la couche supérieure (figure 5c) :

Après rupture des deux premières couches, la couche supérieure va être à son tour sollicitée en traction et donc subir un processus d'endommagement.

15

En fait, compte tenu du mode de fonctionnement original de cette structure, sa durée de vie est la somme de trois durées élémentaires.

20 Cette particularité n'est jamais rencontrée pour les structures classiques. A titre d'exemple, on peut examiner les deux cas extrêmes suivants :

- a) une structure avec le même matériau en couche de base et de fondation (ou modèle tricouche avec $E_s = E_m = E_f$).

25

Dans ce cas, la structure est monolithique (voir figure 6a), et le processus de ruine ne comporte qu'une phase qui est l'endommagement de la couche de fondation. En effet, comme les couches sont collées entre elles et qu'elles ont des rigidités au moins sensiblement voisines, toute fissure apparue à la base de la structure se propage très rapidement vers la surface. Cette phase de propagation est négligeable devant la phase d'amorçage de la fissure. Dans le cas de la structure tricouche, la présence d'une couche médiane nettement moins rigide, bloque la propagation de la fissure et une nouvelle phase

30

d'amorçage est nécessaire pour que le processus de ruine puisse progresser.

- b) une structure inverse (ou modèle tricouche avec $E_m \leq E_i$ et E_s).

5

Dans un tel cas de figure, il y a endommagement simultané de la couche inférieure et de la couche supérieure (voir figure 6b) et il n'y a pas sommation des durées de vie des couches.

- 10 Pour illustrer l'amélioration de durée de vie de la structure tricouche selon l'invention, le calcul proposé pour illustrer la démarche a porté sur la structure suivante :

15

6 cm de BBTHM® + 8 cm de GM + 6 cm de BBTHM® sur une plate-forme PF2.

GM désignant une grave traitée à la mousse de bitume, en particulier la Grave-Mousse®.

20

La modélisation des trois phases est présentée dans le tableau III ci-après :

TABEAU III

25

Couche	1ère phase	2ème phase	3ème phase
supérieure	17 800	17 800	17 800
médiane	5 500	5 500	1 100 (*)
inférieure	17 800	3 500 (*)	3 500 (*)

Module des couches (MPa) en fonction de leur état d'endommagement (intact ou cassé *).

30

Les déformations critiques calculées sont les suivantes :

- 1ère phase : $85,5 \cdot 10^{-6}$ à la base de la couche inférieure

- 2ème phase : $112 \cdot 10^{-6}$ à la base de la couche médiane
- 3ème phase : $87,6 \cdot 10^{-6}$ à la base de la couche supérieure.

Les caractéristiques en fatigue nécessaires aux calculs sont données dans le
5 tableau IV ci-après :

TABLEAU IV

		Epsilon 6	Pente	SN	SII
10	BBTHM®	$132 \cdot 10^{-6}$	0,175	0,29	1 cm
	Grave-Mousse®	$109 \cdot 10^{-6}$	0,126	0,6	1 cm

La durée de vie de chaque couche est calculée à partir de la formule ci-après,
conformément au guide technique français de conception et de
15 dimensionnement des structures de chaussées.

$$\epsilon_t = \epsilon_6 \left(\frac{N}{10^6} \right)^b \cdot K_c \cdot K_r \cdot K_s$$

20

avec ϵ_t : déformation à la base des couches bitumineuses

ϵ_6 : déformation qui aboutit à une durée de vie équivalente à 10^6
cycles

N : nombre de cycles

25

K_c : coefficient de calage

$K_c = 1$ pour le BBTHM®

$K_c = 1,3$ pour la Grave-Mousse®

K_r : est un coefficient qui ajuste la valeur de la déformation
admissible au risque de calcul retenu en fonction des
facteurs de dispersion sur l'épaisseur (écart-type Sh) et sur
30 les résultats des essais de fatigue (écart-type SN)

$$K_r = 10^{-ub\delta}$$

15

- u : variable centrée réduite associée au risque r
 b : pente de la loi de fatigue du matériau (loi bi-logarithmique)
 δ : écart-type de la distribution de logN à la rupture

5

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0.5}$$

10

- c : coefficient reliant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée, Δh , ($\log \epsilon = \log \epsilon_0 - c \Delta h$).

Pour les structures courantes, c est de l'ordre de 0,02 cm⁻¹.

15

- K_s : le coefficient de plate-forme. Il vaut 1 dans le cas qui nous concerne.

Pour les calculs qui suivent, on prendra $U = 2,05$ ce qui correspond à un risque de rupture de 2 % (risque habituellement retenu pour les chaussées à fort trafic).

20

Pour calculer la durée de vie de la structure tricouche, on a déterminé la densité de probabilité de rupture de chacune des trois couches représentée à la figure 7 annexée.

- 25 La probabilité de rupture du tricouche qui est le produit des probabilités de rupture de chacune des couches est données à la figure 8 annexée.

On y observe que pour un risque de rupture de 2 %, la durée de vie escomptée est telle que :

30

$$\begin{aligned} \log(N) &= 7,04 \\ \text{soit } N &= 11.10^6 \end{aligned}$$

Il convient d'observer que l'épaisseur d'une structure monolithique (constituée de BBTHM® uniquement) équivalente en durée de vie est de 25 cm et de 38 cm pour une structure en grave bitume classique, valeur qui est à comparer aux 20 cm de la structure tricouche.

5

Les performances mécaniques de la structure tricouche selon l'invention permettent de réaliser d'importantes économies des matières. Le tableau V ci-après donne le bilan matières de trois structures équivalentes en durée de vie construites sur des supports identiques :

10

- la première est une structure tricouche constituée de 20 cm de matériaux (6 cm de BBTHM® + 8 cm de Grave-Mousse® + 6 cm de BBTHM®).
- 15 - la seconde est une structure monolithique constituée par 25 cm de BBTHM®. Il est à noter que ce type de matériau est aujourd'hui le matériau le plus performant permettant les structures les moins épaisses.
- 20 - la troisième est aussi une structure monolithique constituée par 38 cm de grave bitume de classe 2 (GB2).

TABLEAU V

		Tricou- che	BBTHM	GB2
5	BBTHM® ou GB2	Epaisseur (cm) 2 X 6 Masse surfactive (kg/m²) : - des granulats - du bitume - TOTALE	25 591 34 625	38 816 34 850
10	Grave- Mousse®	Epaisseur (cm) 8 Masse surfactive (kg/m²) : - des granulats - du bitume - TOTALE	- - - -	- - - -
15	Total	Epaisseur (cm) 20 Masse surfactive (kg/m²) : - des granulats - du bitume - TOTALE	+ 25 % + 30 % + 55 % + 31 %	+ 90 % + 80 % + 55 % + 79 %

Ce bilan matières fait ressortir les avantages suivants par rapport à la structure classique la plus performante :

- 20 - une économie très importante du matériau le plus cher, c'est-à-dire plus de la moitié de bitume ;
- une économie de granulats (30 %) qui génère de plus des économies de transport et de mise en oeuvre ;

- une réduction d'épaisseur qui, dans le cas de décaissements en traverse d'agglomération, conduit à des économies de terrassement.

Un exemple de structure tricouche a été testée sur le manège de fatigue du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) à Nantes, dans le but de définir le mode de fonctionnement réel et de vérifier sa tenue en fatigue.

La structure de chaussée définie en figure 9 a été construite avec du matériel classique et selon les méthodes habituelles utilisées en technique routière. En ce sens, la planche d'essais est bien représentative de la technique à étudier.

Outre la Grave Reconstituée Humidifiée (GRH) utilisée en couche de forme, la structure tricouche comporte deux types de matériaux.

15 a) Le BBTHM®

Il s'agit d'un enrobé à module élevé de granularité 0/10 comportant 90 % de granulats concassés issus de roches massives et 10 % de sable naturel roulé. Le liant est un bitume dur de grade 10/20 dosé à 5,8 ppc.

Cet enrobé est conforme à la norme NPF 98 128 définissant les enrobés à module élevé (EME de classe 2).

Les principales caractéristiques mécaniques de cet enrobé sont :

- module complexe à 15°C et 10 Hz :

$$/E^*/ = 17\,800 \text{ MPa}$$
- résistance à la fatigue (essai à déformation imposée)
 déformation admissible à 10^6 cycles

$$(15^\circ\text{C} - 10 \text{ Hz}) : \epsilon_6 = 132 \cdot 10^{-6}$$

 pente de la droite de fatigue : $b = -0,175$

b) La Grave-Mousse®

La Grave-Mousse® est un matériau d'assise fabriqué par incorporation de bitume chaud sous forme de mousse dans des granûlats non chauffés.

La granularité est celle d'une Grave Reconstituée Humidifiée (GRH) avec une courbe pleine qui présente de bonnes caractéristiques de stabilité à court terme. La formule mise en oeuvre, de granularité 0/10, est composée entièrement de granûlats concassés issus de roches massives. La teneur en bitume est de 3,5 ppc. Il s'agit d'un bitume choisi pour sa moussabilité et sa dureté moyenne de grade 70/100.

Les principales caractéristiques mécaniques de ce matériau sont :

- module complexe à 15°C et 10 Hz :

$$/E^*/ = 5\,500 \text{ MPa}$$
- résistance à la fatigue (15°C et 10 Hz)

$$\epsilon_6 = 109 \cdot 10^{-6}$$
- $$\text{pente de la droite de fatigue : } b = -0,126$$

Déroulement de l'essai de fatigue :

L'essai de fatigue s'est déroulé en quatre phases de chargements progressifs (figure 10) :

- La première est une phase de préchargement. Elle a pour but de recréer les conditions habituelles de mûrissement des matériaux et en particulier celui de la Grave-Mousse® qui semble être accéléré par l'effet du trafic.

Cette phase, réalisée en Novembre 1994, a comporté environ 70 000 passages de roues jumelées lestées à 4,5 T.

- La deuxième phase, qui constitue l'essentiel de l'essai de fatigue, a démarré en Août 1995 après achèvement des expérimentations en cours sur deux autres anneaux du manège. Le nombre de passages prévisionnel de cette phase était de 1,5 million. En fait, elle a comporté 2,1 millions de passages de roues jumelées lestées à 6,5 T, charge qui correspond à un essieu de 13 T, l'essieu de référence français. La deuxième phase s'est achevée en Novembre 1995.
 - La troisième phase, prolongée par la quatrième, avait pour but d'évaluer la résistance limite de la structure neuve qui, au stade précédent, ne présentait aucun signe extérieur de fatigue. Au cours de ces deux phases, les roues jumelées ont été lestées à 7,5 T pour 100 000 passages puis à 8,5 T (essieu standard en surcharge à 17 T) pour 500 000 autres passages.
- L'essai a été arrêté après que les structures aient subi l'équivalent de 4,7 millions de passages d'essieux de 13 T.
- Au cours de cette période, les conditions hydriques et thermiques ont évolué. Elles sont précisées sur les figures 11 (niveau de la nappe phréatique) et 12 (températures dans la structure).

Ce nombre d'essieux équivalents a été déterminé comme suit :

$$Neq = \sum n_i \left[\frac{P_i}{6,5} \right]^{-1/b}$$

Tout au long de l'essai de fatigue, la structure a été auscultée par des mesures réalisées en surface (déflexion, profondeur d'ornièrre, relevés visuels) ou dans le corps de la structure (jauges de déformation, ovalisation).

Les mesures de déflexion sont présentées en figure 11. Elles sont mesurées sous le jumelage en service au moment de l'essai dont la masse varie de 4,5 T au début à 8,5 T en fin d'expérimentation.

- 5 Ces valeurs brutes ont fait l'objet d'une correction proportionnelle à la charge pour les ramener à la charge du jumelage standard français (6,5 T).

Il est à noter que les deux premières valeurs mesurées sous une charge de 4,5 T l'ont été avant la mise en oeuvre de la deuxième couche de BBTHM®.

10

Il apparaît clairement sur ce graphique que la déflexion varie avec la température mesurée dans la structure.

- 15 Une analyse détaillée du phénomène montre que cette variation est linéaire (figure 12) et qu'à une variation de température de 1°C correspond une variation de la déflexion de 2/100^e mm.

- 20 Corrigée des variations de charge et de température, la déflexion n'évolue pas de manière significative sauf en fin d'expérimentation où la légère augmentation constatée peut être attribuée au niveau élevé de la nappe phréatique. Ces constatations laissent à penser que la structure n'a plus été endommagée au cours de l'essai de fatigue.

- 25 La mesure de la profondeur d'ornièrre ou l'orniérage dans la bande de roulement est mesurée au transversoprofilographe.

Le graphique de la figure 13 montre l'évolution de ce paramètre au fil des chargements.

- 30 L'orniérage initial après mise en oeuvre de la troisième couche est de 5 mm ; il correspond plus à un défaut de profil en travers généré lors du compactage qu'à une évolution sous trafic. Ensuite l'orniérage croît linéairement avec le nombre de chargements, mais de manière très lente à raison de 1 mm par million de passages du jumelage de 6,5 T.

Le comportement de la structure vis-à-vis de l'orniérage est donc très satisfaisant, tant du point de vue fluage des couches bitumineuses qu'au niveau de la déformation permanente du sol support que la structure protège efficacement.

