(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication : **2 617 8**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) N° d'enregistrement national : **87 103**

(51) Int Cl⁴ : C 08 H 1/06; A 61 L 27/00.

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

(22) **Date de dépôt** : 8 juillet 1987.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de la mise à disposition du public de la demande** : BOPI « Brevets » n° 2 du 13 janvier 1989.

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

(71) **Demandeur(s)** : *Société anonyme dite : BIOETICA ; STITUT NATIONAL DE LA SANTÉ ET DE LA CHERCHE MEDICALE (INSERM).* — FR.

(72) **Inventeur(s)** : Hervé Petite ; Philippe Menasche ; Huc.

(73) **Titulaire(s) :**

(74) **Mandataire(s)** : Cabinet Germain et Maureau.

(54) Procédé de réticulation du collagène par introduction de groupes azides ainsi que les tissus et biomaté obtenus par mise en œuvre du procédé.

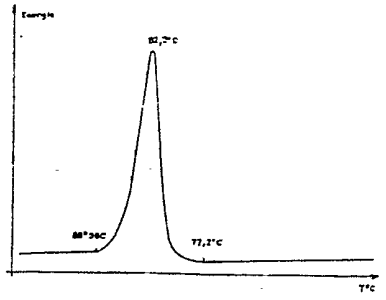
(57) Ce procédé qui comporte essentiellement les étapes suivantes :

— estérification des groupements acides libres du collagène;

— transformation des groupements estérifiés en groupements hydrazides;

— transformation des groupements hydrazides en groupements azides par action de l'acide nitreux,

est caractérisé en ce que chaque étape est séparée par un rinçage en solution aqueuse de sel et en ce que l'étape de transformation des groupements estérifiés en groupements azides et l'étape de transformation des groupements hydrazides en groupements azides par action de l'acide nitreux, sont effectuées en présence de sel.



R 2 617 855 - A1

PROCEDE DE RETICULATION DU COLLAGENE PAR INTRODUCTION DE GROUPES AZIDES AINSI QUE LES TISSUS ET BIOMATERIAUX OBTENUS PAR MISE EN OEUVRE DU PROCEDE

La présente invention concerne un procédé de réticulation du collagène par introduction de groupes azides ainsi que les tissus et biomatériaux obtenus par mise en oeuvre du procédé.

Le remplacement d'une valve cardiaque pathologique chez l'homme fait actuellement essentiellement appel à deux types de substituts : les prothèses mécaniques et les valves biologiques hétérologues (encore dénommées hétérogreffes ou bioprothèses). Si les premières ont l'avantage d'une durabilité presque illimitée, elles ont comme limitation principale un risque thrombo-embolique permanent obligeant à un traitement anticoagulant à vie dont les risques propres (hémorragiques) contribuent pour une part non négligeable à la morbidité et à la mortalité globale observées chez les patients porteurs de ces prothèses.

A l'opposé, les bioprothèses ont aujourd'hui clairement fait la preuve de leur faible thrombogénicité, et ce en l'absence de traitement anticoagulant. En revanche, leur longévité est fortement obérée par la survenue de calcifications tissulaires qui, isolées ou en association avec des lésions dites de fatigue, conduisent à une réintervention dans un délai moyen de 6 ans, ce délai étant d'ailleurs souvent plus court chez les malades les plus jeunes.

Aussi, l'un des principaux courants de recherche en matière de valves artificielles est-il aujourd'hui axé sur la mise au point de techniques permettant de retarder la détérioration des bioprothèses.

Cette détérioration est, à l'évidence, un phénomène plurifactoriel, certains facteurs dits "liés à l'hôte" étant difficilement contrôlables.

Il apparaît toutefois clairement que le mode de traitement du tissu, au moment de la fabrication de la valve, traitement sur lequel il est possible d'intervenir, peut jouer un rôle primordial.

A l'heure actuelle, quelle que soit l'origine animale de ce tissu (valves aortiques de porc ou péricarde bovin), son traitement fait pratiquement toujours appel,pour les modèles de bioprothèses actuellement sur le marché, à des techniques de tannage utilisant le glutaraldéhyde (G.T.A.).

On connaît en effet, l'aptitude de cet agent tannant à créer des liaisons intermoléculaires solides qui permettront au tissu ainsi traité

de présenter les propriétés mécaniques requises et de résister à la dégradation enzymatique "in vivo".

