

L'APPLICATION ET L'ISOLEMENT ÉLECTRIQUE DES JAUGES DE DÉFORMATION SUR OS FRAIS «ÉTUDE PRÉLIMINAIRE»

par J. L. DE GEETER, M. VERHELPE et E. MUNTING

Le but de ce travail est de déterminer la préparation de surface et l'isolement électrique les plus adéquats pour utiliser des jauges de contrainte sur de l'os frais, maintenu humide.

Différents types de préparation de surface sont testés. Leur efficacité est évaluée par comparaison des déformations obtenues à partir des jauges ou d'un extensomètre à couteaux, placés sur des éprouvettes d'os cortical bovin mises en traction. Les résultats nous informent de la nécessité d'un polissage suffisant : minimum 5 cycles de polissage au papier émeri n° 320. Une étude en microscopie électronique à balayage (MEB) fut réalisée pour déterminer l'effet de la procédure de préparation sur l'état de surface et visualiser l'influence de l'usinage sur les éprouvettes.

Différents isolants sont testés en veillant particulièrement à l'absence d'influence sur les déformations mesurées. Un isolant optimal à base de polyuréthane est proposé.

Mots-clés : jauges de déformation ; biomécanique.

Keywords : strain gauges ; biomechanics.

SUMMARY

J. L. DE GEETER, M. VERHELPE and E. MUNTING. Application and electrical insulation of strain gauges used with fresh bone. A preliminary study.

This report describes the optimal use of strain gauges placed on fresh wet bones. Two principal stages in gauge installation were studied : surface preparation and gauge insulation.

Different surface preparation procedures were tested on bovine bone specimens loaded in traction. The preparation efficiency was evaluated by comparing

strains measured from gauges and from an extensometer with sharp edges. Results show the necessity of sufficient rubbing : a minimum of 5 rubbing cycles with n° 320 emery paper. Scanning electron microscopy was used to examine the effect of the preparation procedures.

Different coatings were also tested with special attention given to the influence of these coatings on the measured strains. An optimal polyurethane coating is proposed.

SAMENVATTING

J. L. DE GEETER, M. VERHELPE en E. MUNTING. Toepassing en elektrische isolatie van rekstrookjes op vers bot. Voorafgaande studie.

De bedoeling van deze studie is de meest geschikte wijze van oppervlakte voorbereiding en elektrische isolatie te bepalen bij het gebruik van rekstrookjes op vers, vochtig gehouden bot.

Verschillende technieken van oppervlakte voorbereiding worden vergeleken. Hun doelmatigheid wordt geëvalueerd door het vergelijken van de metingen van vervorming van aan een trekproef onderworpen proefplaatjes runderbot, respectievelijk met rekstrookjes of met een extensometer met mesoplegging.

De bekomen gegevens tonen aan dat het oppervlak genoeg moet worden gepolijst : minimum 5 cycli met schuurpapier n° 320.

Om de invloed van de voorbereidingsprocedures op de oppervlaktetoestand en de mechanische bewerking van de proefplaatjes aan te tonen, werd ook een onderzoek verricht met een aftastelectronenmicroscopie.

Laboratoire d'Orthopédie, Université Catholique de Louvain, Bruxelles (Belgique).

Verschillende isolatoren werden getest waarbij bijzondere zorg werd besteed om invloed op de gemeten vervormingen te voorkomen. Een optimale isolator op polyurethaanbasis wordt voorgesteld.

INTRODUCTION

En biomécanique osseuse, les jauges de déformation ont quatre applications principales : collées sur os frais gardé humide *in vitro*, collées sur os *in vivo*, collées sur os sec ou embaumé, collées sur du matériel d'ostéosynthèse.

L'os est un matériau composite, poreux, humide et gras. Le collage des jauges sur os frais maintenu humide par du sérum physiologique nécessite donc une préparation de surface de l'os et une protection électrique adéquates. La littérature propose différentes «recettes» d'application des jauges ohmiques sur ce matériau vivant aux caractéristiques structurelles complexes (2, 3, 5, 6, 7, 8).