5

Il convient de noter qu'au cours de l'expérimentation, aucune dégradation n'a été constatée en surface.

10 Au cours d'un essai d'ovalisation, les déformations d'un trou de carottage sont mesurées au passage de la charge. L'exploitation des résultats permet de retrouver les déformations dans la structure avant carottage, donc en fonctionnement normal.

15 Deux essais ont été réalisés, l'un dans la bande de roulement ayant subi d'éventuels endommagements par fatigue (1,645 million de passages), l'autre hors de cette bande. Ce dernier essai est représentatif du fonctionnement de la structure avant tout endommagement.

20 Au cours de l'essai sur la structure non endommagée, le diagramme des déformations ainsi déterminé (figure 14) montre des profils relativement continus conformes à celui calculé à l'aide du modèle numérique.

25 Au cours de l'essai dans une zone circulée, les diagrammes obtenus dans cette zone (figure 15) présentent une brusque variation dans la moitié inférieure de la couche médiane. Ce type de profils suggère un plan de glissement à ce niveau (une découpe réalisée plus tard dans la structure a confirmé cette hypothèse).

30 La modélisation de ce phénomène par une simple interface glissante conduit à des déformations excessives. Une bonne concordance a été obtenue en modélisant cette zone dégradée par une couche mince de 1,5 cm d'épaisseur et de rigidité faible de 500 MPa. Cette rigidité correspond sensiblement à celle d'une grave non traitée. Les ajustements ainsi obtenus sont présentés en figure 16.

Au cours des essais destructifs, des carottages et des découpes ont été réalisés dans la structure à la fin de la phase 2.

5 Les carottages ont confirmé la présence d'une surface de rupture à la partie basse de la couche médiane au droit de la bande de roulement. Par contre, les carottes prélevées hors de la bande de roulement étaient intactes.

10 Les découpes transversales ont confirmé ce diagnostic. Elles ont permis de visualiser cette surface de rupture et montré qu'elle se limitait à la bande de roulement.

Cette constatation indique qu'il s'agit bien d'une rupture par fatigue de la Grave Mousse® et non pas un défaut préexistant.

15 La surface de rupture étant horizontale, elle ne résulte pas d'une fatigue par flexion qui aurait conduit à une fissuration verticale. Elle serait plutôt la conséquence d'une fatigue par cisaillement. Le calcul de la contrainte de cisaillement dans la couche médiane confirme cette hypothèse.

20 Les graphiques de la figure 17 montrent en effet que la contrainte de cisaillement sous les roues du jumelage atteint une valeur de 0,2 MPa. A cette valeur correspond une déformation de l'ordre de $70 \cdot 10^{-6}$ (pour un module de 4 000 MPa et un coefficient de poisson de 0,35) qui est tout à fait significative pour ce matériau dont la valeur admissible pour un million de cycle est :

25
$$\epsilon_6 = 109 \cdot 10^{-6}$$

De plus, ce maximum est relativement constant sur toute l'épaisseur de la couche médiane alors que la contrainte verticale décroît fortement avec la profondeur ce qui est favorable au développement du plan de fissuration en
30 partie basse de cette couche.

Cette structure tricouche présente un mode de rupture peu habituel qui diffère du mode de rupture décrit précédemment. En fait, il s'agit d'un des modes possibles d'un processus plus général présenté en figure 18.

- 5 En conclusion, cette expérimentation a montré qu'il est possible de minimiser le coût d'une structure de chaussée par un choix judicieux des matériaux en fonction de leurs caractéristiques mécaniques.

10 L'approche théorique a permis de définir le rapport des rigidités des matériaux pour que le fonctionnement de la structure soit optimal ($E_s = E_i$ et $10 > E_s/E_m > 2$).

15 L'expérimentation au manège de fatigue du LCPC à Nantes a permis de vérifier le fonctionnement d'une telle structure construite en vraie grandeur par des moyens habituels. Le fonctionnement de la structure s'est avéré conforme aux prévisions de la modélisation et s'est traduit par une excellente résistance au trafic.

20 En fin d'expérimentation, la planche d'essais ne présentait aucune dégradation malgré les 2,7 M de passages dont 600 000 en surcharge par rapport à l'essieu légal français. Le trafic total équivalent correspond à environ 5 millions d'essieux de 13 T.

REVENDICATIONS

- 1) Structure de chaussée dont la partie portante surmontant un sol comprend trois couches successives de matériaux bitumineux collées entre elles, à savoir :
- 5
- une couche inférieure qui repose sur le sol avec interposition éventuelle d'une couche de forme, d'épaisseur H_i telle que :

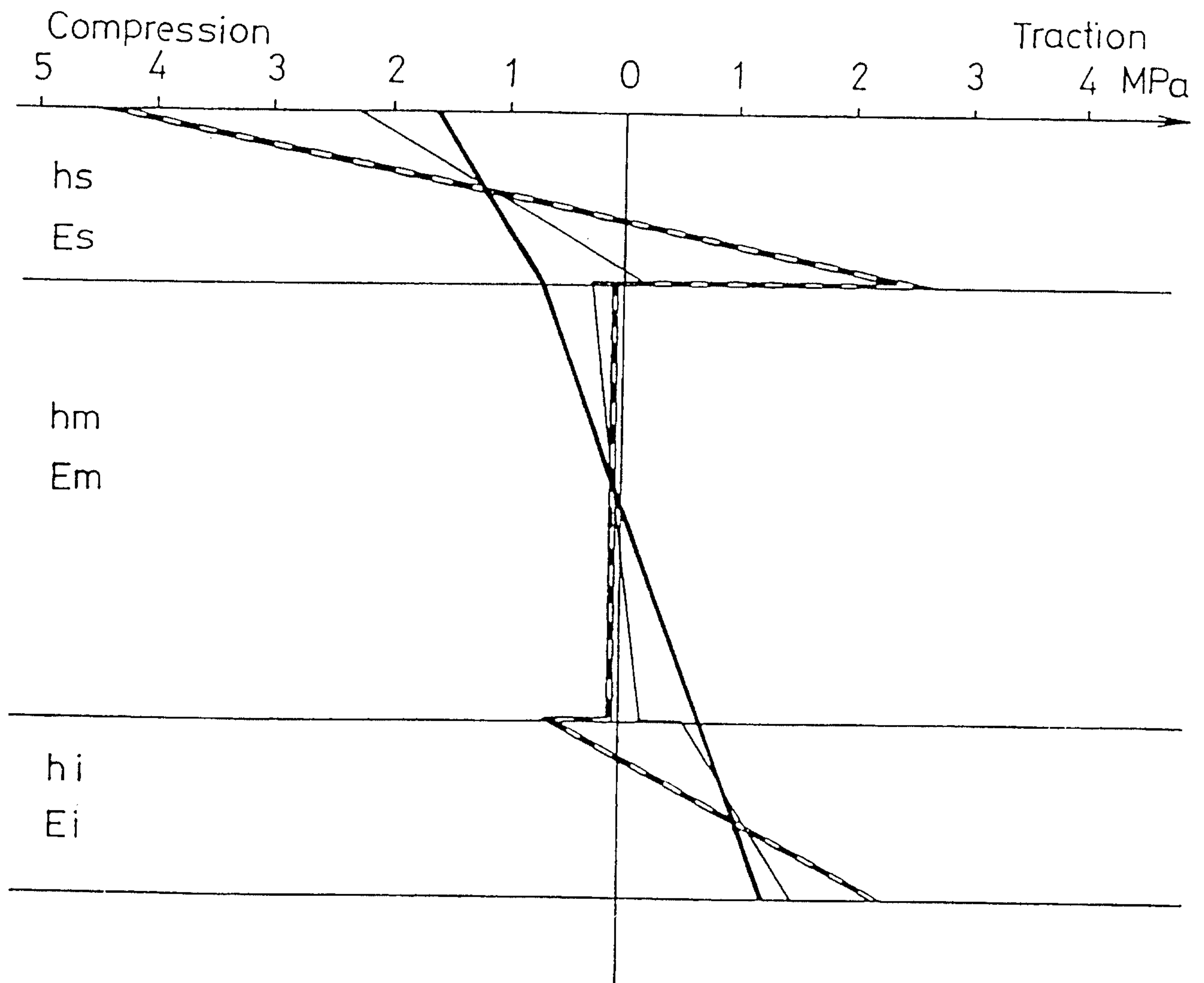
$$4 \text{ cm} \leq H_i \leq 10 \text{ cm}$$
 10 et de module élastique : E_i
 - une couche médiane d'épaisseur H_m telle que :

$$4 \text{ cm} \leq H_m \leq 20 \text{ cm}$$
 et de module élastique E_m tel que :
 15
$$2\,000 \text{ MPa} < E_m < 8\,000 \text{ MPa}$$
 - une couche supérieure d'épaisseur H_s telle que :

$$4 \text{ cm} \leq H_s \leq 10 \text{ cm}$$
 et de module élastique E_s ,
 20
- lesdits modules élastiques desdites couches répondant aux relations d'inégalité suivantes :
- 25
- $$2 < \frac{E_i}{E_m} < 10 \quad \text{et} \quad 2 < \frac{E_s}{E_m} < 10$$
- 2) Structure de chaussée selon la revendication 1, caractérisée en ce que les couches inférieure et supérieure présentent des modules élastiques au moins sensiblement identiques.
- 30

3. Structure de chaussée selon la revendication 2, caractérisée en ce que les couches inférieure et supérieure présentent des modules élastiques identiques.
4. Structure de chaussée selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que les épaisseurs des couches inférieure et supérieure H_i et H_s sont au moins sensiblement identiques.
5. Structure de chaussée selon la revendication 4, caractérisée en ce que les épaisseurs des couches
10 inférieure et supérieure H_i et H_s sont égales.
6. Structure de chaussée selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisée en ce que lesdites couches inférieure et supérieure sont réalisées en une grave et/ou en sable traité(s) par un liant hydrocarboné.
7. Structure de chaussée selon la revendication 6, caractérisée en ce que les couches inférieure et supérieure sont réalisées à l'aide d'un béton bitumineux à module élevé.
8. Structure de chaussée selon l'une quelconque des
20 revendications 1 à 7, caractérisée en ce que la couche médiane réalisée en une grave et/ou en sable traité(s) par un liant hydrocarboné, un liant hydraulique ou un mélange de tels liants.
9. Structure de chaussée selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisée en ce que lesdites couches sont collées entre elles par interposition d'une couche d'accrochage ou d'une couche d'imprégnation et d'une couche d'accrochage.
10. Structure de chaussée selon l'une quelconque des
30 revendications 1 à 9, caractérisée en ce que ladite structure est surmontée d'une couche de roulement.

