

Cimentoplastie préventive des fractures du poignet ostéoporotique : bases expérimentales

Cimentoplasty to prevent osteoporotic distal radius fracture : experimental study

P Liverneaux¹, C Taleb¹, C Noirfalisse², G Poumarat²

1. SOS main, CCOM, Hôpitaux Universitaires de Strasbourg, Illkirch, France

2. Laboratoire de Biomécanique Anatomie de l'ERIM EA 3295, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France

Mots clés

- ◆ Substitut osseux
- ◆ résistance mécanique
- ◆ ostéoporose
- ◆ radius
- ◆ ciment phosphocalcique

Résumé

Le but de ce travail était de rechercher une possible modification, après injection de ciment phosphocalcique, de la résistance mécanique du radius distal lors des fractures habituellement rencontrées chez les patients ostéoporotiques.

Nous avons reproduit une fracture de Colles sur deux sujets anatomiques. Un seul poignet par cadavre a été injecté par le ciment phosphocalcique Cementek LV®. De cette façon, nous avons comparé la résistance mécanique d'un poignet injecté et celle d'un poignet non injecté.

Cette étude montre qu'une injection de ciment phosphocalcique pour remplacer l'os trabéculaire du radius distal est mécaniquement capable de diminuer l'incidence des fractures chez les patients ostéoporotiques, à condition que le ciment remplisse complètement la cavité osseuse.

Cette étude, certes limitée, nous permet néanmoins de montrer que le ciment possède une résistance mécanique à la compression meilleure que celle de l'os trabéculaire. Il n'est pas interdit d'imaginer qu'il sera possible dans l'avenir de prévenir les fractures des patients ostéoporotiques en injectant du ciment phosphocalcique dans les zones de fragilité mécanique.

Keywords

- ◆ Bone substitute
- ◆ Mechanical resistance
- ◆ Osteoporosis
- ◆ Radius
- ◆ Calcium phosphate cement

Abstract

The purpose of this work was to determine a possible change, after an injection of calcium phosphate cement, in the mechanical resistance of the distal radius in fractures often seen in osteoporotic patients.

We reproduced a Colles' fracture on two anatomical subjects. Only one wrist per cadaver had been injected with calcium phosphate cement Cementek LV®. In this way, we compared the mechanical strength of a wrist injected and a wrist not injected.

This study shows that an injection of calcium phosphate cement to replace the trabecular bone in the radius is mechanically interesting in preventing fractures in osteoporotic patients if the cement completely fills the bone cavity.

The confined study allows us to show that the cement has mechanical resistance in compression much better than those found in the trabecular bone.

En dix ans, l'ostéoporose est passée progressivement d'un domaine très limité à un sujet de préoccupation majeure pour un nombre croissant de chercheurs et de cliniciens. Des études épidémiologiques récentes ont montré que 30% des femmes américaines âgées de plus de 50 ans et que 70% de celles âgées de plus de 80 ans étaient atteintes d'ostéoporose (1). En France, l'incidence de cette affection est sensiblement similaire : environ 30% des femmes ménopausées et plus de 50% des femmes de plus de 75 ans (2). C'est ainsi que l'ostéoporose représente un enjeu majeur de santé publique. Actuel-

lement, le traitement médicamenteux reste la seule thérapeutique générale utilisée pour limiter les complications de cette maladie, bien que certains effets secondaires tels que le risque carcinogène du traitement hormonal substitutif ne soient pas maîtrisés.

Un traitement chirurgical localisé, visant à améliorer la résistance mécanique des zones à risque fracturaire, comme le radius distal, serait une alternative ou plutôt un traitement complémentaire utile. Ce procédé est déjà couramment utilisé dans d'autres sites fracturaires ou préfracturaires, par

Correspondance :

Professeur Philippe Liverneaux, SOS main, CCOM, Hôpitaux Universitaires de Strasbourg
10, avenue A. Baumann, B. P. N° 80096, Illkirch, F - 67403, France

