

# 98

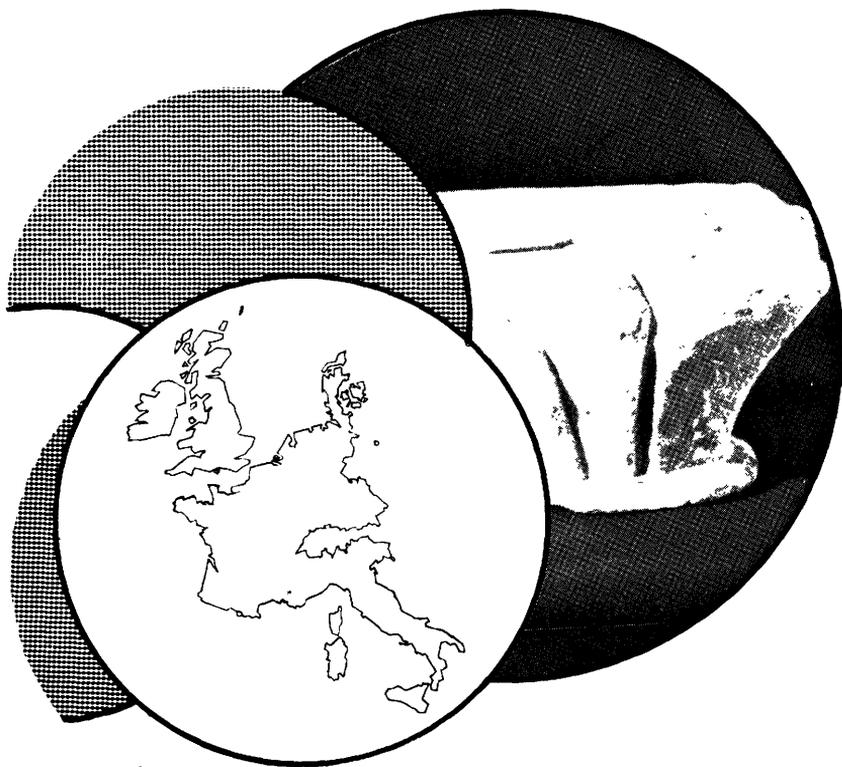
COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES

CAHIER D'INFORMATION DU BUREAU

## EURISOTOP

Série :

Monographies - 38



**APPLICATIONS  
DES TECHNIQUES NUCLEAIRES  
A LA CONSERVATION  
DES ŒUVRES D'ART**

R. Cornuet  
R. Ramiere  
C. de Tassigny

MAI 1975

## AVERTISSEMENT

La Commission des Communautés européennes, ou toute personne agissant en son nom, décline toute responsabilité quant au caractère complet des informations contenues dans ce « Cahier d'information » et quant aux dommages qui pourraient résulter de l'utilisation d'informations, d'équipements, de méthodes ou de procédés qui y sont présentés.

**APPLICATIONS  
DES TECHNIQUES NUCLEAIRES  
A LA CONSERVATION DES ŒUVRES D'ART**

R. CORNUET,\* R. RAMIERE,\*\* C. de TASSIGNY\*\*

- \* *Chef du service d'Applications des radioéléments et rayonnements  
Commissariat à l'Energie Atomique – France*
- \*\* *Ingénieur au projet «Nucléart» –  
Centre d'études nucléaires de Grenoble – France*

## AVANT-PROPOS

La technique est l'un des facteurs essentiels de l'évolution de notre environnement. Des acquis, procédés de production et produits nouveaux en sont le fruit.

Devant cette importance primordiale de la technique, on oublie souvent qu'elle peut aussi nous permettre de sauvegarder notre environnement.

Le profane songe encore moins au fait qu'une des techniques les plus révolutionnaires, la technique nucléaire, est en mesure de contribuer au maintien de notre patrimoine culturel, élément le plus subtil et le plus précieux du milieu dans lequel nous vivons.

Le présent cahier met en évidence les services que la technique nucléaire peut rendre à la conservation des oeuvres de nos artistes, artisans, architectes et écrivains. Les méthodes décrites sont nouvelles et encore peu employées.

Puisse cette brochure inciter les instances chargées de la préservation de notre patrimoine culturel à recourir de plus en plus à ces méthodes.

G. Pröpstl

Chef du Bureau EURISOTOP

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE I - TECHNIQUES TRADITIONNELLES</u> <u>DE CONSERVATION</u>	8
<u>I - TRAITEMENT DU PAPIER CONTRE LES</u> <u>MICROORGANISMES ET LES INSECTES</u>	9
I-1. <u>Introduction</u>	9
I-2. <u>Méthodes de traitement</u>	9
I-2.1. le formol	9
I-2.2. l'oxyde d'éthylène	10
I-2.3. courant à haute fréquence	11
<u>II - TRAITEMENT DE CONSOLIDATION DE LA PIERRE</u>	12
II-1. <u>Causes d'altérations</u>	12
II-1.1. rôle des agents extérieurs	13
II-1.1.1. - mécanisme physique	13
II-1.1.2. - mécanisme chimique ou physico-chimique	13
II-1.1.3. - mécanisme biologique	13
II-1.2. défauts naturels de la pierre	13
II-1.3. mauvaise utilisation du matériau	13
II-1.4. mise en oeuvre défectueuse	14

	<u>Page</u>
II-2. <u>Traitement de la pierre</u>	14
II-2.1. la cire	15
II-2.2. imprégnation d'une résine synthétique	15
II-2.2.1. - l'acétate de polyvinyle	16
II-2.2.2. - les polyméthacrylates	16
II-2.2.2.1. polyméthacrylate de méthyle	16
II-2.2.2.2. paraloid B.72	17
II-2.2.2.3. polyméthacrylate de butyle	17
II-2.2.3. - résines époxy	17
II-2.2.3.1. DOMASLOWSKY	17
II-2.2.3.2. HEMPEL	17
II-2.2.3.3. GAURI	17
II-2.2.4. - résines siliconées	18
II-2.3. consolidation à caractère minéral	18
II-2.3.1. - les silicates	18
II-2.3.1.1. silicates d'éthyle	18
II-2.3.1.2. fluorosilicate de magnésium et silicate neutre de sodium	18
II-2.3.2. - hydroxyde de barium - urée	18
III - <u>CONSERVATION DES BOIS</u>	20
III-1. <u>Désinfection des bois</u>	20
III-2. <u>Consolidation des bois</u>	21
III-2.1. critères à respecter	21
III-2.2. matériaux consolidants	22
III-2.2.1. - matériaux anciens	22
III-2.2.2. - matériaux synthétiques	22
III-2.2.2.1. cires synthétiques	22
III-2.2.2.2. résines synthétiques dissoutes dans un solvant	23

	<u>Page</u>
III-2.2.2.3. résines synthétiques sans solvant	24
IV - <u>CONSERVATION DES BOIS GORGES D'EAU</u>	26
IV-1. <u>Définition et propriétés des bois gorgés d'eau</u>	26
IV-1.1. témoins irremplaçables	26
IV-1.2. comportement à l'air	26
IV-1.3. processus de dégradation	30
IV-1.4. composition des bois gorgés d'eau	30
IV-2. <u>Traitements de conservation des bois gorgés d'eau</u>	31
IV-2.1. choix de la méthode de conservation	31
IV-2.2. méthodes de traitement	32
IV-2.2.1. - deshydratation sous vide	33
IV-2.2.1.1. ROSENQVIST - ORGAN	33
IV-2.2.1.2. BRORSON - CHRISTENSEN	33
IV-2.2.1.3. AMBROSE	33
IV-2.2.1.4. procédé à l'alcool-éther-résine	33
IV-2.2.2. - méthode électrocinétique	33
IV-2.2.3. - consolidation à caractère minéral	33
IV-2.2.3.1. méthode à l'alun	34
IV-2.2.3.2. méthode GARROUSTE-BOUIS	34
IV-2.2.4. - méthode au polyéthylène glycol	34
IV-2.2.4.1. MOREN - ORGAN	35
IV-2.2.4.2. LEFEVE	35
IV-2.2.4.3. ALBRIGHT	35
IV-2.2.4.4. SEABORG - INVERARITY	35
IV-2.2.5. - méthode à l'arigal C	36
IV-2.2.6. - méthode au polyméthacrylate de butyle	36

	<u>Page</u>
<u>CHAPITRE II - POSSIBILITES DU RAYONNEMENT</u>	37
<u>GAMMA</u>	
<u>I - DESINFECTION PAR RAYONNEMENT GAMMA</u>	38
I-1. <u>Introduction</u>	38
I-2. <u>Processus de dégradation</u>	38
I-3. <u>Courbe de survie</u>	38
I-4. <u>Principaux facteurs intervenant dans la radiosensibilité des microorganismes</u>	40
I-4.1. atmosphère gazeuse	40
I-4.2. taux d'humidité	40
I-4.3. débit de dose	40
I-4.4. fractionnement de la dose	40
I-4.5. température	40
I-5. <u>Avantages et inconvénients de la stérilisation par rayonnement gamma</u>	42
<u>II - POLYMERISATION DE MONOMERES ET RESINES PAR RAYONNEMENT GAMMA</u>	43
II-1. <u>Solubilité des polymères</u>	43
II-1.1. les thermoplastiques	43
II-1.2. les thermodurcissables	43
II-2. <u>Réaction exothermique</u>	44
II-3. <u>Polymérisation dans un matériau poreux</u>	46

	<u>Page</u>
<u>CHAPITRE III - UTILISATION DU RAYONNEMENT</u> <u>GAMMA POUR LA CONSERVATION</u> <u>DES OBJETS D'ART</u>	47
I - <u>INTRODUCTION</u>	48
II - <u>DESINFECTION PAR RAYONNEMENT GAMMA</u>	48
II-1. <u>Désinfection des papiers</u>	48
II-1.1. altération de la cellulose	48
II-1.2. étude du papier "moderne" irradié	49
II-1.3. étude de l'utilisation de l'irradiation pour la désinfection des papiers	49
II-2. <u>Désinfection des bois</u>	52
II-2.1. action du rayonnement $\gamma$ sur le papier	52
II-2.2. action du rayonnement $\gamma$ sur certains revêtements du bois	53
II-2.3. remarques sur la désinsectisation	54
II-2.4. applications à la désinfection d'objets anciens	54
II-3. <u>Avantages du rayonnement gamma pour             la désinfection</u>	55
III - <u>TRAITEMENT DE LA PIERRE PAR RAYONNEMENT</u> <u>GAMMA</u>	56
III-1. <u>Introduction</u>	56
III-2. <u>Les phases du traitement</u>	57
III-2.1. l'imprégnation	57
III-2.1.1. - mise sous vide	57
III-2.1.2. - introduction de la résine	57
III-2.1.3. - mise en pression	57
III-2.1.4. - sortie de l'objet imprégné	58
III-2.2. durcissement de la résine	58

	<u>Page</u>
III-3. <u>Contrôles effectués</u>	59
III-3.1. première série	60
III-3.1.1. - porosité	60
III-3.1.2. - porométrie	60
III-3.1.3. - remontée capillaire	60
III-3.2. deuxième série	62
III-3.2.1. - résistance à la traction par flexion	62
III-3.2.2. - résistance à la compression	62
III-3.2.3. - dureté superficielle	62
III-3.2.4. - vitesse du son	62
III-3.2.5. - choc thermique	65
III-3.2.6. - gel - dégel	65
III-3.3. observations complémentaires	67
III-3.3.1. - vieillissements accélérés	67
III-3.3.2. - observation au microscope électronique à balayage	69
III-4. <u>Conclusion</u>	69
IV - <u>CONSOLIDATION DES BOIS SECS</u>	72
IV-1. <u>Introduction</u>	72
IV-2. <u>Les phases du traitement</u>	73
IV-2.1. imprégnation	73
IV-2.2. irradiation	75
IV-2.3. une installation de traitement	77
IV-3. <u>Application au traitement de bois anciens</u>	79
IV-3.1. durcissement d'un bois sain ancien	79
IV-3.2. consolidation par le méthacrylate de méthyle de bois anciens altérés	79
IV-3.3. consolidation par une résine styrène/polyester de bois secs et anciens	79

	<u>Page</u>
IV-4. <u>Choix du produit d'imprégnation</u>	81
IV-4.1. qualités du monomère ou de la résine	81
IV-4.2. qualités du polymère	83
V - <u>CONSOLIDATION DES BOIS GORGES D'EAU</u>	88
V-1. <u>Possibilités du rayonnement gamma</u>	88
V-2. <u>Procédés de consolidation</u>	89
V-2.1. imprégnation par une émulsion aqueuse	89
V-2.2. imprégnation par échange eau-monomère	90
V-2.3. imprégnation par échange eau-solvant- monomère	90
V-2.3.1. - méthode de MUNNIKENDAM	91
V-2.3.2. - méthode de GUICHEN et MUHLETHALER	91
V-2.3.3. - méthode de NADAILLAC	93
V-2.4. imprégnation par extraction liquide-liquide	95
V-2.4.1. - système ternaire	95
V-2.4.2. - application	97
V-2.4.3. - avantages de la méthode	99
<u>CONCLUSION</u>	99
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	105

INTRODUCTION

---

" Les oeuvres d'art ne sont pas de purs symboles, mais de véritables objets nécessaires à la vie des groupes sociaux ".

Pierre Francastel  
( Peinture et Société )

Le regain d'intérêt que connaît actuellement l'art et qui se manifeste autant par la floraison d'expositions prestigieuses parcourues par des foules denses que par la multiplication des publications : (albums raffinés, monographies, études critiques qui s'épanouissent à la vitrine des libraires ou des kiosques), procède certainement de causes complexes dont l'analyse est délicate.

Le besoin de s'instruire et de comprendre est ainsi probablement aussi important que celui de la recherche du sentiment de plénitude que procure la contemplation d'une oeuvre équilibrée résultant de l'association de la peine de l'homme et du génie de l'artiste.

Il est cependant possible de faire apparaître d'autres motivations, plus profondes, plus fondamentales et par la même, plus permanentes. Ainsi en est-il probablement de ce besoin quasi viscéral de sécurité que l'individu trouve à la fois dans la place qu'il occupe dans la société humaine et dans son identité propre. Serait-il imaginable que des civilisations se développent et survivent dans un constant renouvellement de leur environnement ? Est-il concevable que l'homme puisse assimiler à chaque génération la totalité de l'acquis antérieur pour l'exploiter et le perfectionner en faisant du

même coup table rase, à chaque fois, de tous les témoignages du passé ?

Que serait la condition de l'homme si, à travers la fragilité humaine, la permanence de ses réalisations les plus valables ne lui donnait le sentiment d'appartenir à une communauté qui se survit à elle-même fournissant ainsi la rassurante impression d'une éternité si nécessaire face à la vie éphémère.

Pour élémentaire que soit une telle approche psychologique, on peut cependant constater qu'au fur et à mesure que les progrès de la civilisation technique ont permis de repousser, voire même de faire disparaître, les préoccupations immédiates liées à la survie de l'individu, celui-ci s'est davantage consacré à préserver le passé. Après le pain, l'Art (sinon le souvenir ?) serait-il la chose au monde le plus nécessaire ? Car où commence l'Art ?

" L'Art nous apparaît chose relative, variant dans ses manifestations comme dans ses principes avec les temps et les pays (...) Il n'est pas rare de trouver dans un manuel général, aux premières pages, la description de figurines grossièrement modelées dans l'argile et elles sont presque, à elles seules, le témoignage de la vie artistique de toute une époque -, tandis que, dans le cours du livre, les oeuvres de Michel Ange relègueront dans l'obscurité, des sculpteurs qui, pour être de moindre envergure que ce grand maître, ont cependant créé plus de beauté que les pauvres artisans auxquels l'indigence artistique des premières époques obligeait à faire un sort Art ou simplement technique ? " <sup>(+)</sup> Voilà, en définitive, la grande question; s'il n'est, en effet, pas question ici de tenter de répondre à ces interrogations de toujours et de se perdre dans les méandres d'une complexe et néanmoins partielle définition de l'objet d'art,

---

(+) Pierre DEVAMBEZ in : Histoire de l'Art  
(Encyclopédie de la Pléiade).

il est important d'essayer de situer l'oeuvre que l'on souhaite conserver. Il en est, en effet, des oeuvres d'art comme de ces gisements de minerais dont on annonce à intervalle régulier l'épuisement total.

Une variation, même légère, des cours du métal correspondant oblige à reconsidérer les estimations antérieures et fait apparaître de nouveaux gisements que les nouveaux prix rendent exploitables. De même, la possibilité de conserver dans un musée un nombre limité de pièces, ou l'utilisation d'une méthode de consolidation délicate, donc onéreuse, obligent-elles à faire un choix strict parmi de nombreux objets pour n'en retenir qu'une faible part qui sera exposée ou conservée. L'apparition d'une méthode différente, plus simple, moins chère, permettra par contre, de toute évidence, dans le cadre d'une même enveloppe budgétaire, de traiter beaucoup plus d'objets qui, renforcés, pourront être exposés, stockés, voire déplacés dans des expositions itinérantes. L'incidence d'une méthode de conservation nouvelle même plus rustique que les techniques classiques à condition qu'elle soit moins chère et qu'elle réponde évidemment aux critères stricts relatifs au respect intégral de l'oeuvre traitée - peut être très importante au niveau de la muséographie ou même de l'éthique. Une telle méthode qui permettrait par exemple le renforcement de pièces volumineuses tels que des éléments d'architecture, des statues de pierre ou de bois, ou des objets d'usage courant pourrait permettre de les conserver dans leur cadre habituel même si, dans ces conditions, elles sont soumises aux agents agressifs classiques : pluie, vent, soleil, gel ou même manipulation par les visiteurs !

N'est-il pas plus agréable de contempler les statues de Versailles dans leur site que d'avoir à traverser un parc vide pour retrouver ces oeuvres dans une salle de musée? Le musée vivant, idéal de tout conservateur et qui, en fait, nous environne dans la plupart des villes d'Europe, exige pour être maintenu des procédés de

conservation particuliers, adaptés à des oeuvres souvent de second ordre (ce qui ne signifie en rien "négligeables" !) importantes en nombre et en volume et situées dans un environnement non protégé.

Sans vouloir en rien préjuger l'avenir, il semble que l'intervention des techniques nucléaires dans le domaine de la conservation pourrait permettre de faire un pas vers la solution d'un tel problème en rendant concevable la conservation de masse par des techniques issues directement de procédés industriels. Il est, certes, bien trop tôt pour crier victoire et nous en sommes à la phase initiale de transposition de ces techniques sans recul et sans assurance d'avenir. Il est cependant important de poursuivre la mise au point des méthodes et de les mettre à l'épreuve sur des pièces représentatives afin de confirmer directement les résultats obtenus lors des essais synthétiques de résistance aux agents agressifs et de vieillissement accéléré.

Le principe de base de ces techniques réside dans l'emploi des rayonnements d'origine nucléaire, émis par les isotopes radioactifs au cours du processus de désintégration. Directement dérivées d'études entreprises en vue de créer des matériaux composites nouveaux et en particulier le bois-plastique, c'est à Louis de NADAILLAC que l'on doit l'idée de les appliquer à la consolidation des oeuvres d'art. Dès 1970, les essais préliminaires s'étaient révélés assez convaincants pour qu'il soit possible d'appliquer la méthode d'imprégnation du bois par un monomère, polymérisé ensuite par l'action du rayonnement au traitement du parquet de l'ancien Hôtel de Ville de Grenoble (France), qui devait être transformé en Musée consacré à STENDHAL. Le résultat fut excellent et confirmé par le comportement de ce sol, assuré désormais d'une longue conservation.

La généralisation de la méthode à d'autres éléments, tels que la pierre ou le bois gorgé d'eau, lui ouvre des possibilités d'applications innombrables. Parallèlement, les méthodes classiques resteront probablement destinées aux chefs d'oeuvre dont la valeur impose que l'on ne leur fasse subir que le minimum de traitement nécessaire pour assurer leur conservation, les conditions de cette dernière étant d'ailleurs telles que les risques d'altérations sont normalement très faibles.

Le rayonnement  $\gamma$  peut aussi être utilisé pour ses propriétés germicides afin d'obtenir, par simple irradiation de l'objet, la suppression des insectes et organismes divers qui contribuent à sa destruction.

Aux possibilités, déjà très vastes, ouvertes aux techniques nucléaires dans le domaine de la conservation, Louis de NADAILLAC avait voulu, dès l'abord, adjoindre celles d'une spécialité différente : l'étude des oeuvres d'art. Il postulait, en effet, que les moyens mis en oeuvre pour la recherche nucléaire, qui exige des appareillages extrêmement variés aux performances souvent exceptionnelles, devraient pouvoir être utilisés de façon marginale pour résoudre les problèmes difficiles rencontrés dans l'étude des objets les plus variés. Ainsi les numismates pourraient ils par exemple faire appel à l'analyse par radioactivation pour acquérir, de manière non destructive, une meilleure connaissance de la composition globale de pièces de monnaie anciennes. Les techniques les plus récentes de détection par thermoluminescence ou par émission exoélectronique pourraient compléter la méthode plus classique et plus répandue (bien que nucléaire également !) du Carbone 14.

Dans un domaine apparemment plus éloigné, l'emploi d'un magnéto-  
mètre de très grande sensibilité, mis au point dans un laboratoire  
du Commissariat à l'Energie Atomique, a permis la prospection  
systématique rationnelle et l'exploitation de sites archéologiques que  
des travaux routiers vouaient à la destruction à court terme.