1 / 15



$$h_i = h_s = 6 \text{ cm}$$

$$E_i = E_s = 17800 \text{ MPa}$$

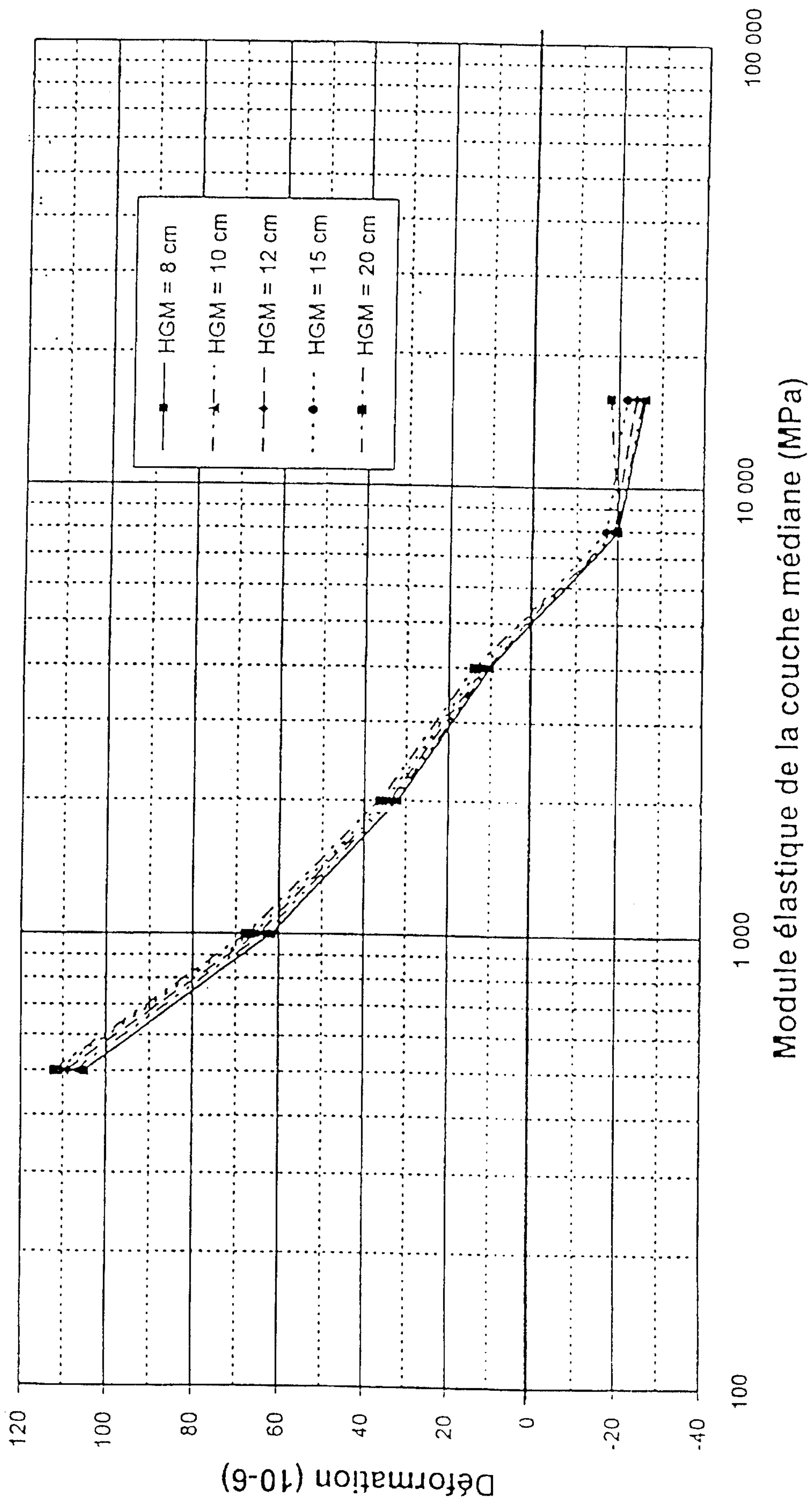
$$E_s / E_m = 1 \text{ —————}$$

$$E_s / E_m = 4 \text{ —————}$$

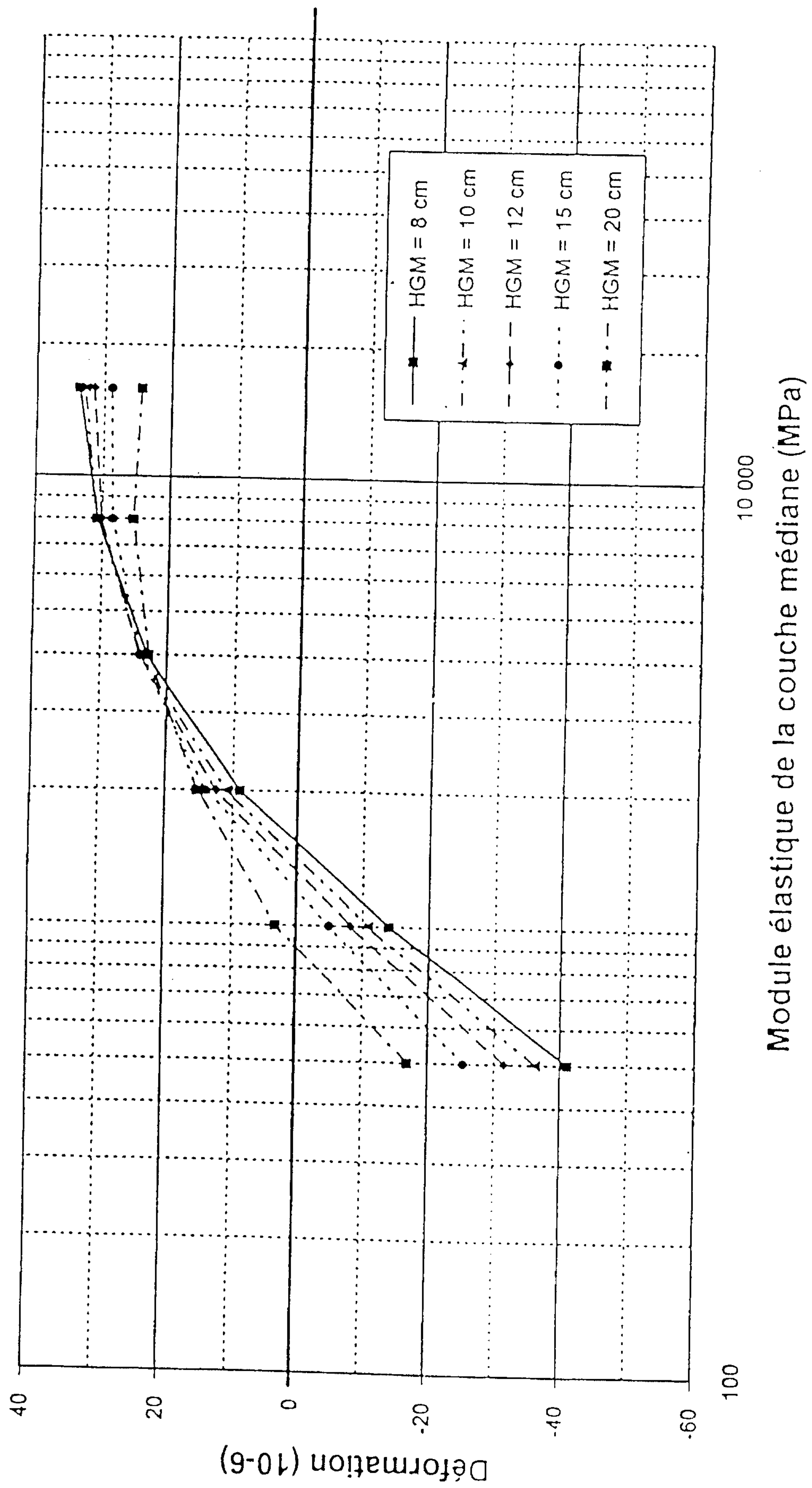
$$E_s / E_m = 35 \text{ =====}$$

FIG. 1