Ce travail a pour but d'établir les conditions adéquates d'utilisation des jauges de déformation collées sur os frais gardé humide (4). Il est basé sur des essais mécaniques réalisés sur des éprouvettes normalisées prélevées dans la diaphyse de fémurs frais de bovins. L'accent est mis sur l'influence des différentes préparations de surfaces et protections électriques sur la mesure correcte des déformations. Une technique satisfaisant aux différents critères est proposée.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Fixation des jauges

Pour tester la procédure des jauges, nous avons comparé les mesures obtenues par des jauges collées et celles données par un extensomètre électrique à couteaux montés sur une même éprouvette mise en traction.

Toutes les éprouvettes de traction ont été prélevées parallèlement à l'axe longitudinal, dans la diaphyse de fémurs frais de bovins. Elles ont été usinées par une machine-outil conventionnelle sous une irrigation continue par du liquide physiologique. Dans un premier temps, par souci de conserver les conditions réelles de collage, trois des quatre

faces de l'éprouvette furent usinées. La surface externe de l'os étant gardée intacte. Cependant, la difficulté d'obtenir lors de l'usinage une éprouvette normalisée, c'est-à-dire à section constante et dont la surface est plane nous a conduit à usiner les quatre faces.

En l'absence de normes pour les éprouvettes de traction en os, nous avons opté pour les dimensions suivantes : longueur totale 60 mm, longueur de la partie calibrée 18 mm, largeur 5 mm, épaisseur 4 mm (fig. 1). Les tests porteront sur 23 éprouvettes. Toutes les éprouvettes ont subi le même traitement de base. Les différences de préparation se situent au niveau du grain du papier émeri et du nombre de cycles de polissage et de dégraissage.

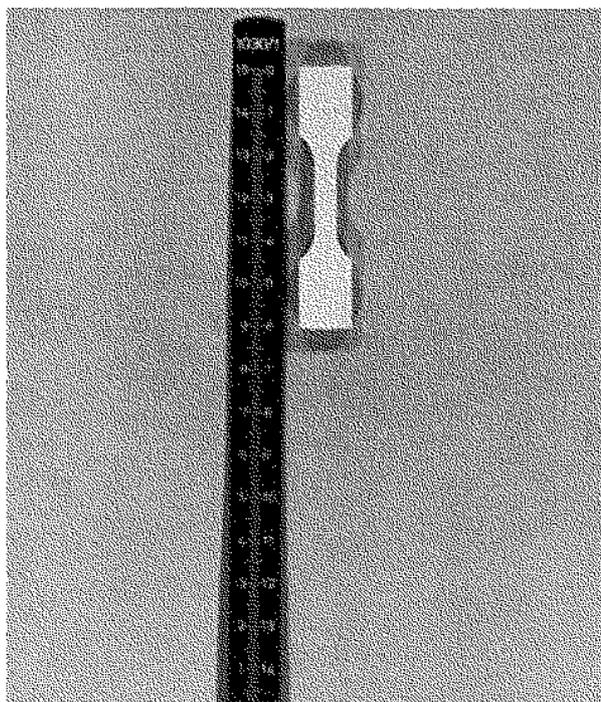


Fig. 1. — Éprouvette d'os bovin.

Le traitement de base se subdivise en quatre étapes :

- | | | |
|---------|---|---|
| cycle → | { | 1. Grattage du périoste. |
| | | 2. Polissage à sec dans le sens de la longueur. |
| | | 3. Dégraissage à l'éther. |
| | | 4. Neutralisation. |

Tableau I. — Influence de différentes préparations sur la mesure des déformations

Trait	Nbre	Face ext. éprouv.	Préparation	Pourcentage d'erreur de la mesure de la jauge par rapport à l'extens, pour 3 états de mise en charge (N/cm ²)					
				Moyenne			Écart-type		
				2000	4000	6000	2000	4000	6000
-	1	alu.	bon poliss. et dégraiss.	4,7	2,9	7,1	/	/	/
1	5	Os non usiné	1 cycle* grain 320	59,5	61,5	55,5	41,2	32,3	14,0
2	1	Os usiné	2 cycles* grain 320	28,0	23,9	21,4	/	/	/
3	2	Os usiné	3 cycles* grain 320	3,5	10,2	11,5	1,6	2,2	2,4
4	9	Os usiné	5 cycles* grain 320	5,7	3,4	3,4	4,6	3,4	2,9
5	2	Os usiné	5 cycles* grain 400	11,9	16,3	18,2	6,8	5,8	5,8
6	3	Os usiné	10 cycles* grain 400	5,8	5,1	4,4	1,6	2,0	2,5

cycle* : cycle de polissage et de dégraissage.