L'énumération des possibilités latentes serait ici trop longue et  
fastidieuse; il suffit que le contact entre les chercheurs disposant  
de méthodes et de matériels performants soit établi avec les  
spécialistes de l'art. Le reste n'est plus qu'une question de bonne  
volonté et d'imagination. Puisse le présent ouvrage, par les  
informations et les exemples qu'il fournit, aider à accroître la  
première et à développer la seconde.

CHAPITRE I

TECHNIQUES TRADITIONNELLES

DE CONSERVATION

-----

Les méthodes de conservation des biens culturels consistent en l'application de traitements qui les empêcheront de disparaître. Toutefois, la notion de conservation ou de consolidation est bien différente de celle de la restauration.

Ce chapitre est destiné à mettre en valeur quelques méthodes traditionnelles de conservation d'objets altérés. Il ne sera envisagé que les objets d'art dont les matériaux constitutifs seront étudiés dans le chapitre de l'utilisation du rayonnement  $\gamma$ .

## I- TRAITEMENT DU PAPIER CONTRE LES MICROORGANISMES ET INSECTES

### I-1. Introduction

Quoique le problème de la conservation des documents graphiques ne soit pas récent, il se posait autrefois avec moins d'acuité car le papier était de meilleure qualité (papier pur chiffon) et les conditions de conservation étaient plus favorables (pollution atmosphérique peu importante, bâtiments aux murs épais).

Les principales causes d'altération des documents graphiques sont la pollution atmosphérique, la lumière, la température, les champignons et les insectes.

De bonnes conditions de conservation permettent de suspendre ou de diminuer certains processus de dégradation, mais on doit parfois avoir recours à des traitements curatifs énergiques pour arrêter le développement des champignons, bactéries ou insectes. On utilise à cet effet des produits volatils très pénétrants.

### I-2. Méthodes de traitement [1] [2]

Les principales méthodes de traitement fongicide couramment utilisées sont les suivantes :

I-2.1. le formol (H - CHO) ou l'aldéhyde formique.

Ce gaz, très volatil, est introduit dans une étuve ( $0,5\text{ m}^3$  environ) maintenue à  $30^\circ\text{C}$ , à raison de  $250\text{ g/m}^3$ .

L'atmosphère est humidifiée par une vaporisation d'eau - le traitement dure de 24 à 72 h.

Cette méthode est utilisée en particulier à la Bibliothèque Nationale de Paris pour la désinfection des documents moisissés, ainsi qu'en URSS. [3]

I-2.2. l'oxyde d'éthylène ( $\text{CH}_2 - \text{O} - \text{CH}_2$ )

Les propriétés fongicides de ce gaz ne sont connues que depuis une quinzaine d'années [4].

Le traitement a lieu sous pression réduite (pression de 10 à 60 mm de mercure).

La proportion de gaz mélangé avec l'air (150 à 500 g/m<sup>3</sup>) dépend du taux d'humidité des documents <sup>(+)</sup>. La température est de 20° C environ <sup>(++)</sup>.

La durée du traitement est de 6 h.

La quantité traitée varie avec les dimensions de l'étuve (certaines ont un volume de plusieurs m<sup>3</sup>).

L'emploi de ce traitement est assez généralisé. En Pologne (produit "Rotanox") et aux USA (produit "Carboxide") on utilise un mélange gaz carbonique (90 %) - oxyde d'éthylène (10 %). Ce mélange est utilisé pour limiter les risques d'explosion et d'inflammabilité du mélange oxyde d'éthylène - air. Les progrès réalisés dans la technique du vide ont permis de diminuer considérablement les risques et on utilise actuellement en France un mélange oxyde d'éthylène - air.

Le processus de dégradation cellulaire causé sur les microorganismes par un traitement de stérilisation chimique (formol, oxyde d'éthylène) est encore imparfaitement connu.

---

(+ ) Les champignons sont beaucoup plus résistants en milieu sec qu'en milieu humide.

(++) Le maximum d'efficacité de l'oxyde d'éthylène se situe entre 20 et 22° C.

### I-2.3. courant à haute fréquence

Dans cette méthode, on utilise l'élévation de température provoquée par un courant H.F. = phénomène rapide et uniforme.

Cette élévation de température provoque une altération irréversible de la cellule = coagulation des protéines et action sur les enzymes vitales dans le cas d'une chaleur humide, phénomène d'oxydation dans le cas d'une chaleur sèche [5].

On utilise cette méthode en URSS [6], avec un oscillateur ayant une fréquence de 18 à 30MHz et une puissance de 8kW. La température est amenée autour de 100° C pendant 15 minutes pour des documents secs et 12 minutes pour des documents humides.

Ce traitement ne peut pas être appliqué aux cuirs et aux parchemins

Des essais effectués sur un papier traité permettent d'étudier les effets des divers traitements sur le papier = [7]

#### - Essais physiques :

Résistance à la traction, à la déchirure, à l'éclatement, au pliage.

#### - Essais chimiques (qui permettent de connaître la structure interne de la fibre) :

x mesure de l'indice de cuivre (poids de cuivre réduit de l'état cuivrique à l'état cuivreux) - une altération du papier provoque une augmentation de cet indice.

x mesure du degré de polymérisation viscosimétrique moyen - une diminution du degré de polymérisation indique une altération de la cellulose.

x mesure du pH = plus l'acidité d'un papier est importante, plus le papier risque de se désagréger.

#### - Essais optiques :

mesure de la blancheur et de l'opacité.

## II- TRAITEMENT DE CONSOLIDATION DE LA PIERRE

L'altération de la pierre s'observe aussi bien sur les ensembles monumentaux (quelques exemples récents : Borobudur - Indonésie, Ripoll - Espagne, Moissac - France, etc ...) que sur des statues; des pièces conservées dans des musées ne sont pas épargnées. A un échelon artistique plus modeste, combien d'encadrements en pierre (portails, fenêtres) sont entièrement corrodés ou fendus, de toute façon dénaturés ! - Que la "maladie" soit exfoliante (desquamation de la pierre) ou alvéolaire [8], c'est le drame de la défiguration du patrimoine architectural et sculptural.

Les responsables culturels internationaux ont oeuvré pour que les recherches des nombreux laboratoires travaillant sur la pierre soient mieux coordonnées. Sous l'égide de l'UNESCO, des conférences ont lieu régulièrement, organisées par l'I COM<sup>(+)</sup>, l'ICOMOS<sup>(++)</sup> ou le "Centre de Rome"<sup>(+++)</sup>; des colloques sont dus aussi à l'initiative d'organismes nationaux.

Les recherches se font dans deux directions principales :

- causes de l'altération de la pierre
- traitements pour y remédier.

### II-1. Causes d'altérations

Beaucoup d'articles ou d'études bibliographiques ont été consacrés à ce problème [9] [10] [11] [12] [13].

Il ne sera donné ici que les très grandes lignes de la question<sup>(++++)</sup>

---

(+) International council of museums

(++) International council of monuments and sites

(+++)<sup>(+)</sup> Centre international d'études pour la conservation et la restauration des biens culturels

(++++)

Le plan adopté ici est celui de MAMILLAN [13]



#### II-1.4. Mise en oeuvre défectueuse -

L'action directe ou indirecte de l'eau qui joue un rôle important dans l'altération est facilitée par la porosité de la pierre.

Les traitements dont il va être question auront pour but de diminuer la porosité et de limiter au maximum la migration de l'eau.

#### II-2. Traitements de la pierre

Beaucoup de méthodes ont été proposées pour lutter contre l'altération de la pierre - [10] [11] [12] [14] [15], selon la nature de la pierre, la "maladie" et son état d'avancement, l'importance de l'élément à traiter (statue ou monument).

Les solutions extrêmes étant, d'une part le lavage périodique, d'autre part le remplacement pur et simple de la pierre; entre ces deux cas extrêmes, dont il ne sera pas parlé ici, il existe bien des possibilités, mais aucune méthode ne peut résoudre tous les problèmes que pose l'altération de la pierre; il apparaît qu'une pénétration en profondeur de la matière consolidante est nécessaire - PLENDERLEITH<sup>(+)</sup> mentionne des essais effectués au British Museum sur des stèles coptes en calcaire très poreux traitées avec différents produits (cire, gomme laque, nitrate de cellulose, acétate de polyvinyle) : dans une ambiance de musée, la réussite du traitement fut proportionnelle au degré de pénétration du produit. Cette constatation s'est confirmée une vingtaine d'années après, ces stèles ayant été entreposées dans des bâtiments humides non chauffés durant la 2ème guerre mondiale.

Les traitements actuellement utilisés peuvent se classer en 3 catégories =

---

(+) référence bibliographique [14] p. 325

- imprégnation de cire (action préventive)
- imprégnation de résines synthétiques
- formation d'un dépôt minéral qui recimente les grains

de pierre mis à nu.

#### II-2.1. La cire [14] [15]

Elle est utilisée depuis l'Antiquité [16] à des fins préventives. Ce traitement très durable est encore employé de nos jours pour les pierres en intérieur et extérieur; toutefois, il peut foncer la teinte des pierres claires.

On utilise un mélange de cire d'abeilles et de paraffine, ou des cires microcristallines pour diminuer l'accrochage de la poussière.

Le traitement qui doit être effectué sur une pierre sèche se pratique de différentes façons :

- immersion pour les objets de petites dimensions
- sur place, pour les grands objets = la cire dissoute

dans un mélange de térébenthine et de toluène est disposée à la brosse sur la pierre; un chauffage par rayons infra-rouges fait pénétrer la matière imprégnante - on ajoute le mélange jusqu'à saturation.

#### II-2.2. Imprégnation d'une résine synthétique

Elle a pour but de retrouver la cohésion originelle d'une pierre altérée (soit entre les grains de la zone altérée, soit entre la couche superficielle "malade" et la couche saine) et de rendre la pierre imperméable à l'eau et aux agents agressifs qu'elle peut contenir.

L'imprégnation peut être réalisée avec des résines polymérisées ou partiellement polymérisées (résines méthacryliques par exemple) dissoutes dans un solvant organique.

Lors de l'évaporation du solvant (qui augmente la viscosité de la résine jusqu'à la rendre dure), il peut y avoir migration de la matière consolidante vers la surface; cela entraîne une imprégnation peu importante en profondeur- Dans d'autres cas (résine époxy par exemple), le durcissement de la résine, dissoute dans un solvant pour plus de fluidité, est provoqué par un agent durcisseur- Il faut dans ce cas que l'évaporation du solvant n'ait lieu que lorsque la polymérisation est assez avancée pour qu'il n'y ait pas de migration de la résine vers la surface.

Selon les cas, la résine est introduite à la brosse ou au pinceau, par pulvérisation, par immersion, par application de poches (fig.1)

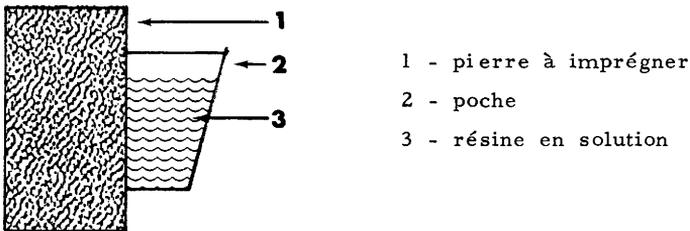


Fig. 1 - Imprégnation par application de poche.

Les résines les plus souvent utilisées sont les suivantes :

#### II-2.2.1. l'acétate de polyvinyle

solvant : toluène, acétone ...

Il doit être appliqué uniquement sur une pierre sèche, sinon il peut y avoir formation d'acide acétique [17].

#### II-2.2.2. les polyméthacrylates

##### II-2.2.2.1. - polyméthacrylate de méthyle

Le Bedacryl 122 X (Imperial Chemical Industries Ltd - Londres) est très souvent utilisé; c'est le polyméthacrylate de méthyle en solution dans du xylène et du toluène.

Ce produit a été notamment employé pour la consolidation du portail de l'église de Ripoll - (Espagne) (XII<sup>e</sup> s.). Il a été introduit par pulvérisation dans une couche supérieure à 20mm d'épaisseur [18].

#### II-2.2.2.2. - paraloïd B.72

Copolymère d'acrylate de méthyle et de méthacrylate d'éthyle, dissout dans du xylène (Rohm and Haas - USA) utilisé notamment pour la consolidation de l'architrave du portail en marbre de la cathédrale de Sienne (Italie) [19].

#### II-2.2.2.3. - polyméthacrylate de butyle

Lucite 2046 (du Pont de Nemours - USA) - solvant : white spirit et benzène, ou benzène thérébentine.

#### II-2.2.3. Résines époxy

La polymérisation de ces résines est provoquée par un agent "durcisseur" en solution avec la résine.

##### II-2.2.3.1. DOMASLOWSKY (Pologne [20] [21])

L'imprégnation de la résine (de fabrication polonaise) dissoute dans un solvant organique se fait au moyen de poches (voir Fig.1) Plusieurs portails en pierre ont été ainsi consolidés.

##### II-2.2.3.2. HEMPEL (Victoria and Albert Museum - Londres) [22]

Après avoir chauffé la pierre à traiter (marbre), on applique au pinceau la résine (produit Marbelette Corporation - USA). Cette méthode a été appliquée à des statues et pierres tombales.

##### II-2.2.3.3. GAURI (USA)

Méthode en cours de mise au point pour le traitement des marbres, par immersion dans des bains successifs (eau-acétone, puis acétone résine) dont on fait varier les concentration - (produits Celanese Coatings Company - USA = Epi Rez 510-504-502).

#### II-2.2.4. Résines siliconées [24] [25]

MARCHESINI utilise une résine partiellement polymérisée (méthylphenylpolysiloxane) dissoute dans du toluène - xylène ou du benzène - il a employé ce procédé pour :

- la consolidation de la façade en terre cuite de la cathédrale de Chivasso (Italie) : imprégnation par imbibition de cotons placés contre le matériau.
- la consolidation de statues en marbre, à Venise (statue de Sainte Alvisé, Anges de San Martino) - imprégnation sous vide, polymérisation thermique (110° C) - le produit utilisé : Sogesil XR 893.

#### II-2.3. Consolidation à caractère minéral

Le ciment intergranulaire ayant disparu au cours de l'altération, les grains de la pierre n'ont plus de cohésion entre eux; la formation d'un dépôt minéral (cristaux) va recréer une cimentation.

##### II-2.3.1. Les silicates

###### II-2.3.1.1. - silicates d'éthyle - $\text{SiO}_4 \text{C}_8 \text{H}_{20}$

Il est employé en solution alcoolique. Sous l'action de l'humidité de l'air, il s'hydrolyse en libérant de l'alcool éthylique avec précipitation de silice colloïdale. Le traitement doit être répété plusieurs fois. Le produit est appliqué à la brosse, au pistolet ou par injection.

###### II-2.3.1.2. - fluorosilicate de magnésium et silicate neutre de sodium

Utilisé en Italie pour des monuments [26]. On dispose des rembourrages au contact de la pierre et on y fait ruisseler de l'eau pour un lavage préalable, puis de la solution durcissante (3 à 5 jours).

###### II-2.3.2. - hydroxyde de barium-urée

Méthode expérimentée aux USA [27] pour le traitement de calcaire et marbres.



### III- CONSERVATION DES BOIS

Les méthodes de conservation des bois anciens se doivent de résoudre deux problèmes :

- traitement d'objets en bois qui souffrent des détériorations dues à des causes naturelles : variations de température et humidité principalement.
- ces facteurs climatiques créent des conditions favorables aux ravages provoqués par les insectes (termites), les larves d'insectes, ainsi que les pourritures sèches et humides.

Parmi les méthodes de sauvegarde, on peut distinguer :

- des procédés de destruction des attaques biologiques (insectes, champignons), par des moyens curatifs ou préventifs.
- des procédés de consolidation des bois qui suffisent bien souvent à prévenir des contaminations biologiques ultérieures.

#### III-1. Désinfection des bois

Les champignons xylophages se développent en présence d'humidité. Les insectes xylophages causent des dégâts à l'état d'insectes (termites) ou de larves (capricornes, lyctus, vrillettes ...). La désinfection des objets contaminés peut se faire par élévation de température, par traitement sous vide, par fumigation, par voie liquide.

Seules, les désinfections par voie liquide sont préventives.

Ces procédés ont bien été décrits par PLENDERLEITH [28], FINDLAY [29], dans les publications du FOREST PRODUCTS RESEARCH LABORATORY et dans les cahiers du CENTRE TECHNIQUE DU BOIS [30].

Les stérilisations par fumigation se font en présence, par exemple, de cyanure d'hydrogène, bromure de méthyle, sulfure de carbone et plus récemment oxyde d'éthylène ....

Ces traitements sont tributaires d'installations fixes dans lesquelles les opérations de contrôle de la température, de la pression et de l'hygrométrie sont assez strictes. Bien que curatifs, ils permettent la stérilisation de collections importantes d'objets dans des délais relativement courts.

Les stérilisations préventives par imprégnation se font dans les Musées par injection à la pipette ou la seringue afin de préserver les revêtements des bois. Parmi les nombreux insecticides, citons les DDT, HCH (gammexane), pentachlorophénol (lindane), chloro-naphtalènes, naphtésates...

### III-2. Consolidation des bois

#### III-2.1. critères à respecter

La nécessité de restituer une solidité mécanique à des objets dont la fragilité ne permet parfois plus leur transport est un problème qu'il faut envisager souvent en termes d'urgence et de sauvetage.

Plusieurs critères interviennent dans le choix des agents de consolidation :

- modification minimale de la teinte, respect de l'aspect de surface et de la patine
- le bois et ses revêtements ne doivent pas être altérés par l'agent consolidant (solvant, durcisseur etc ...)
- le durcissement de l'agent de consolidation ne doit pas provoquer de contraction,
- ni de gonflement du bois
- la protection contre les champignons, bactéries et les insectes doit être rendue efficace et durable
- la consolidation doit assurer stabilité chimique, durabilité et résistance au choc
- elle doit assurer aussi une protection contre les échanges d'humidité entre le bois et l'atmosphère ambiante

- la pénétration en profondeur doit être réalisée d'une façon homogène
- la réversibilité doit être recherchée au moins sur la couche superficielle. Il semble [31] toutefois difficile d'atteindre une réversibilité complète qui consisterait à extraire la totalité d'un polymère qui aurait imprégné le coeur d'un objet de grande épaisseur.

### III-2.2. Matériaux consolidants

#### III-2.2.1. matériaux anciens

Les matériaux d'usage courant dans le passé étaient des colles de peaux, cire d'abeille et résines naturelles comme la gomme laque ou le shellac. Ces méthodes ont été décrites par PLENDERLEITH [28], BRACHERT [32], LEFEVE [33], WILLEMSEN [34], ABERLE et KOLLER [35].

Le procédé d'imprégnation à la cire d'abeille et gomme elemi a eu un regain de faveur [31], les conditions techniques de contrôle de la température ont permis de pénétrer plus profondément [36].

#### III-2.2.2. matériaux synthétiques

L'apparition de matériaux synthétiques a permis de pallier aux inconvénients présentés par les cires naturelles :

- assombrissement de la surface à cause de l'indice de réfraction des cires
- faible pénétration dans les bois compacts
- sensibilité aux variations du degré hygrométrique ambiant.

On peut les classer en cires et résines synthétiques avec ou sans solvant.

##### III-2.2.2.1. cires synthétiques

Les cires microcristallines synthétiques tirées du raffinage du

pétrole sont plastiques à la différence des cires naturelles qui sont cassantes. Leur consistance et leur point de fusion sont variables. Un produit commercial est vendu sous le nom Cosmolloid [37].

Les cires au polyéthylèneglycol ou Carbowax ont une viscosité d'autant plus grande que leur poids moléculaire est élevé : certaines sont liquides (M = 100), d'autres plus lourdes (M = 4000) ont l'aspect de cires; elles sont solubles dans l'eau.

Des mélanges de Cosmolloid et Carbowax 4000 ont été utilisés par WERNER [38]; MIHAÏLOV [39] préconise pour des panneaux de bois brûlé un mélange de cire d'abeille (74 %), de polyéthylène glycol 4000 (8 %), rosine (18 %), ou bien encore une solution à 0,5 % de Carbowax, 1,5 % de Cosmolloid et d'essence de thérébenthine comme solvant.

D'autres cires peuvent être obtenues par copolymérisation d'éthylène et d'acétate de vinyle. Ces thermoplastiques sont amorphes et possèdent de bonnes propriétés mécaniques qui améliorent celles des cires de paraffine ou de cires microcristallines. Elles sont utilisées sous le nom d'Elvax.

#### III-2.2.2.2. résines synthétiques dissoutes dans un solvant

Ces résines peuvent se présenter sous forme de polymères dissous dans un solvant; le durcissement a lieu progressivement par évaporation du solvant. Des inconvénients majeurs en résultent :

- ces résines ne peuvent pénétrer profondément dans le bois que si elles sont diluées; ceci nécessite plusieurs imprégnations pour faire pénétrer une quantité suffisante de résine.
- il est difficile de s'assurer que la pénétration dans les couches profondes est effective.
- lors de l'évaporation du solvant, la résine a tendance à migrer vers la surface.

La nitrocellulose dissoute dans l'alcool n'est plus d'usage. Des solutions de métyl-cellulose et acétate de polyvinyle dans l'alcool ont été utilisées par ZYKAN [40]. ABERLE et KOLLER ont utilisé à Vienne du Xylamon-LX-durcissant [37] soluble dans un solvant de pétrole; ce produit contient à la fois un désinfectant, un agent consolidant et son solvant benzénique est moins néfaste que l'alcool pour les polychromies. Le Calaton CA ou nylon soluble dans l'alcool méthylique a été utilisé par OLIN [37] contre la pourriture sèche et pour consolider le navire "Philadelphia". Le Saran est un copolymère de chlorure de vinylidène et d'acrylonitrile soluble dans la méthylisobutylocétone et rend les plus grands services comme barrière contre l'humidité.