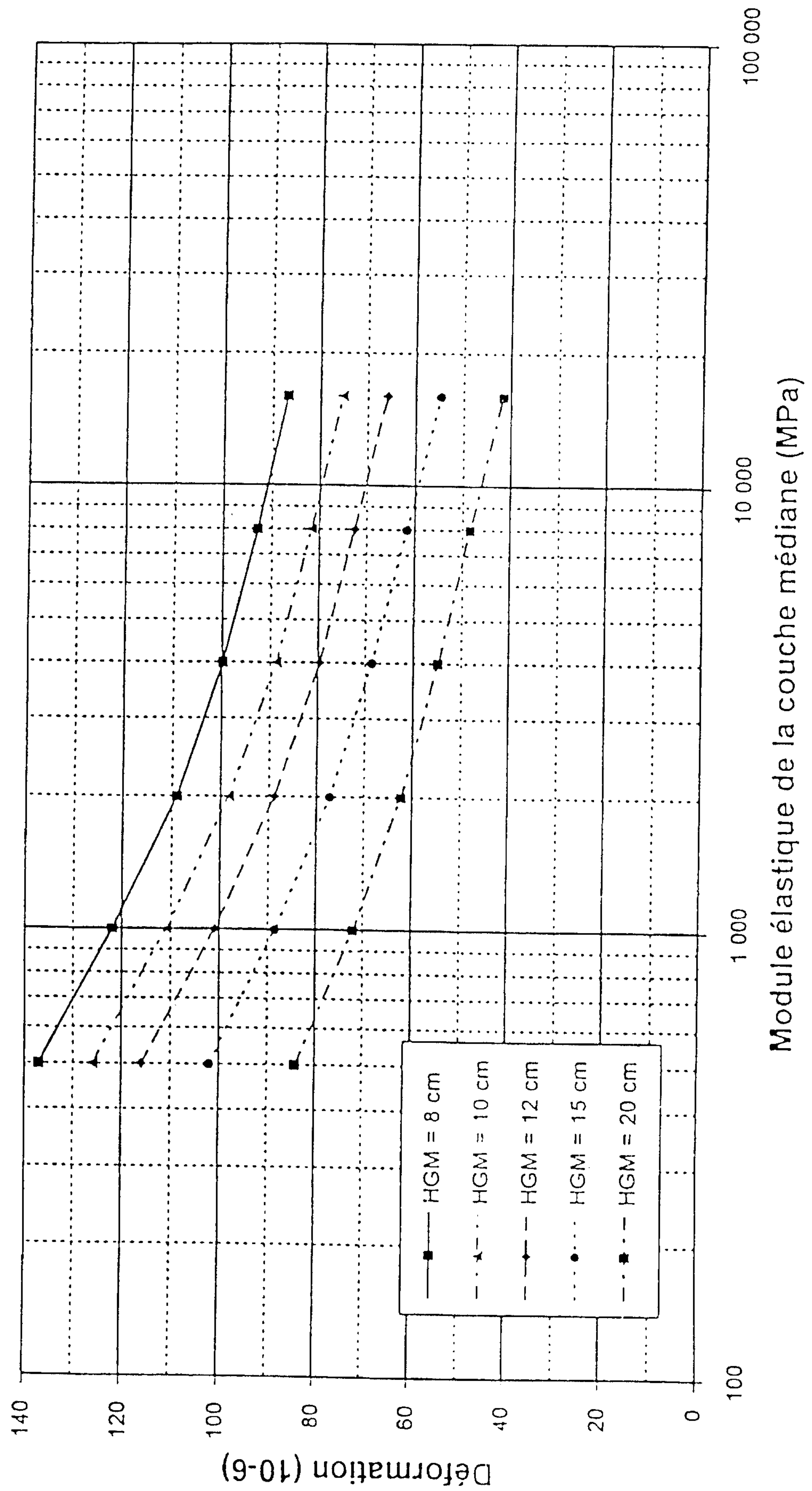
2 / 15

FIG. 2

3 / 15

FIG. 3

4 / 15

FIG. 4

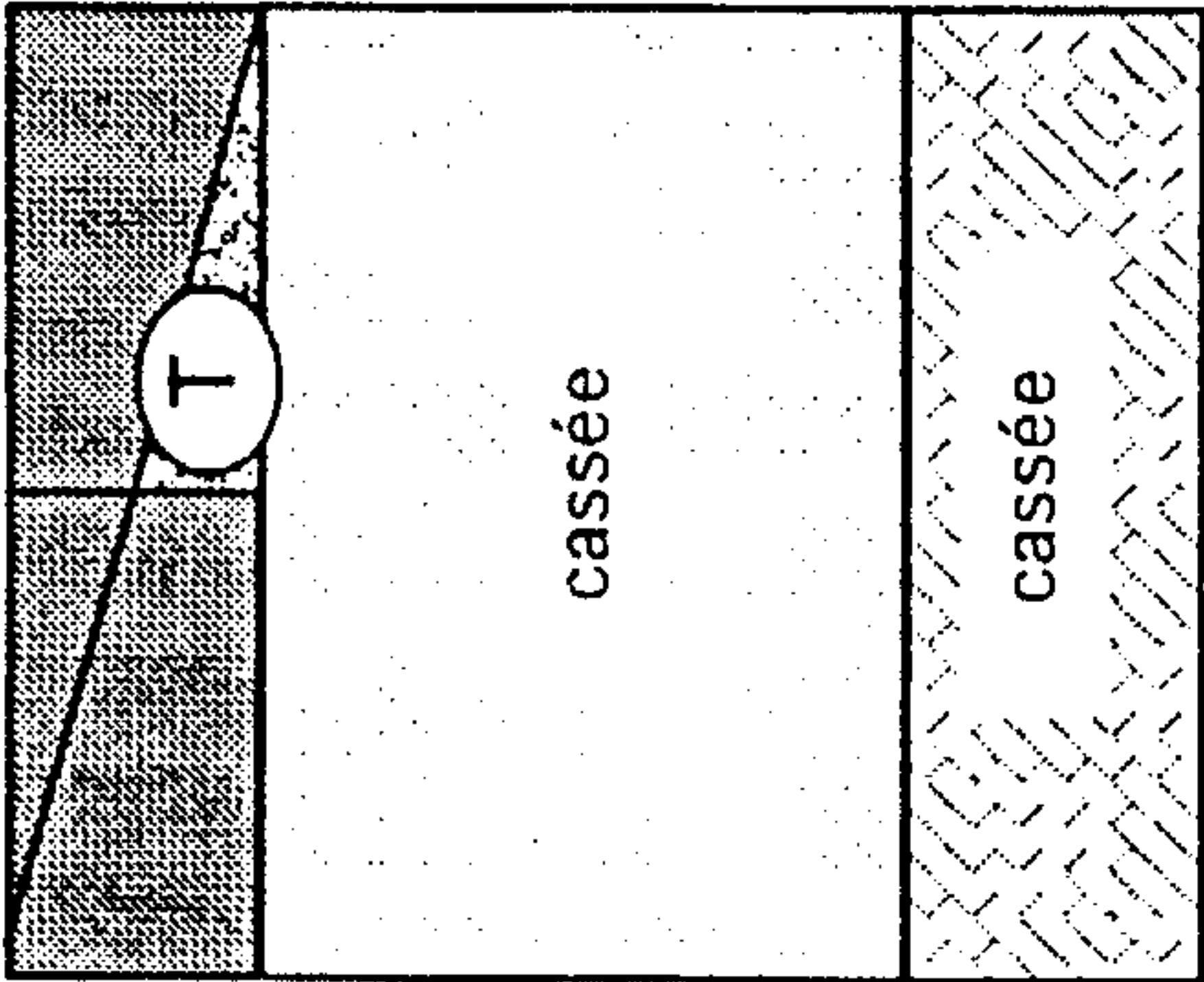


FIG. 5c

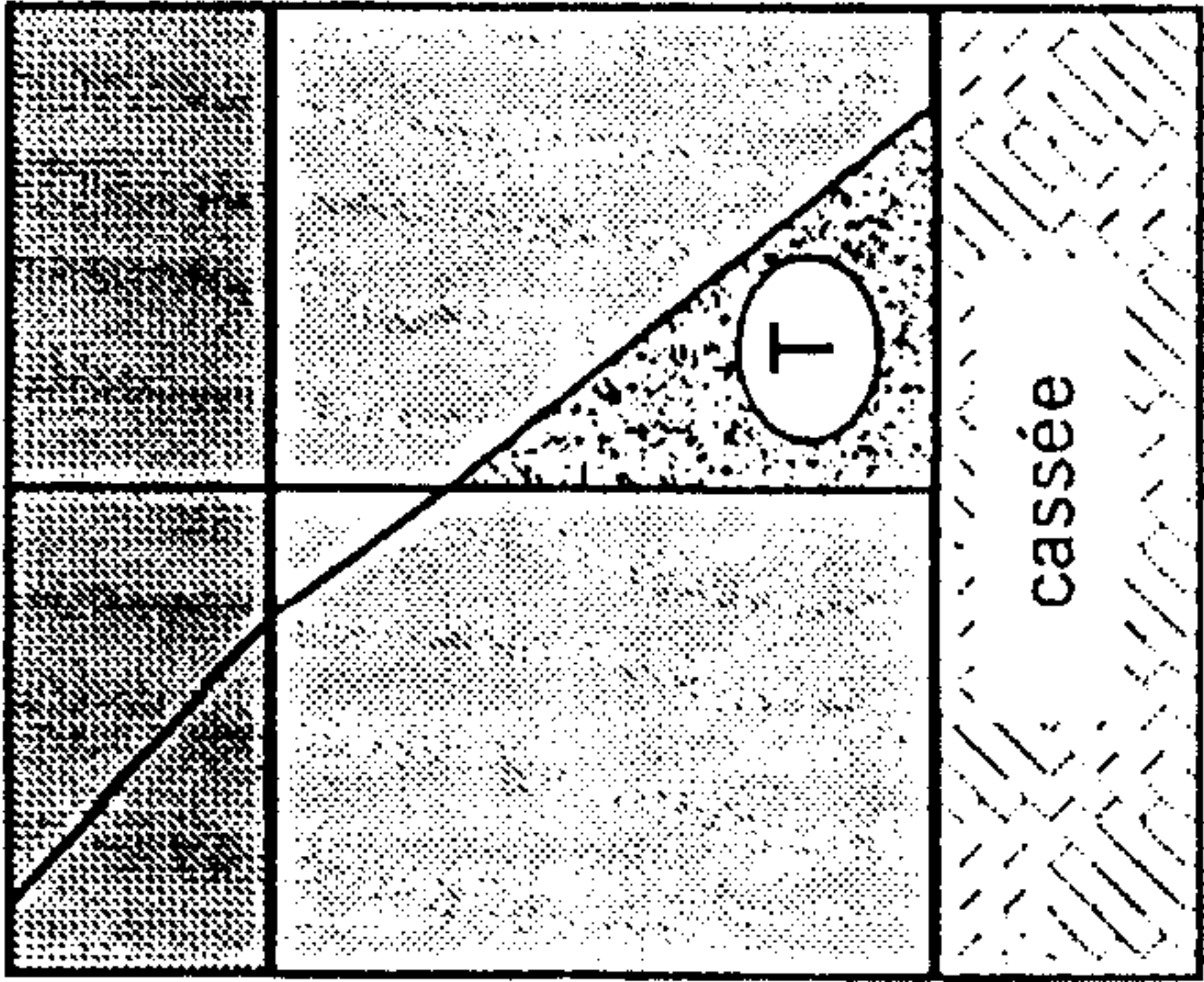


FIG. 5b

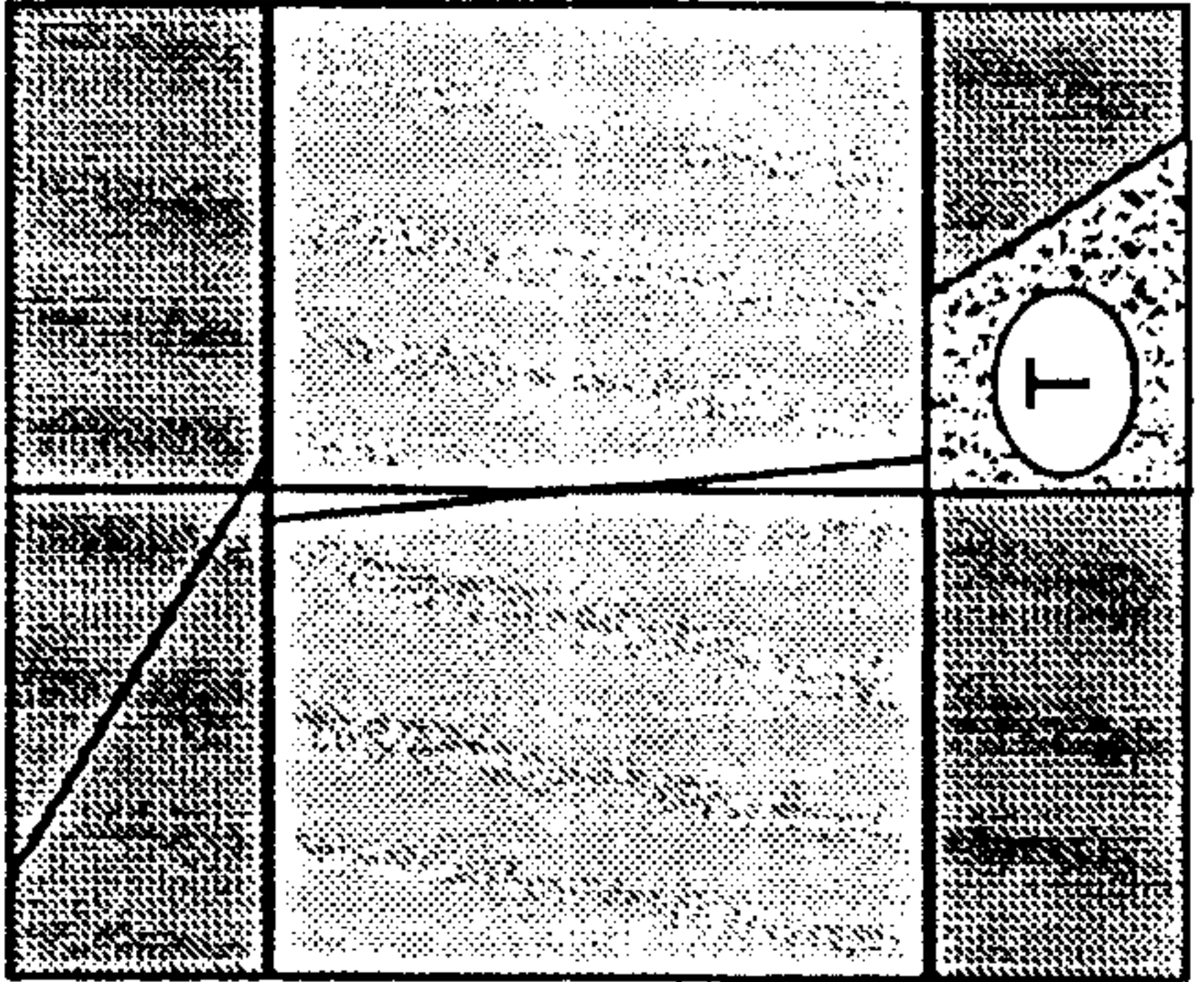
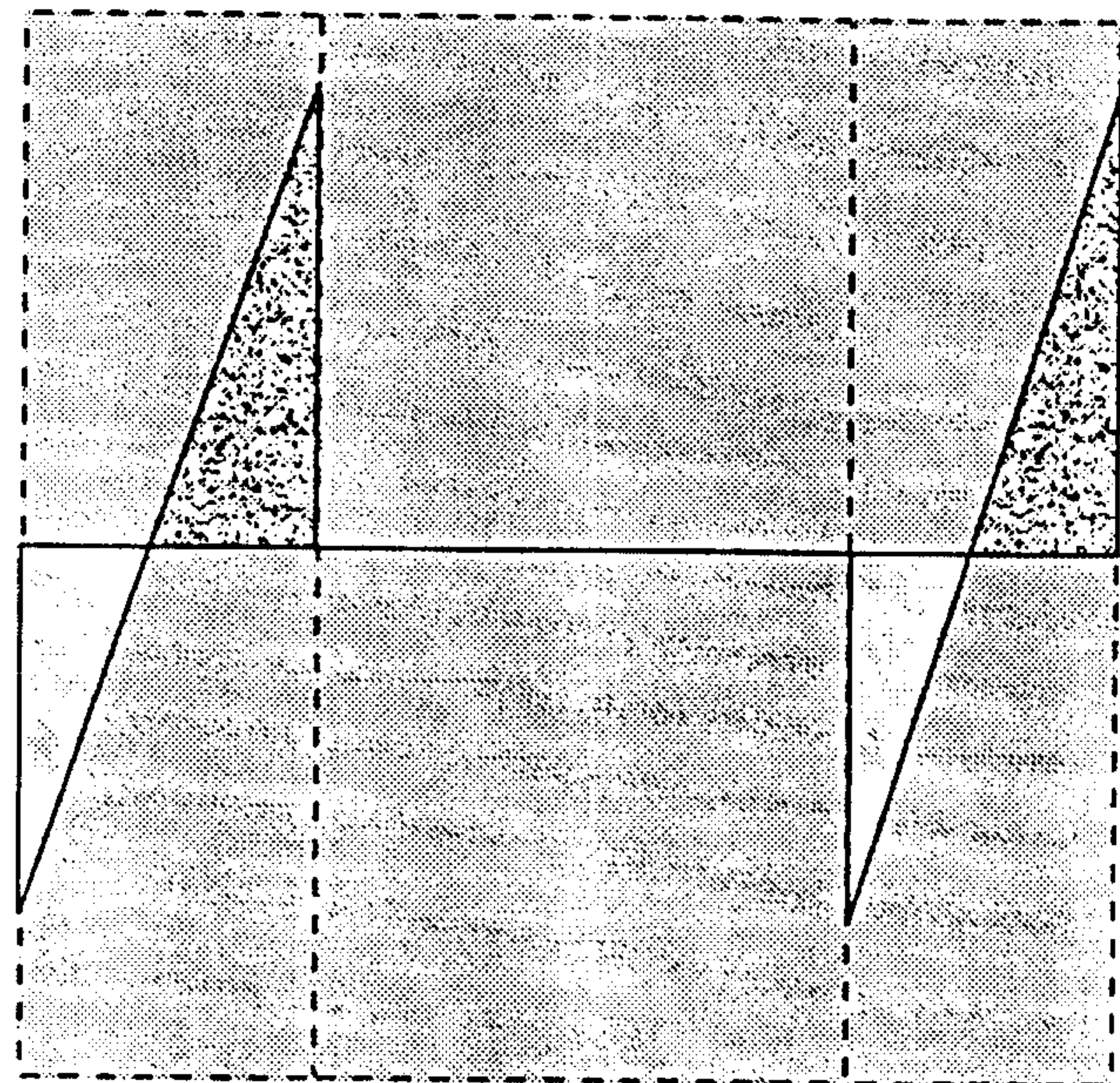