Un argument supplémentaire pour l'utilisation du glutaraldéhyde est que, par création de liaisons entre les molécules de collagène, il masque certains déterminants antigéniques ce qui permet de limiter l'antigénicité du tissu.

Bien que la filiation exacte entre le glutaraldéhyde et la calcification ne soit pas encore totalement élucidée, il existe certainement une relation de causalité. Il apparait en effet que, contrairement aux implants non traités, les implants de valves aortiques de porc traités au G.T.A. se calcifient sévèrement.

De plus, on a démontré que des valves aortiques de porc, ou du péricarde de veau, tous deux traités au GTA, calcifient de manière similaire chez le rat.(Schoen et al Am.J. Pathol 1986, 193 pp 134-145).

Bien que des facteurs régulant ce mécanisme de calcification et dépendant de l'hôte et de l'implant aient été mis en évidence (par Lévy, Schoen, Howard et al), on n'a pas encore pu déterminer le mécanisme sous-jacent de cette calcification.

Le rôle des groupements latéraux du collagène a par ailleurs été étudié par Urist en 1966 et Glimcher en 1968.

Ainsi Urist a pu montrer que le traitement de tendon de queue de rat dans des solutions de sels inorganiques telles que $CaCl_2$, $SrCl_2$ ou des cations organiques, qui bloquent les groupements carboxyliques des chaînes latérales, inhibe efficacement la calcification des tendons implantés chez le rat hypercalcémique.

Glimcher a tenté d'inhiber la calcification du collagène de l'os in vitro en estérifiant les groupements carboxyliques. Dans ce cas, le blocage des groupements inhibe la calcification. Cependant, une partie de cette inhibition serait due à la déshydratation de la molécule dans le méthanol.

La présente invention s'est donné pour but de proposer un procédé chimique susceptible d'assurer le bloquage des groupements latéraux acides du collagène et d'éviter l'utilisation de glutaraldéhyde dont l'inconvénient est, en plus de l'induction de calcification, une certaine toxicité.

Dans FR-A-2 559 666 les inventeurs avaient déjà proposé un procédé de fabrication de tubes de collagène selon lequel, une fois séché, le tube de collagène était soumis à une réticulation par déshydratation

poussée en étuve à environ 80° C sous un vide d'environ 0,1 mm de mercure pendant environ 24 heures.

Le tube de collagène réticulé était ensuite soumis à un traitement permettant d'introduire des groupes azides dans la molécule sans toutefois occasionner le couplage du collagène avec quelque molécule que ce soit.

Les inventeurs ont poursuivi leurs recherches dans cette voie notamment en essayant d'éliminer l'étape préalable de réticulation par déshydratation tout en arrivant à un bloquage des groupements terminaux acides du collagène améliorant les propriétés mécaniques du tissu obtenu et évitant toute resolubilisation du collagène, le but étant d'obtenir un degré de réticulation du collagène équivalent à celui obtenu avec le glutaraldéhyde laissant ainsi espérer une diminution des phénomènes de calcification et bien entendu des phénomènes de toxicité liés au relargage secondaire du glutaraldéhyde.

L'intérêt du procédé est renforcé par le fait qu'il ne remplace pas le glutaraldéhyde par un autre agent tannant qui pourrait poser des problèmes spécifiques, puisqu'il crée des liaisons réticulaires entre les chaînes latérales du collagène sans introduire de façon permanente un agent chimique étranger.

Ainsi, sur le plan conceptuel, le procédé selon l'invention parait-il présenter une voie nouvelle dans la mesure où il substitue à la fixation traditionnelle du tissu, invariablement fondée sur l'emploi du glutaraldéhyde, une fixation fondée sur une modification de structure des groupements latéraux du collagène obtenue sans recours à un quelconque agent tannant.

Les inventeurs ont pu déterminer au cours de leur recherche qu'il était possible de bloquer efficacement les groupements latéraux du collagène de façon à éviter toute resolubilisation de ce dernier et d'améliorer de façon importante les propriétés mécaniques des biomatériaux obtenus si l'on effectue une réticulation chimique du collagène par introduction de groupes azides en présence de chlorure de sodium.

Selon l'invention, le procédé de réticulation du collagène par introduction de groupes azides qui comporte essentiellement les étapes suivantes :

- estérification des groupements acides libres du collagène.
- transformation des groupements estérifiés en groupements

hydrazides.

- transformation des groupements hydrazides en groupements azides par action de l'acide nitreux,

est caractérisé en ce que chaque étape est séparée par un rinçage grâce à une solution aqueuse de sel.