L'Acryloïd ou Paraloid B 72 est un copolymère d'acrylate et de méthacrylate dissous dans du toluène. Ses bonnes propriétés optiques et de résistance aux rayons ultra-violetes lui assurent une large utilisation [37].

#### III-2.2.2.3. résines synthétiques sans solvant

Il existe aussi des types de résines synthétiques sans solvant, Liquides au moment de l'imprégnation, elles durcissent, soit par addition d'un durcisseur qui provoquera la polymérisation à froid, soit pour d'autres types de résines thermocatalytiques en provoquant cette polymérisation à chaud.

Ces procédés sont moins contraignants; ils présentent néanmoins d'autres inconvénients :

- la présence d'un durcisseur dans la résine limite le temps d'imprégnation, donc la profondeur de pénétration
- la polymérisation thermocatalytique risque d'endommager l'objet si la température nécessaire à la réaction est trop élevée
- l'excès de résine qui n'a pas pénétré est perdu.

a/ Les polyester sont vendus sous les noms de Bondafiler (avec charge inerte), Crystic, Leguval, Palatal ou Stratyl [37].

b/ Les résines époxy durcissent à température ordinaire avec un faible retrait. L'Araldite est l'une des plus connues [41], "Git Rot" Epohen, Lukotherm [37] ont d'autres compositions.

WERNER [42] décrit, par exemple, le traitement d'un masque africain au BRITISH MUSEUM avec le mélange suivant :

Araldite CY 219	50 %
Durcisseur	25 %
Accélérateur	1 %
Phtalate de dibutyle	20 %

c/ Les résines polyacryliques se présentent sous forme de liquides. Elles contiennent un polymère solide dissous dans un monomère avec un catalyseur. Leurs propriétés optiques leur permettent de consolider des verres. Marques commerciales : Technovit, Tensol, Plexigum M 355 [37] .

#### IV - CONSERVATION DES BOIS GORGES D'EAU

##### IV-1. Définition et propriétés des bois gorgés d'eau

###### IV-1.1. témoins irremplaçables

Les découvertes de bois secs datant de la préhistoire ou des premiers siècles après J.C. sont assez rares en Europe. Il existe pourtant de nombreux objets archéologiques en bois qui sont des témoins importants de civilisations encore mal connues (néolithique, chalcolithique, ...): poutres, pieux, barques, manches d'outils, plats, etc ... Des objets usuels plus récents (Moyen Age) présentent aussi un grand intérêt ethnographique.

Ces bois anciens ont séjourné dans un milieu saturé en eau qui a permis la conservation de leurs formes; ils sont extraits entre autres lieux de :

- sources           statuettes des sources de la Seine (France)
- rivières          navire marchand dans la Weser à Brême "Bremer Kogge"
- marais           objets usuels et sculptures de Novgorod (URSS)
- lacs             objets usuels du lac de Neuchâtel à Auvernier (Suisse)
- mer              bateau Viking "Wasa" coulé à Beckholmen (Suède)

###### IV-1.2. comportement à l'air

Placés dans l'air, les bois anciens gorgés d'eau ne se comportent pas comme le bois frais : leur volume diminue, le bois se contracte. Un bois récent peut contenir jusqu'à 30 % d'eau hygroscopique en poids, eau absorbée par la cellulose. Le système cavitaire du bois gorgé d'eau ne contient pratiquement plus que de l'eau libre. Les propriétés mécaniques de ce type de bois sont considérablement amoindries : diminution de 60 % du module d'élasticité dynamique sur le navire de Brême (cf MUHLETHALER [44] et Tableau I).

	poids volumique g/cm <sup>3</sup>	résistance en compression kg/cm <sup>2</sup>	résistance en flexion kg/cm <sup>2</sup>	résistance au choc kgm/cm <sup>2</sup>	dureté kg/cm <sup>2</sup>
chêne du Wasa	0,46	171	350	284	0,35
chêne frais	0,65	300	600	450	1,30

tableau I - Propriétés mécaniques comparées du chêne humide du Wasa et de chêne frais. D'après MUHLETHALER [44].

	taux d'humidité du bois en poids	contraction tangentielle	contraction radiale	contraction volumique
chêne récent (bois de coeur)	13 %	7 %	3,5 %	10,5 %
chêne ancien gorgé d'eau (navire de Brême)	15 %	16 %	6,5 %	22,5 %

tableau II - Contractions après séchage dans une atmosphère à 60 % d'humidité. D'après D. NOAK [43].

Le séchage d'un bois récent le conduit à varier de volume lorsque le taux d'humidité diminue; il ne perdra son eau hygroscopique que dans la limite de 30 % en poids. Un bois gorgé d'eau sèchera jusqu'à atteindre l'équilibre avec le taux d'humidité de l'air ambiant ses contractions volumiques ne sont pas du même ordre de grandeur. Dans un musée, avec un taux d'humidité de 60 %, NOAK a fait différentes observations lors du traitement de conservation du navire " Bremer Kogge " [43]. (voir tableau II). Les contractions volumiques observées sont deux fois plus importantes pour le chêne ancien.

#### Observation microscopique.

L'observation microscopique montre généralement une première dégradation à l'intérieur de la cellule et un deuxième type de dégradation qui tend à dissoudre les liens des cellules adjacentes (Fig. 2).

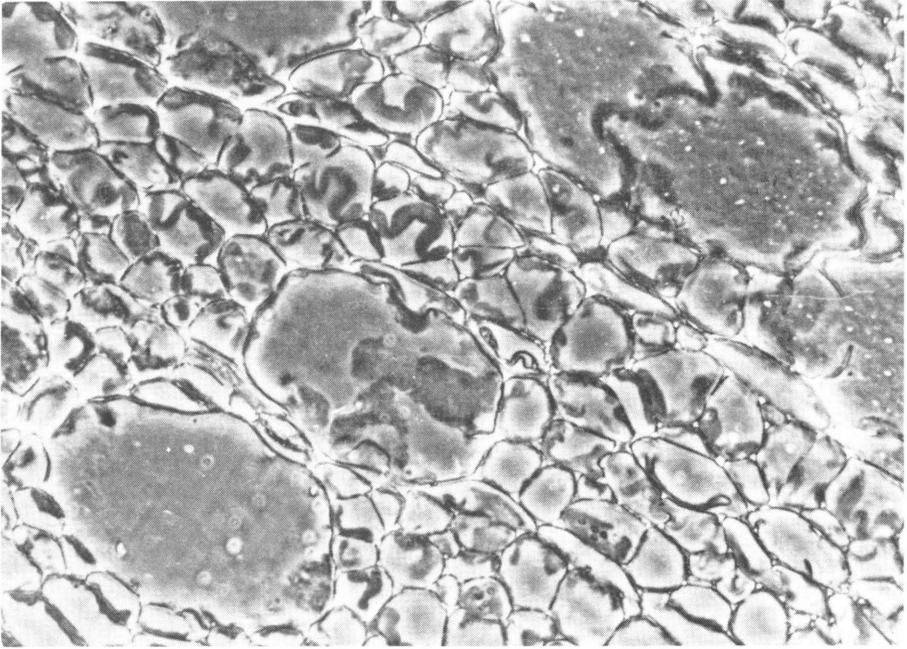


fig.2 - Coupe transversale - Parois cellulaires très dégradées et souvent libres dans le lumen. Feuillu à pores diffus. Provenance: Chamalières - ( France ). Bois gorgé d'eau d'époque probablement Gallo-romaine. G = 820. Cliché Centre d'Etudes Techniques du Papier - Grenoble - ( France ) .

IV-I.3. processus de dégradation

Les dommages subis par le bois sont le résultat d'une attaque double physico-chimique et de microorganismes ou champignons. Les substances solubles par hydrolyse disparaissent, la cellulose en premier lieu; puis les hemicelluloses (peptines, pentosanes) peu stables s'hydrolysent; les hemicelluloses (galactoses, polyuronides) sont alors attaquées par des microorganismes spécifiques. Reste la lignine qui n'est cependant pas à l'abri de dégradation anaérobie [45] [46] [47].

IV-1.4. composition des bois gorgés d'eau

Une composition moyenne de bois gorgés d'eau anciens (feuillus) extraits de Chamalières (France) est donnée dans les tableaux III et IV.

Nature probable du bois	Saule ou peuplier	Bouleau	Hêtre	Frêne
Siccité: % sur brut :	19,1	25,9	27,4	39,7
Composition du bois anhydre :				
Cendres à 800° C	22,5	39,5	28,5	22,2
Lignine :	62,5	41	53	60
Extrait à l'eau (Soxhlet) :	12,5	35	11,7	7
Polyosides totaux :	25,5	16	29,5	25
Fraction minérale: en % des cendres				
Fer :	29	12	29,4	25
Calcium :	7,5	4,4	3,8	6,4
Aluminium :	2	3,7	2,1	0,7
Magnésium :	0,9	1,1	0,6	0,8
Silice (SiO <sub>2</sub> ) :	27,4	43	30,4	29,1

tableau III - Composition de bois gorgés d'eau.

D'après NADAILLAC [48].

Ces bois contiennent 60 à 80 % d'eau en poids; le taux de lignine est anormalement élevé par rapport à celui que renferment les bois frais : 15 à 30 %. Cette fraction a beaucoup mieux résisté à la dégradation que la fraction polyosidique.

Les échantillons contiennent par ailleurs des quantités importantes de matières minérales : fer et silice.

Fraction polyosidique composition relative %	Peuplier		Bouleau		Hêtre		Chêne	
	récent	gorgé d'eau	récent	gorgé d'eau	récent	gorgé d'eau	récent	gorgé d'eau
glucose	64,5	50,5	58,5	58,5	65,0	42,0	60,0	43,5
galactose	1,5	5,0	1,5	5,5	4,0	11,0	3,0	14,0
mannose	3,0	5,5	0,5	5,5	1,5	12,0	2,5	14,0
arabinose	1,0	20,0	0,5	20,5	1,5	19,5	2,5	12,5
xylose	30,0	19,0	39,0	10,0	28,0	15,5	32,0	15,5

tableau IV - Compositions comparées polyosidiques de bois récents et gorgés d'eau. D'après NADAILLAC [48].

Les compositions de bois récents sont tirées de WENZL [49]

La fraction polyosidique des quatre bois a subi une forte dégradation puisque des bois frais en renferment habituellement 65 à 80 %. L'enrichissement relatif de la fraction hemicellulosique (galactose, mannose, arabinose, xylose) est important.

#### IV-2. Traitements de conservation des bois gorgés d'eau

##### IV-2.1. choix d'une méthode de conservation

La méthode la plus simple et la moins dommageable consisterait à conserver l'objet dans une atmosphère à 98 % d'humidité, mais elle ne résoudrait pas les problèmes de tenue mécanique.

Malgré la complexité des problèmes associés à la consolidation des bois humides, plusieurs critères doivent être respectés :

- éliminer l'eau sans altérer la structure du bois; c'est-à-dire réduire les variations dimensionnelles au minimum.
- redonner au bois au moins sa cohésion initiale
- stabiliser ses dimensions de manière à le rendre insensible aux changements climatiques.
- le rendre maniable et transportable; il doit au moins supporter son propre poids.
- lui redonner un aspect et une couleur de bois.

Le choix d'une méthode de conservation dépend :

- de la nature et des propriétés du bois gorgé d'eau : l'eau peut être remplacée par un volume égal d'agent consolidant.
- des propriétés de l'agent de conservation.

L'agent de consolidation ne peut pénétrer que par voie liquide. Sa capacité de pénétration dépend de la taille des molécules des résines consolidantes et de la dimension du réseau capillaire. S'il est solide, il peut être dissous dans un solvant.

- des conditions climatiques du dépôt des objets après traitement : par exemple, variation de température sous l'éclairage d'une vitrine, variation du degré hygrométrique subie lors d'une exposition itinérante.

#### IV-2.2. méthodes de traitement

Les méthodes traditionnelles se partagent entre des procédés de déshydratation et de durcissement dans le bois d'une substance introduite en phase liquide.

#### IV-2.2.1. déshydratation sous vide

IV-2.2.1.1. La méthode consiste à geler le bois et sublimer la glace sous vide. ROSENQVIST [50] l'a décrite comme prometteuse, mais ORGAN [51] l'a expérimentée sans succès.

IV-2.2.1.2. BRORSON-CHRISTENSEN [52] a utilisé une variante en remplaçant l'eau du bois par de l'alcool butylique tertiaire, puis en l'échangeant par une solution de polyéthylène-glycol 4000 (PEG 4000) dans l'alcool butylique tertiaire. L'alcool est sublimé, laissant le polyéthylène-glycol dur dans le bois. Le procédé a été appliqué à la conservation de bateaux Viking découverts à Roskilde au Danemark.

IV-2.2.1.3. AMBROSE [53] a sublimé dans la carboglace des bois imprégnés de solution aqueuse à 10 % de PEG 1000.

#### IV-2.2.1.4. Procédé à l'alcool-éther-résine

Il a été mis au point par BRORSON-CHRISTENSEN [54] et consiste à remplacer l'eau dans des bains successifs d'éthanol, puis dans des bains d'éther éthylique. Les bains d'éther contiennent une résine et le séchage sous un vide partiel permet de déposer la résine dans les canaux du bois. Cette méthode a été améliorée par KRAMER et MUHLETHALER [55] au Musée National Suisse de Zurich.

#### IV-2.2.2. méthode électrocinétique

CEBERTOWICZ et JASIENSKI ont solidifié des sols en faisant passer un courant pendant l'imprégnation du sol par une solution de silicate de soude et de chlorure de calcium. WIELICKA [56] a appliqué le procédé in situ à Gdansk-, mais il ne semble pas reproductible par d'autres laboratoires.

#### IV-2.2.3. consolidation à caractère minéral

IV-2.2.3.1. La méthode à l'alun est la plus ancienne. Elle utilise la solubilité de l'alun de potasse dans l'eau à des températures différentes = une solution saturée d'alun de potasse avec de la glycérine remplace peu à peu l'eau à 92 - 96° C. A température ambiante, l'alun cristallise. Cette méthode a été appliquée par ROSENBERG [57], puis ROSENQVIST [58] sur le bateau Viking de Oseberg.

IV-2.2.3.2. Dans la méthode de GARROUSTE-BOUIS [47] [60], on fait durcir, après imprégnation, une solution aqueuse d'anhydride chromique à 10 % additionnée de bicarbonate de soude à 10-20 %. une imprégnation supplémentaire par une résine est cependant nécessaire pour éviter l'inconvénient d'une dissolution des sels minéraux quand l'humidité ambiante augmente.

IV-2.2.4. méthodes au polyéthylène glycol (carbowax)

Elles consistent à immerger le bois dans une solution aqueuse de polyéthylène-glycol (PEG), puis à élever progressivement la température jusque vers 60° C. L'eau de la solution et du bois s'évapore lentement et la concentration en PEG augmente. Après refroidissement, on nettoie avec un solvant (toluène).

Les PEG sont solubles dans l'eau; plus leur poids moléculaire est faible, meilleure sera leur diffusion dans le bois; mais leur consistance atteint celle de la cire pour des masses moléculaires de 4000. STAM [61] a montré que la stabilisation dimensionnelle du bois était obtenue quand l'imprégnation du réseau des cavités submicroscopiques était effective. La viscosité et les limites de solubilité des polyéthylène glycols limitent le choix de leur masse moléculaire entre 1000 et 4000, ainsi que la température d'imprégnation entre 35° C et 60° C. (à température ambiante, le PEG 4000 est un solide blanc)

La méthode offre plusieurs variantes selon le choix de la masse moléculaire, la concentration de la solution, les durées de traitement et les températures des bains.

IV-2.2.4.1. MOREN et CENTERWALL [62], ainsi que ORGAN [63] utilisent le PEG 4000 à 10 % avec 0,1 % de pentachlorophenatate de sodium. Cette méthode est de très longue durée.

IV-2.2.4.2. LEFEVE [64] à l'IRPA<sup>(+)</sup> conseille une solution initiale de PEG 4000 à 40 % et limite l'évaporation de l'eau durant l'imprégnation.

IV-2.2.4.3. ALBRIGHT (Smithsonian Institution, - Washington) [65] remplace l'eau du bois par l'alcool et procède ensuite selon la méthode d'ORGAN, MOREN et CENTERWALL.

IV-2.2.4.4. SEABORG et INVERARITY [66] [67] ont conservé un bateau vieux de deux siècles avec du PEG 1000 en solution à 50%

Les applications les plus spectaculaires des procédés avec du PEG concernent la conservation du "WASA" et d'un navire marchand à Brême ("BREME KOGGE").

La conservation du WASA [68] nécessite l'emploi de deux méthodes d'imprégnation :

- des objets démontables en bois dont la longueur atteignait 17m ont été immergés dans une solution de PEG 4000 dont la concentration initiale était de 1,5 %; cette concentration a été augmentée en continu de 0,5 % toutes les 24h. Un tel traitement dure environ deux ans
- la coque du WASA ne pouvait être démontée. Elle a été imprégnée par pulvérisation automatique d'un mélange antiseptique et consolidant d'acide borique, de borax et de PEG 1500.

---

(+) Institut Royal du Patrimoine Artistique (Belgique).

La conservation du navire marchand de Brême pose un autre problème à cause des difficultés d'imprégnation [69]. Le PEG 1000 doit être utilisé à de faibles concentrations, sinon l'eau pourrait quitter le bois plus rapidement que le PEG n'y rentre et provoquer un affaissement. La durée du traitement sera probablement de 20 à 30 ans.

#### IV-2.2.5. méthodes à l'ARIGAL C

Cette méthode consiste à imprégner la matière d'un composé que l'on polymérisera in situ dans le bois. On immerge le bois dans une solution aqueuse contenant 25 % d'une résine mélamine - formol. Le durcissement est provoqué par l'action d'un catalyseur et l'abaissement du pH de 9 à 7.

L'usage de la méthode est très répandu, mais les conditions d'emploi délicates : élimination des extraits solubles du bois qui peuvent troubler la condensation, contrôle rigoureux du pH, durée d'action du catalyseur limitée à deux jours, contrôle strict du séchage après traitement.

1- MÜLLER-BECK et HAAS [70] ont mis au point la méthode et l'ont appliquée à Berne (Suisse) à la consolidation d'un grand nombre de bois néolithiques.

2- GRABBAR [71] à Moscou a consolidé du matériel trouvé à Novgorod en remplaçant le mélange mélamine-formol par des précondensats urée-formaldéhyde de faible poids moléculaire.

3- LEHMAN [72] à Poznam (Pologne) utilise une résine carbamide et un catalyseur au chlorure mercurique.

#### IV-2.2.6. méthode au polyméthacrylate de butyle

NOGID et POZDNEVAK [73] au Musée de l'Hermitage à Léninegrad remplacent successivement l'eau par l'acétone, puis par du méthacrylate de butyle qui est ensuite polymérisé avec un catalyseur.

CHAPITRE II

POSSIBILITES DU RAYONNEMENT

G A M M A

-----

Ce chapitre ne traite pas le sujet d'une manière exhaustive. Il souligne seulement quelques propriétés importantes du rayonnement gamma :

- pour la désinfection d'objets d'art
- pour la polymérisation de monomères et résines radiodurcissables destinés à consolider des objets anciens.

## I - DESINFECTION PAR RAYONNEMENT GAMMA

### I-1. Introduction

La radiostérilisation utilise les propriétés destructives des rayonnements ionisants sur les cellules des microorganismes. Elle est employée à l'échelon industriel dans le monde entier -(une quarantaine d'installations). Son principal domaine d'action est le traitement de matériel médical : seringues et instruments à usage unique, prothèses, etc ...

Dans la plupart des cas, on utilise le rayonnement  $\gamma$  issu d'un radioélément tel que le Cobalt 60 (Co 60) ou le Césium 137 (Cs 137).

### I-2. Processus de dégradation [75] [77]

Le processus de dégradation d'une cellule par irradiation a fait l'objet de nombreuses études; quoiqu'imparfaitement connues, il est généralement admis que les lésions cellulaires peuvent être causées

- par action direct du rayonnement ionisant
- par action indirecte : le rayonnement agit sur les milieux internes et externes en créant des radicaux libres qui provoquent des lésions.

### I-3. Courbe de survie [75]

La loi de décroissance d'une population donnée  $N_0$  de microorganismes soumise au rayonnement est souvent représentée par un modèle de la forme

$$N = N_0 e^{-kD} \quad \text{quand la dose } D \text{ est suffisamment grande}$$

$N$  = nombre de microorganismes survivants lorsque la dose  $D$  (exprimée en Rad ou Joule/kg) est appliquée

$k = 1/D_0$  est une constante dont les dimensions sont l'inverse de celles d'une dose

On définit conventionnellement la dose  $D_{10}$  comme la dose appliquée à une population pour réduire le nombre de ses individus de 90 % par rapport à son état avant cette irradiation.

L'allure d'une " courbe de survie " est donnée ci-dessous :

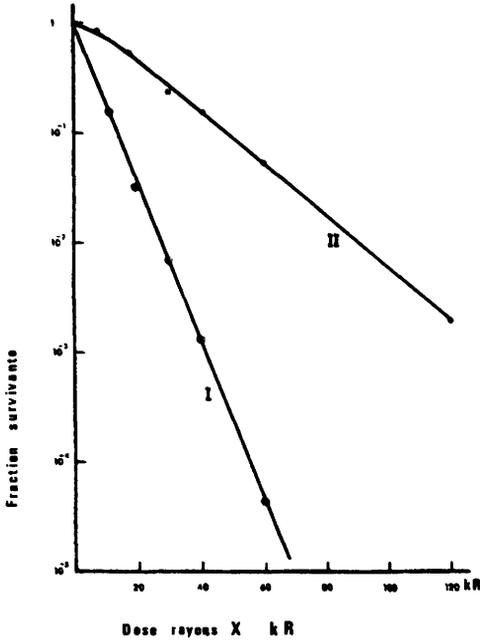


Fig.3 - courbe de survie de culture d' Escherichia Coli irradiée en milieu tampon : saturé d'oxygène (I) - saturé d'azote (II) d'après CASARET [81].