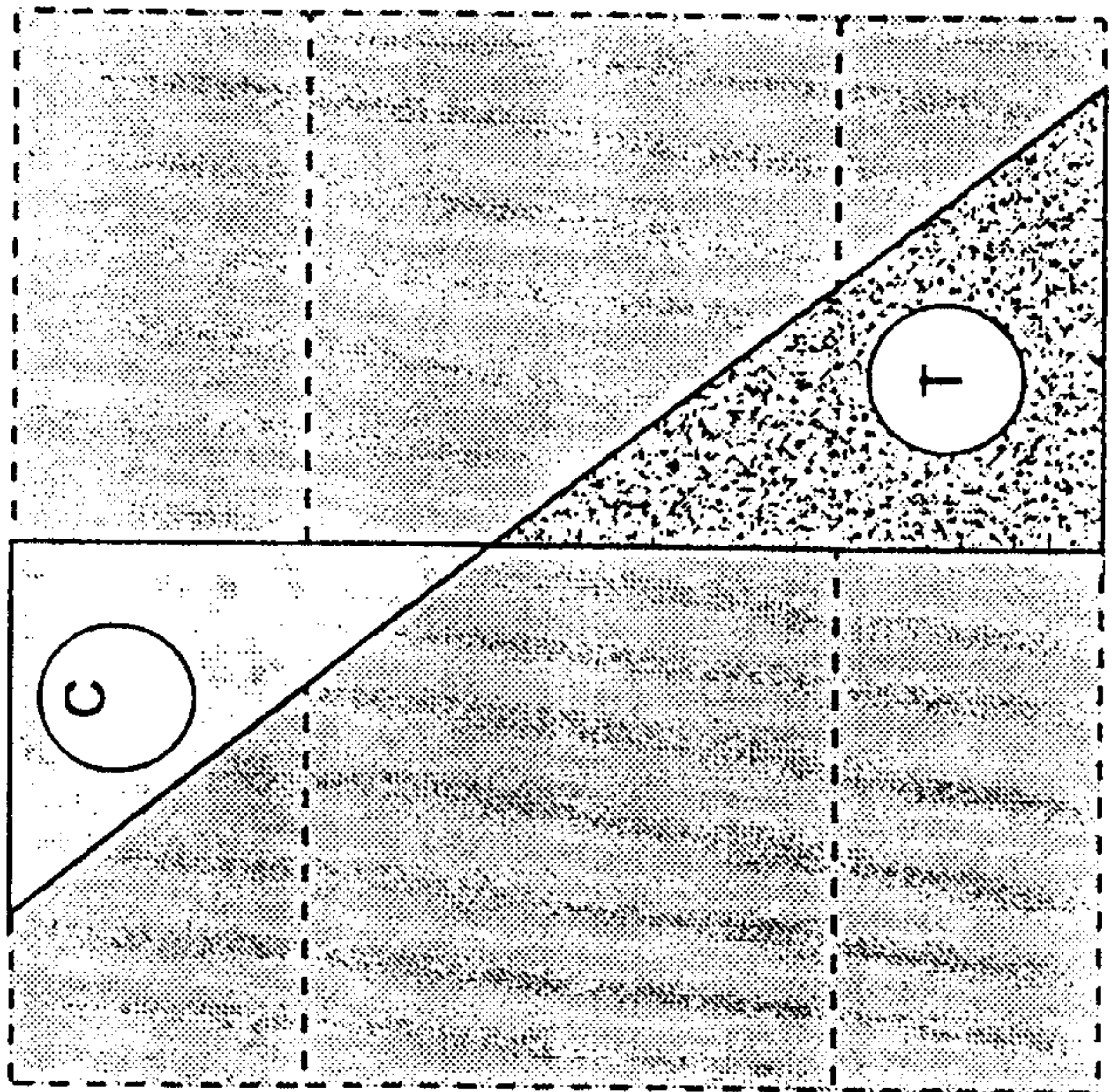
FIG. 5a



Structure inverse

les deux couches s'endommagent
simultanément

FIG. 6b



Structure monolithique

une seule phase d'endommagement

FIG. 6a

7 / 15

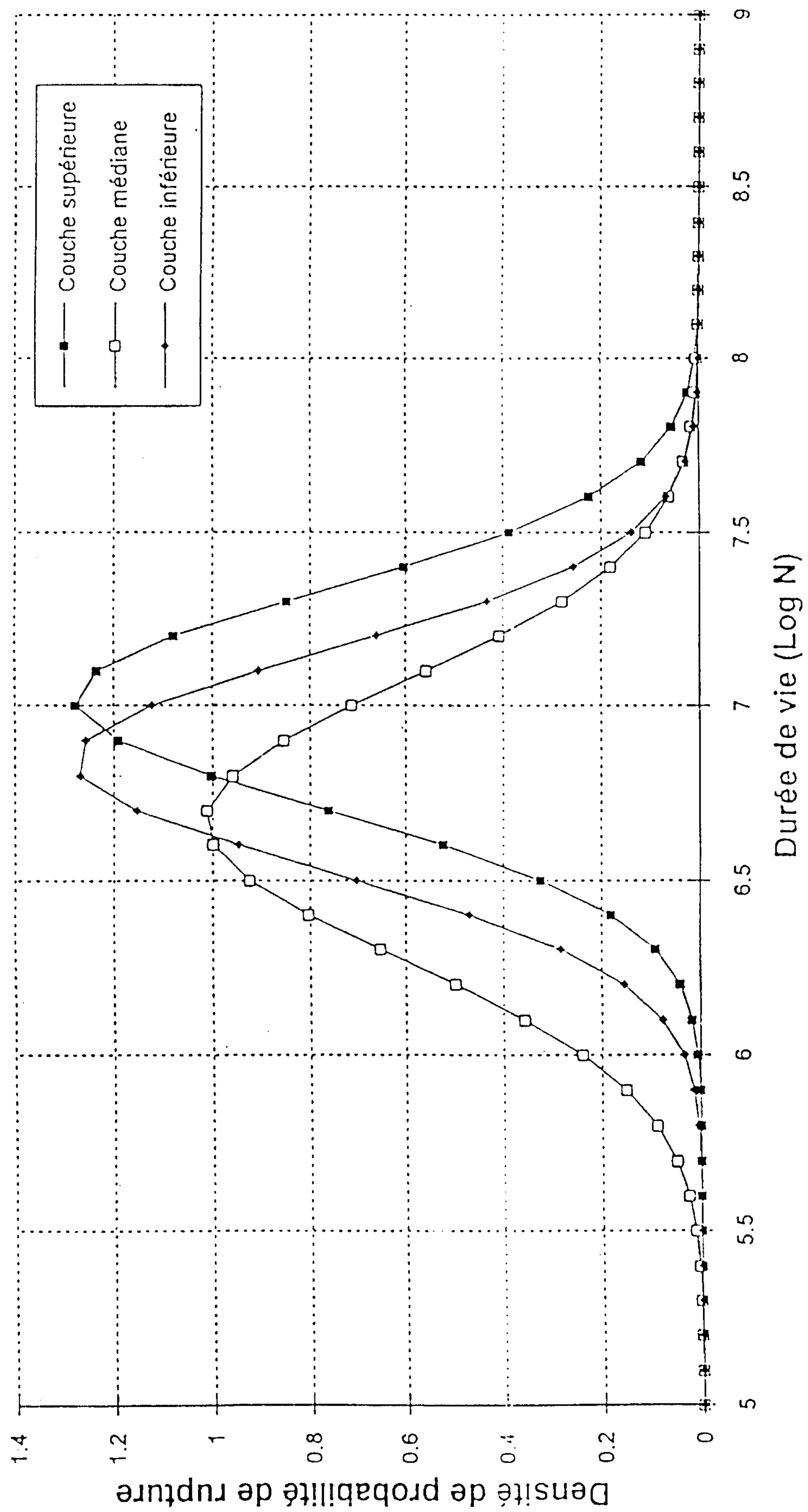


FIG. 7

8 / 15