On évite le nettoyage à l'acide qui pourrait altérer les propriétés de l'os.

Les différents traitements testés sont repris dans le tableau I.

Une jauge TML FLA-2 est collée au centre de la partie à section constante de chaque éprouvette avec du méthyl-2-cyanoacrylate (Cyanolit®) suivant la technique classique (1). Le relais est collé sur la face opposée. Les fils électriques de connexion sont soudés à température régulée en utilisant le minimum de soudure et en limitant le temps de contact du fer à souder pour éviter un échauffement local. Durant l'application de chaque jauge, l'éprouvette est humidifiée par un tampon imbibé d'eau.

Les éprouvettes sont mises en traction sur une machine Instron Model 1126. Pour chaque essai, un extensomètre à couteaux Instron G-51-16 mm est monté sur l'éprouvette du même côté que la jauge. Cette précaution permet d'éviter la mesure parasite des phénomènes de flexion. La vitesse de mise en charge est de 0,01 cm/min. La lecture des déformations se fait à chaque incrément de

charge de 20 kg. Parallèlement, l'extensomètre est raccordé à un générateur de graphe X-Y exprimant la force appliquée et la déformation résultante.

L'effet de la procédure de préparation sur l'état de surface est analysé par MEB (Microscope Électronique à Balayage). Six échantillons ont été analysés. Trois d'entre eux ont conservé la surface périostale intacte, les trois autres ont été usinés sur leur quatre faces. La préparation de surface de chaque échantillon avant analyse en MEB est reprise dans le tableau II. Après déshydratation, les échantillons sont recouverts par une couche d'or de 100 Angströms pour permettre l'étude en MEB.

Tableau II. — Préparations de surface des échantillons en vue de l'analyse microscopique

1 :	usiné	pas de préparation
2 :	usiné	3 cycles papier 320
3 :	usiné	5 cycles papier 320
4 :	non usiné	pas de préparation
5 :	non usiné	3 cycles papier 320
6 :	non usiné	5 cycles papier 320

Isolement des jauges

Pour une mesure correcte de la déformation, il faut que la variation de résistance de la jauge provienne uniquement de la déformation de l'os et non pas de l'échauffement ou d'un isolement électrique insuffisant. Les effets dus à une variation de température peuvent être en grande partie éliminés par un montage en 1/2 pont.

L'os étant humidifié par du liquide physiologique, une protection de la jauge réunissant les caractéristiques suivantes doit être réalisée :

1. Un bon isolement électrique. En effet, une chute de la résistance d'isolement de 10 à 1 MOhms entraîne une variation de déformation d'environ 50 microstrains.
2. Il faut éviter que le produit de protection ne soit d'une rigidité telle qu'il reprenne une partie des contraintes. L'utilisation d'une telle protection entraînerait une diminution de la déformation mesurée ne correspondant plus à la déformation réelle de l'os.
3. Il est impératif d'utiliser des produits de protection à séchage rapide pour éviter une dessiccation de l'os. Toutes les protections testées sèchent en moins de 45 minutes.

L'expérimentation de mise au point de l'isolement a été réalisée sur 33 éprouvettes semblables à celles utilisées précédemment. Sur chaque éprouvette une jauge TML-FLA-2 est appliquée. Pour évaluer l'efficacité de la protection, deux tests sont effectués :

1. Test de rigidité de la protection

Les jauges sont câblées en 1/2 pont. Avant l'application de la protection, l'éprouvette est chargée et déchargée trois fois. À chaque décharge, on vérifie bien une tension de sortie nulle. Ensuite l'éprouvette est mise en traction (1250 N/cm²) et le produit de protection est appliqué sur la jauge et le relais. Après séchage de la protection, l'éprouvette est déchargée, et on vérifie le retour à zéro de la tension de sortie. Une éventuelle tension résiduelle est notée.