La pente de la courbe varie suivant les espèces étudiées, et pour une même espèce selon l'état de la population = par exemple, les spores sont plus radiorésistants que les cellules en croissance.

La connaissance du comportement d'une espèce donnée à un agent stérilisant (chaleur, gaz ou rayonnement ...) ne permet pas de savoir quelle sera sa résistance à un autre agent stérilisant.

I-4. Principaux facteurs intervenant dans la radiosensibilité des microorganismes

De nombreux facteurs interviennent en modifiant la physiologie cellulaire et l'action physique du rayonnement [74] [75] [76]. Parmi les plus importants, on peut citer :

I-4.1. - atmosphère gazeuse entourant les microorganismes pendant l'irradiation : par exemple, la sensibilité à l'irradiation est plus grande dans l'oxygène que dans l'azote.

I-4.2. - taux d'humidité  
en milieu sec, une population est beaucoup plus résistante qu'en milieu humide.

I-4.3. - débit de dose (dans la gamme utilisée en radiostérilisation)  
Il semble que dans certains cas, la radiosensibilité décroît avec le débit de dose.

I-4.4. - fractionnement de la dose

Elle peut permettre une restauration de la cellule et donc elle nécessite une dose globale plus importante pour atteindre un taux de survie donné.

I-4.5. - température

Lorsque la température augmente, il apparaît un phénomène de synergie entre température et dose destructive = on peut utiliser une dose de rayonnement plus faible que si l'irradiation a lieu à température ambiante.

BORS (tableau V) a montré par exemple qu'une dose de 210 kRad détruit le mycélium du *Merulius Lacrymans* à 20° C dans la gélose de bio-malt; les mêmes effets sont observés pour une dose de 6 kRad environ à 32° C.

D (kRad)	Température d'exposition au rayonnement			
	dans le bio-malt		dans le bois	
	20° C	30° C	20° C	30° C
0	100	20	100	7
0,21	62	15	68	-
0,64	101	19	25	-
21,0	22	1	1	-
64,0	5	-	-	-
210,0	1	-	-	-

Tableau V - Action simultanée de la température et du rayonnement d'après BORS [80].

Accroissement, en pourcentage, de la longueur du mycélium du *Merulius Lacrymans* après exposition au rayonnement dans la gélose de bio-malt et dans le bois.

(Contrôle à 20° C = 100 %).

La destruction du même champignon dans le bois a eu lieu pour des doses inférieures : 20 kRad environ à 20° C, tandis qu'à 30° C 0,2 kRad produit les mêmes effets.

I-5. Avantages et inconvénients de la stérilisation par rayonnement gamma

Le pouvoir de pénétration élevé du rayonnement  $\gamma$  a des conséquences intéressantes dans la radiostérilisation :

- bonne homogénéité du traitement
- non spécificité de l'action du rayonnement pour les insectes et les microorganismes; seule la dose à appliquer varie : pour la destruction des microorganismes, la dose employée dans plusieurs pays d'Europe est  $D = 2,5 \text{ MRad}$ , alors que pour les insectes, elle est de l'ordre de  $D = 50 \text{ kRad}$ .
- possibilité de stériliser les objets dans leur emballage : il faut bien sûr vérifier que le rayonnement ne les fragilise pas.

Dans le cas de stérilisations par les gaz, il faut que l'emballage de l'objet soit imperméable aux microorganismes et perméable au gaz (il devra pouvoir être introduit, puis enlevé).

La stérilisation par la chaleur (1 heure à  $120^\circ \text{ C}$  en présence de chaleur humide ou 20 minutes à  $160 - 180^\circ \text{ C}$  en présence de chaleur sèche) ne peut être utilisée pour beaucoup de produits en matière synthétique.

Toutefois, une installation d'irradiation demande un investissement élevé qui ne peut s'envisager que dans une optique industrielle (un minimum de  $10 \text{ m}^3$ /jour à stériliser). Mais il existe des sociétés possédant des irradiateurs qui pratiquent le "traitement à façon" - (une douzaine en Europe).

## II- POLYMERISATION DE MONOMERES ET RESINES PAR RAYONNEMENT GAMMA

Le rôle d'initiateur de radicaux libres joué par le rayonnement  $\gamma$  lui permet de former des polymères à partir de corps organiques disposant de liaisons éthyléniques. Ces réactions ont été étudiées depuis longtemps par SWALLOW [82], PARKER [83], SHAPIRO [84] Il est cependant intéressant de rappeler des propriétés qui interviennent dans la consolidation des objets d'art.

### II-1. Solubilité des polymères

On distingue deux classes de polymères selon leurs propriétés : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

II-1.1. les thermoplastiques ont un point de fusion; ils sont donc déformables en fonction de la température. Ils sont généralement solubles, quand ils ne sont pas réticulés, dans les solvants usuels (cétones, esters, carbures) et dans leur monomère (avec des exceptions : chlorure de polyvinyle, polyacrylonitrile...). Les meilleures présomptions d'extraction d'un polymère thermoplastique inclus dans un matériau vont vers un solvant dont la structure est proche de celle du motif du polymère. Ces polymères sont dits "réversibles"; la réversibilité totale sur une oeuvre d'art consiste à pouvoir extraire la totalité du matériau introduit et de revenir ainsi à l'état antérieur avant sa consolidation.

II-1.2. les thermodurcissables sont des solides sans point de fusion; ils sont généralement insolubles dans les solvants usuels et leur monomère. On les dit "irréversibles". Les résines polyester appartiennent à cette classe. Des polymères (polyesters : maléates, phtalates, isophtalates) sont dissous dans un solvant (styrène) qui participe à la réaction de consolidation comme agent de réticulation. Un réseau tridimensionnel est créé avec des propriétés de résistance mécanique élevées. La viscosité de la résine avant consolidation peut être adaptée par sa teneur en solvant.

Les thermoplastiques et thermodurcissables cités dans le tableau VI peuvent polymériser sous rayonnement  $\gamma$  pourvu qu'ils contiennent des insaturations éthyléniques.

thermoplastiques	thermodurcissables
polycellulosiques	résines polyesters
polyvinyliques	
polyoléfines	
oléfines polychlorés	
polyacrylates	
polyméthacrylates	
polystyrène	

Tableau VI - Classes usuelles de polymères obtenus par radio-polymérisation  $\gamma$

## II-2. Réaction exothermique

La polymérisation d'un monomère ou la réticulation d'une résine provoque une réaction exothermique accompagnée d'un grand dégagement de chaleur : la chaleur dégagée par exemple par un mélange de 35 % de styrène et 65 % de résine polyester est de 80 à 100 kcal/kg.

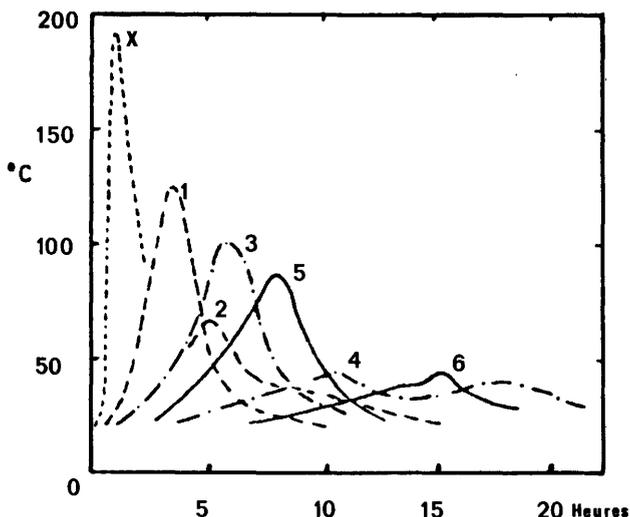


Fig. 4 : Polymérisation d'un mélange d'une résine de Polyester Soredur H75 avec 25 % de styrène

x initiation par voie chimique (0,6 % d'hydroperoxyde de cyclohexanone et 0,006 % de naph-ténate de cobalt)

1 à 6 initiation par rayonnement  $\gamma$

débits de dose: 58,2 kRad/h	1 sous N <sub>2</sub>	2 dans l'air
23,3 "	3 "	4 "
5,6 "	5 "	6 "

- Elévation de température durant la polymérisation en fonction de la durée de la polymérisation.

D'après MIETTINEN [85]

Cette action est très sensible dans le cas de la polymérisation d'une résine styrène/polyester par voie chimique : le coeur d'un bloc de résine de 500 g voit sa température monter à 192° C.

Une telle température est nocive à la fois pour la structure de l'objet et celle du polymère.

Le rayonnement  $\gamma$  permet d'éviter un dégagement de chaleur trop important car on peut abaisser la vitesse de la réaction en diminuant le débit de dose : il suffit d'éloigner la résine de la source de rayonnement.

### II-3. Polymérisation dans un matériau poreux

La polymérisation d'un monomère ou la réticulation d'une résine dans un corps poreux a fait l'objet de nombreuses études.

L'application à la consolidation de bois "moderne" pour créer un nouveau matériau, le "bois plastique", a été passée en revue par RONDENAY [86], BURMESTER [87], VILLIERE [88], CZVIKOVSKY [89]...

Des travaux importants ont été réalisés entre autres dans ce domaine à l'Université de WEST VIRGINIA (U.S.A.) [90].

Dans le domaine de l'imprégnation des matériaux pierreux "modernes" tels que les bétons, des études réalisées en particulier au Laboratoire National de BROOKHAVEN ont montré l'importance des améliorations apportées aux propriétés mécaniques de ces matériaux [91] [92].

Les résultats obtenus sur des matériaux modernes et sains peuvent servir de point de départ à l'application du procédé à la consolidation des matériaux anciens. Mais les buts recherchés sont différents et les choix techniques de l'agent radiodurcissable ou du procédé d'imprégnation doivent être modifiés : il faut les adapter aux exigences posées par la nature de l'objet d'art et son état d'altération.

CHAPITRE III

UTILISATION DU RAYONNEMENT GAMMA  
POUR LA CONSERVATION DES OBJETS D'ART

-----

La désinfection ou la consolidation d'objets d'art par le rayonnement  $\gamma$  peut s'appliquer à une grande variété de matériaux organiques et pierreux. Il ne sera envisagé dans ce chapitre que les études parues à ce jour dans le domaine du papier, de la pierre, des bois et des bois gorgés d'eau.

En outre, pour le papier et le bois, il sera fait une brève description des effets du rayonnement  $\gamma$ , observés sur ces matériaux.

## I- INTRODUCTION

Les rayons  $\gamma$  émis par une source de cobalt 60 peuvent-ils rendre dangereux les objets qui y sont soumis ? A cette question, la réponse est catégorique et définitive : en aucun cas.

La possibilité théorique d'induire une radioactivité par le rayonnement  $\gamma$  du cobalt 60 (émetteur  $\gamma$  de 1,17 et 1,33 MeV) existe pour le béryllium et l'argent. Elle est décrite par MEINKE [93], ROGERS [94], TUKHSHEERER [95], [96]...

Dans les conditions d'irradiation pratiquées pour la conservation d'objets d'art, cette éventualité conduirait à induire des activités totalement négligeables devant la radioactivité naturelle des objets. La manipulation des objets désinfectés ou consolidés par irradiation au cobalt 60 est donc absolument sans danger et cette notion mérite d'être rappelée auprès des milieux de la conservation des objets d'art.

## II- DESINFECTION PAR RAYONNEMENT GAMMA

### II-1. Désinfection des papiers

#### II-1.1. Altération de la cellulose par le rayonnement gamma

Plusieurs auteurs ont étudié ce sujet :

Pour KRASSIG [97], des doses de 3 à 5 MRad ne provoquent pas de dégradation moléculaire notable; au delà, elle est proportionnelle à la quantité de rayonnement émis.

POLCIN et Collaborateurs [98] montrent que les longues chaînes sont dégradées en priorité. PASZNER [99] indique qu'il y a une dégradation importante à partir de 1 MRad, qui dépend de la dose totale reçue et non de son débit. Pour les faibles doses, la dégradation est moindre lorsque l'on irradie sous azote.

### II-1.2. Etude du papier "moderne" irradié

SORANTIN [100] a irradié du papier d'emballage à des doses pouvant atteindre 40 M Rad; il a constaté une diminution générale des propriétés mécaniques du papier.

KUBAT et Collaborateurs [101] ont utilisé des doses variant entre 0,1 et 50 M Rad = au-dessus de 1 M Rad, les propriétés physico - chimiques du papier sont rapidement diminuées; les fibres d'un papier soumis à de fortes doses ne présentent pas de modification notable au microscope électronique.

### II-1.3. Etude sur l'utilisation de l'irradiation pour la désinfection des papiers

Jusqu'à ce jour, l'irradiation  $\gamma$  n'a pas été utilisée pour la désinfection des papiers, mais deux auteurs se sont intéressés à ce problème.

BECK [78] a fait ses études sur des papiers anciens provenant de reliures de volumes in-folio et des papiers modernes.

(voir Tableau VIII).

N° courant	Année	Epaisseur moyenne en $\mu$	Observations
1	1559	180	Sain
2	1645	140	Rongé par la carie et taches foncées
3	1653	160	Fortement tacheté, rongé par la carie
4	XVII <sup>e</sup> siècle	160	Partiellement sali
5	XVIII <sup>e</sup> siècle	190	Sain
6	Envir. 1700	170	Sain, lignes tracées à l'encre
7	Fin XVIII <sup>e</sup>	160	Froissé, sali
8	Envir. 1800	200	Fortement tacheté de rouge et de marron
9	Vers 1800	150	Partiellement sali, taches d'encre
10	1840	220	Couvert d'imprimerie
11	1967	50	Papier à machine à écrire crêpé 30 g 61/86
12	1967	90	Papier à machine à écrire avec filigrane
13	1967	80	Matière C 80 g 61/86
14	1967	90	Papier multicol. 110 g 61/86
15	1967	140	Carton carte postale 150 g
16	1967	200	Carton registre 220 g 70/100
17	1967	240	Carton carte postale 170 g 61/86

Tableau VIII - Papiers anciens et récents sélectionnés par BECK [78] pour son étude.

Il les a soumis à des doses comprises entre 0,1 et 1 M Rad. Pour une dose inférieure à 1 M Rad, les conclusions de ses travaux sont :

- aucune différence de couleur entre un papier irradié et non irradié
- pas de modification observable au microscope des fibres d'un papier irradié
- pas d'action notable sur la résistance à la déchirure et l'allongement d'un papier irradié
- pour les doses comprises entre 0,5 et 1 M Rad, tendance à la diminution de la résistance au double pliage

BECK en déduit qu'il semble possible d'utiliser l'irradiation  $\gamma$  pour débarasser les vieux papiers des insectes et champignons nuisibles.

PAVON [102]<sup>(+)</sup> a travaillé sur cinq sortes de papier moderne : du papier pur chiffon d'excellente qualité (papier AFNOR VII/5) ou papier de la qualité du papier journal (80 % de pâte mécanique et 20 % de pâte chimique) (AFNOR I/1). Elle a étudié sur une sélection de 36 souches de champignons cellulolytiques la dose qu'il fallait appliquer aux documents graphiques pour arrêter la dégradation causée par les champignons.

La dernière souche a été détruite pour une dose comprise entre 0,9 et 1 M Rad (débit de dose 0,5 M Rad/h); prenant une marge de sécurité, elle a étudié l'action de la dose de 1,8 M Rad sur les propriétés du papier. Les irradiations ont été effectuées dans l'air ou sous azote.

Les conclusions sont les suivantes :

- le débit de dose n'a pas d'influence significative sur la résistance physico-chimique des papiers

---

(+) étude effectuée au Centre de Recherche sur la conservation des documents graphiques - PARIS.

- l'irradiation en atmosphère d'azote n'a pas amélioré la résistance du papier vis à vis du rayonnement
- la résistance mécanique du papier est peu modifiée par l'irradiation<sup>(+)</sup>
- les qualités optiques et l'aspect des fibres au microscope ne sont pas changés
- sur le plan chimique<sup>(+)</sup>, le pH varie peu. Par contre, on observe une variation notable de l'indice de cuivre et du degré de polymérisation viscosimétrique moyen, qui indique une altération moléculaire de la cellulose - c'est, du reste, sur les papiers les plus riches en cellulose que l'on note les plus grandes variations.
- un vieillissement artificiel des papiers (72 h à 105° C) augmente la dégradation de tous les papiers quelque soit leur composition.

PAVON estime que des recherches supplémentaires doivent être entreprises avant l'utilisation de l'irradiation pour la désinfection des documents graphiques.

## II-2. Désinfection des bois

### II-2.1. Action du rayonnement $\gamma$ sur le bois

L'action du rayonnement  $\gamma$  sur le bois dépend principalement de la dose reçue. BURMESTER [87] a comparé les travaux publiés dans ce domaine. Les conséquences de cette action se traduisent par des modifications physico-chimiques et mécaniques.

---

(+) la liste des essais mécaniques et chimiques effectués dans cette étude se trouve page 11.

L'exposition du bois à de faibles doses de rayonnement  $\gamma$  entraîne une dégradation de la cellulose et de la lignine [103], [104], [105] mais améliore les propriétés mécaniques telles que la résilience [105], [106], la résistance en flexion, à la compression et à la traction [107]. Un accroissement des doses, au contraire, entraîne une dégradation des constituants du bois, une diminution de sa résistance mécanique et de son hygroscopicité [108], [109], [110], [111].

Le point d'inversion diffère suivant les essences et les propriétés considérées; il est généralement de l'ordre du Mégard.

Les doses de désinsectisation dans les bois (50 kRad) correspondent donc à une zone d'amélioration des propriétés mécaniques. Les doses de stérilisation (2,5 M Rad) se situent à un palier de ces mêmes propriétés.

#### II-2.2. Action du rayonnement $\gamma$ sur certains revêtements du bois

MIHAÏLOV [112] a observé les effets du rayonnement  $\gamma$  sur la stabilité de liants et pigments anciens contaminés par des microorganismes; ces bois revêtus provenaient de peintures sur bois bulgares du XVII<sup>e</sup> - XIX<sup>e</sup> siècle.

Ses résultats montrent que les doses observées de 2,5 et 3,2 M Rad dépassent largement les doses létales des microorganismes qu'il a observés sur des bois contaminés naturellement. Les doses  $D_{10}$  sont de 80 kRad pour *C. Cerebella*, 60 kRad pour *Merulius Lacrymans*, 26 kRad pour *B. Subtilis*.

Ces doses sont sans effet notable sur 17 pigments. Jusqu'à 0,5 M Rad 11 liants ne présentent pas de modification de leur aspect.

### II-2.3. Remarques sur la désinsectisation [113]

D'après BECK [78], la dose de 300kRad est létale pour la plupart des insectes d'Europe Centrale. Selon BORS [114], la destruction des coléoptères adultes ou de leurs larves xylophages nécessite des doses de 40 à 60kRad; ils ne pondent plus d'oeufs féconds à partir de 10 à 15kRad [79].

D'après NADAILLAC [48], une dose de 25kRad détruit la quasi - totalité des insectes connus. Il envisage de faire subir aux matériaux constitutifs des objets, un nombre important de traitements successifs durant leur existence et propose d'appliquer une dose correspondant à 100 traitements avec un coefficient de sécurité de 2 pour des raisons d'inhomogénéité de dose reçue. La dose d'étude de l'effet de 100 traitements correspondrait à :

$$100 \times 2 \times 0,025 = 5M \text{ Rad.}$$

### II-2.4. Applications à la désinfection d'objets anciens

BECK [78] a fait des essais de désinsectisation et stérilisation sur des bois anciens :

- pin de 1622 : provenant de la Fondation de Kremsmünster  
(Haute-Autriche)
- pin de 1681 : provenant de poutres du château de Puchenau  
(Haute-Autriche)
- tilleul de 1700 : statue baroque avec fond de craie et dorure à  
la feuille.

Les champignons vivant sur ces vieux bois (*Penicilium* et *Méruilius Lacrymans*) ont été détruits entre 0,3 et 0,5M Rad. Ces doses létales semblent plus faibles que les doses létales nécessaires pour les mêmes champignons dans des bois récents de même type. Aucune diminution de la dureté du bois ancien n'a été observée.

BORS [80] a montré l'efficacité de la méthode sur des sculptures en bois provenant de la " Lüneburger Heide " (Basse-Saxe).

NADAILLAC [48] a désinsectisé un lot de poteaux funéraires en provenance du Nord de l'Australie pour le Musée d'Art Océanien et Africain de Vincennes (France) avec une dose de 50 kRad.

### II-3. Avantages du rayonnement $\gamma$ pour la désinfection

L'action des rayons  $\gamma$  est analogue aux gaz sur un point : le traitement est curatif, il n'empêche pas une réinfection ultérieure.

Mais cette méthode est complémentaire d'un traitement chimique : le rayonnement comme moyen d'anéantir les organismes destructeurs, la méthode chimique pour prévenir une réinfection ultérieure. Cette méthode est rapide, sûre, d'application simple. L'innocuité de l'action de rayonnement  $\gamma$  aux doses de stérilisation reste cependant à préciser pour de nombreux matériaux constitutifs d'objets ethnographiques.

Ces possibilités montrent cependant tout l'intérêt de pouvoir disposer de ces moyens de désinfection, notamment lors d'inondations catastrophiques.