Selon un mode de réalisation préféré de l'invention, les étapes de transformation des groupements estérifiés en groupements hydrazides et des groupements hydrazides en groupements azides par action de l'acide nitreux, sont effectuées en présence de sel.

Le sel est choisi parmi les sels de métaux alcalins ne dénaturant pas le collagène. Les solutions aqueuses de sel sont utilisées à des concentrations se situant entre 5 et 15 %. La réaction de réticulation par introduction de groupes azides est effectuée sur les collagènes non réticulés.

L'invention concerne également les biomatériaux obtenus par mise en oeuvre du procédé ci-avant et notamment les bio-prothèses ainsi que tout autre biomatériau à base du collagène réticulé ainsi obtenu, tels que films, éponges, tubes, etc.

La présente invention sera mieux comprise et ses avantages ressortiront bien de la description qui suit d'un mode de réalisation du procédé selon l'invention.

A Préparation du matériau de départ

On prélève aux abattoirs, les péricardes, chez des veaux de 100 jours, moins d'une heure après leur mise à mort. Ces péricardes sont alors dégraissés, triés, lavés dans une solution aqueuse à 9 °/₀₀ de chlorure de sodium.

B Réticulation du collagène par introduction de groupes azides

Cette réaction de réticulation peut être résumée comme suit :

$$\text{Coll - COOH} + CH_3OH \xrightarrow{HCl} \text{Coll - } \underset{\underset{O}{\|}}{C} \text{ - O } CH_3 + H_2O$$

ester

$$\text{Coll - } \underset{\underset{O}{\|}}{C} \text{ - O } CH_3 + NH_2 - NH_2 \longrightarrow \text{Coll - } \underset{\underset{O}{\|}}{C} \text{ - NH - } NH_2$$

hydrazide

$$\text{Coll - } \underset{\underset{O}{\|}}{C} \text{ - NH - } NH_2 + NaNO_2 + HCl \longrightarrow \text{Coll - } \underset{\underset{O}{\|}}{C} \text{ - } N_3$$

(Coll = Collagène)

acyl azide

La première étape, l'estérification des groupements carboxyliques est réalisée par immersion des échantillons dans une solution de méthanol contenant 0,2 mole d'acide chlorhydrique à température ambiante pendant 7 jours.

Deux rinçages sont effectués dans le méthanol sans acide.

Puis on procède à deux rinçages avec une solution aqueuse à 6 % de chlorure de sodium (étape 2).

Les échantillons sont ensuite plongés dans une solution d'hydrazine 1 % avec NaCl 6 % pendant une nuit afin d'obtenir des hydrazides à partir des groupements estérifiés. La réaction se passe à température ambiante (étape 3).

On procède alors à un rinçage à 4° C avec une solution aqueuse à 6 % de chlorure de sodium (étape 4).

L'étape suivante (étape 5), consiste à immerger les échantillons obtenus dans une solution renfermant 0,3 mole d'acide chlorydrique et 0,5 mole de nitrite de sodium dans une solution aqueuse à 6 % de chlorure de sodium.

Les échantillons sont ensuite rincés (étape 6) afin d'en éliminer complètement l'acide ; ils sont ensuite maintenus pendant quatre heures à température ambiante dans un tampon borate-chlorure de sodium 6 % (étape 7).

Les acyl-azotures formés à partir des groupements carboxyliques des chaînes latérales du collagène vont ainsi pouvoir réagir avec les groupements aminés, essentiellement de la lysine, pour former une liaison amide. On crée ainsi des liaisons de réticulation à l'intérieur du réseau collagénique.

Les échantillons sont enfin incubés, à température ambiante, dans un tampon borate-glycine-chlorure de sodium à 9 % pendant au moins trois heures.

Afin d'obtenir un biomatériau stérile, il est préférable de conserver les échantillons ainsi obtenus dans de l'alcool à 70°.

L'influence exercée par l'addition du chlorure de sodium au cours des différentes étapes du procédé va maintenant être étudiée.

Dans le dessin schématique annexé :

Figures 1 et 2 sont des courbes de calorimétrie différentielle programmées respectivement pour un péricarde frais non traité, et pour un péricarde traité selon l'invention.

Figure 3 et 4 sont des courbes retraçant les propriétés physiques (masse à la rupture en kg en abscisse, et allongement en mm en ordonnée) respectivement pour un tendon frais et pour un tendon traité selon l'invention.

Figure 5 est une courbe retraçant l'évolution du gonflement d'une peau en fonction du pH.