2. Résistances de jauge et d'isolement

Après le test de rigidité, les éprouvettes protégées sont immergées dans du liquide physiologique. Les résistances de jauge et d'isolement sont mesurées à intervalles de temps réguliers. L'expérimentation est poursuivie pendant une semaine.

Neuf protections simples et deux protections mixtes ont été testées (2, 3, 8).

RÉSULTATS

Les résultats relatifs au bon placement des jauges sont présentés au tableau I. Nous avons estimé l'erreur commise par la mesure de la jauge par rapport à l'extensomètre. Ceci pour trois états de mise en charge. Deux diagrammes correspondant aux traitements 3 et 4 sont présentés aux figures 3 et 2. Des observations par microscopie électronique à balayage pour les 6 échantillons sont présentées à la figure 4.

Les différents isolants et les résultats associés sont présentés au tableau III. Deux diagrammes aux figures 5 et 6 montrent bien la différence apportée par la solution mixte Vulgavit® - Rubson® par rapport au polyuréthane Rubson® seul. Notons la variation de résistance de la jauge intervenant durant les premières 24 heures.

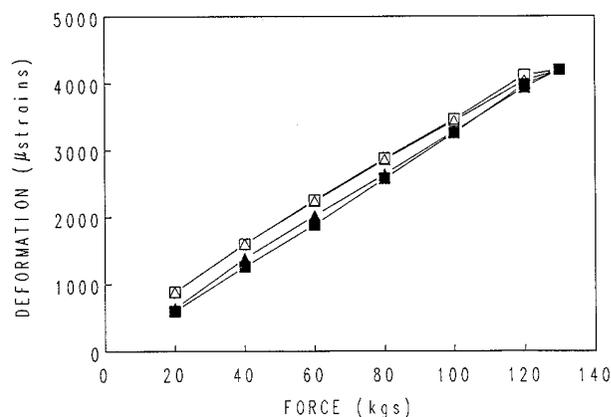


Fig. 2. — Diagramme force/déformation. Mise en charge et décharge d'une éprouvette du traitement 4. Les courbes de déformation de la jauge sont indiquées par des carrés pleins pour la mise en charge, des carrés vides pour la décharge. Les courbes relatives à l'extensomètre, superposées dans ce cas-ci, sont représentées par des triangles.

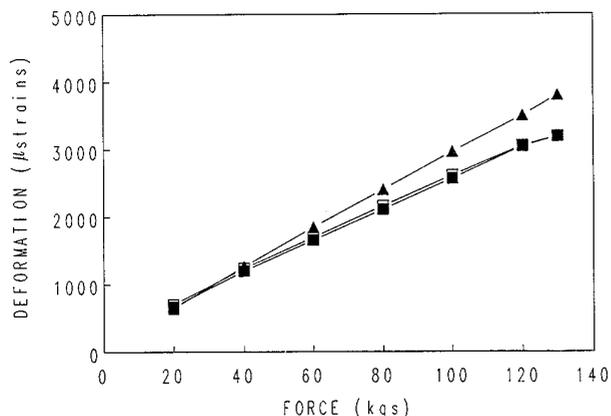


Fig. 3. — Diagramme Force/Déformation. Mise en charge et décharge d'une éprouvette du traitement 3. Les courbes de déformation de la jauge sont indiquées par des carrés pleins pour la mise en charge, des carrés vides pour la décharge. Les courbes relatives à l'extensomètre sont représentées par des triangles.

DISCUSSION

Pour apprécier l'exactitude des mesures de déformation réalisées par une jauge collée sur un os frais, nous avons choisi comme étalon l'extensomètre à couteaux Instron G-51-16 mm. Lors d'un essai sur une éprouvette d'un matériau métallique, l'aluminium, pour lequel la technique du collage des jauges est bien codifiée, nous avons observé une bonne concordance des résultats obtenus par les deux méthodes de mesures. Les couteaux de l'extensomètre étant en acier trempé et incisifs, l'humidité et le caractère gras de l'os n'affectent pas le bon ancrage de ceux-ci dans la matière. Il est très difficile de prélever une éprouvette valable dans un fémur. De plus, de nombreuses éprouvettes ont été perdues lors de l'usinage. De ce fait l'échantillonnage pour les divers traitements de surface est relativement faible.