Le sauvetage dépend alors de l'existence de moyens capables de traiter rapidement des volumes importants d'objets contaminés (bois, matériaux composites). Des installations d'irradiation pourraient compléter géographiquement les possibilités offertes par d'autres moyens de désinfection à installations fixes (oxyde d'éthylène par exemple).

### III- TRAITEMENT DE LA PIERRE PAR RAYONNEMENT GAMMA

#### III-1. Introduction

Les études entreprises pour augmenter la résistance de matériaux pierreux par imprégnation d'une résine radiodurcissable sont récentes.

Les premières expériences ont été faites aux U.S.A. (Brookhaven National Laboratory et US Bureau of reclamation) sur le béton [91] et la pierre [92]<sup>(+)</sup>; elles ont été suivies par des travaux faits au Danemark (béton) [115].

Le but de ces travaux était d'améliorer les caractéristiques des matériaux afin d'étendre leur utilisation dans de nouveaux domaines industriels.

Cette méthode est reprise depuis peu en France<sup>(++)</sup> dans un esprit très différent, pour la consolidation des objets d'art altérés en pierre. Des impératifs nouveaux interviennent car le traitement est effectué sur un matériau fragile qu'il faut consolider tout en conservant son aspect de surface. Il a été vu que des traitements de consolidation devaient être effectués aussi bien sur des objets de petites dimensions que sur des monuments entiers; la méthode qui va être exposée ne peut s'appliquer qu'à des éléments transportables dans les laboratoires de traitement; les dimensions des objets doivent être compatibles avec celles de la cuve d'imprégnation et de la cellule d'irradiation. Le traitement ne peut être effectué sur place car l'imprégnation est réalisée sous vide et l'emploi du rayonnement  $\gamma$  pour la polymérisation nécessite un système de protection (béton) très important.

---

(+) Dans cette étude, plusieurs types de polymérisations ont été envisagés : par rayonnement et par voie thermocatalytique

(++) Commissariat à l'Energie Atomique - Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble (Projet Nucléart).

Les pages suivantes exposent la méthode et les principaux résultats obtenus (+).

### III-2. Les phases du traitement

Le traitement comprend :

- l'imprégnation de l'objet par une résine liquide
- le durcissement in situ de cette résine à l'aide du rayonnement  $\gamma$

#### III-2.1. - l'imprégnation

##### III-2.1.1. - mise sous vide

L'objet en pierre est placé dans une cuve d'imprégnation où l'on fait un vide partiel (de l'ordre du centimètre de mercure). Cette opération a pour but d'extraire l'air occlus dans les pores de la pierre. L'objet est laissé sous vide pendant 4 à 5 heures.

##### III-2.1.2. - introduction de la résine

On fait pénétrer lentement dans la cuve la résine liquide jusqu'à ce qu'elle immerge totalement l'objet.

##### III-2.1.3. - mise en pression

La cuve est mise sous pression d'azote<sup>(++)</sup> ( $3 \text{ kg/cm}^2$  environ).  
L'objet est laissé ainsi une dizaine d'heures.

Le passage sous vide favorise l'imprégnation en profondeur de la résine car il n'y a pas de compression d'air occlus vers le centre de la pierre lors de la pénétration de la matière consolidante.

---

(+) Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs communications  
[116] [117] [118]

(++) L'azote est préférée à l'air car l'oxygène est un facteur d'inhibition de la polymérisation par rayonnement  $\gamma$ .

La pression est nécessaire pour contrarier les forces de tension superficielle qui s'opposent à la pénétration de la résine dans les pores fins.

On voit donc que deux facteurs interviennent dans l'imprégnation d'une pierre = sa porosité et sa porométrie (répartition des pores selon leur diamètre).

#### III-2.1.4. - sortie de l'objet imprégné

Après avoir remis en stockage la résine qui n'a pas pénétré dans l'objet<sup>(+)</sup>, ce dernier est sorti de la cuve d'imprégnation et immergé quelques secondes dans un bain de solvant : cela permet de dissoudre la résine qui se trouve sur la surface de la pierre.

La viscosité de la résine est un paramètre important. Si l'on emploie une résine trop fluide pour imprégner une pierre ayant de gros pores, il y aura un écoulement naturel de la résine avant qu'elle ne durcisse hors de la pierre; ainsi, une zone superficielle est moins imprégnée que la partie interne de l'objet; l'épaisseur de cette zone peut varier de quelques dixièmes à quelques millimètres suivant les pierres. D'autre part, une résine trop visqueuse pénètre difficilement dans une pierre peu poreuse à pores fins.

#### III-2.2. Durcissement de la résine

L'objet est amené dans la cellule d'irradiation. Le durcissement de la résine est initié par le rayonnement  $\gamma$ . La dose employée est de l'ordre de 2 MRad. (voir Fig. 10 page 74)

---

(+) Il faut noter que par cette méthode, on ne consomme que la matière qui imprègne l'objet; l'excédent de résine, qui ne comporte aucun agent durcisseur, peut être remis dans les cuves de stockage.

La polymérisation dans l'air ne donne pas de bons résultats : d'une part, à cause de l'inhibition provoquée par l'oxygène de l'air (il faut donc une dose de rayonnement importante pour obtenir une polymérisation complète); d'autre part, la pierre traitée subit un important changement de teinte; elle garde un aspect " mouillé ".

La polymérisation dans l'eau donne de meilleurs résultats. La teinte de la pierre est bien mieux conservée (+).

### III-3. Les contrôles effectués(++)

Les modifications apportées par le traitement sur le matériau sont chiffrées par des contrôles appropriés sur une pierre non traitée et une pierre traitée de même nature. L'imprégnation a été effectuée avec une résine polyester dissoute dans du styrène(+++).

Pour avoir une meilleure homogénéité des échantillons, ces essais ont été pratiqués sur des éprouvettes de calcaire récemment extrait de carrière (dimensions 7 x 7 x 7 cm ou 7 x 7 x 28 cm). Selon les essais, les valeurs données sont des moyennes sur 3 ou 6 éprouvettes. Les calcaires de différentes porosités ont été choisis (voir Tableau IX).

---

(+) La température de l'eau a une influence sur la dose de rayonnement nécessaire à la polymérisation = réf. [91] 2ème rapport, p.14 : Pour polymériser du méthacrylate de méthyle imprégnant un bloc de béton plongé dans l'eau, la dose nécessaire est de 1,5M Rad si la température de l'eau est de 20° C, alors qu'elle n'est que de 0,5M Rad pour une température de 85° C. Le même phénomène est observé dans l'air (même rapport, p.7) : la dose passe de 1,5 à 0,5M Rad quand la température de l'air passe de 22 à 75° C.

(++) Les modes opératoires sont exposés dans les communications de MAMILLAN [119].

(+++)  
résine Stratyl A 228 - Produit Rhône-Progil - France

Deux séries de contrôle : l'une pour voir les modifications sur la migration de l'eau à l'intérieur de la pierre traitée, l'autre pour connaître les caractéristiques mécaniques du nouveau matériau : pierre + résine.

### III-3.1. Première série

L'étude des possibilités de migration de l'eau dans la pierre traitée s'impose, à cause du rôle déterminant de ce facteur dans l'altération de la pierre (voir p. 13).

#### III-3.1.1. - la porosité

Elle est mesurée par imbibition d'eau sous vide. On voit dans le tableau que pour toutes les pierres étudiées, elle diminue considérablement : de 86 à 93 % selon les pierres traitées (voir Tableau IX).

#### III-3.1.2. - porométrie

L'étude de la répartition du diamètre des pores est faite à l'aide d'un porosimètre à mercure.

Pour une pierre complètement imprégnée, on observe une diminution du diamètre des pores; la proportion micropores/macropores est sensiblement la même sur une pierre traitée et une pierre non traitée - (la valeur du diamètre qui délimite la macroporosité de la microporosité est  $\varnothing = 7,5 \mu$ ).

#### III-3.1.3. - remontée capillaire

Selon les 6 calcaires étudiés, le coefficient de capillarité diminue de 98 à 100% - Ainsi, la migration de l'eau par remontée capillaire est supprimée = ceci est important pour des pierres placées en milieu très humide.

Cette première série d'essais montre l'efficacité du traitement = il limite au maximum la migration de l'eau à l'intérieur d'une pierre traitée.

Porosité	Massangis	Le Puley	Tervoux	Savon- nières	St Pierre Aigle	Vassens
Avant traitement	11,9 %	15,0	24,3	33,5	39,5	39,5
Après traitement	0,8 %	0,8	1,8	2,1	3,8	5,3
Diminution apportée par le traitement	93 %	94	93	94	90	86

Tableau IX - Porosité avant et après traitement - D'après [120].

### III-3.2. Deuxième série = caractéristiques mécaniques du matériau traité

#### III-3.2.1. - résistance à la traction par flexion (+)

Son augmentation est une fonction croissante du taux d'imprégnation c'est donc la pierre la plus poreuse (Vassens) qui bénéficie de la plus grande amélioration : 970 % (voir Tableau X).

#### III-3.2.2. - résistance à la compression

La plus grande augmentation de la résistance à la compression est observée pour la pierre de Vassens : elle passe de 8,6 à 99,7 N/mm<sup>2</sup> (voir Tableau XI).

#### III-3.2.3. - dureté superficielle

On mesure la largeur de la rayure obtenue par une pointe d'acier sur la surface de l'éprouvette (scléromètre de Martens).

L'amélioration est nulle pour les pierres dures (Massangis ou Le Puley). Par contre, elle est sensible pour les pierres plus tendres qui acquièrent une dureté semblable aux précédentes (voir Tableau XII).

#### III-3.2.4. - vitesse du son

La mesure de la vitesse du son dans la pierre est de plus en plus utilisée pour déterminer la compacité et la résistance à la compression; de plus, elle permet un contrôle non destructif de l'homogénéité du matériau. Il est donc utile de connaître les modifications apportées par le traitement.

---

(+) La résistance à la traction pure n'a pu être mesurée car les collages pratiqués pour le déroulement des essais n'étaient pas assez résistants pour supporter la traction nécessaire pour briser la pierre traitée.

	Taux d'imprégnation de résine (en volume)	Résistance à la traction par flexion		Amélioration
		avant traitement	après traitement	
Massangis	10,1 %	12,9 N/mm <sup>2</sup>	21,0 N/mm <sup>2</sup>	63 %
Tervoux	24,0	4,8	27,8	480
Vassens	38,1	1,6	17,1	970

Tableau X - Résistance à la traction par flexion. D'après [120]

	Résistance à la compression		Amélioration due au traitement
	avant traitement	après traitement	
Massangis	84,1 N/mm <sup>2</sup>	162,5 N/mm <sup>2</sup>	93 %
Tervoux	30,0	149,2	400
Vassens	8,6	99,7	1060

Tableau XI - Résistance à la compression. D'après [120]

	Largeur de la rayure		Amélioration
	pierre non traitée	pierre traitée	
Le Puley	0,5 mm	0,5 mm	0 %
Savonnières	1,3	0,6	55
Tervoux	1,6	0,6	62
St Pierre Aigle	1,7	0,6	66

Tableau XII - Etude dureté superficielle. D'après [120]

	Vitesse du son		Augmentation
	avant traitement	après traitement	
Le Puley	4150 m/s	4940 m/s	18 %
Tervoux	3225	4575	41
Savonnières	3180	4410	38
St Pierre Aigle	2920	4100	40
Vassens	2520	3655	47

Tableau XIII - Etude de la vitesse du son. D'après [120]

On voit sur le tableau XIII que la vitesse du son est d'autant plus élevée que le taux d'imprégnation est plus grand = pour la pierre de Vassens, elle passe de 2520 à 3655 m/s (voir Tableau XIII).

### III-3.2.5. - choc thermique

Les éprouvettes ont été soumises à des cycles durant lesquels la température passe de 50° C en ambiance sèche (15h) à 20° C, immergées dans l'eau (5h)<sup>(+)</sup> (la durée de chaque phase du cycle est inversée tous les 15 cycles).

La résine ayant un coefficient de dilatation plus important que celui de la pierre, les chocs thermiques auraient pu provoquer l'éclatement d'une pierre à fort taux d'imprégnation.

Or, après 100 cycles, les dégradations observées sur les éprouvettes traitées sont pratiquement nulles.

### III-3.2.6. - gel - dégel

Le cycle auquel sont soumises les pierres est le suivant = 6h dans l'air à - 15° C et 6h dans l'eau qui est à 15° C à son arrivée et qui se stabilise à + 3° C.

Si la pierre a une couche superficielle moins bien imprégnée que le coeur, ce test peut provoquer des écaillages par plaques.

---

(+) la durée de chaque palier est longue pour que le coeur de la pierre subisse bien toute l'amplitude de la variation thermique.

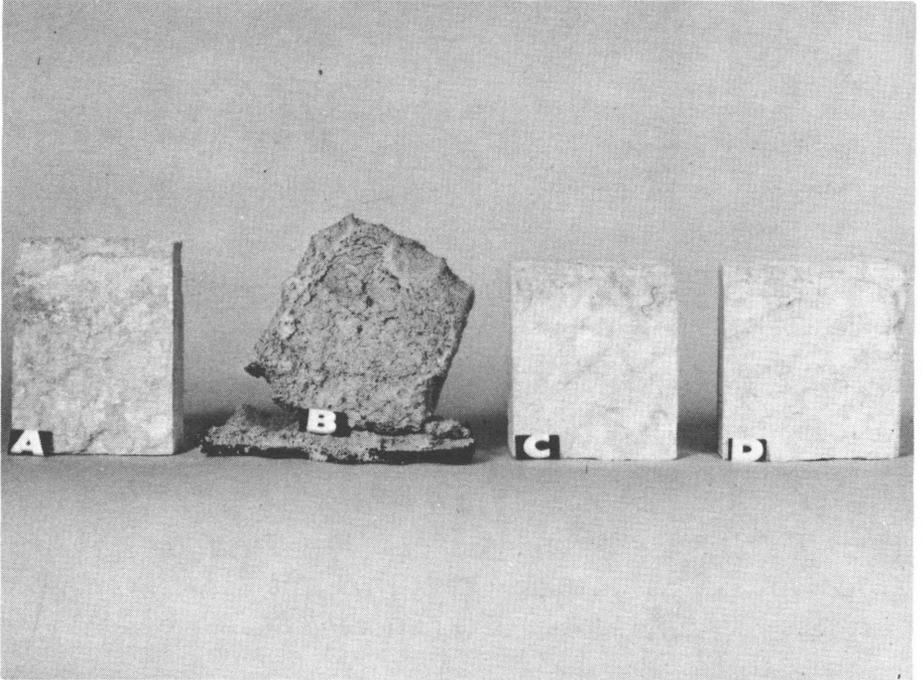


Fig. 5 - Test de vieillissement artificiel sur calcaire ancien  
St Antoine de Compiègne (France) - Etat des pierres  
après 166 cycles.

A - Pierre non traitée - non vieillie

B - Pierre non traitée - vieillie

C - Pierre traitée - non vieillie

D - Pierre traitée - vieillie

D'après [121].

	Nombre de cycles nécessaires pour avoir une altération significative	
	Pierre non traitée	Pierre traitée
Le Puley	148	> 310
Savonnières	104	265
Vassens	37	166

Tableau XIV - Essai gel - dégel. D'après [120]

L'amélioration apportée par le traitement est surtout importante pour la pierre de Vassens qui est très sensible aux alternances gel-dégel lorsqu'elle n'est pas traitée. Elle résiste beaucoup mieux après traitement (voir Tableau XIV).

### III.3.3. Observations complémentaires

#### III-3.3.1. - vieillissements accélérés

Pour étudier les variations de teinte en surface après traitement, des calcaires ont été soumis à un vieillissement artificiel accéléré (aspersion d'eau, vapeur d'eau, atmosphère acide, rayonnement ultra violet) utilisé pour contrôler industriellement les revêtements de surface (vernis, peinture).

On n'a pas observé de variation de teinte significative, après vieillissement, entre une pierre traitée et un témoin non traité [120].

Un autre test de vieillissement a été appliqué sur des calcaires : variation thermique ( - 20° C à + 60° C), aspersion d'eau, vapeur d'eau, rayonnement ultra violet; il a permis de vérifier le bon comportement d'une pierre traitée et vieillie (Fig. 5).

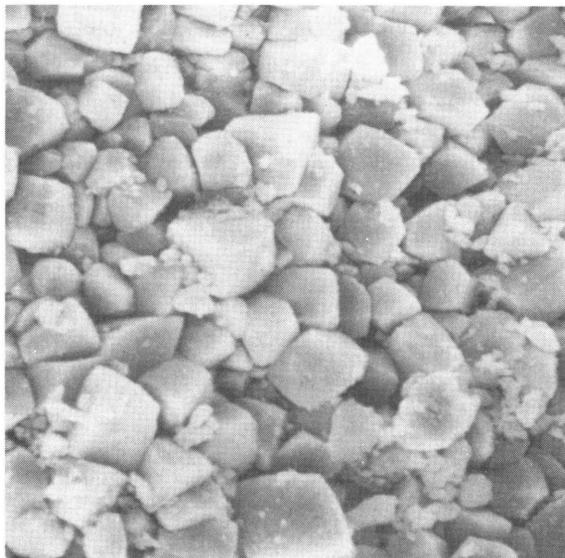


Fig.6 - pierre non traitée

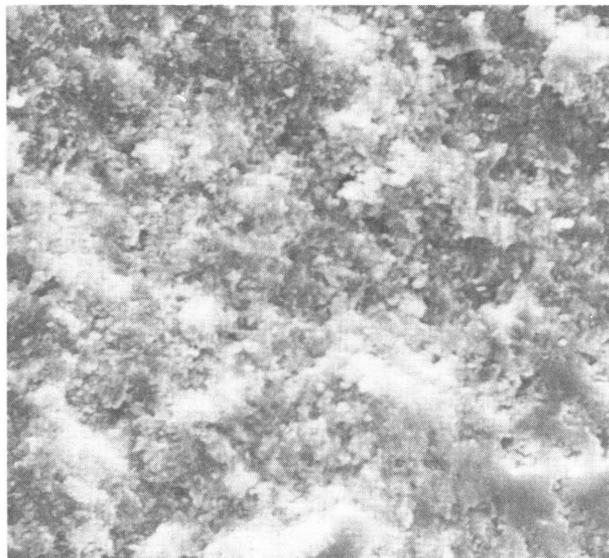


Fig.7 - pierre traitée

Fig. 6 et 7 - Coupes d'un calcaire de Vassens (France) observées au microscope électronique à balayage (G = 1400).

D'après [120].

### III-3.3.2. - observation au microscope électronique à balayage

Les photos (Fig. 6 et 7) permettent de comparer l'aspect des coupes de calcaire de Vassens non traité et traité (grossissement 1400) = les cristaux de carbonate de calcium très visibles dans la pierre non traitée, sont totalement enrobés dans la pierre traitée.

### III-4. Conclusion

La méthode qui vient d'être décrite a déjà été utilisée sur des objets de petites dimensions (par exemple, ceux des Fig. 8 et 9).

Sous réserves de contrôles préliminaires, elle peut être employée, dès maintenant, à la consolidation de pièces plus importantes placées en extérieur (statues grandeur humaine ...). Les contrôles, dont on a donné les principaux résultats, montrent que le traitement apporte de grandes améliorations, aussi bien sur le plan de la résistance mécanique que sur celui de la limitation de la migration de l'eau dans la pierre.

Ce dernier point est important car on sait que l'eau est la cause de bien des altérations de la pierre : cristallisation des sels solubles sur les surfaces externes, attaque par des agents agressifs de la pollution atmosphérique, éclatements en période de gel, etc...

Les améliorations apportées par le traitement sont d'autant plus grandes que la pierre sera rendue plus homogène. La consolidation en profondeur est un facteur primordial pour obtenir un bon vieillissement du matériau traité, car elle supprime les causes principales de l'altération de la pierre.

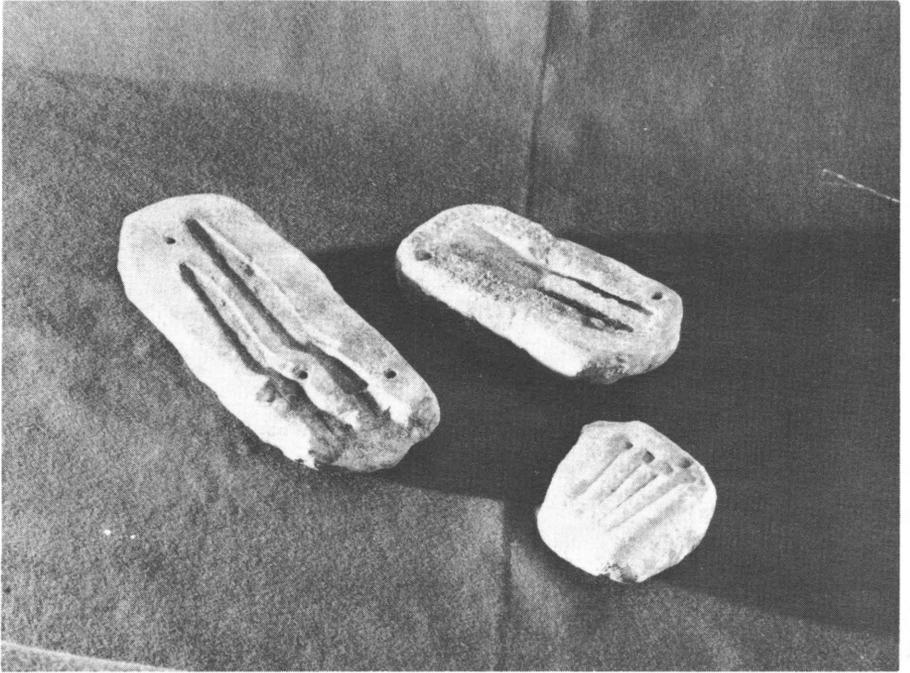


Fig. 8 - Moules palafittes en molasse, après consolidation -  
(Musée de Chambéry - France).