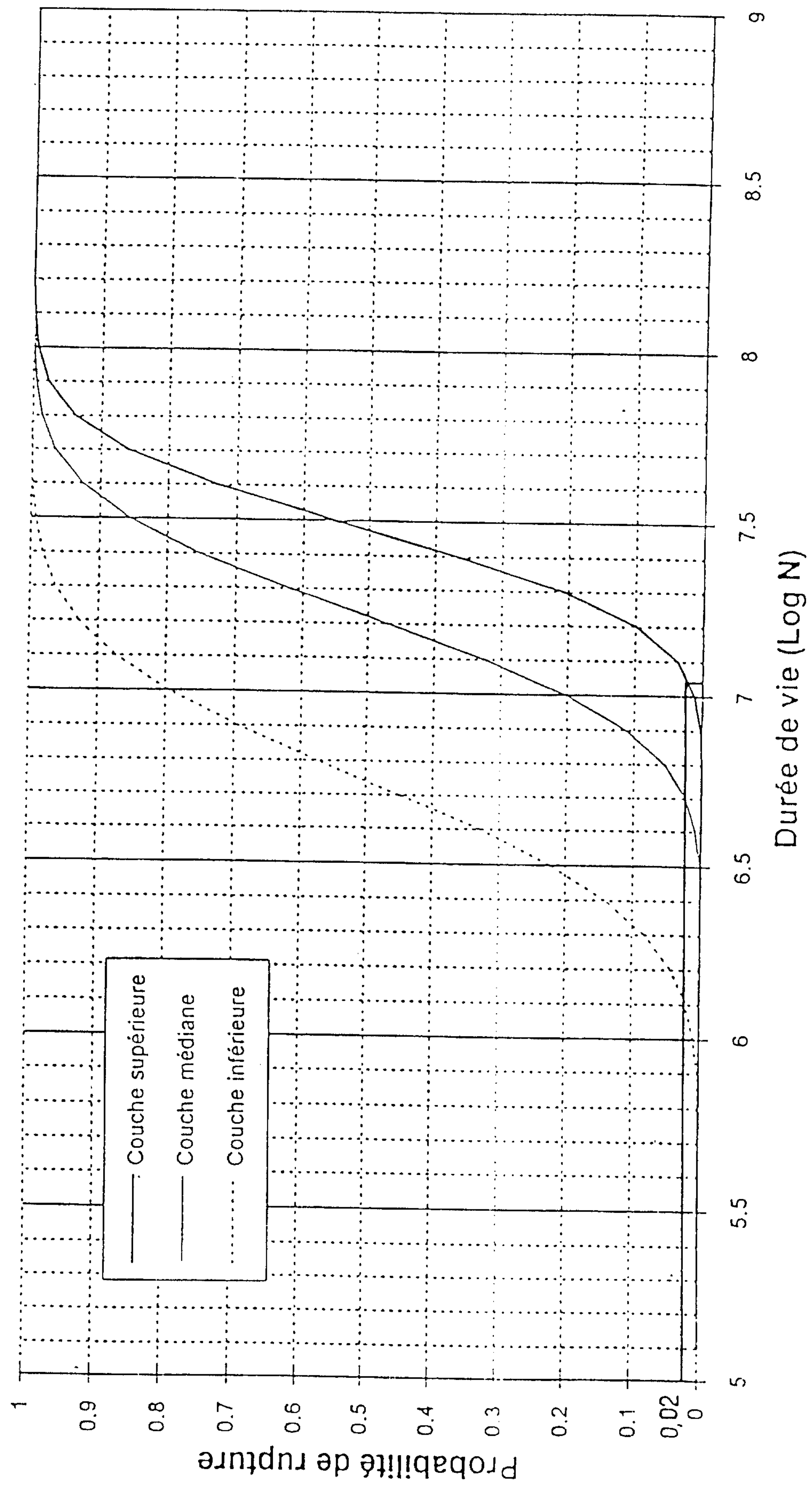


FIG. 8

9 / 15

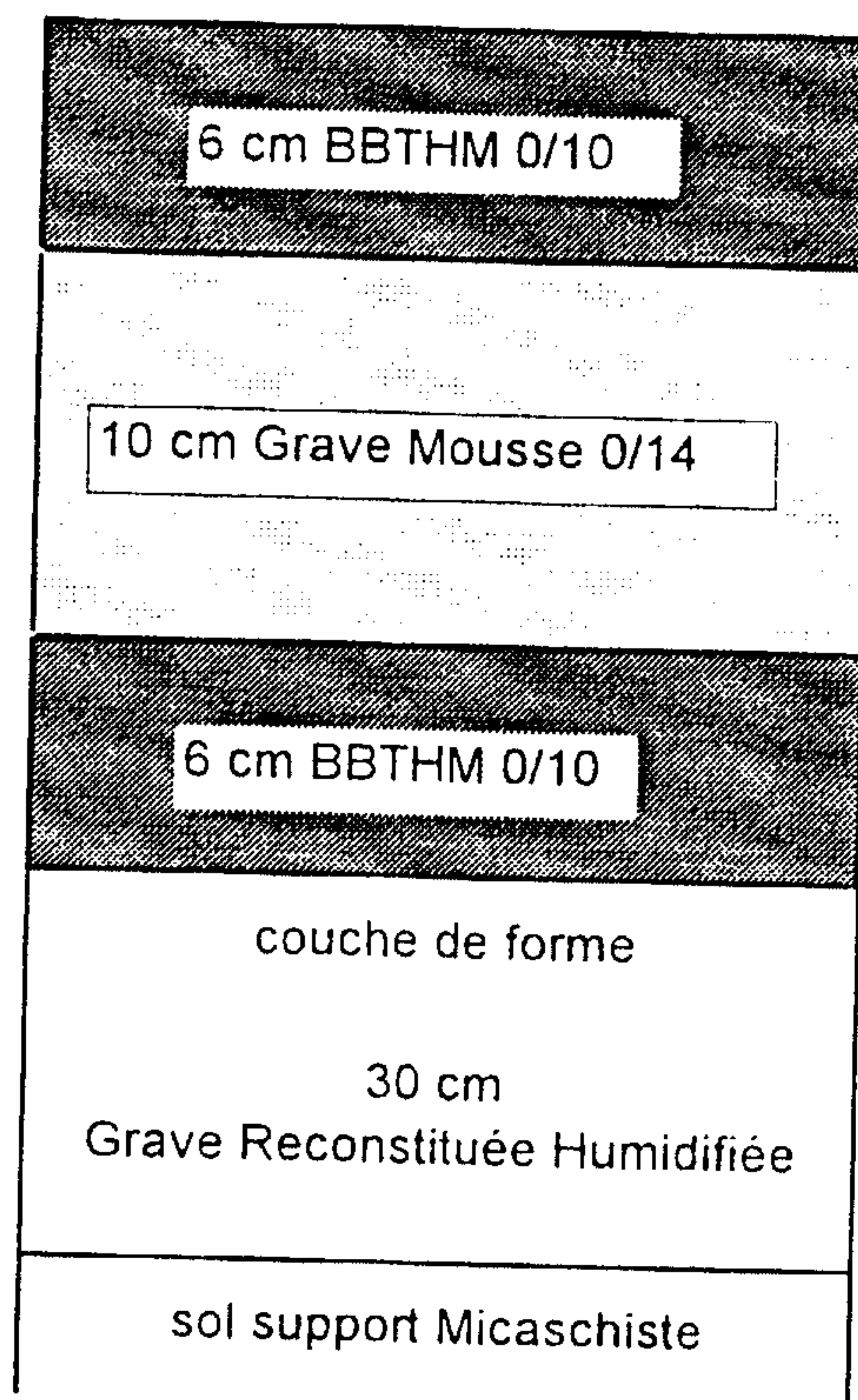


FIG. 9

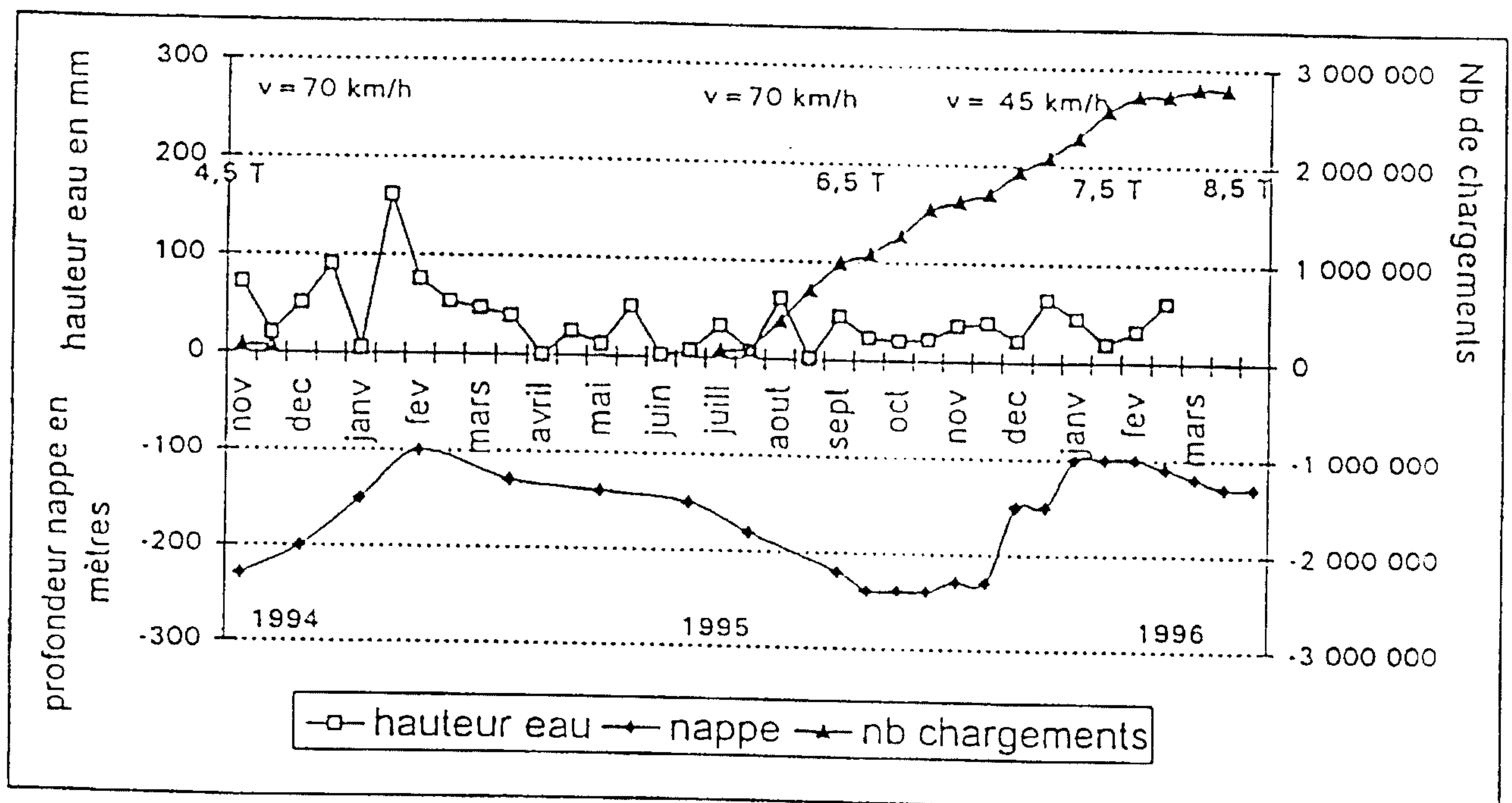
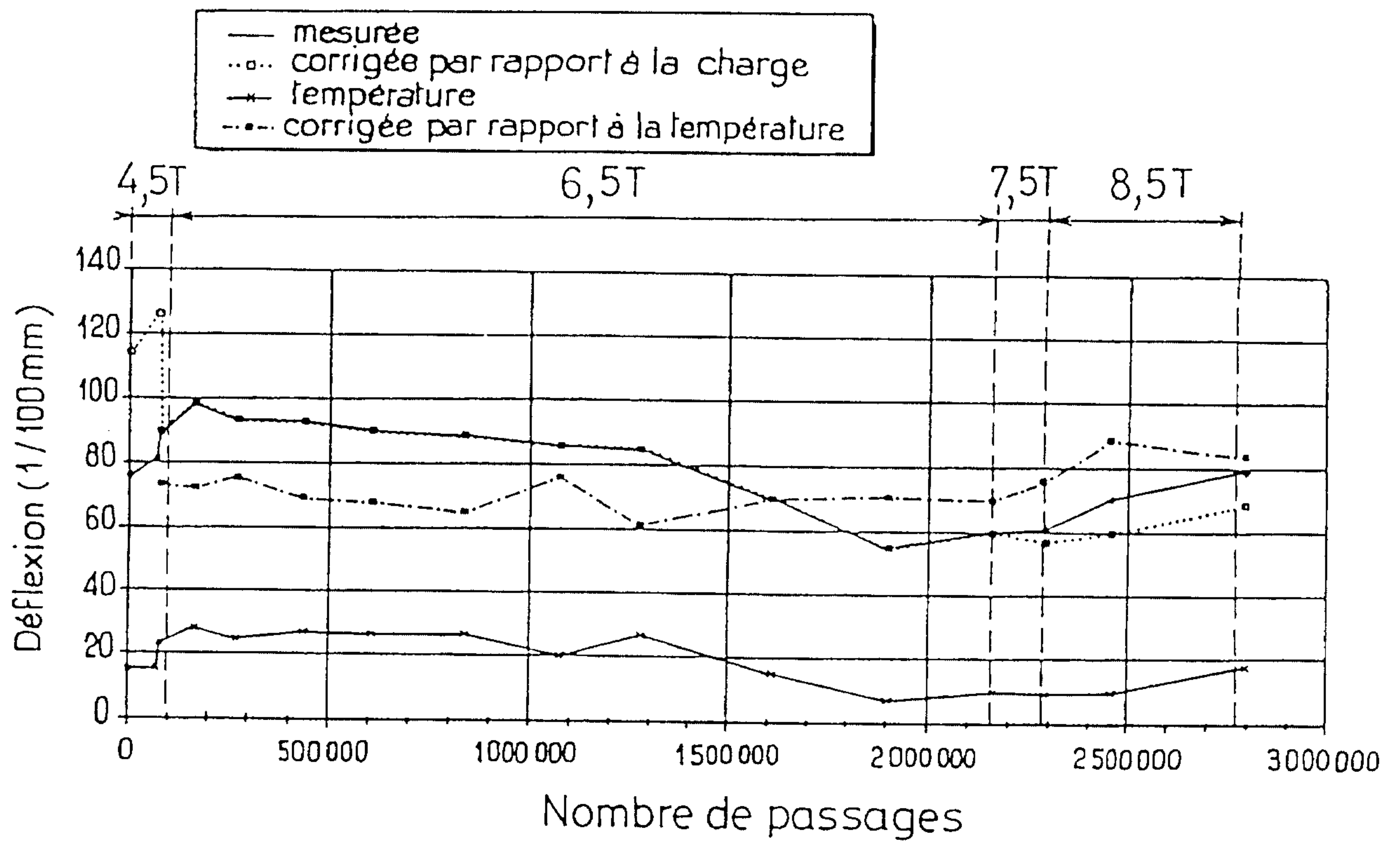
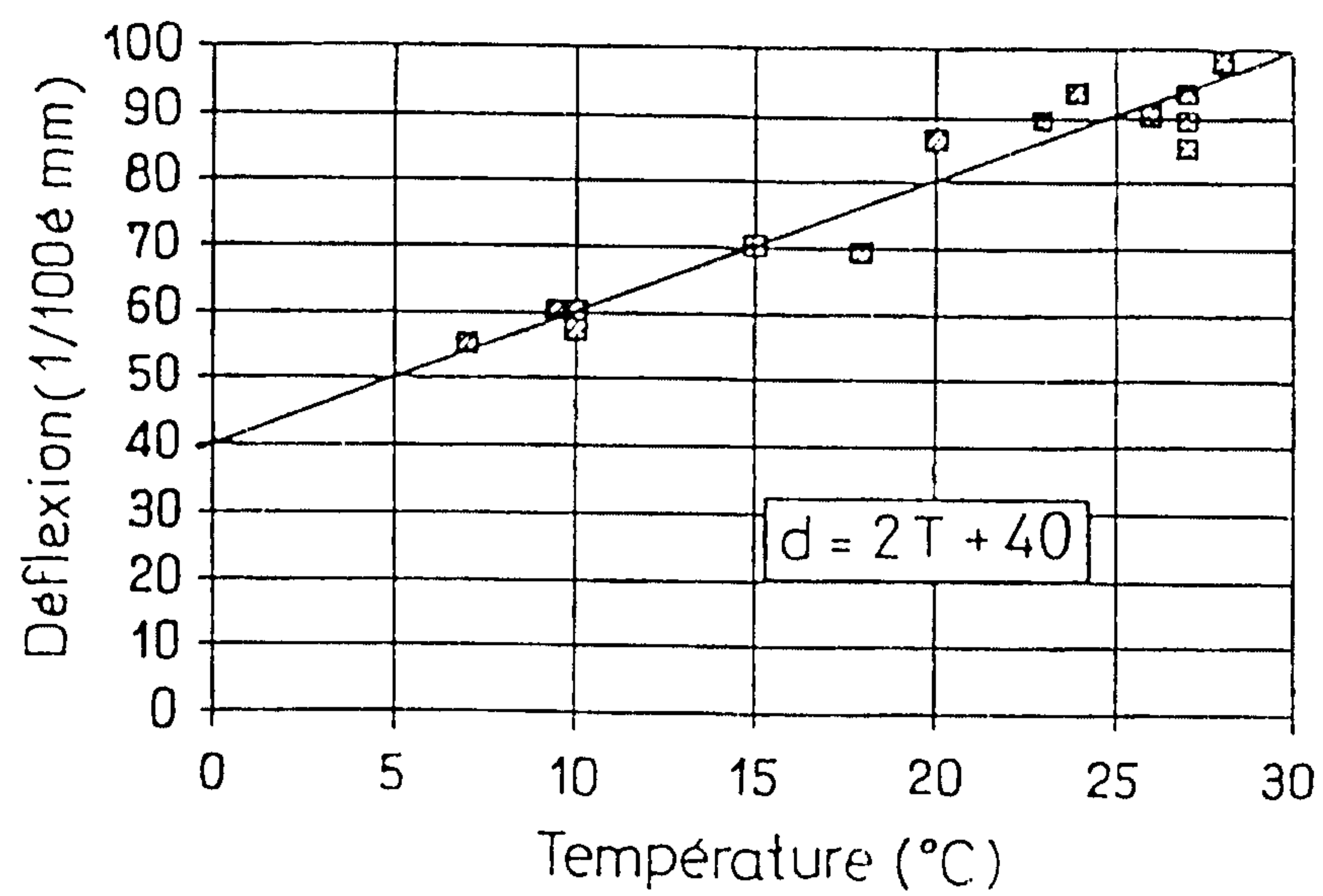
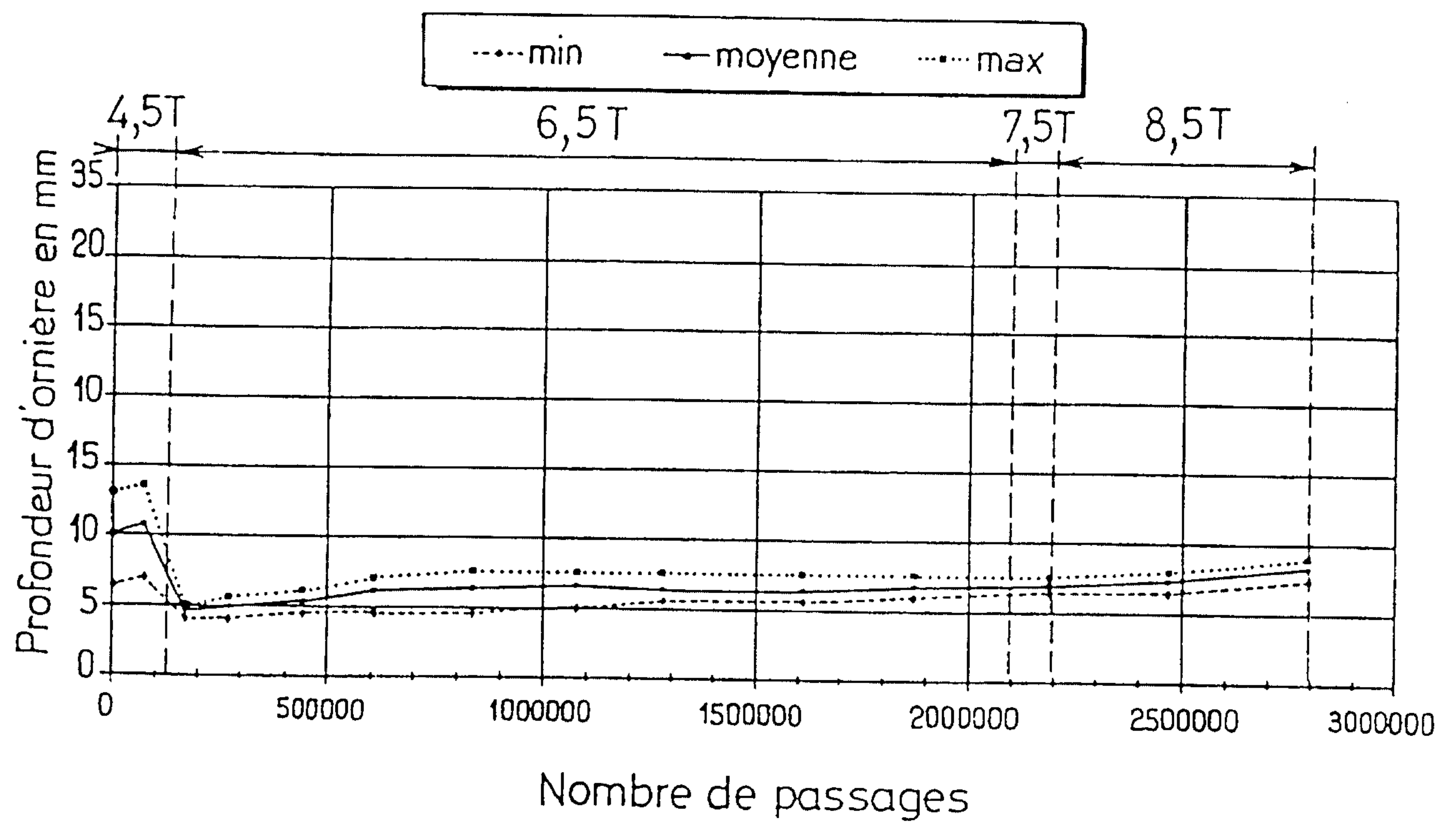