Tableau III. — Influence de divers produits d'isolement de jauges

	nombre des échant.	Test de rigidité		Variation de le R jauge après 7 jours (Ohms)		R isolement après 7 jours (MOhms)	
		V _{rés} /V _{max} (%)					
		moyenne	Écart type	moyenne	Écart type	moyenne	Écart type
1. Résine époxy (Araldite)	2	14,7	1,3	0	0	> 20	/*
2. Mastic polyuréthane Rubson	3	0	0	0,53	0,05	0,53	0,05
3. Cire M-Coat W-1	2	0	0	-0,1	0	0,075	0,005
4. Pansement plastique (Nobécutane)	3	0	0	0,53	0,2	0,075	0,005
5. Bitume en émulsion dans l'eau	3	0	0	0,66	0,19	0,1	0,02
6. Polyuréthane Vulgavit	3	9,47	5,9	0	0	> 20	/*
7. Polystyrène	3	0,5	0,5	instable		0,28	0,24
8. Silicone rubber mono-composant Silirub	3	0	0	0,86	0,22	4	3
9. Silicone rubber double composant RTV 3120 (Dow Corning)	2	0,7	0	0,5	0,1	0,39	0,31
10. Prod. 6 sur relais, fils + Prod. 2 sur relais, fils et jauges	6	0,7	0,8	0,45	0,05	> 20	/*
11. Prod. 1 sur relais, fils + Prod. 9 sur relais, fils et jauge	3	0	0	0,5	0,1	> 20	/*

(*) Toutes les éprouvettes ont R isolément > 20 MOhms après 7 jours.