Email : philippe.liverneaux@chru-strasbourg.fr

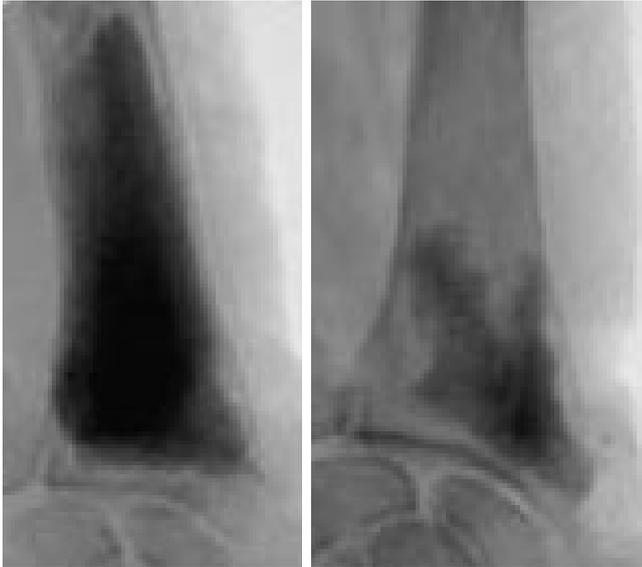


Figure 1 - Radiographie de face du radius distal après injection percutanée de ciment phosphocalcique radio-opaque.
1a - Sujet 1 : injection après création d'une cavité à l'aide d'une broche courbée ; la répartition du ciment est homogène.
1b - Sujet 2 : injection sans création de cavité ; la répartition du ciment est inhomogène.

exemple l'injection percutanée de substitut osseux dans les tassements vertébraux ostéoporotiques, permettant l'augmentation de la stabilité du foyer de fracture et la diminution des douleurs (3, 4). D'autres ont également testé cette technique dans le traitement des fractures fémorales (5).

Le but de ce travail était de démontrer que l'injection de ciment phosphocalcique dans le radius distal augmente sa résistance mécanique. Le modèle expérimental choisi était la fracture du radius distal, parce que c'est la première à apparaître chez les patients ostéoporotiques.

Matériel et méthodes

Le premier temps a consisté à préparer quatre poignets issus de deux sujets anatomiques conservés avec un os particulièrement porotique.

Le deuxième temps a consisté à injecter un ciment phosphocalcique dans un radius distal par sujet anatomique. Sous fluoroscopie (fluoroscope GE-EOC 7700), un orifice percutané a été créé à travers la pointe de la styloïde radiale, en utilisant un trocart, jusqu'à entrer en contact avec la corticale médiale du radius sans la franchir. Dans le cas du sujet 1, une broche conformée en « S » a ensuite été introduite dans l'orifice, puis poussée dans le radius distal, et mobilisée dans les trois plans de l'espace pour effondrer l'os spongieux afin d'obtenir une cavité homogène. Dans le cas des sujets 1 et 2, une dose de ciment phosphocalcique Cementek LV® (Teknimed™, Vic en Bigorre, France) a été injectée dans la cavité obtenue à l'aide d'une seringue dont le trocart pénètre l'orifice (fig. 1).

Le troisième temps a consisté à reproduire une fracture du radius distal sur chacun des quatre poignets. Le talon de la main a été immobilisé de façon à ce que le scaphoïde et le lunatum viennent s'appliquer directement sur le radius. Les tests de compression mécanique ont été réalisés avec une



Figure 2 - Capteur de force en place sur un poignet.

machine spécifique (Hounsfield H10KM) qui a permis d'appliquer une force le long de l'axe du radius. Le plan de la machine, sur lequel reposait le talon de la main, comportait un plan de force (Kistler instrument AG 9286A, Winterthur, Suisse). Un capteur de force articulaire (Flexiforce®) a été introduit en regard de la crête séparant la surface lunarienne de la surface scaphoïdienne pour mesurer la pression exercée sur chacun des radius (fig. 2). Le déplacement et la force appliquée par les cellules de force, les trois forces et les trois moments développés par la plateforme étaient enregistrés par un logiciel Matlab (*The Language of technical computing*, version 6.5.1).

Les tests mécaniques ont consisté en l'application de forces de compression et de forces de flexion. Les forces de compression avaient pour but de provoquer une fracture du radius distal, alors que le spectre des forces de flexion ne devait pas dépasser le seuil de rupture. Nous avons réalisé deux expériences : d'abord une compression-flexion au-dessous du seuil fracturaire, ensuite une compression isolée au-dessus du seuil fracturaire. Le maximum des forces appliquées sur le radius a été défini comme le maximum des moments atteint le long de l'axe longitudinal X.