D'après [121].



Fig.9 - Chapiteaux en calcaire.

à gauche : chapiteau non traité - à droite chapiteau traité.

D'après [121].

#### IV - CONSOLIDATION DES BOIS SECS

##### IV-1. Introduction

Il est souhaitable de limiter au maximum l'intervention sur un objet d'art; toutefois, lorsque son état d'altération lui fait perdre sa fonction culturelle, il faut envisager sa consolidation ou sa restauration.

Dans la mise en oeuvre d'une méthode de consolidation des bois secs, il faut distinguer les bois secs non revêtus des bois dorés et polychromés. Les objets d'art de cette nature sont tous soumis aux ravages causés par les insectes xylophages. Mais les polychromies anciennes souffrent particulièrement des variations climatiques ambiantes. Les effets répétés de la contraction et du gonflement de leur support - le bois - se traduisent par le fendillement et l'écaillage de la préparation et de la couche picturale.

Le problème du traitement des polychromies est rendu délicat par le grand nombre des paramètres qui interviennent dans le choix d'un procédé de consolidation du bois : essences de bois, types de préparation, liants, pigments, vernis ...

Les études mentionnées plus haut sur le "bois plastique" avaient pour fin d'obtenir la plus grande absorption possible de matière imprégnante : les buts industriels étant d'accroître le rapport résistance/poids pour la résistance à la compression et à la flexion.

L'augmentation de ces propriétés semble être proportionnelle à l'augmentation de la densité.

Dans le cas de la consolidation d'objets d'art, le matériau à consolider est très souvent différent . Il est creusé de nombreuses galeries d'insectes, avec un bois réduit parfois à l'état pulvérulent. La première fonction du traitement est alors celle d'un sauvetage.

Les résultats obtenus sur l'amélioration des propriétés mécaniques de bois sains restent valables, mais les buts primordiaux sont autres.

Les critères du choix d'une méthode de conservation des bois ont été envisagés au premier chapitre. Dans le cas de la consolidation par une substance radiodurcissable, ils se traduisent principalement par les propriétés suivantes :

- une évaporation superficielle doit intervenir durant la polymérisation pour préserver l'aspect de surface
- le bois doit être stabilisé pour résister à l'humidité, aux intempéries et aux organismes vivants
- il doit être consolidé en grande profondeur et d'une manière homogène.

#### IV-2. Les phases du traitement

Les phases du traitement ont été décrites pour la consolidation de la pierre (p. 57 et NADAILLAC [118]).

Le même principe d'imprégnation sous vide a été appliqué aux bois anciens. Mais les différences résident dans la durée du mode opératoire.

##### IV-2.1. imprégnation

La pénétration d'un monomère ou d'une résine au coeur d'un matériau pierreux, même altéré, nécessite généralement une imprégnation de longue durée sous pression.

Un bois très altéré sera saturé de mélange imprégnant beaucoup plus rapidement. De plus, le temps de contact entre des revêtements du bois et le monomère doit être limité pour éviter entre autres les conséquences de l'effet "solvant" du monomère sur les polychromies

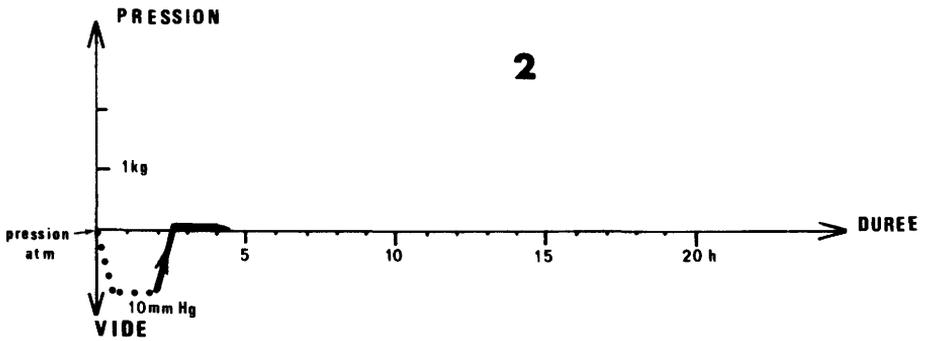
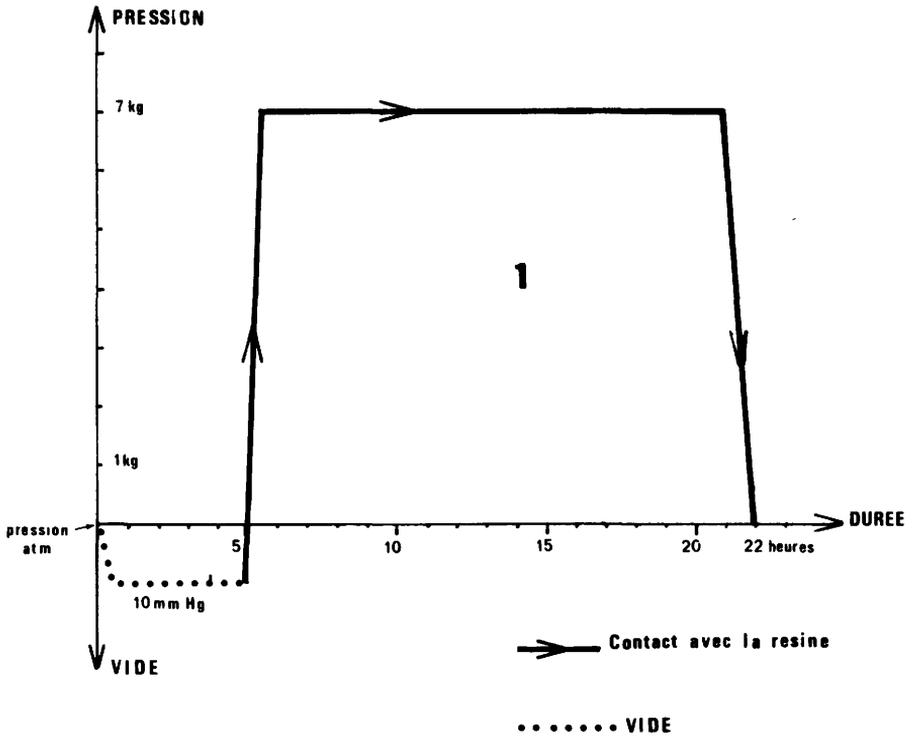


Fig.10 - Cycles d'imprégnation.

D'après [121]

La Fig.10 représente deux cycles d'imprégnation appliqués au traitement d'un bloc de calcaire ancien et à la consolidation d'une sculpture du XVI<sup>e</sup> siècle sur bois.

Légende de la Fig. 10 :

- 1- Bloc de calcaire de 102 kg  
Taux d'imprégnation par une résine styrène/polyester : 11 %  
en poids [121]
- 2- Sculpture du XVI<sup>e</sup> s "Homme Sauvage" du Musée Dauphinois  
de Grenoble - (France) - (voir Fig.11)  
Taux d'imprégnation par une résine styrène/polyester : 164 %  
en poids [121].

Les remarques faites pour les conditions de trempage de la pierre, immédiatement après imprégnation par une résine styrène/polyester, restent valables pour le bois.

#### IV-2.2. irradiation

Les avantages du rayonnement  $\gamma$  sur les méthodes traditionnelles sont multiples lors du durcissement du monomère ou de la résine. Son emploi comme agent durcisseur permet en effet de bien contrôler la réaction de polymérisation:

- l'élévation de la température au sein d'un objet d'art doit être limitée et peut être contrôlée = il suffit de soumettre l'objet à un débit de dose convenable; il est possible de faire varier ce débit de dose en éloignant par exemple l'objet de la source de rayonnement.
- le débit de dose peut être, par ailleurs, adapté au degré d'évaporation que l'on désire obtenir pour conserver l'aspect de surface initial. Le faible poids moléculaire des monomères utilisables, la présence de solvant dans les résines styrène/polyester offrent un éventail suffisamment large pour répondre à cette exigence.

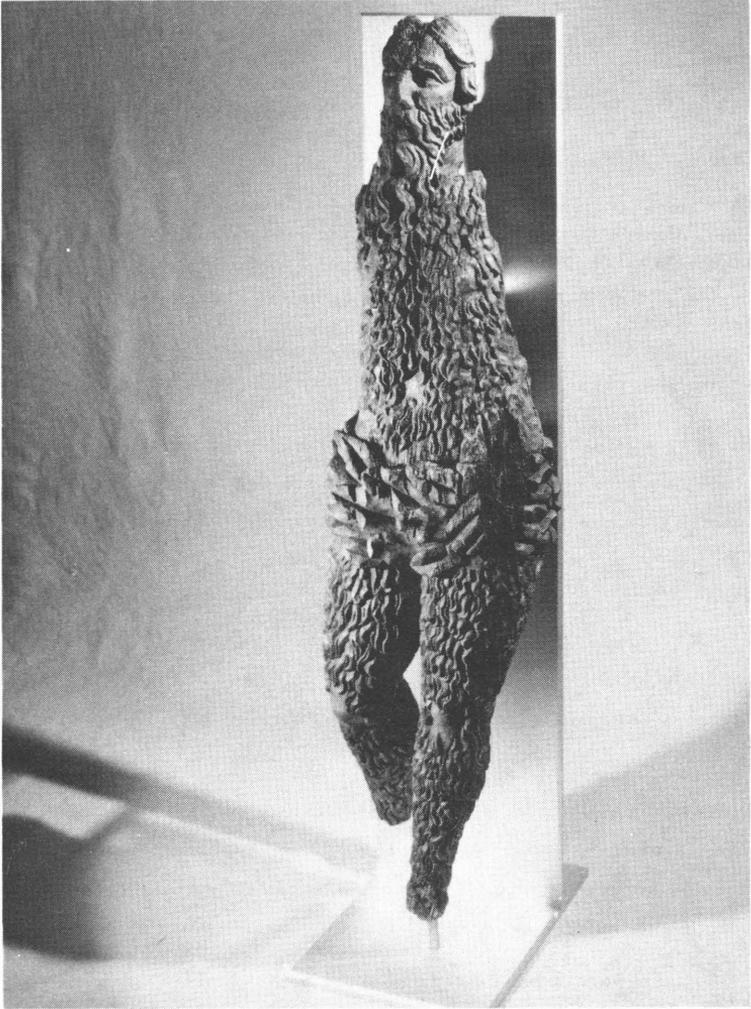


Fig.11 - Sculpture du XVI<sup>e</sup> s. "Homme Sauvage" appartenant au Musée Dauphinois de Grenoble (France).

Imprégnation et consolidation par irradiation  $\gamma$ .

D'après [121].

(Photographie: Techniques des Fluides)

- le pouvoir de pénétration du rayonnement  $\gamma$  lui offre la possibilité de durcir en profondeur et de façon homogène un objet de taille importante : statue de grandeur humaine par exemple. On évite ainsi:
- de faire subir les méfaits d'une température trop élevée lors de polymérisations thermocatalytiques.
- une consolidation inhomogène, voire superficielle avec un mélange qui contient son durcisseur chimique.
- une migration de la résine vers la surface durant l'évaporation, dans le cas du durcissement d'un polymère par évaporation de solvant.

Les doses de rayonnement nécessaires à la polymérisation des méthacrylates et résines employées [121] sont de l'ordre de 2 M Rad. Elles sont délivrées avec des débits de dose variables selon la taille et l'altération des objets à consolider = 20 à 100 kRad/h.

#### IV-2.3. une installation de traitement

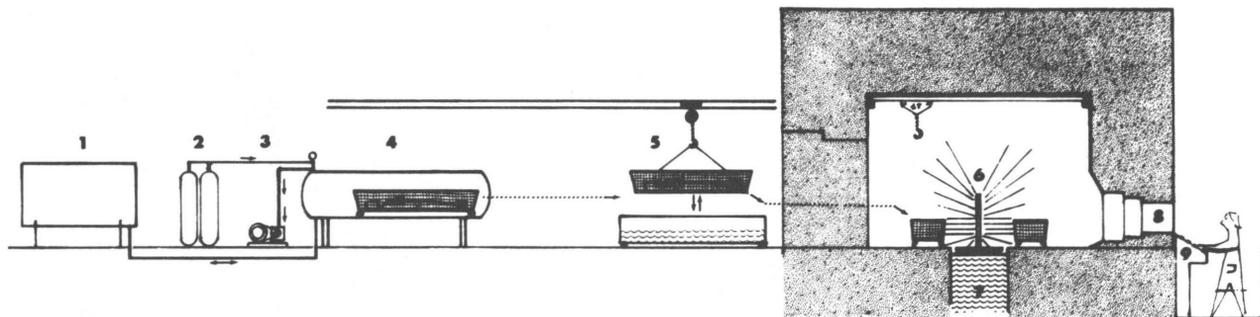
Les installations d'imprégnation et d'irradiation correspondant au diagramme de traitement sont représentées dans la Fig.12.

Le schéma correspond aux conditions de traitement mises au point par NADAILLAC [48].

On peut remarquer que dans ces installations, des objets de grandes dimensions peuvent être traités; leur taille n'est limitée que par les dimensions de la cuve d'imprégnation.

- longueur de la cuve d'imprégnation = 3 m
- diamètre = 0,8 m
- dimensions de la chambre d'irradiation = 4 x 4 x 3 m

La source de Co 60 utilisée dans cette chambre (100000 Ci) permet de délivrer des débits de dose maxima d'environ 600 kRad/h.



- 1 Stock Monomeres - Resines
- 2 Azote
- 3 Pompe à vide
- 4 Cuve d'impregnation
- 5 Trompage
- 6 Cellule d'irradiation
- 7 Piscine
- 8 Fenêtre
- 9 Tableau de commande

## Installation de traitement d'Objets d'Art Impregnation - Irradiation

Fig.12 - Une installation de traitement - D'après [121].

#### IV-3. Application au traitement de bois anciens

##### IV-3.1. durcissement d'un bois sain ancien

Le méthacrylate de méthyle a été utilisé [48] pour transformer en bois-plastique le parquet de l'ancien Hôtel de Ville de Grenoble - (France) attribué à un ébéniste du XVIII<sup>e</sup> s, J.F. HACHE - Fig.13.

L'épaisseur de la mosaïque était passée aux endroits les plus atteints de 9mm à 3mm, le durcissement par le méthacrylate de méthyle a pu en ralentir l'usure à temps.

Ce parquet représente 4500 kg après traitement, de bois très divers assemblés sous forme de 600 panneaux carrés de 45cm de côté. L'assemblage complet représente une surface de 155m<sup>2</sup>.

La consolidation de ce bois relativement sain a permis d'en sauvegarder l'aspect extérieur. (voir Fig.13) .

##### IV-3.2. consolidation par le méthacrylate de méthyle de bois anciens altérés

Les résultats escomptés sur des bois très atteints, creusés de nombreuses galeries d'insectes n'ont pas été concluants. La tension de vapeur trop élevée du méthacrylate de méthyle et sa viscosité trop faible entraînent pendant la polymérisation un drainage des parties les plus poreuses et les plus fragiles, aboutissant paradoxalement au renforcement des parties les plus solides au détriment des cavités. De plus, le méthacrylate de méthyle est un bon solvant des polychromies [48] - (voir Fig.14) .

##### IV-3.3. consolidation par une résine styrène/polyester de bois secs et anciens

L'utilisation d'un mélange de styrène et polyester, assez fluide pour donner une bonne pénétration, mais avec une tension de vapeur beaucoup plus faible, pallie en partie les inconvénients du méthacrylate de méthyle.

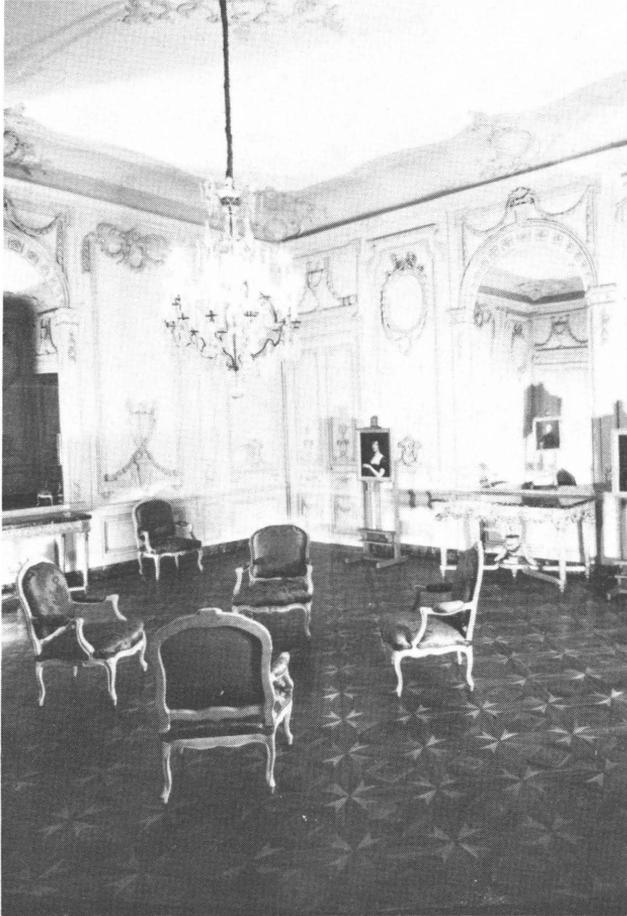


Fig.13 - Parquet du Musée STENDHAL - (ancien Hôtel de Ville de Grenoble (France)

Durci par imprégnation et irradiation  $\gamma$  [121].

Les résultats obtenus sur des bois très altérés ont permis de constater l'accroissement de la résistance de l'ensemble bois - polymère, l'arrêt de toute attaque biologique et l'aspect naturel du revêtement de surface. (voir Fig.15 et 16).

De nombreuses autres sculptures sur bois non revêtus ont été consolidées ainsi [121]. Cette méthode se révèle aussi très efficace pour le sauvetage du mobilier ancien non restaurable par des ébénistes; elle trouve son emploi dans la consolidation du matériel ethnographique destiné à figurer dans des expositions itinérantes.

Toutefois, l'application à des pièces polychromées n'a été effectuée qu'à titre expérimental. Les meilleurs résultats concernant l'innocuité du mélange imprégnant vis à vis des revêtements sont obtenus avec des résines à solvants benzéniques [121].

#### IV-4. Choix du produit d'imprégnation

Les résultats obtenus conduisent à définir les caractéristiques idéales que doivent posséder un monomère et son produit de polymérisation.

##### IV-4.1. Qualités du monomère ou de la résine

- sa viscosité de 10 à 50 centipoises doit être faible pour permettre une pénétration rapide au coeur de l'objet
- il ne doit pas attaquer les constituants des polychromies, ni faire gonfler la couche picturale
- sa tension de vapeur doit être assez faible pour éviter le drainage des monomères trop volatils
- son prix doit être suffisamment bas pour permettre un traitement de grandes quantités d'objets.

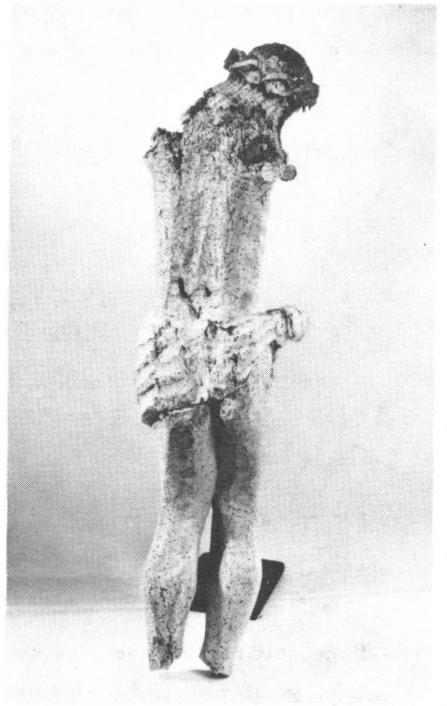


Fig.14 - Vues de face et de dos d'un Christ d'Aubenas - Ardèche (France)

Consolidé par imprégnation et irradiation  $\gamma$ .

#### IV-4.2. Qualités du polymère

Les propriétés du polymère ou du combiné "bois-polymère" doivent répondre aux caractéristiques suivantes :

- la dose de polymérisation, suffisante pour assurer la stérilisation ne doit pas dépasser 2 à 3 MRad
- l'insensibilité à l'eau du polymère doit être vérifiée dans des conditions variables d'humidité et température
- la "réversibilité" de l'introduction du polymère doit être assurée par un solvant inoffensif pour les revêtements du bois
- sa résistance mécanique doit permettre la consolidation d'un bois très atteint
- une certaine souplesse doit aussi lui permettre d'atténuer les conséquences des chocs thermiques
- les variations dimensionnelles lors du traitement doivent être de l'ordre du % : elles restent ainsi inférieures aux variations naturelles dues aux changements de la température et du degré hygrométrique de l'air ambiant
- ses propriétés optiques doivent le rendre transparent et incolore, inerte aux ultra-violets
- enfin, le vieillissement ne doit pas altérer ses propriétés optiques et mécaniques.

L'utilisation de résines styrène/polyester à base de phtalates et d'isophtalates répond favorablement à la plupart de ces critères :

Pour la résine = la viscosité, la tension de vapeur et le prix sont adaptables à un grand nombre de cas posés par des bois de natures différentes, revêtus ou non. L'action d'un solvant benzénique (le styrène par exemple) semble avoir une action minimum sur les constituants des polychromies envisagées à titre expérimental.