1) Etude en calorimétrie différentielle programmée

L'analyse calorimétrique différentielle programmée (C.D.P.) permet une étude calorimétrique dynamique des échantillons expérimentaux.

La technique consiste à mesurer, lors d'une montée linéaire de la température, la différence d'énergie qu'il faut fournir à un échantillon et à une référence pour les maintenir à une température identique. Lorsque la protéine se dénature, un pic d'absorption de chaleur apparaît sur l'enregistreur. En effet, la transition hélice pelote statique est endothermique pour le collagène.

On définit ainsi :

- la température de début de dénaturation
- la température de pic de dénaturation
- la température de fin de dénaturation.

L'étude a été effectuée comparativement :

- sur un film et sur un péricarde témoin, non traité (témoin)
- sur un film et sur un péricarde soumis aux différentes étapes de réticulation par introduction de groupes azides, en présence d'eau.
- sur un film et sur un péricarde soumis aux différentes étapes de réticulation par introduction de groupes azides selon l'invention c'est-à-dire en présence d'une solution aqueuse à 6 % de chlorure de sodium (NaCl).
- sur un film et sur un péricarde traité avec une solution à 0,6 % de glutaraldéhyde (G.T.A.).

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau I ci-après :

Tableau I

Film	Temps en °C Début	Temps en °C Pic	Temps en °C Fin
témoin	39,15	49,1	66,1
eau	53,6	63,8	76,6
NaCl 6 %	65,5	74,3	83
GTA 0,6 %	71,1	79,1	86,4
Péricarde			
témoin	53,6	62,8	73,6
eau	70	75,7	84,1
NaCl 6 %	78	81,4	89,1
GTA 0,6 %	82	85,3	93,8

La figure 1 représente la courbe énergie/température pour un péricarde frais et la figure 2 la même courbe pour un péricarde traité par le procédé selon l'invention, dans un milieu ne contenant pas de chlorure de sodium aux étapes n° 2, 3, 4, 5, 6, ce péricarde a une température de début de dénaturation de 70° C en fin de traitement.

Un péricarde traité dans les mêmes conditions mais en présence de NaCl 6 % aux étapes n° 2, 3, 4, 5, 6 selon l'invention, a une température de début de dénaturation de 78° C en fin de traitement.

Des résultats similaires sont relevés sur les films où l'on observe, dans le cas de films traités par le procédé selon l'invention, une augmentation de température de début de dénaturation de 12° C.

2) Digestion à la collagénase

Afin de confirmer les résultats obtenus en calorimétrie différentielle et d'évaluer les performances des matériaux face à des "agressions" se rapprochant de celles que l'on peut retrouver in-vivo, les différents matériaux (traité en l'absence de sel, traité en présence de chlorure de sodium, traité au G.T.A.) ont été incubés pendant 7 jours en présence de collagénase bactérienne (600 U/ml).

Le 7ème jour, on dose la quantité de protéines se retrouvant dans le surnageant. La quantité de protéines est proportionnelle au degré d'attaque par la collagénase.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau II ci-après :

Tableau II

Traitement	Taux de protéïnes
Traité en l'absence de NaCl	105 µg/ml
Traité en présence de NaCl 6 %	18 µg/ml
Traité G.T.A. 0,6 %	6 µg/ml

On constate également une tenue du matériau très nettement améliorée quand le traitement a été effectué en présence de chlorure de sodium.

3)Etude des propriétés mécaniques

L'influence des conditions du procédé de réticulation chimique sur les propriétés physiques du collagène a été étudiée sur des tendons de porc. Contrairement au péricarde, le tendon comporte des fibres de collagène toutes orientées dans la même direction ce qui facilite l'interprétation des résultats.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau III et dans les figures 3 et 4.

La figure 3 est la courbe de masse à la rupture en kg en fonction de l'allongement en mm pour un tendon frais et la figure 4 est une courbe similaire pour un tendon traité par le procédé selon l'invention.

Lorsque le tendon est étiré, on obtient une courbe à partir de laquelle on peut déterminer :

- la masse à la rupture : elle est donnée par la masse maximum nécessaire pour rompre l'échantillon
- la déformation à la rupture (extensibilité à rupture) : Elle est donnée par le rapport de l'allongement à la rupture à la longueur initiale de l'échantillon.
- Le module d'élasticité : c'est la pente de la partie linéaire de la courbe ; plus le module d'élasticité est fort, plus le tissu est rigide.