Des images radiographiques des quatre radius distaux ont été

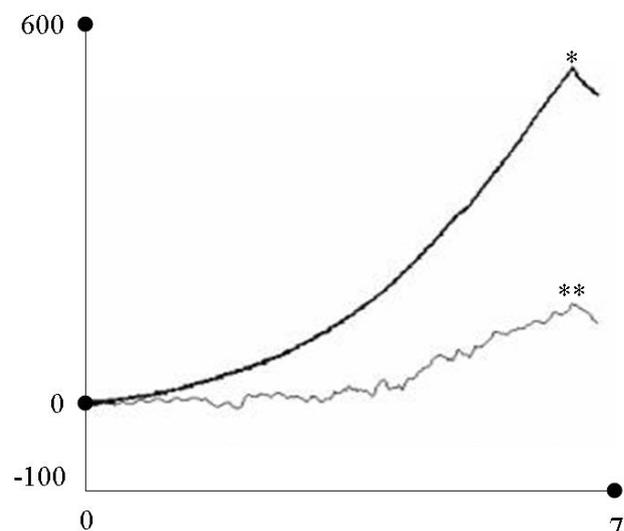
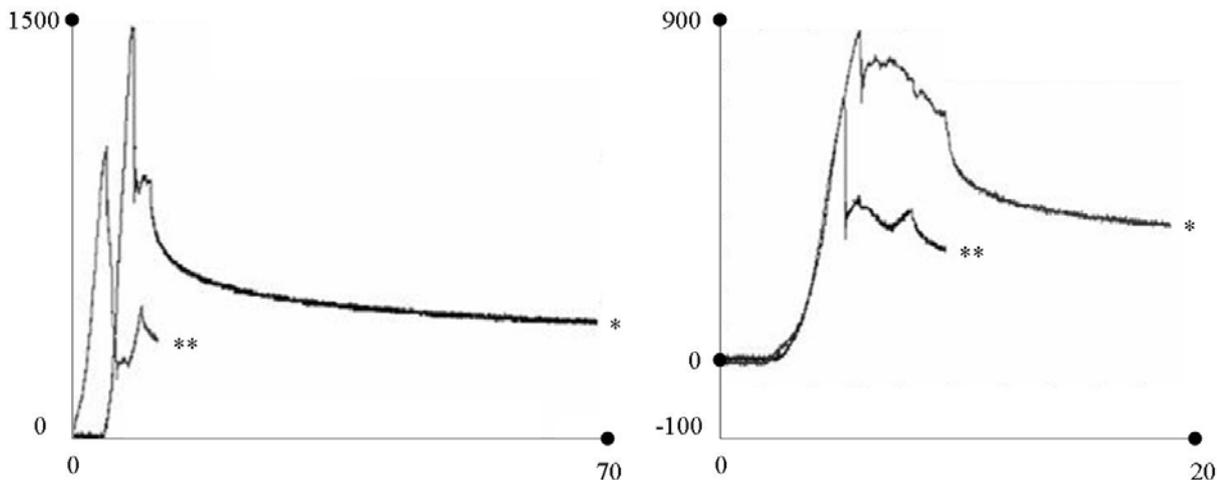


Figure 3 - Mesure des forces appliquées en fonction du temps. En abscisse le temps en millisecondes ; en ordonnée la force en Newton.

* force appliquée par la machine de test ;

** force enregistrée par le capteur de force



* côté non injecté
 ** côté injecté
 Figure 4 - Mesure des forces enregistrées par le capteur de force en fonction du temps. En abscisse le temps en secondes ; en ordonnée la force en Newton.
 4a - Sujet 1 - 4b - Sujet 2



Figure 5 - Radiographie de face du radius distal après test mécanique de rupture chez le sujet 1.
 5a - Côté injecté ; à noter l'absence de fracture au dessus du ciment
 5b - Côté non injecté ; à noter que la fracture siège au même niveau que le côté non injecté.

Figure 6 - Théorie des rayons appliquée au radius représenté schématiquement par l'axe AB. La zone hachurée représente le sol, point de contact de la paume de la main avec la machine de test. La force de cisaillement en un point non spécifique G de l'axe AB est notée T_y , et le moment en un point non spécifique G de l'axe AB est noté M_x .

réalisées avant injection de ciment, après injection de ciment et après fracture. Elles ont permis de mesurer la variance ulnaire, d'apprécier la répartition du ciment injecté, et d'étudier les traits de fracture.