FIG. 10

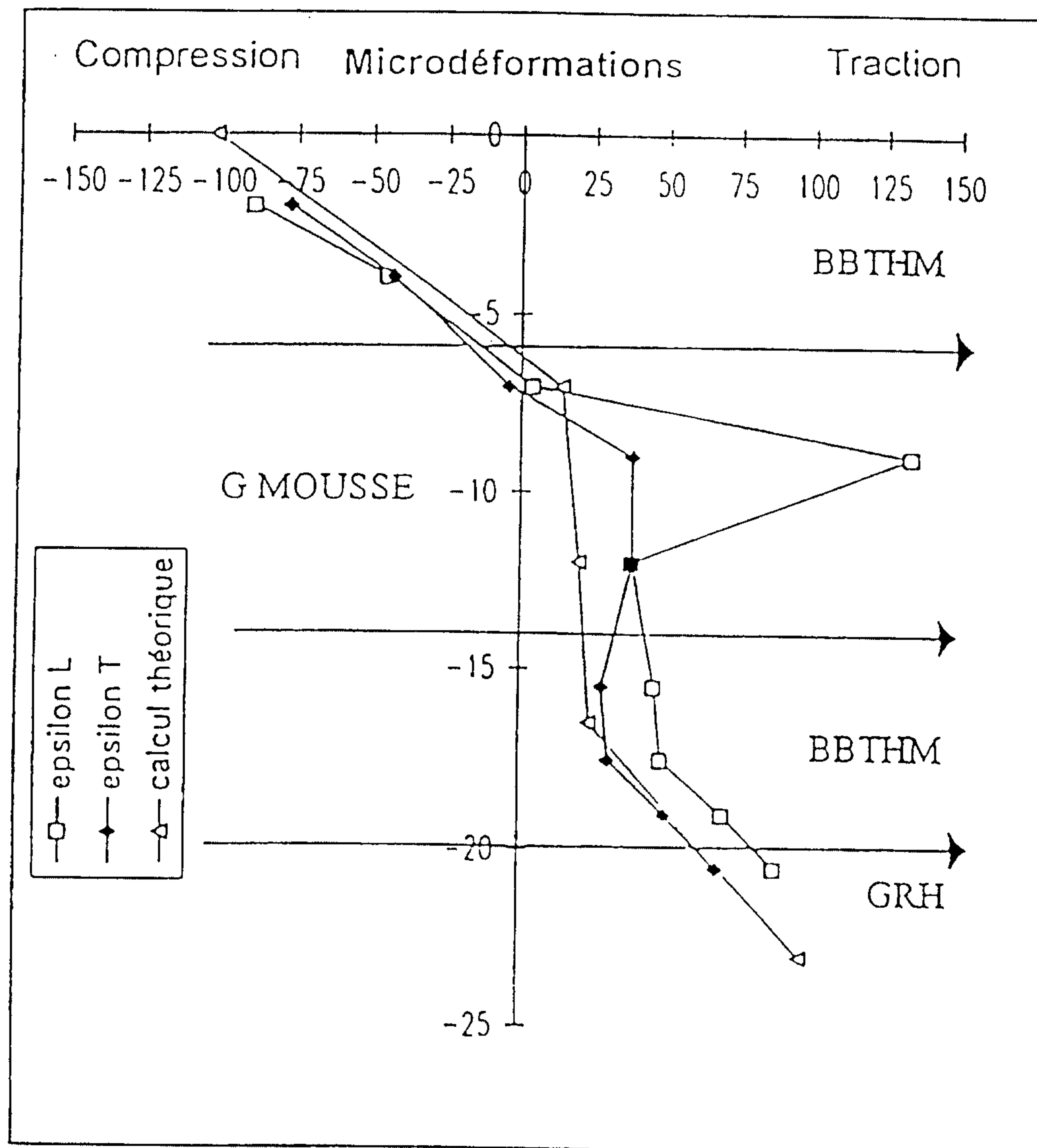
10 / 15

FIG.11FIG.12

11 / 15

FIG. 13

12 / 15

FIG. 14

13 / 15

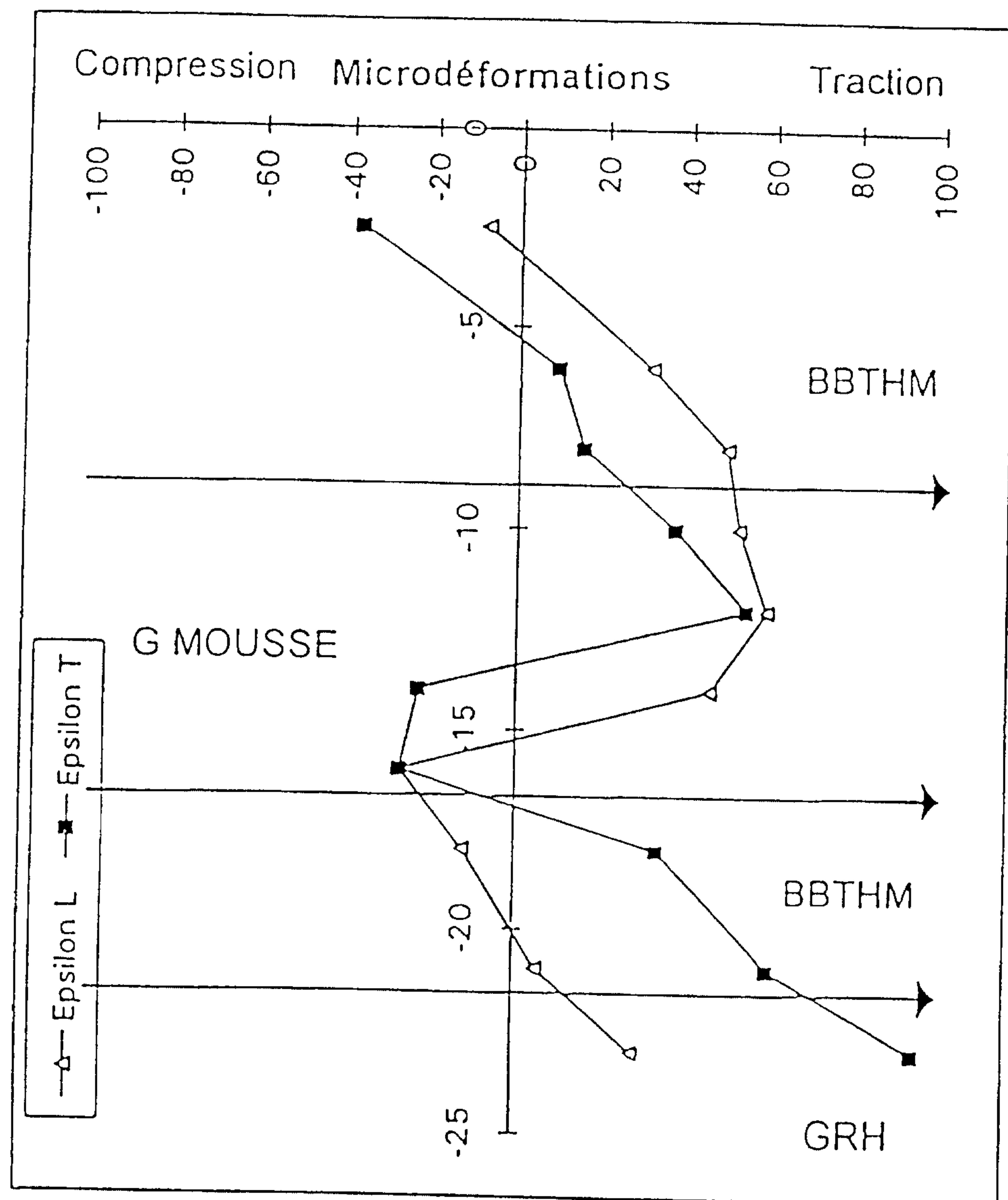
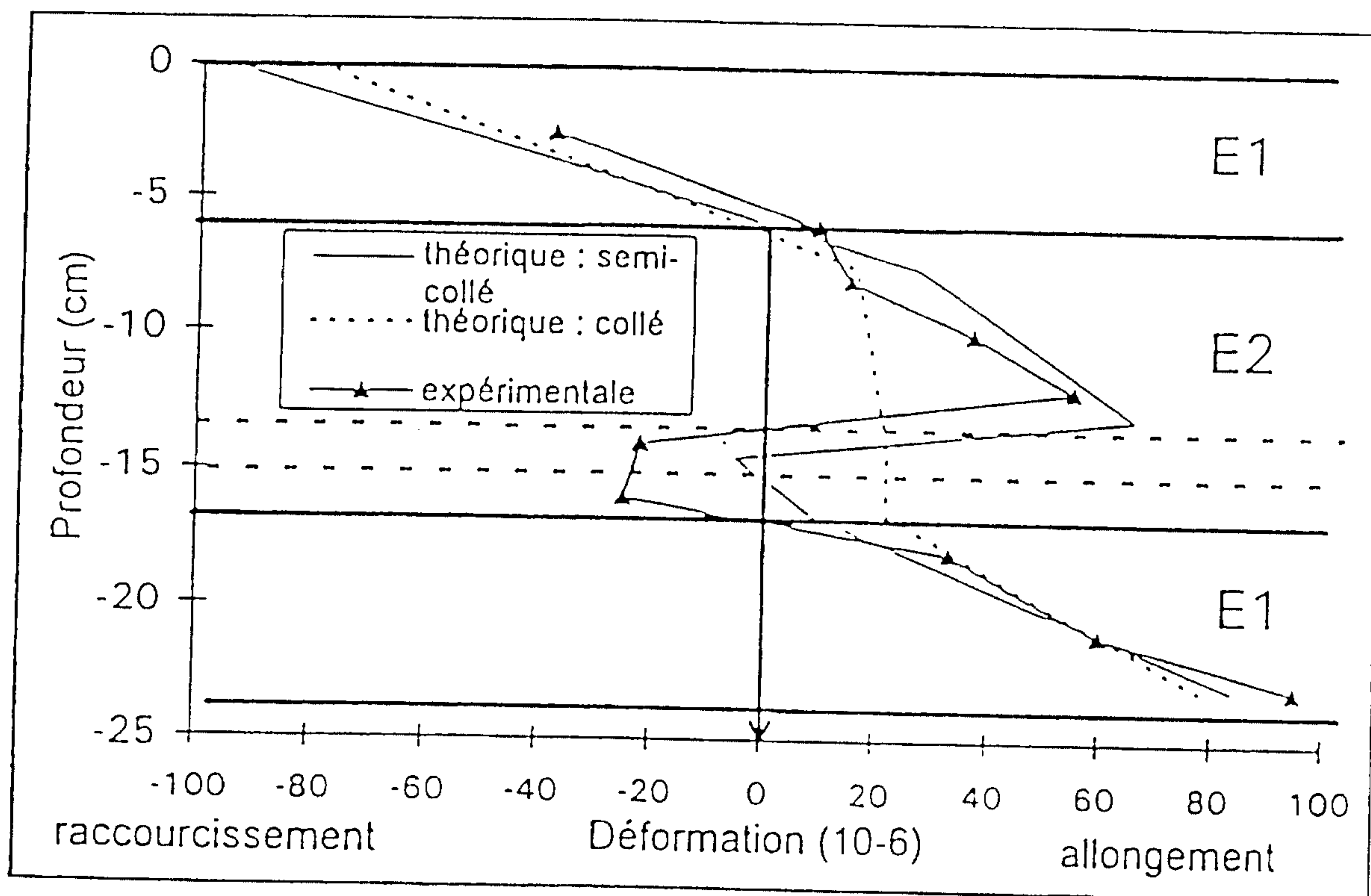
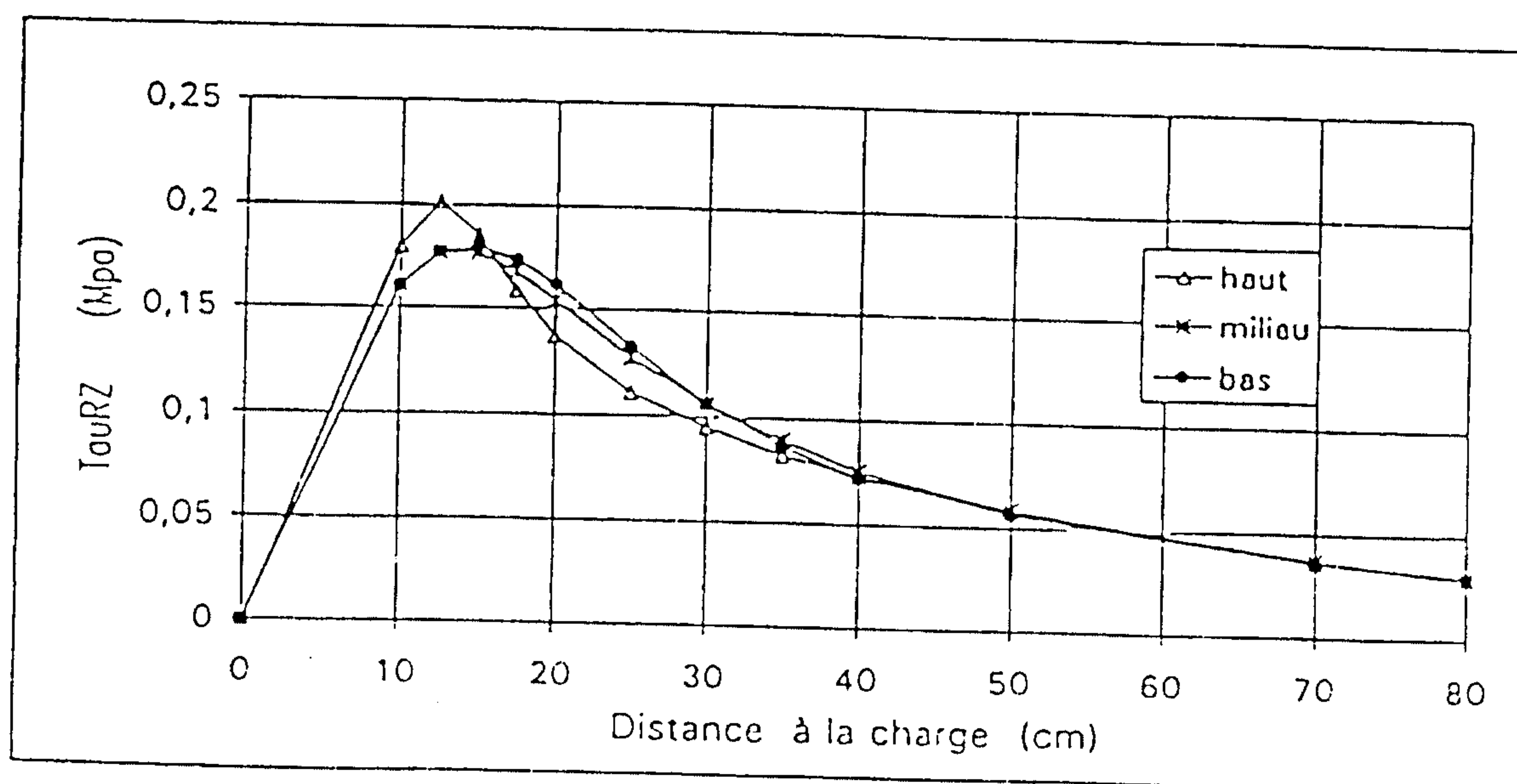