Tableau III

Etude des propriétés physiques en traction uniaxiale

	Masse à la rupture en kg	Extensibilité à la rupture en %	Module élasticité en kg
Tendon frais	46,42 ± 9	1,88 ± 0,6	1,38
Tendon activé par l'eau	87,83 ± 27,5	4,4 ± 0,92	7,8 ± 3,32
Tendon activé NaCl 6 %	87,33 ± 17,5	5,9 ± 1,2	8,75 ± 3,9
Tendon GTA 0,6 %	94,28 ± 16,57	7,14 ± 1,87	8 ± 1,9

Les masses à la rupture des tissus traités sont similaires et significativement différentes de la masse à la rupture d'un tissu témoin non traité. On constate, de plus, une augmentation des valeurs de l'extensibilité à la rupture pour les tissus traités selon l'invention et tannés au G.T.A..

Enfin, on observe une augmentation significative du module d'élasticité qui traduit une augmentation de la rigidité.

Comment peut-on expliquer les différences importantes exposées ci-avant, notamment entre les matériaux soumis de façon classique, à une réticulation par introduction de groupes azides et les matériaux traités selon l'invention, en présence de chlorure de sodium ?

Quand l'introduction de groupes azides est effectuée en l'absence de chlorure de sodium, l'acide chlorhydrique entraîne en fin d'estérification, un gonflement du tissu ; celui-ci devient alors plus épais et translucide. Ce gonflement correspond à une dissolution limitée du tissu puisqu'il existe de nombreuses liaisons inter et intramoléculaires empêchant une dissolution totale du tissu. En fin d'estérification, la stabilité thermique du tissu est celle d'un collagène acido-soluble (la température de début de dénaturation est de 36° C, l'épaisseur du péricarde passe de 0,38 mm à 0,82 mm).

Aux autres étapes du traitement,le phénomène est identique mais de moindre amplitude.

Quand l'introduction de groupes azides se fait dans les conditions du procédé de l'invention, c'est-à-dire en présence de chlorure de sodium, on obtient, en fin d'estérification, un tissu qui, d'un point de vue macroscopique, ne s'est pas modifié.

En CDP, la stabilité thermique du tissu ainsi traité est voisine de celle d'un tissu frais non traité (la température de début de dénaturation est de 53,9° C pour le tissu traité selon l'invention et de 58° C pour le tissu frais).

Au cours des autres étapes de traitement, on n'observe pas non plus de dénaturation du tissu.

En théorie, on peut expliquer comme suit l'action limitante du chlorure de sodium sur le gonflement.

Le collagène possède des groupements latéraux polaires provenant des acides aminés acides et basiques.

Ainsi, suivant le pH du milieu, ces groupements seront ou non ionisés.

En milieu acide : $COOH$ et $NH3^+$

En milieu basique : COO^- et $NH2$

Ces ionisations expliquent les phénomènes de gonflements c'est-à-dire d'absoption d'eau par la fibre.

Ils sont bien connus en tannerie et sont utilisés pour faciliter l'épilage des peaux. On a pu ainsi établir des courbes de gonflement de la peau en fonction du pH (figure 5).

L'estérification réalisée en présence d'acide chlorhydrique provoque la fixation d'ions H+ par le tissu. Ainsi, il va y avoir une migration d'H+ et de Cl- de la phase aqueuse à la phase collagénique. Afin de maintenir l'électroneutralité, les ions chlorure et hydrogène circuleront sous forme de molécules plutôt que d'ions libres. Les ions hydrogène sont fixés par la protéine et la concentration en ions chlorure de la fibre se trouve être plus importante que la concentration en ions chlorure de la phase aqueuse. En accord avec la loi d'action de masse, le produit de la concentration en ions chlorure par la concentration en ions hydrogène doit être égal dans la fibre et dans la phase aqueuse. Il va alors se développer une pression osmotique dans la fibre qui va augmenter de volume en absorbant de l'eau d'où un gonflement du péricarde.

Le même raisonnement peut être tenu en milieu basique, lorsque le tissu se trouve en présence d'hydrazine ($pH \simeq 10$).

En présence de sel, on assiste à une répression du gonflement du tissu. En effet, dans ce cas la différence de concentration en ions chlorure est atténuée par adjonction de chlorure de sodium. La pression osmotique est faible et le gonflement réduit.

On constate, après estérification en présence de sel, une constance de l'épaisseur du tissu, une augmentation de la stabilité thermique ; une concentration en chlorure de sodium de 6 % s'est révélée être tout spécialement efficace pour obtenir un tannage important et de bonne qualité.