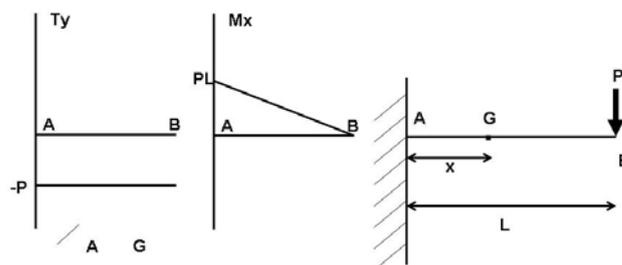
Résultats

Au cours des tests de compression-flexion au-dessus du seuil fracturaire, le pourcentage des forces transmises du carpe au radius variait de 10 à 40% (fig. 3).

Au cours des tests de compression isolée au-dessus du seuil fracturaire, il existait une différence significative entre les forces maximales appliquées le long de l'axe de chacun des quatre poignets (fig. 4). La moyenne de charge était de 1014 N.

On notait une élévation de l'indicateur du moment M_x au cours des tests de compression.

Les radiographies des quatre poignets ont montré une fracture associée du radius distal et de l'ulna (fig. 5).



Discussion

Une force appliquée perpendiculairement à l'axe du radius provoque une fracture du radius distal. La force de torsion est constante le long du radius et le moment de cette force augmente linéairement de zéro à un maximum qui est atteint au niveau du radius distal. Selon Lewis, ce serait ce moment maximal qui déterminerait le lieu exact de la fracture du radius (6).

En effet, en considérant le radius comme un rayon s'intégrant dans le plan horizontal et en application de la théorie des

rayons (fig. 6), le couple des forces internes d'un point non spécifique G du segment AB est donné par :

$$\{\tau_G\} = \vec{R} \{\tau_G\} = -P \vec{j}$$

$$\vec{M}(\tau_G, G) = \vec{GB} \wedge -P \vec{j} = P(L-x)\vec{i}$$

La force de cisaillement Ty reste constante le long du rayon, et n'intervient donc pas dans la détermination du site fracturaire. C'est le moment Mx, maximum en A, qui détermine le site fracturaire au niveau du poignet. Dans nos résultats, nous avons effectivement observé une élévation de l'indicateur du moment Mx.

Bien que Lewis prône l'application d'une force perpendiculaire à l'axe du radius, nous avons préféré appliquer une force le long de cet axe pour nous assurer de la bonne transmission des forces de compression au radius distal. Dans ce cas, il apparaissait pertinent de mesurer les moments des forces appliquées au niveau de la main, en particulier le moment Mx. C'est pourquoi les poignets ont été placés en position d'hyperextension à 90° (6-8), pour éviter tout phénomène de torsion susceptible de perturber la transmission des forces, déjà optimisée par la courbure naturelle du radius et la répartition de ses insertions musculaires (9).

Dans notre étude, les forces mesurées par les capteurs de force articulaires étaient plus basses que les forces appliquées par la machine de test. En fait, les capteurs de force mesuraient une force en regard de toute leur surface sensible. Mais comme les surfaces articulaires sont complexes, il est peu probable que la surface sensible des capteurs ait été parfaitement appliquée sur la surface articulaire. De plus, la surface sensible des capteurs de force (0,78 cm²) était nettement inférieure à celle de la surface articulaire du radius distal. Enfin, les capteurs de force n'étaient pas nécessairement placés exactement au même endroit d'un poignet à l'autre. Malgré ces limites, cette méthode reste un puissant outil, utilisée par de nombreux auteurs, dont certains ont montré que 82% des forces croisant le carpe étaient transmises au radius (10).

D'un autre côté, la transmission des forces des os du carpe au radius mesurées dans notre étude était excellente. Nous avons obtenu une moyenne de charge de 1014 N contre une moyenne de 1240 N pour Pistoria sur 54 bras embaumés (11). Cette différence peut s'expliquer par notre choix d'utiliser des sujets ostéoporotiques.

La fracture apparaissait en premier sur le radius et en second sur l'ulna. Deux raisons semblent le corroborer. La première est que le radius emmagasinait 80% de la force contre 20% pour l'ulna. La seconde est que si l'ulna se fracturait en premier, les traits de fracture obtenus auraient été identiques avec ou sans injection de ciment, ce qui n'est pas le cas.