FIG. 15

14 / 15

FIG. 16FIG. 17

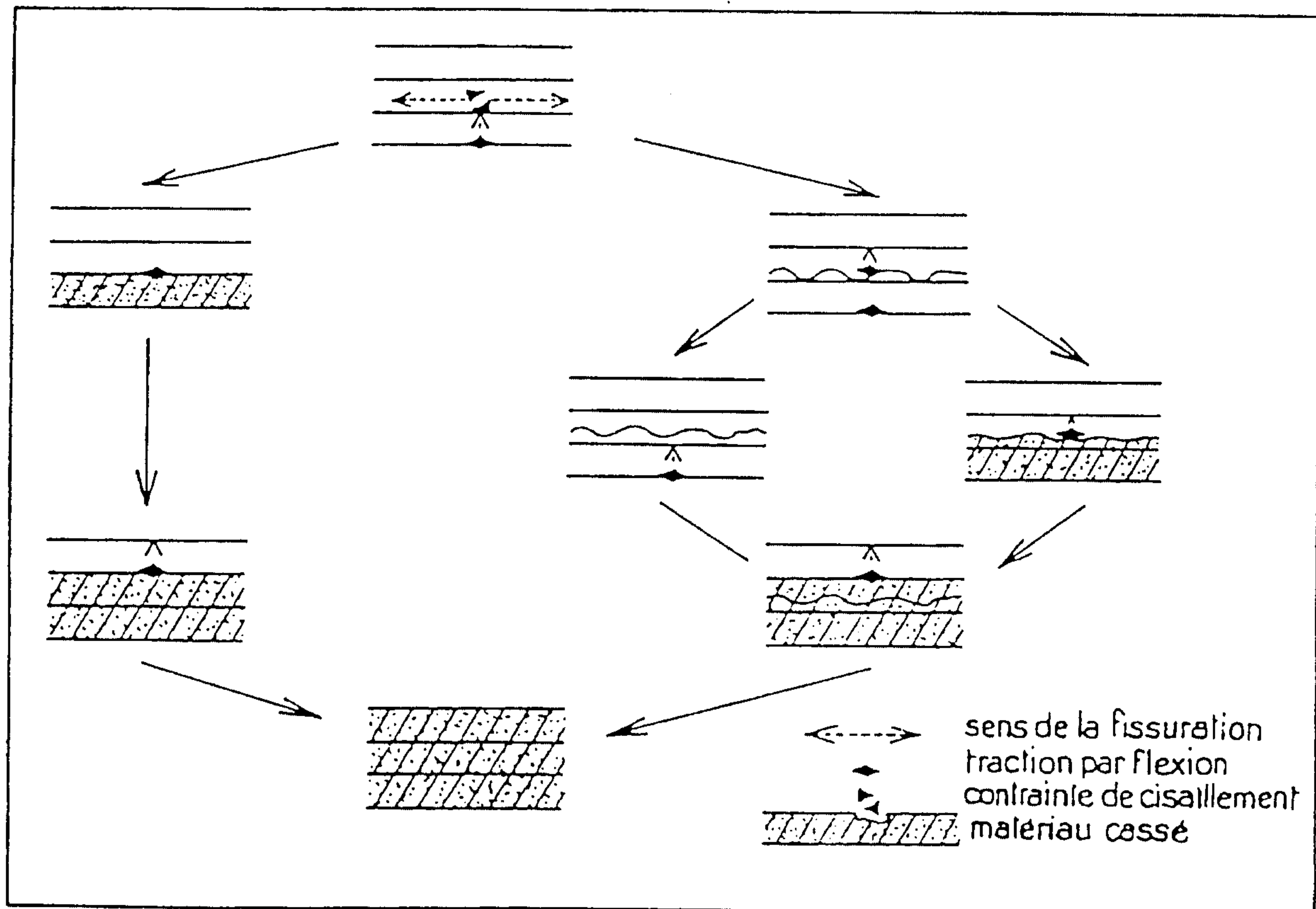
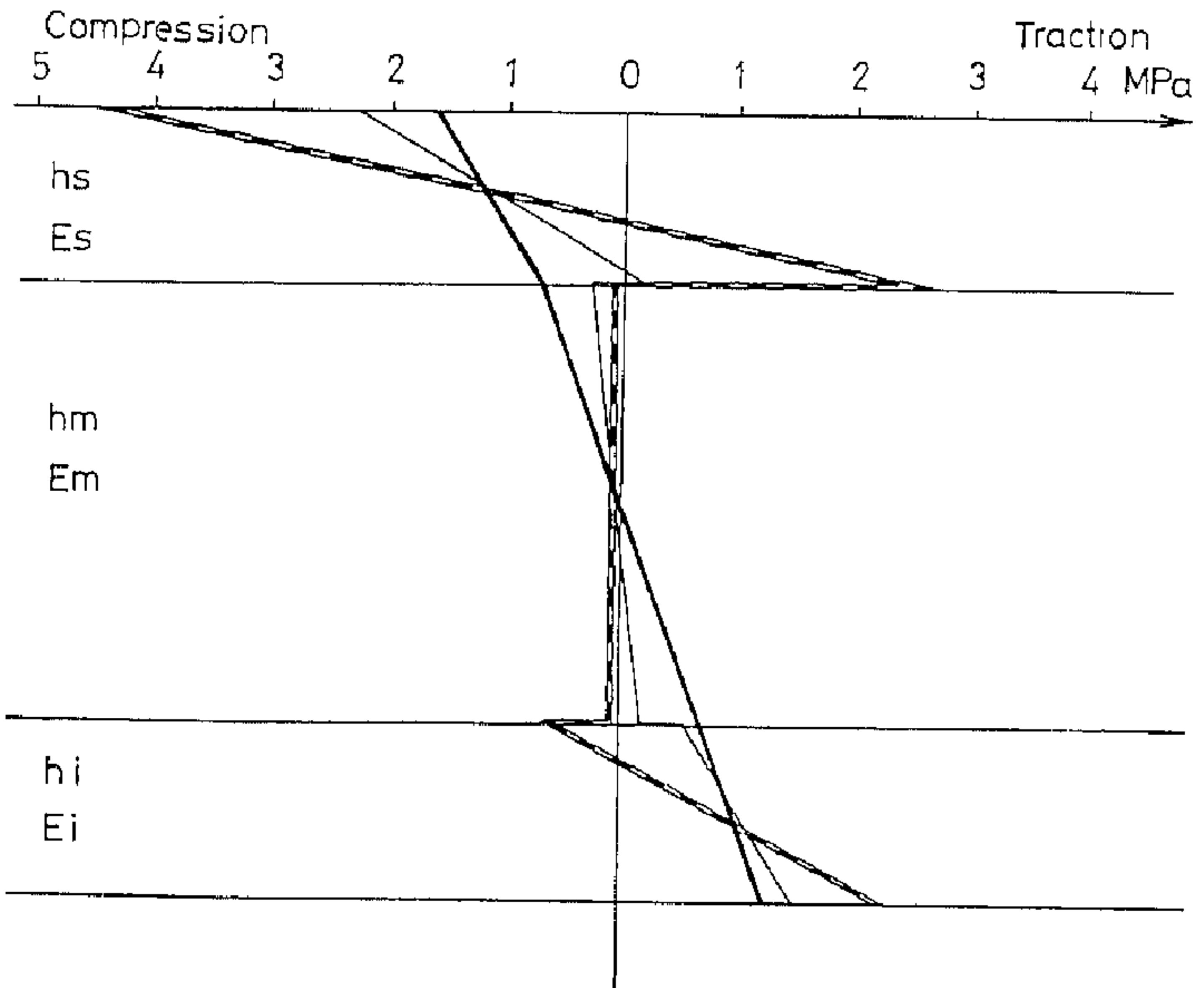


FIG. 18

$$2 < \frac{E_l}{E_m} < 10 \quad (I)$$

$$2 < \frac{E_s}{E_m} < 10 \quad (II)$$



$$h_i = h_s = 6 \text{ cm}$$

$$E_i = E_s = 17800 \text{ MPa}$$

$$E_s / E_m = 1 \quad \text{—————}$$

$$E_s / E_m = 4 \quad \text{—————}$$

$$E_s / E_m = 35 \quad \text{=====}$$