Pour résumer, il apparait que la réticulation du collagène par introduction de groupes azides en présence de chlorure de sodium, permet d'obtenir un matériau réticulé de meilleure qualité que le même traitement en l'absence de sel.

Le matériau réticulé en présence de chlorure de sodium présente un certain nombre de propriétés (stabilité thermique, digestion à la collagénase) qui sont voisines de celles d'un matériau traité au glutaraldéhyde.

Par rapport à un matériau traité au glutaraldéhyde, le matériau traité par le procédé selon l'invention, présente une biocompatibilité nettement améliorée.

En effet, le procédé selon l'invention présente le grand avantage de n'introduire aucun agent chimique étranger dans le collagène, alors que le traitement au glutaraldéhyde entraîne la fixation de substances qui sont cytotoxiques et qui, de ce fait, font perdre au tissu l'essentiel de ses propriétés biologiques.

De plus, un tissu traité par le procédé selon l'invention et implanté dans un organisme vivant ne relarguera aucune matière toxique pouvant exercer des effets fâcheux, à court ou à long terme.

Comme il va de soi, et comme il ressort de ce qui précède, le procédé qui vient d'être décrit, appliqué au péricarde peut être appliqué à tout autre tissu collagénique. Il peut bien entendu convenir à la réalisation de tout biomatériau à base de collagène reconstitué tels que films, éponges, tubes etc.

REVENDICATIONS

1- Procédé de réticulation du collagène par introduction de groupes azides qui comporte essentiellement les étapes suivantes :

- estérification des groupements acides libres du collagène.
- transformation des groupements estérifiés en groupements hydrazides.
- transformation des groupements hydrazides en groupements azides par action de l'acide nitreux, caractérisé en ce que chaque étape est séparée par un rinçage en solution aqueuse de sel.

2- Procédé selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'étape de transformation des groupements estérifiés en groupements azides et l'étape de transformation des groupements hydrazides en groupements azides par action de l'acide nitreux, sont effectuées en présence de sel.

3- Procédé selon les revendications 1 et 2 caractérisé en ce que le sel est choisi parmi les sels de métaux alcalins.

4- Procédé selon la revendication 3 caractérisé en ce que la concentration de la solution aqueuse de sel se situe entre 5 et 15 %.

5- Procédé selon la revendication 4 caractérisé en ce que la réaction de réticulation par introduction de groupes azides est effectuée sur les collagènes non réticulés.

6- Application du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5 à l'obtention de bioprothèses.

7- Application du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5 à l'obtention de biomatériaux.