Fig.15 - Vierge du XIV<sup>e</sup> s provenant de Flavigny-sur-Ozerain  
en Côte d'Or (France) - Collection particulière.

Traitement par imprégnation et irradiation  $\gamma$ .  
D'après [121] .

En ce qui concerne les propriétés du matériau consolidé : la dose nécessaire à la polymérisation, l'augmentation des propriétés mécaniques, les faibles variations dimensionnelles constatées, les vieillissements comparatifs observés jusqu'à ce jour permettent d'employer favorablement ce type de résine.

Cependant, la réversibilité de l'introduction d'une résine thermoscurcissable apparaît théoriquement impossible : on ne peut dissoudre le polymère dans son "monomère" ou les solvants usuels.

Une telle précaution devrait, théoriquement, laisser la possibilité ultérieure d'extraire la totalité d'une substance étrangère au bois et d'obtenir ainsi une réversibilité totale. Mais cette notion est actuellement controversée et le choix dépend finalement du conservateur de l'objet d'art.

Les traitements de consolidation des bois revêtus, à cause de leur durée et de leur prix, sont aujourd'hui réservés aux pièces exceptionnelles.

Le sauvetage d'un grand nombre de sculptures par les restaurations conventionnelles apparaît, faute de moyens, irréalisable.

La dispersion, le moindre renom d'un grand nombre de bois sculptés dont l'intérêt apparaît secondaire, les rendent vulnérables.

Ils n'en constituent pas moins, globalement, la richesse d'un patrimoine artistique.

Les possibilités du procédé ne s'arrêtant pas aux pierres et bois, son application à la consolidation des plâtres (ébauches d'artistes), poteries, fossiles, os ... et tous matériaux poreux dont l'intérêt ne semble pas justifier des méthodes de restauration traditionnelles longues et coûteuses peut être envisagée.

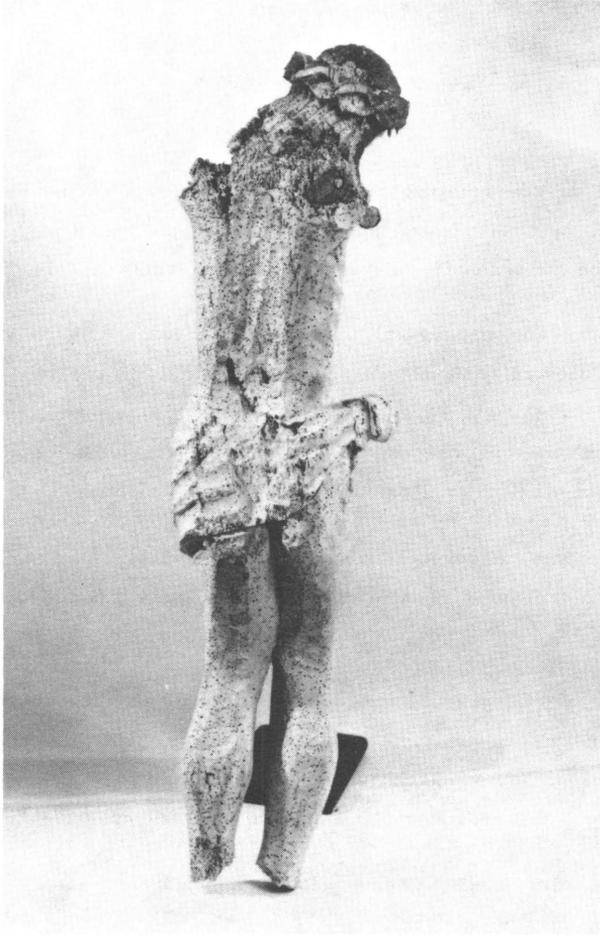


Fig.16 - Saint Paul de Vaux-Saules en Côte d'Or.  
Musée de Dijon (France)

Consolidé par imprégnation et irradiation  $\gamma$ .

L'urgence et l'ampleur des sauvetages à réaliser, le phénomène général de l'accélération des dégradations démontrent l'intérêt d'un procédé qui allie la rapidité du traitement et un type de consolidation bien moins onéreux que ceux des méthodes traditionnelles.

## V - CONSOLIDATION DES BOIS GORGES D'EAU

### V-1. Possibilités du rayonnement gamma

Les avantages de l'utilisation du rayonnement  $\gamma$  pour la consolidation des bois gorgés d'eau sont nombreux :

- Les coefficients de diffusion des monomères, à cause de leur faible poids moléculaire, sont plus grands que ceux des polyéthylène-glycols (PEG). Selon la loi de GRAHAM [61] et les lois de vitesse de diffusion, Munnikendam [59] admet que le temps de diffusion d'une substance qui pénètre un bois gorgé d'eau est proportionnel à sa masse moléculaire. Le méthanol diffuse 120 fois plus vite et le méthacrylate de méthyle 40 fois plus vite que le PEG 4000.

- Les coefficients de diffusion des solvants et des monomères légers sont comparables à ceux de l'eau.

- Les phénomènes de contraction lors du séchage sont dus à la diminution de la résistance du bois par effondrement de la paroi cellulaire. La petite taille des molécules de monomère leur permet de pénétrer dans les espaces intermicellaires de la paroi cellulaire. TARKOW [122] a montré que dans un épicéa sitka, la taille limite correspondait à celle des molécules du PEG 3000.

- Le polymère formé est une substance dure contrairement au PEG de poids moléculaire voisin de 1000.

- Le polymère est obtenu sans l'addition et sans les inconvénients d'un catalyseur (cas de l'Arigal C).

- Le pouvoir de pénétration du rayonnement  $\gamma$  offre la possibilité d'initier la réaction de polymérisation de façon homogène.

- Les doses nécessaires à la polymérisation sont des doses insecticides, fongicides et bactéricides. La dégradation causée au bois [106], par ces doses de rayonnement, est négligeable devant l'augmentation des propriétés mécaniques conférées par le polymère.

## V-2. Procédés de consolidation

Les traitements de consolidation des bois gorgés d'eau par rayonnement  $\gamma$  sont généralement décomposés en deux étapes :

- remplacement de l'eau
- durcissement du matériau substitué par irradiation  $\gamma$ .

Les méthodes se différencient principalement par la nature du procédé utilisé dans la première phase.

### V-2.1. Imprégnation par émulsion aqueuse

Les premières expériences ont été pratiquées par MUHLETHALER et GUICHEN [124] au Musée National Suisse de Zurich et à l'Ecole Polytechnique de Lausanne.

Le but du traitement était de remplacer l'eau contenue dans le bois par une émulsion aqueuse d'un monomère et de polymériser ensuite sous rayonnement  $\gamma$ .

Le procédé offre, en principe, deux avantages :

- un seul bain d'imprégnation suffit
- le mélange utilisé à base de styrène polymérise en émulsion, dans les conditions de cette expérience, cent fois plus rapidement que le styrène pur.

	monomère	émulsifiant
eau	styrène méthacrylate de méthyle acrylate de méthyle	stéarate de sodium stéaryl alcool - sulfonate lux lauryl sulfate de sodium fettalcool sulfonate émulsifiants SANDOZ (6645, 6446, 6453)

Tableau XV - Emulsions aqueuses radiodurcissables -

D'après MUHLETHALER [124].

Une émulsion s'est révélée stable:

eau	46 %
styrène	40 %
émulsifiant 6445	10 %
C Cl <sub>4</sub>	4 %

La polymérisation a été effectuée à l'aide d'une source de Cobalt 60 délivrant un débit de dose de 0,6 M Rad/h. La polymérisation d'une émulsion pure donne d'excellents résultats sur la stabilité dimensionnelle, mais l'application de cette émulsion à des blocs de frene gorgés d'eau s'est révélée négative.

La stabilité de l'émulsion ne dépasse pas quatre jours, elle ne semble pas pouvoir pénétrer profondément dans le bois en peu de temps. Seule, la surface est consolidée et lors du séchage ultérieur, le coeur de l'échantillon se contracte, entraînant le fendillement du bois.

#### V-2.2. Imprégnation par échange eau-monomère

Cette étude a été essayée par MUNNIKENDAM [59]. Elle consiste à utiliser un monomère soluble dans l'eau et polymérisable sous rayonnement  $\gamma$  : le méthacrylate de 2 - hydroxy-éthyl peut ainsi ne nécessiter qu'un seul processus d'échange.

Ce composé s'est révélé néfaste : à cause de ses fonctions glycol, il doit probablement jouer comme un agent de gonflement; il provoque craquelures et distorsion durant la consolidation.

#### V-2.3. Imprégnation par échange eau-solvant-monomère méthode des bains successifs

Les expériences ont été menées par GUICHEN [124], MUNNIKENDAM [59] et NADAILLAC [125].

Dans le cas où le monomère n'est pas soluble dans l'eau, la méthode consiste à plonger les objets dans des bains successifs de solvant pur jusqu'à remplacement quasi-total de l'eau par le solvant; le procédé est répété pour substituer le monomère au solvant.

V.2.3.1. - MUNNIKENDAM a étudié l'action d'un couple méthanol - méthacrylate de méthyle sur de petits échantillons (quelques cm<sup>3</sup>) de bois d'une fouille effectuée dans le Zuyderzee. Le temps requis pour chaque échange dure 3 à 5 jours.

Le séchage à l'air d'un échantillon humide provoque des contractions : tangentielle de 15,2 %  
radiale de 8,1 %

Après traitement, les variations dimensionnelles ne dépendent plus que du taux d'imprégnation. La polymérisation a été réalisée avec une source de Cobalt 60. Débit de dose 0,1 MRad/h  
Dose : 5 MRad. (voir Fig. 17).

Le taux d'imprégnation en méthacrylate de méthyle est calculé par rapport au bois humide dont le taux d'imprégnation en eau est de 100 %.

V-2.3.2. - GUICHEN et MUHLETHALER [124] ont observé les résultats donnés par les couples d'imprégnation  
méthanol - styrène  
éthanol - méthacrylate de méthyle  
éthanol - acrylate de méthyle.

Les essais pratiqués sur de petits échantillons (8 cm<sup>3</sup> environ) ont permis de vérifier les vitesses d'échange dans des bois de frêne et sapin.

L'échange méthanol-styrène avec polymérisation accélérée par du tétrachlorure de carbone a donné les résultats les plus reproductibles.

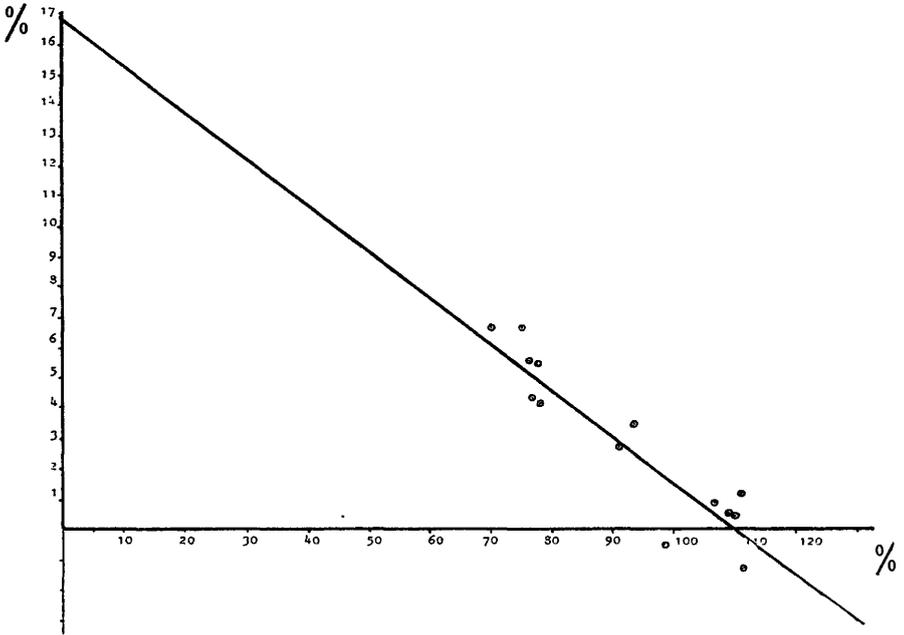


Fig.17 - Taux de variation tangentielle résiduelle en fonction du taux d'impregnation en méthacrylate de méthyle -  
D'après MUNNIKENDAM [59]

Le méthacrylate de méthyle ne donne pas de résultats constants; de plus, des fentes apparaissent. Le système eau-éthanol-acrylate de méthyle s'est révélé négatif pour frêne et sapin.

V-2.3.3. - NADAILLAC [125] a étudié trois couples solvant - monomère :  
acétone-méthacrylate de méthyle  
éthanol-méthacrylate de méthyle  
acétone-styrène/polyester

sur des échantillons provenant du lac du Bourget (France).

acétone-méthacrylate de méthyle : l'aspect final est satisfaisant, mais les variations dimensionnelles supérieures à 5 % sont trop importantes.

éthanol-méthacrylate de méthyle : les variations dimensionnelles sont moindres, mais dans un échantillon contenant coeur et aubier, il est encore possible d'améliorer la dureté de l'aubier.

acétone-styrène/polyester : les variations dimensionnelles sont inférieures à 5 %. Après traitement, le coeur est aussi dur que l'aubier. La couleur du bois après traitement est plus foncée qu'avec la méthode au méthacrylate de méthyle. Des objets chalcolithiques ont été ainsi traités : ils proviennent du lac de Charavines (Isère - France) - (voir Fig. 18) et du lac du Bourget (Savoie - France). Leur stabilité depuis trois ans est bonne.

Parmi l'éventail des systèmes eau-solvant-monomère, ceux qui emploient le styrène semblent adéquats pour certaines natures de bois, mais la méthode des bains successifs combinée à la polymérisation de monomère sous rayonnement  $\gamma$  comporte certains inconvénients :

- durée du traitement due à la longueur du processus d'échange : un mois pour des objets de 500 g.

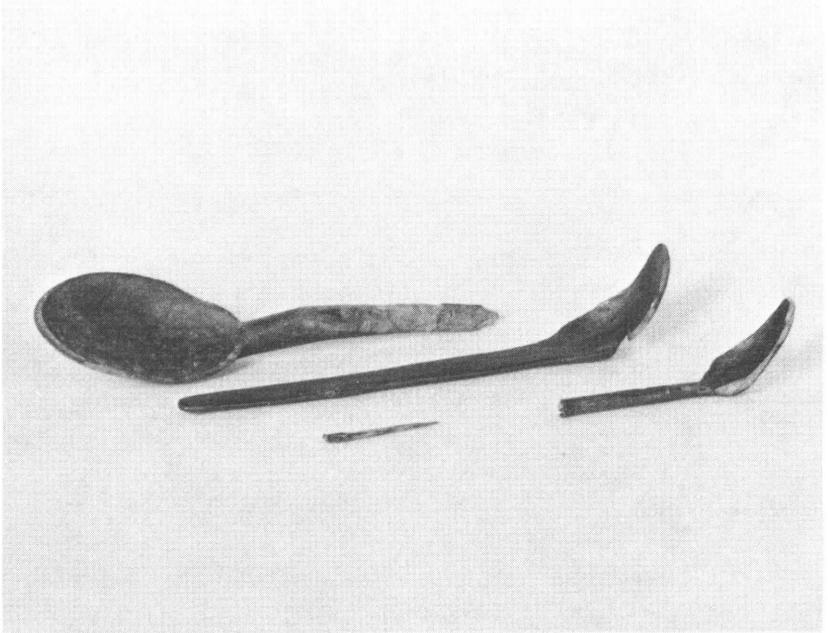


Fig.18 - Bois gorgés d'eau, après consolidation, provenant du lac de Charavines (Isère - France).

Louche médiévale, cuillères et aiguille chalcolithiques (2500 ans avant J.C.)

D'après [121].

- dépense de solvants et monomères : cinq changements de baignoires pour les mêmes 500 g.

#### V-2.4. Imprégnation par extraction liquide-liquide

##### V-2.4.1. - système ternaire

Pour pallier ces inconvénients NADAILLAC et DETANGER [125] ont rendu le monomère artificiellement soluble dans l'eau par addition d'une petite quantité de solvant.

Le système en présence d'eau se sépare, dans un décanteur extérieur, en deux phases : l'une contient la quasi totalité de l'eau, un peu de solvant et des traces de monomère, l'autre ne contient presque pas d'eau et peut être recyclée.

Les conditions théoriques d'extraction sont précisées par des diagrammes ternaires qui permettent d'obtenir des données chiffrées pour :

- éliminer la majeure partie de l'eau
- la remplacer simultanément par le couple solvant - monomère
- obtenir les proportions adéquates de ce couple pour que le polymère ait de bonnes propriétés mécaniques.

Les systèmes eau - éthanol - styrène

eau - méthanol - styrène

eau - acétone - styrène

eau - acétone - styrène/polyester

eau - éthanol - méthacrylate de méthyle

eau - acétone - méthacrylate de méthyle

ont été étudiés.

Les polymères obtenus en fin de traitement ont des propriétés mécaniques valables.

Le plus homogène et le plus stable a été le mélange éthanol - méthacrylate de méthyle qui, même avec 10 % d'alcool inclus, ne voit pas son poids varier de plus de 1 % après trois mois d'étuve à 65° C.

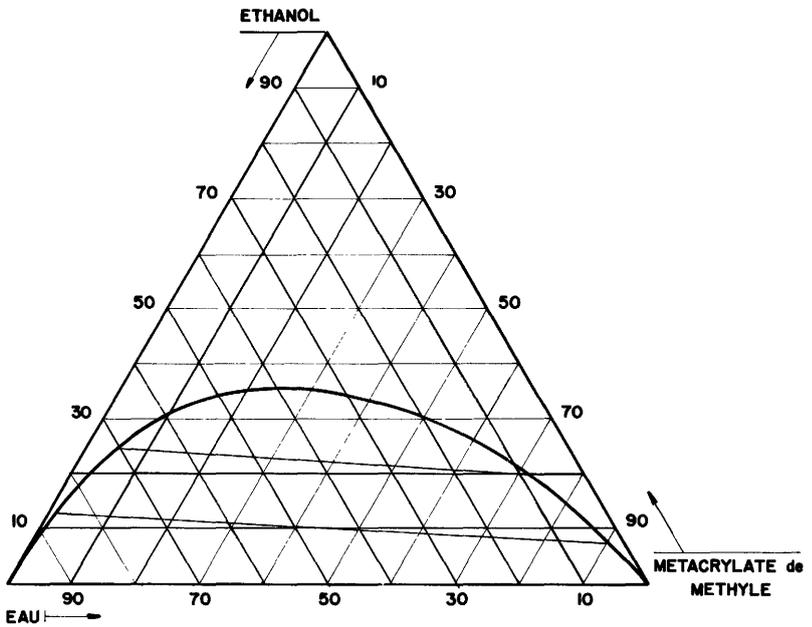


Fig.19 - Diagramme de solubilité eau-éthanol-méthacrylate de méthyle.

D'après NADAILLAC [125].

V-2.4.2. - application

Une installation pilote (voir Fig.20) pour traiter en continu des objets de quelques litres a fonctionné [125]; le recyclage de la phase contenant le monomère permet une importante économie de matière. Les pertes en solvant dans la phase rejetée sont raisonnables. La phase recyclée est riche en monomère; sa teneur en solvant est compatible avec les résultats obtenus sur le comportement de polymères de même composition.

	composition initiale	phase aqueuse rejetée	phase organique recyclée
méthacrylate de méthyle	85 %	traces	87 %
éthanol	10 %	15 %	10 %
eau	5 %	84 %	traces

Tableau XVI - Compositions pondérales des phases rejetée et recyclée. Extraction liquide - liquide automatique de l'eau de bois gorgés d'eau.

D'après NADAILLAC [125].

Des échantillons de quelques litres de bois gorgés d'eau provenant du lac du Bourget (France) ont été traités par ce procédé. Les résultats concernant l'extraction de l'eau ont été jugés satisfaisants. Après polymérisation, l'aspect du bois est jugé convenable. Mais les variations dimensionnelles maximales pour ce type de bois, de l'ordre de 5 %, sont encore trop élevées. Des modifications des conditions opératoires devraient permettre de parvenir à de meilleurs résultats.

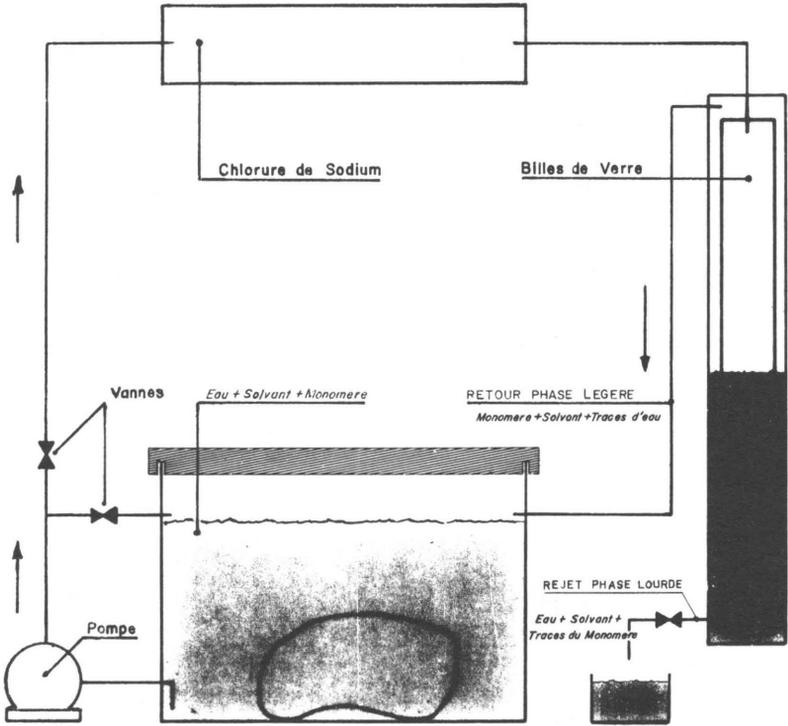


Fig.20 - Installation pilote pour traiter en continu des objets de quelques litres.