Les forces et les moments enregistrés étaient sensiblement différents. Nous nous attendions à une amélioration systématique des propriétés mécaniques du radius distal par l'injection de ciment, mais ce n'était pas toujours le cas. La qualité de l'injection était probablement le facteur déterminant de la réponse biomécanique. En effet, lorsque le ciment remplissait entièrement le radius distal lorsqu'une cavité avait été créée (sujet 1), la force maximale était plus élevée que celle d'un poignet non injecté. Nous obtenions l'effet inverse lorsque le poignet n'était pas complètement injecté, parce qu'aucune cavité n'avait été créée (sujet 2). Le radius distal doit donc être entièrement rempli pour assurer la meilleure résistance mécanique possible.

Dans la littérature, nous avons trouvé quelques cas dans lesquels était prouvé que l'injection de ciment était bénéfique dans la prise en charge de l'ostéoporose. Par exemple, l'injection de ciment phosphocalcique dans la cavité médullaire fémorale de rats ostéoporotiques augmente la résistance mécanique de l'os (5). Il a également été prouvé que la vertébroplastie par ciment phosphocalcique dans le traitement des

tassements vertébraux ostéoporotiques était efficace (12).

Les résultats que nous avons obtenus tendent à montrer que l'injection de ciment phosphocalcique remplissant complètement le radius distal augmentait la résistance mécanique du radius distal et serait donc intéressante pour prévenir ses fractures. En revanche, si le ciment ne remplit pas entièrement le radius distal, en laissant des zones non remplies parce qu'aucune cavité n'a été créée, il en résulterait des zones de faiblesse propices aux fractures. Il est nécessaire de mettre au point une procédure chirurgicale fiable permettant d'obtenir un remplissage maximum de ciment sans perforation de la corticale osseuse. Il est peut-être possible de s'inspirer de la kyphoplastie, technique mini-invasive fiable pour stabiliser des tassements vertébraux ostéoporotiques ; elle consiste à gonfler un ballonnet dans le corps vertébral créant ainsi une cavité qui sera remplie secondairement de ciment sous pression (13).

Conclusion

Nous pensons avoir démontré par cette étude biomécanique que l'injection homogène de ciment phosphocalcique dans le radius distal des patients ostéoporotiques pouvait augmenter sa résistance mécanique. Cette cimentoplastie chirurgicale pourrait être utilisée dans l'avenir en complément de la prévention primaire médicale des fractures des patients ostéoporotiques.

Références

1. Consensus development conference. Diagnosis, prophylaxis and treatment of osteoporosis. American Journal of Medicine 1993;94:646-50.
2. Breart G, Cormier C, Le Gales C, de Vernejoule MC, Dupuy C. L'ostéoporose, ou comment prévenir une maladie du vieillissement - Fondation pour la recherche médicale 2000 www.frm.org .
3. Cortet B, Cotten A, Boutry N, Flipo RM, Duquesnoy B, Chastanet P, Delcambre B. Percutaneous vertebroplasty in the treatment of osteoporotic vertebral compression fractures : on open prospective study. J Rheumatol 1999;26:2222-8.
4. Mehdod A, Aunoble S, Le Huec JC. Vertebroplasty for osteoporotic spine fracture: prevention and treatment. Eur Spine J 2003;12:155-62.
5. Tanaka A, Ishii Y. Mechanical properties of the femur after injection of calcium phosphate cement containing arbekacin sulfate and polylactic acid in a rat model of experimental osteoporosis. J Ortho Science 2002;7:370-8.
6. Lewis RM. Colles's fracture : causative mechanism. Surgery 1950; 27:427-35.
7. Castaing J et Le Club des Dix. Les fractures récentes de l'extrémité inférieure du radius chez l'adulte. Rev Chir Orthop 1964;50:581-696.
8. Kapandji IA. Physiologie articulaire du membre supérieur cinquième édition. Paris: Maloine; 2001: 138-70.
9. Bonnel F. Os cortical et os trabéculaire : un point de vue mécanique finaliste (de l'anatomie microscopique à la microscopie). Paris: Masson; 1993: 1-13.
10. Allieu Y. Fractures du radius distal de l'adulte : mécanismes et classifications des fractures du radius distal. Cahiers d'enseignement de la SOFCOT 1998 pp 28-48.
11. Pistoia W, Van Rietbergen B, Lochmuller EM, Lill CA, Eckstein F, Rueggsegger P. Estimation of distal radius failure load with micro-finite element analysis models based on three-dimensional peripheral quantitative computed tomography images. Bone 2002;30:842-8.
12. Matsuyama Y, Goto M, Yoshihara H, Tsuji T, Sakai Y, Nakamura H, Sato K, Kamiya M, Ishiguro N. Vertebral reconstruction with biodegradable calcium phosphate cement in the treatment of osteoporotic vertebral compression fracture using instrumentation. J Spinal Disord Tech 2004;17:291-6.
13. Hillmeier J, Grafe I, Da Fonseca K, Meeder PJ, Noldge G, Libicher M, Kock HJ, Haag M, Kasperk C. The evaluation of balloonkyphoplasty for osteoporotic vertebral fractures : an interdisciplinary concept. Orthopade 2004;33:893-904.