FIG_1

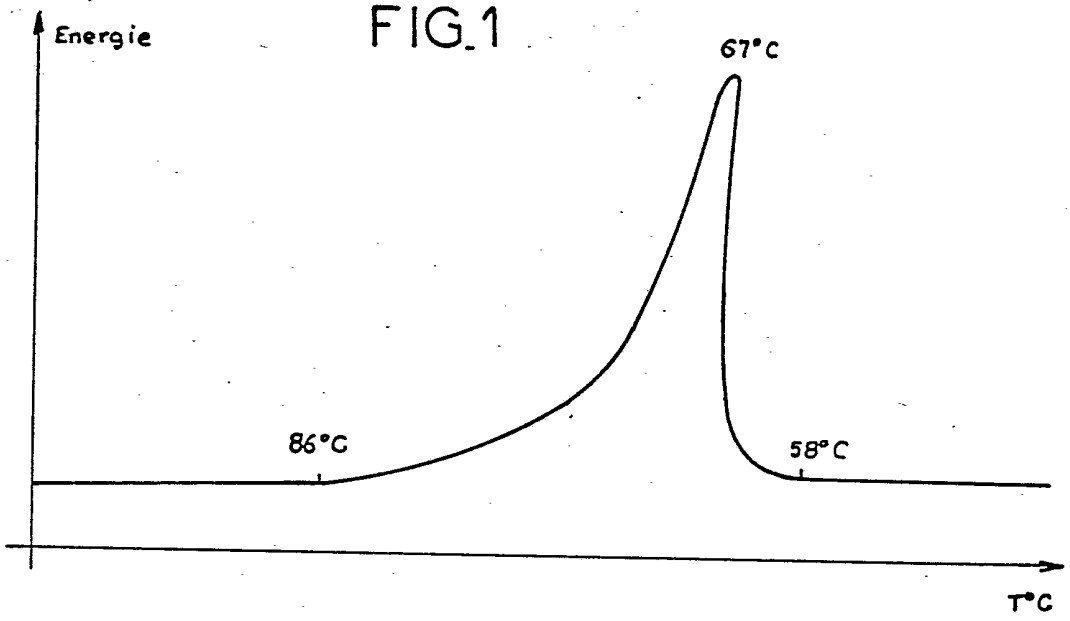
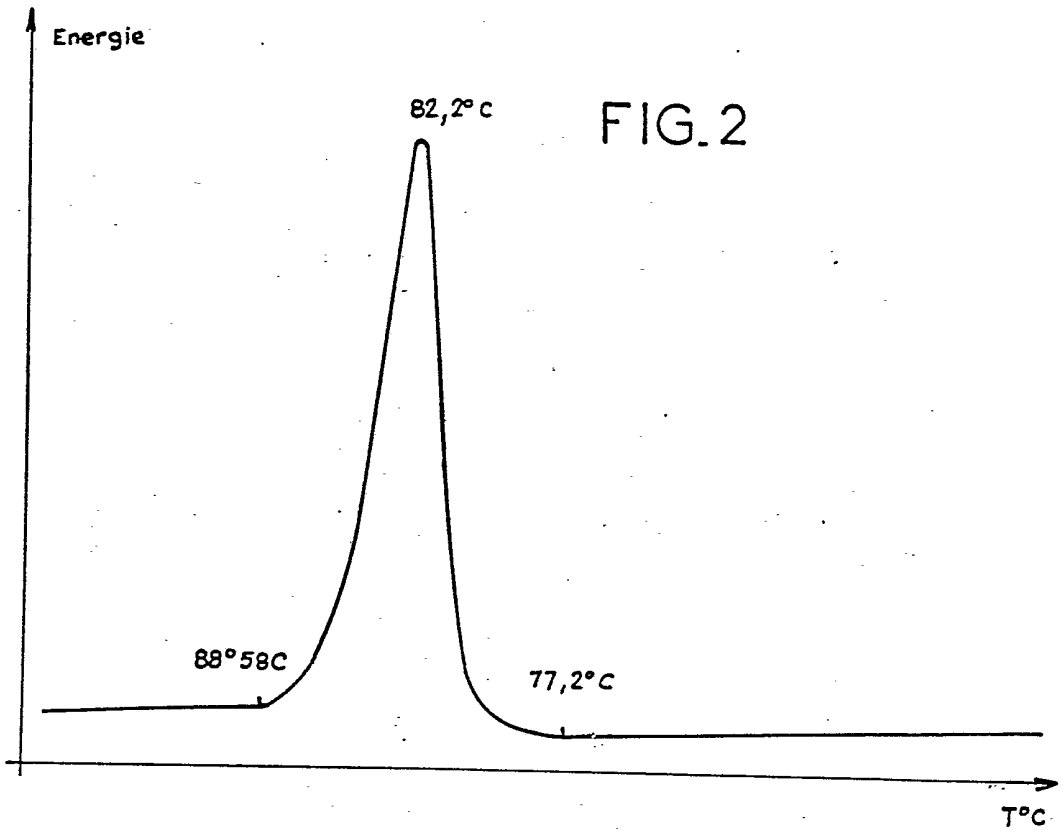