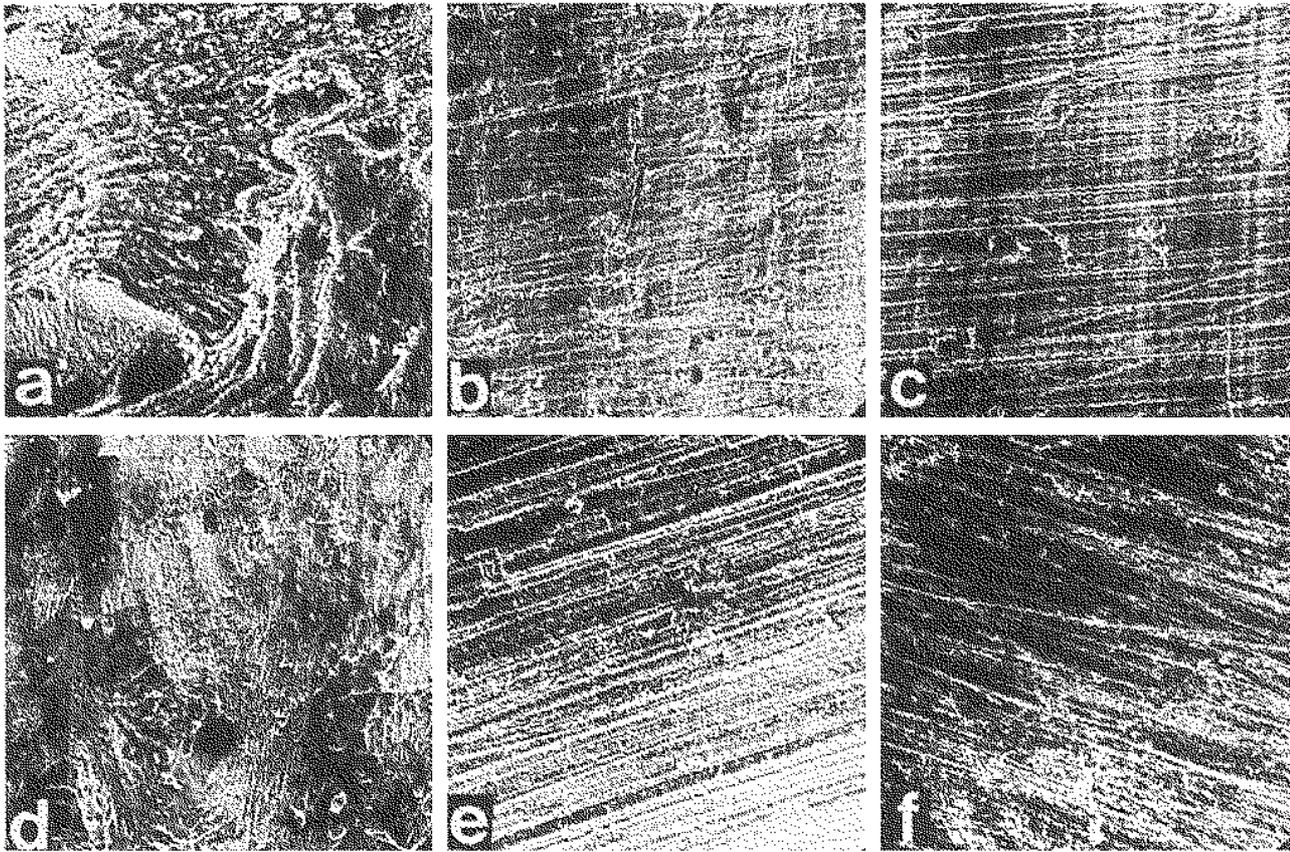


Fig. 4. — Les photographies de MEB 4 (a) à 4 (f) correspondent aux échantillons 1 à 6 respectivement (60 X).

La surface brute de l'os usiné (a) et non usiné (d) est très irrégulière. On y observe de nombreuses cavités dont la densité est plus élevée sur la surface usinée. Les plus grandes sont les canaux de Havers ; les plus petites, les ostéoplastes. Lors de l'usinage, la fraiseuse a provoqué des arrachements de la matière osseuse et on peut observer sur la figure 4 (a) les couches superposées de la structure lamellaire des ostéones. La surface usinée de l'os apparaît donc plus accidentée que sa surface naturelle.

Après cinq cycles de polissage et de dégraissage, l'os usiné (e) et non usiné (f) présentent une surface homogène et lisse. À ce stade, il n'y a plus de différences significatives.

Lors des premiers essais (traitement 1), la surface externe de l'os était non usinée. Les éprouvettes ont été préparées sommairement en ce sens qu'elles n'ont subi qu'un seul cycle de polissage et de dégraissage. On assiste à une mesure incorrecte des déformations.

Les traitements 2, 3 et 4 prouvent que la préparation de surface a une influence significative sur la précision des mesures de déformations de l'os frais par la technique des jauges de déformation. Globalement, pour un même type de papier émeri, on constate une amélioration des résultats lorsque le nombre de cycles de traitement augmente. La

finesse des grains semble, par contre, avoir un effet défavorable (traitements 5 et 6).

Les traitements 4 et 6 donnent les meilleurs résultats. Cinq cycles de polissage et de dégraissage au papier abrasif 320 ou 10 cycles de polissage et dégraissage au papier abrasif 400 permettent l'obtention de mesures de déformations correctes d'une éprouvette normalisée en os frais.

La mise au point de la procédure d'application des jauges sur os frais a été réalisée sur des éprouvettes usinées sur leurs quatre faces. L'analyse en microscopie électronique à balayage nous révèle qu'après avoir subi le traitement 5, l'état de surface

d'un os usiné et non usiné ne présente plus de différence significative. Ces os offrent une surface de collage relativement lisse et homogène donnant probablement une même précision aux mesures. Avec le système de mise en charge utilisé, les mesures de déformation ne sont pas reproductibles à chaque mise en charge. En effet, lorsque l'éprouvette est retirée de l'appareil de mise en charge, et ensuite replacée dans celui-ci, il est impossible de reproduire parfaitement les conditions initiales de préhension de l'éprouvette. C'est pourquoi nous

avons préféré vérifier le retour à zéro de la tension de sortie du pont à la décharge après avoir appliqué et laissé sécher l'isolant sur une éprouvette en charge. Le retour à zéro de cette valeur démontre que la protection utilisée ne compromet pas la libre déformation de l'unité os-colle-jauge. L'épaisseur de la couche de protection peut bien sûr influencer les mesures. Nous nous sommes appliqués à mettre une couche mince sans avoir mesuré avec précision cette épaisseur qui n'excède cependant pas 0,5 mm.