Discussion

M. Germain

Trois questions ponctuelles :

- Quelle est la température de polymérisation du substrat osseux ?

R : Il ne s'agit pas de polymérisation mais de cristallisation non-exothermique. La réaction chimique ne dégage aucune chaleur.

- Y a-t-il un risque d'embolie graisseuse chez un sujet vivant ?

R : Non pour la même raison que la question 1, car le cristal reste sur place.

- Quel serait le coût de ce traitement sachant qu'il y aurait une anesthésie chez le patient ?

R : Environ 150 euros pour l'acte chirurgical. Une anesthésie locale est théoriquement possible.

M. Premont

La prévention de la fracture de Pouteau Colles ne peut que passionner un vieux chirurgien généraliste dont ce fut naguère une occupation très fréquente. Je voudrais vous poser quelques questions :

- Que penser des traitements médicaux, très répandus maintenant, en prévention de l'ostéoporose ?

R : Je pense que ces traitements sont efficaces à long terme. Certains, comme le traitement hormonal substitutif, ne sont pas sans danger, notamment de cancer du sein. Il est capital de débiter ces traitements dès le début de la ménopause, car après 80 ans c'est trop tard.

- Parmi les ciments proposés, que pensez-vous du corail ?

R : Le corail expose à des réactions immunologiques et infectieuses. Il n'est plus guère utilisé actuellement.

- Cette prévention pourrait-elle s'appliquer aux cols du fémur ?

R : Pas dans la forme actuelle, car le ciment phosphocalcique augmente la résistance à la compression, mais pas à la flexion. Or, c'est cette dernière qui est prépondérante dans les fractures du col du fémur. Ce serait plus logique dans les fractures des vertèbres.

Y. Chapuis

Je souhaite sortir du domaine de l'orthopédie que vous avez remarquablement illustré pour vous poser la question suivante : avez-vous recherché systématiquement chez ces femmes ostéoporotiques une hyperparathyroïdie, enquête justifiée par la notion que l'épidémiologie montre après 60 ans une fréquence d'HPTI de 2 à 3 pour 1000 ?

R : Hélas, non.

J.D. Picard

Accessoirement, je relève un lapsus pour la découverte des Rayons X par Röntgen n'est pas 1887 mais 1895. (**R** : Désolé *mea culpa*). En renforçant la solidité préventive du radius, n'augmente-t-on pas le risque de fracture de l'extrémité supérieure de l'humérus puisque l'ostéoporose est hélas diffuse.

R : Logiquement non, car il ne s'agit pas du même mécanisme.

Y. Laburthe Tolra

La glène radiale a normalement une antéversion. Celle-ci heurte le sol au cours des chutes en hyper-extension. Il faut rétablir cette antéversion au cours de la réduction et la maintenir ensuite. Lorsque vous traiterez les fracturés de cette région par la cimentoplastie, pensez-vous en post-thérapeutique à protéger la zone comblée par une attelle ?

R : Je pense que la cimentoplastie n'est pas du tout efficace en cas de fracture avérée. Elle ne serait efficace qu'en préventif.

P. Vichard

Il semble y avoir deux utilisations des ciments phosphocalciques :

- la première pour combler les cavités soit lors des traitements orthopédiques (utilisation la plus ancienne, antérieure à Kopylov) ;

- la deuxième dans un but prophylactique tel que vous l'envisagez.

À ce sujet, ne pensez-vous pas que les risques opératoires sont excessifs par rapport au bénéfice qui n'est pas prouvé, a fortiori pas garanti ?

R : Toutes les thérapeutiques ont des effets secondaires. Ne citons qu'un exemple : les anticoagulants. La cimentoplastie préventive n'échappera pas à cette règle. Mais combien de fractures éviterons-nous par rapport aux complications ?