FIG_2



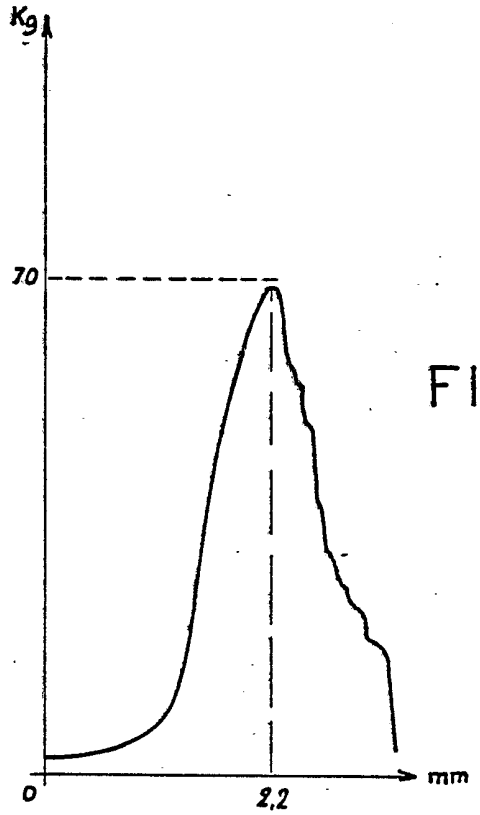


FIG.3

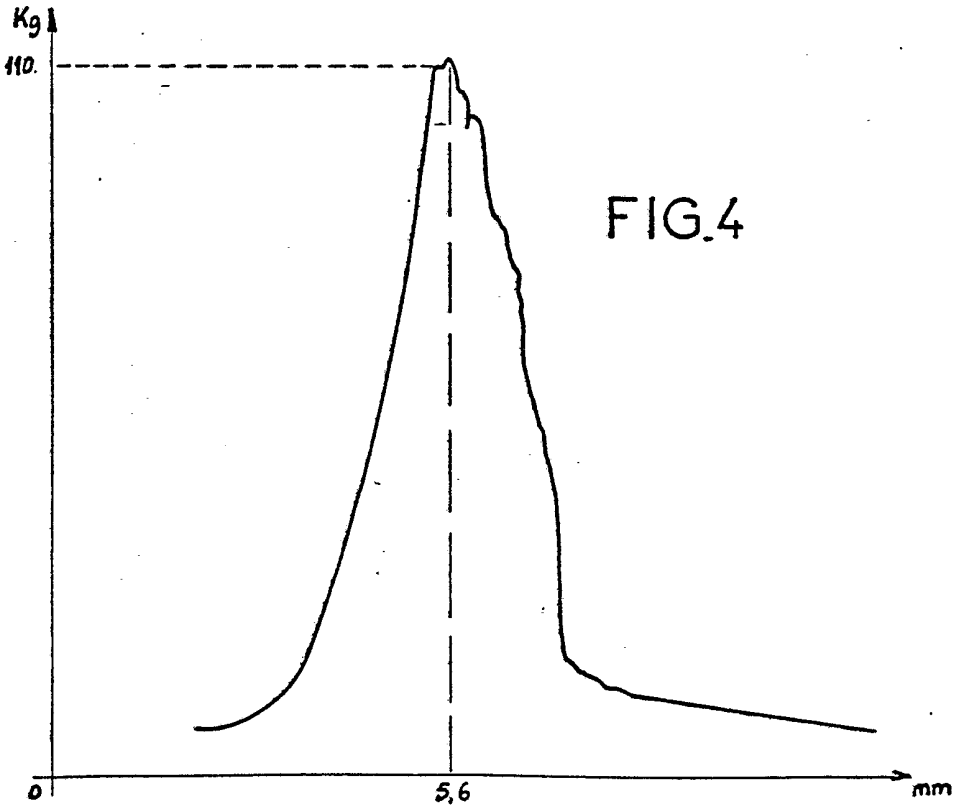
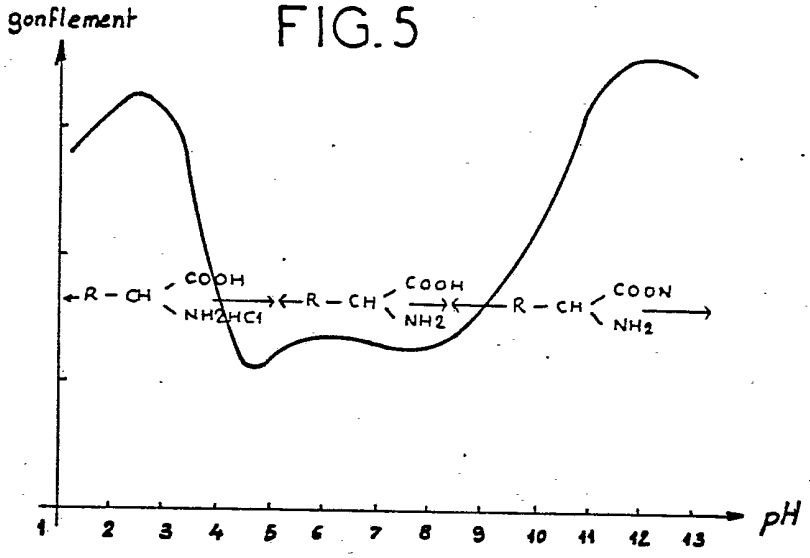


FIG.4

FIG.5


gonflement
R – CH
COOH
NH2HCl
R – CH
COOH
NH2
R – CH
COOH
NH2
pH
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13