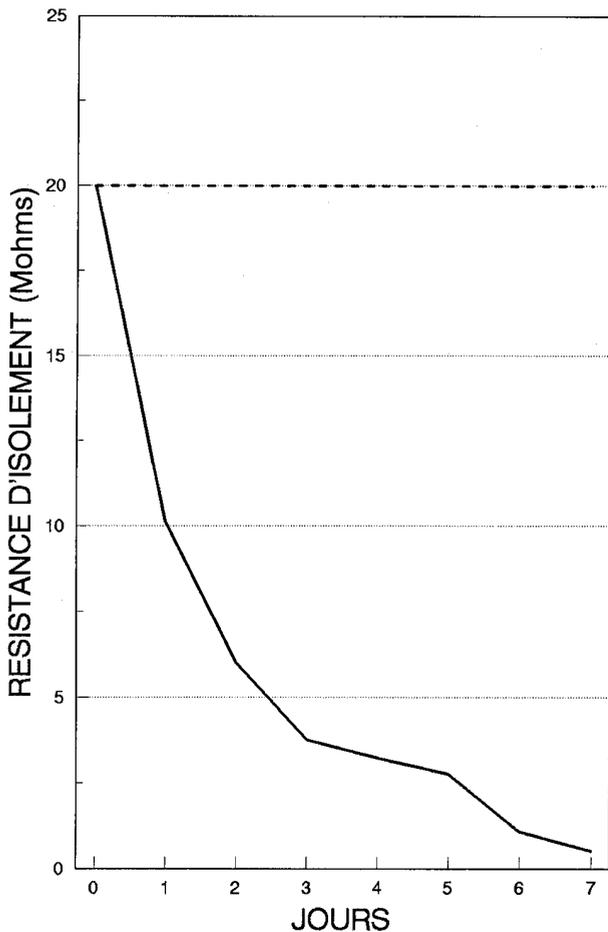


Fig. 5. — Variation moyenne de la résistance d'isolement des jauges en fonction du temps. Trait continu : Rubson seul. Trait pointillé : Vulgavit sur relais et fils + Rubson sur relais, fils et jauge.

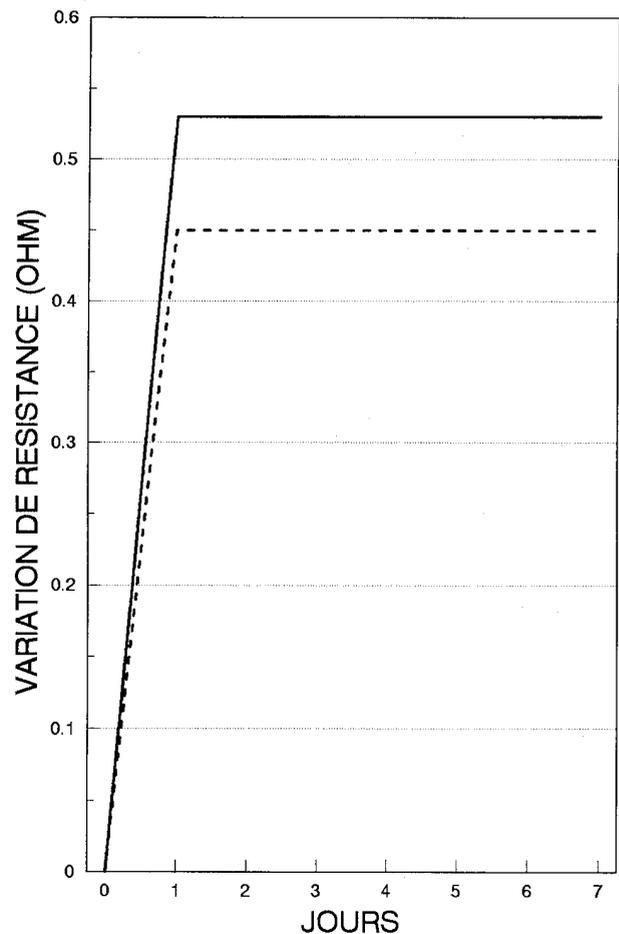


Fig. 6. — Variation moyenne de la résistance des jauges en fonction du temps. Trait continu : Rubson seul. Trait pointillé : Vulgavit sur relais et fils + Rubson sur relais, fils et jauge.

Une chute de résistance de 10000 MOhms à 20 MOhms induit une erreur négligeable de 2,8 microstains dans les mesures. Nous pouvons donc raisonnablement considérer qu'une protection qui réalise une résistance d'isolement de plus de 20 MOhms pendant une semaine est une protection suffisante. Les différentes protections ainsi que les résultats obtenus sont présentées au tableau III.

Des neuf protections simples testées pour la rigidité, seuls la résine époxy Araldite et le polyuréthane Vulgavit produisent une rigidification de la jauge. Malheureusement, ces deux protections sont également les seules à fournir une résistance d'isolement supérieure à 20 MOhms pendant une période d'au moins une semaine.

Pour concilier rigidité et bon isolement électrique, nous avons expérimenté deux protections mixtes. Ces deux protections donnent des résultats concluants quant à la rigidité et l'isolement électrique. Cependant nous avons pu observer un meilleur accrochage du mastic polyuréthane à l'os, par rapport au silicone Rubber.

Notons également une augmentation de la résistance de la jauge de 0,4 à 0,6 Ohm pendant les premières 24 heures. Cette variation de résistance des jauges avait déjà été observée lors de l'utilisation d'une seule protection.

CONCLUSION

Finalement, un procédé permettant d'obtenir des mesures correctes après 24 heures et assurant une résistance d'isolement supérieure à 20 MOhms pendant au moins une semaine peut être réalisé de la manière suivante :

1. Gratter les tissus mous (périoste) à l'aide d'une curette.
2. Minimum 5 cycles de polissage à sec (minimum 5 secondes) au papier abrasif 320 suivi d'un dégraissage à l'éther.
3. Neutraliser avec du M-prep Neutralizer 5 (M-M)
4. Adhésif Cyanolit (méthyl-2-cyanoacrylate)
5. Protection réalisée par une première couche de polyuréthane Vulgavit® sur le relais et les fils électriques de sortie de la jauge, suivie d'une seconde couche de mastic polyuréthane Rubson® recouvrant la première couche et la jauge.

Remerciements

Nous remercions Messieurs J.-C. Van Pachtenbeke et R. Ghislain pour l'aide technique qu'ils ont apportée à la réalisation de ce travail.

RÉFÉRENCES

1. AVRIL J. Encyclopédie Vishay d'analyse des contraintes. *Vishay-micromesures*, 1978, 169-303.
2. BOURGOIS R., BURNY F., LORINI G., HERMANNE A. Problèmes posés par l'utilisation des jauges de contraintes in vivo. *Acta Orthop. Belg.*, 1976, *Suppl. I*, 47-51.
3. CALER W., CARTER D., HARRIS W. Techniques for implementing an in-vivo bone strain gage system. *J. Biomech.*, 1981, *14*, 503-507.
4. DE GEETER J. L. *Contribution à l'étude d'un système de mesure des déformations d'un fémur humain en sollicitation dynamique*. Mémoire d'Ingénieur civil mécanicien, Louvain-la-Neuve, 1986.
5. HOFFMANN J. Practical hints for the application of strain gauges. *Hottinger Baldwin Messtechnik*, 1984, 17.
6. LANYON L. The measurement of bone strain in vivo. *Acta Orthop. Belg.*, 1976, *Suppl. I*, 98-108.
7. PRATT D., BOWKER P., WARLAW D., McLAUGHAN J. Load measurement in orthopedics using strain gauges. *J. Biomed. Eng.*, 1979, *1*, 287-296.
8. WRIGHT T., HAYES W. Strain gauge application on compact bone. *J. Biomech.*, 1979, *12*, 471-475.

E. MUNTING

Laboratoire d'Orthopédie
Tour Pasteur 5388
av. Mounier, 53
1200 Bruxelles (Belgique)