D'après NADAILLAC [125].

**CONCLUSION**

---



Le panorama des techniques exposées dans les pages précédentes permet de situer l'apport des méthodes nucléaires et d'en mieux faire saisir la complémentarité avec les procédés classiques. Les résultats obtenus, pour partiels qu'ils soient encore, sont cependant suffisamment probants pour que l'on puisse considérer que s'il y a, dans ce domaine, un très important travail à poursuivre, il reste également un espoir sérieux de disposer à moyen terme d'une méthode très générale et d'emploi sûr.

Ainsi faudra-t-il, après la poursuite d'études systématiques sur les divers imprégnants utilisables : monomères, résines ou mélanges de plusieurs d'entre eux, établir les critères de choix qui permettront, à coup sûr, de dire que tel objet relève de tel composé, ainsi que les conditions de mise en oeuvre ( durée d'imprégnation, cinétique de polymérisation, donc programme d'irradiation ... ). Il faudra, de même, vérifier dans chacun des cas, que la restauration de l'oeuvre sera encore possible ensuite avec les méthodes connues des restaurateurs et, si ce n'était pas le cas, définir les nouvelles techniques correspondantes.

Si le problème est, en définitive, relativement simple dans le cas du traitement d'objets en bois non décoré ou simplement doré il n'en est, certes, pas de même avec les bois polychromés. Dans ce cas la difficulté fondamentale réside dans le comportement de cette polychromie lors du passage de l'objet dans le bain de matière plastique qui se comporte, en général, comme un excellent solvant. Il faudra donc disposer, là aussi, de critères sûrs permettant de définir la nature et la composition des polychromies afin d'acquérir, a priori, l'assurance que l'opération d'imprégnation n'entraînera aucune altération des couches chromatiques. La voie est, certes, déjà bien ouverte et les essais actuels sont suffisamment concluants pour que l'on puisse avoir l'assurance de trouver pratiquement pour

chaque cas une solution convenable. Il faudra cependant de très nombreux essais, donc beaucoup de temps encore pour disposer du " catalogue " qui rendra possible le traitement avec une procédure quasi routinière. Cette condition est fondamentale pour la validité de la méthode qui se doit, pour atteindre son but et devenir réellement utilisable, d'être de faible coût et ne saurait donc s'accommoder d'un grand nombre d'essais préalables relativement empiriques. Par contre, il serait impensable que cette exploitation visée de quasi routine s'accompagne, de quelque manière que ce soit, d'une réduction des exigences fondamentales de qualité et de respect total de l'oeuvre que l'on est en droit d'exiger d'une méthode de conservation.

Dans un autre ordre d'idées, les bois gorgés d'eau posent également le problème de la substitution du monomère à l'eau d'imprégnation, puis de la polymérisation sans qu'aucune variation dimensionnelle ou d'aspect n'apparaisse. Là aussi, malgré les résultats satisfaisants, et parfois spectaculaires, obtenus jusqu'à présent, de très nombreux essais systématiques restent à effectuer.

Enfin, le problème le plus délicat restera sans doute longtemps encore celui que représente l'exigence (parfaitement justifiée !) des conservateurs de disposer d'une méthode de conservation sûre, garantie, donc ayant recours à des matériaux capables de résister à toutes les agressions classiques, qu'elles soient cryptogamiques, bactériennes, éoliennes, hydrauliques, climatiques, et cependant réversible . La réversibilité réside dans la possibilité de ramener rigoureusement l'objet traité à son état antérieur afin de pouvoir pallier toute évolution néfaste des produits injectés ou encore pour permettre, plus tard, l'utilisation d'une méthode nouvelle présentant de meilleures performances. Cette obligation de " retour " constitue certainement le problème le plus difficile à résoudre en matière de conservation.

Si l'on peut, en effet, concevoir des cas où cette réversibilité pourra être obtenue correctement, il est cependant à craindre qu'elle ne pourra être, ni systématiquement, ni totalement, obtenue. Il sera donc nécessaire d'aborder différemment le problème du renforcement d'une oeuvre dont l'état conduirait à une destruction certaine à court terme et celui d'une pièce encore robuste dont la consolidation est seulement souhaitable.

Cette énumération, non exhaustive des problèmes qui restent à résoudre, montre la nécessité de poursuivre de longs et patients travaux pour élucider chacune des difficultés et disposer de la méthode quasi universelle dont on peut rêver.

Il n'en demeure pas moins que dès à présent, en l'état, les techniques nucléaires permettent d'améliorer à la fois la connaissance des oeuvres d'art et la conservation des objets en bois, en pierre ou en bois gorgés d'eau. La possibilité d'envisager le traitement, dans d'excellentes conditions de sécurité et de prix de revient, d'un grand nombre d'objet d'art qui eussent, autrefois, été plus ou moins abandonnés à leur destinée, ouvre incontestablement de nouveaux horizons aux conservateurs.

Sans être en aucune façon la panacée, ce procédé doit pouvoir trouver une place de choix parmi les méthodes classiques qu'il ne détrônera certainement pas, pas plus d'ailleurs qu'il ne remplacera le patient et laborieux travail des restaurateurs appliqués à faire survivre ou parfois revivre les témoignages du passé. Par contre, il contribuera certainement à maintenir plus longtemps l'intégrité d'un patrimoine culturel que l'accroissement des agressions extérieures dues en particulier à la pollution accrue menace de plus en plus fortement.

Par un juste retour des choses, les techniques les plus avancées dont on dispose aujourd'hui, contribueront ainsi à sauvegarder des oeuvres que l'évolution difficilement contrôlable du progrès menace par ailleurs. Puisse cette constatation rassurante être toujours vérifiée tout au long des relations de l'art et de la technique.

BIBLIOGRAPHIE

- [ 1 ] FLIEDER F. La conservation des documents graphiques - Recherches expérimentales - Eyrolles, Paris (1969) 87-108
- [ 2 ] PLENDERLEITH H.S. - La conservation des antiquités et des oeuvres d'art - Eyrolles, Paris (1966) 65-78
- [ 3 ] Bibliothèque LENINE - Gigiena i restavracija bibliotecnyh fondov - methodiceskoe posobie (l'hygiène et la restauration des fonds de bibliothèque - manuel méthodique) Moskva, Izdatelstvo Kniga (1964)
- [ 4 ] FLIEDER F., BOISSONAT J. Etude des propriétés fongicides de l'oxyde d'éthyle - Bulletin d'information sur la pathologie des documents et leur protection aux Archives de France - Paris, n° 1 (1961) 60-68
- [ 5 ] PERKINS J.J. Principles and methods of sterilization - CC. Thomas publisher - Springfield USA (1960) - Chapitre II - Thermal destruction of microorganisms, 33-45
- [ 6 ] PETROVA - ZAVGORODNJAJA A.P. and PRAVILOVA - Desinfection of books and documentary materials by a high frequency electromagnetic field (traduit du russe) - Jerusalem Israel - program for scientific translations - in : New methods for the restoration and preservation of documents and books (1964) 18-21
- [ 7 ] FLIEDER F. op. cité [1] 141-231
- [ 8 ] Anonyme. Les maladies de la pierre; éditorial - Revue de l'Art - n° 13 (1971) 4-10
- [ 9 ] JAVEY C. L'altération des roches et des monuments - étude documentaire - Bulletin du BRGM - 2ème série, section III - n° 1 (1972) 39-66
- [10] TORRACA G. L'attuale stato della conoscenza sulle alterazione delle pietre. Cause e metodi di trattamento - in : Sculture all'aperto - Degradazione dei materiali e problemi conservativi - Ferrara, Bologna (1969)

- [11] LEWIN S.Z. The preservation of natural stones 1839-1965-  
An annotated bibliography - Art and archeology technical  
abstracts - vol.6 n° 1 (1966) 185-272
- [12] STAMBOLOV T., VAN ASPEREN de BOER J.R.J.  
The deterioration and conservation of porous building  
materials in monuments :  
I - a preliminary review - ICOM committee for museum  
laboratories - Brussels (Sept.1967)  
II- an supplementary literature review - ICOM committee for  
museum laboratories - Amsterdam (Sept.1969)
- [13] MAMILLAN M. Pathologie et restauration des constructions  
en pierre - Centre International pour la conservation et la  
restauration des biens culturels - Rome (1972) 19-34
- [14] PLENDERLEITH H.S. op. cité [2] 325-326
- [15] SNEYERS R., de HENAU. La conservation de la pierre -  
in : La préservation des biens culturels - Collection  
"Musées et Monuments" XI- UNESCO (1969) 225-253
- [16] ROSSI MANARESI R. On the treatment of stone sculptures  
in the past - The treatment of stone - Centro per la  
conservazione delle sculture all'aperto - Bologna (1972)  
81-95
- [17] HEMPEL K.F.B. Notes on the conservation of sculpture,  
stone, marble and terracotta - Studies in conservation - 13  
(1968) 34-44
- [18] CABRERA J.M. Le portail du Monastère de Santa Maria  
de Ripoll - étude scientifique pour sa restauration  
Colloque sur l'altération des pierres - Bruxelles (1966-1967)  
ICOMOS (1968) 127-163
- [19] MORA P. Consolidamento provvisorio di un marmo in stato  
di avanzata degradazione - in : La conservazione delle  
sculture all'aperto, Bologna (1971) 160-162
- [20] DOMASLOWSKI W. Consolidation of stone objects with epoxy  
resins, Monumentum IV (1969) 51-64
- [21] DOMASLOWSKI W. L'affermissement sculptural des pierres  
avec des solutions à base de résines époxydes - in :  
Conservation of stone - (1970) New York conference on  
conservation of stone and wooden objets- n° 1 - IIC London  
(1971) 85-102

- [22] HEMPEL K. Esperimenti di consolidamento con resina epossidica maraglas tipo A 665 - in : La conservazione delle sculture all'aperto - Bologna (1971) 212-216
- [23] GAURI K.L., DODERER G.C., LIPSCOMB N.T., SARMA A.C. Reactivity of treated and untreated marble specimens in an SO<sub>2</sub> atmosphere - Studies in conservation 18 (1973) 25-35
- [24] MARCHESINI L., VALCANOVER F. Su un processo di consolidamento di opere d'arte di marmo fortemente alterato Bolletino dell'Istituto centrale del restauro - Roma (1966) 121-135
- [25] MARCHESINI L., BISCONTIN G. Essai de protection et de consolidation sur la façade en terre cuite d'une église - in : The treatment of stone - Centro per la conservazione delle sculture all'aperto - Bologna (1972) 45-64
- [26] SANPAOLESI P. Metodo di indurimento delle pietre dell'architettura - Officina grafichi Vallichi - Firenze (1966)
- [27] LEWIN S.Z. Recent experience with chemical techniques of stone preservation - in : The treatment of stone - Centro per la conservazione delle sculture all'aperto - Bologna (1972) 139-144
- [28] PLENDERLEITH H.S. op. cité [2] 138-143
- [29] FINDLAY W.P.K. The preservation of timber. Adam and Charles Black. Londres (1962) 162 p.
- [30] Traitements préventifs et curatifs des bois de construction contre les altérations biologiques. Cahier n° 73 du Centre Technique du Bois - Paris (1972)
- [31] PACKARD E. Consolidation of decayed wood sculpture in conservation of wooden objects. in : New York Conference on Conservation of stone and wooden objects. The International Institute for Conservation vol. 2 (1970) 13-22
- [32] BRACHERT T. Konservierung und Denkmalpflege, Verlag Berichthaus. Zurich 1965, Teil 11 - Gefasste Holzskulptur und Schnitzaltar.
- [33] LEFEVE R. Altération, protection et consolidation du bois. Bulletin de l'Institut Royal du Patrimoine artistique - 1 (1965) 111-120

- [34] WILLEMSSEN E. Survey of Restauration Procedures Jahr. Rhein. Denkmalpflege 23 (1960) 324-460
- [35] ABERLE B., KOLLER M. Konservierung von Holzskulpturen Inst. für Österreichische Kunstforschung des Bundesdenkmalamtes - Vienna (1968) 43 p
- [36] PACKARD E. The preservation of polychromed wood sculpture by the wax immersion and other methods. Museum News 46 n°2 (1967) 47-52
- [37] International Center for the study of the preservation and Restauration of Cultural Property - Synthetic Materials used in the Conservation of Cultural Property - Rome (1963) 39
- [38] WERNER A.E. Preservation of Stable Wood Structures (1963)
- [39] MIHAILOV A.D. Conservation of wooden works of art in Bulgaria - in : Conservation of wooden objects. New York Conference on Conservation of stone and wooden objects vol.2 (1970) 115-122. The International Institute for Conservation
- [40] ZYKAN J. Die Conservierung und Restaurierung von Holzplastiken. Speculum Artis - vol.5 (Mai 1965) 19
- [41] WERNER A.E. Araldite in Museum Work - Ciba technical Notes 218 (1965)
- [42] WERNER A.E. La préservation du cuir, du bois, de l'os, de l'ivoire et des documents d'archives - in : La préservation des biens culturels. UNESCO (1969) 285-294
- [43] NOACK D. Der gegenwärtige Stand der Dimensionsstabilisierung von Holz und Schlussfolgerungen für die Konservierung der Bremer Kogge - Bremisches Jahrbuch, 50- Band Historische Gesellschaft Bremen
- [44] MUHLETHALER B. Conservation of waterlogged wood and wet leather - Eyrolles. Paris (1973) 72 p.
- [45] BOUTELJE J.B., KIESSLING H. On water-stored oak timber and its decay by fungi and bacteria - Archiv Mikrobiol. 49 [3] (1964) 305-314
- [46] SEN J. Fine structure in degraded ancient and buried wood and other fossilized plant derivatives - Botanical Review 22 (1956) 343-374

- [47] BOUIS J. Principes de conservation et de restauration des bois antiques immergés - ICOM Conservation committee - Bruxelles (1967)
- [48] DETANGER B., RAMIERE R., de TASSIGNY C., EYMERY R de NADAILLAC L. Application de techniques de polymérisation au traitement des objets en bois. International Conference on Application of Nuclear Methods in the field of work of Art - Venise (24-26 Mai 1973) - à paraître
- [49] WENZL J. Holzforschung - vol.8 - 2 (1954) 33
- [50] ROSENQVIST A.M. Studies in conservation 4 (1959) 62-72
- [51] ORGAN R.M. Studies in conservation 4 (1959) 96
- [52] BRORSON-CHRISTENSEN B. The conservation of water-logged wood in the National Museum of Denmark - Museumstekniske Studier 1. The National Museum of Denmark - Copenhagen (1970) 118 p.
- [53] AMBROSE W. Freezedrying of swamp-degraded wood - in : IIC Conference on the conservation of stone and wood - New York (1970)
- [54] BRORSON-CHRISTENSEN B. Aarboeger for Nordisk Oldkynghed og Historie - National Museum - Copenhagen (1952)
- [55] VON W. KRAMER und B. MUHLETHALER. Über die Erfahrungen mit der Alkohol-äthermethode für die Konservierung von Nassholz am Schweizerischen Landesmuseum - Zeitschrift für Archäologie und Kunstgeschichte, Heft 2 - (1968) 78-88
- [56] WIELICKA H. Research on preservation of timber from Biskupin and Gdansk excavation - Wiadomosci archaologiczne 26 (1959-60) 288-296
- [57] ROSENBERG G.H. Mus. J. 33 (1933) 432
- [58] ROSENQVIST Anna-M. Studies in conservation 4 (1959) 62
- [59] MUNNIKENDAM R.A. Conservation of waterlogged wood using Radiation Polymerization - Studies in conservation- 12 (1967) 70-75
- [60] GARROUSTE L. Procédé de conservation des bois antiques dans l'eau douce ou dans l'eau de mer - Brevet d'invention République Française- n°I.392.835 (1964)

- [61] STAM A.J. Effect of polyethylene glycol on the dimensional stability of wood. Forest Products J.9 - n°10 (1959)
- [62] MOREN R.E., CENTERWALL K.B. The use of polyglycols in the stabilizing and preservation of wood. Meddelanden Fran Lunds Universitets Historiska Museum (June 1960) 176-196
- [63] ORGAN R.M. Carbowax and other materials in the treatment of waterlogged paleolithic wood. Studies in conservation 4 (1959) 96-105
- [64] LEFEVE R. Conservation Treatment with Polyethylene glycol of a wooden roman bucket excavated at Wommel. Bull. Institut Royal du Patrimoine Artistique 4 (1961) 97-108
- [65] ALBRIGHT A.B. The preservation of small waterlogged wood specimens with polyethylene glycol - Curator, American Museum of national history - n°9 (1966) 3
- [66] SEABORG R.M. and INVERARITY R.M. The preservation of old waterlogged wood by treatment with polyethylene glycol - Science 136 (1962) 649-650
- [67] SEABORG R.M. Studies in conservation 7 (1962) 111-119
- [68] BARKMAN M.L. La conservation du bois du bateau de guerre "WASA" des Vikings - Conseil International des monuments et des sites. Colloque sur l'altération du bois, Ludwigsburg 8.11-VI (1969) 99
- [69] NOACK D. Some remarks on the process used for the conservation of the "Bremen Cog"
- [70] MÜLLER-BECK and HAAS A. Studies in conservation- 5 (1960) 150
- [71] TROSTJANSKAJA E.B., TOMASCHEWITSCH G.N., SOROKINA E.W. Festigung und Restaurierung von Altertümern aus Holz - Moscou (1960)
- [72] LEHMAN J. Briefl. Mitteilung (Juni 1965) - National Museum - Poznan - Poland
- [73] NOGID I.L. Conservation of waterlogged wood in archeology, Soviet Archeology - 3 - Editor A.N. SSSR- M.(1965) 277-279
- [74] RICHARDS J.W. Introduction to industrial sterilization- ch12 Radiation sterilization. Academic press, London (1963) 145-156

- [75] GOLDBLITH S.A. General principles of radiosterilization  
Radiosterilization of medical products - IAEA - Vienna  
(1967) 3-22
- [76] BORICK P.M., PEPPER R.E. The spore problem  
Chemical sterilization - Sommerville USA (1973) 318-335
- [77] HUGO W.B. The mode of action of antibacterial agents  
Chemical sterilization - Sommerville USA (1973) 27-60
- [78] BECK W. L'emploi des radiations ionisantes pour l'essai -  
nissement du bois ancien - in : Colloque sur l'altération du  
bois Ludwigsburg - ICOMOS (1969) 53-67
- [79] BLETCHEY J.R., FISCHER R.C. Use of gamma radiation  
for the destruction of wood—boring insects. Nature 179 -  
n°4561 (1957) 670
- [80] BORS J. La suppression des dommages aux bois par des  
radiations ionisantes - in : Colloque sur l'altération des  
bois Ludwigsburg - ICOMOS (1969) 69-76
- [81] CASARET A.P. Radiation biology - New Jersey (1968) 149
- [82] SWALLOW A.J. Radiation Chemistry of organic compounds -  
Pergamon press- Oxford (1960) 380 p.
- [83] PARKER D.B.V. Polymer Chemistry. Applied Science  
Publishers. Londres (1974) 251 p.
- [84] SHAPIRO A. Radiation Chemistry of polymeric systems.  
Interscience Publishers. John Wiley and sons. Londres  
(1962) 712 p.
- [85] MIETTINEN J.K. WPC prepared by induced radiation -  
Paperi Puu 49 2 (1967) 96-97, 184
- [86] RONDENAY F. un nouveau matériel : le bois plastique.  
Cahier d'Information EURISOTOP n°23- Bruxelles (1968) 14 p.
- [87] BURMESTER A. Bois amélioré par imprégnation de  
monomères radiopolymérisés. Cahier d'Information  
EURISOTOP n°22 - Bruxelles (1969) 53 p.
- [88] VILLIERE A. Etude générale des bois plastiques. Cahier  
d'information EURISOTOP n°24 - Bruxelles (1969) 35 p.
- [89] CZVIKOVSKY T. Wood-Plastic combination-IAEA Vienne.  
Atomic Energy review vol. VI n°3 (1968)

- [ 90 ] Preparation of wood-plastic combinations using gamma radiation to induce polymerization - West Virginia University. Rapports ORO 600, 2945-9, 612, 628, 2945-4, 2945-7 (1963-1967)
- [ 91 ] STEINBERG M. et coll. Concrete polymer materials  
I first topical report : BNL 50134 (T 509) and USBR  
Gen. Rep. 41 (Décembre 1968)  
II second - - : BNL 50218 (T 560) and REC OCE  
70-1 (Décembre 1969)  
III third - - : REC - ERC 71-6 and BNL 50275  
(T 602) (Janvier 1971)
- [ 92 ] STEINBERG M., COLOMBO P. Preliminary survey of polymer-impregnated stone = BNL 50255 (Septembre 1970)
- [ 93 ] MEINKE W.W. Nuclear activation with Cobalt 60 gamma rays - Ann Arbor, Michigan (Mai 1954) 17 p.
- [ 94 ] ROGERS F. Activity induced in food by electron, alpha ray and Cobalt 60 gamma radiation. Wantage research Labo U.K. (1964) 28 p.
- [ 95 ] TUKHSHEERER T. Induced activity of nuclear isomers originated in conservation of foods by irradiation in the energy range below 10 MeV. Atomkernenergie 11 - 333-8 (Juillet - Août 1966)
- [ 96 ] TUKHSHEERER T. Problem of induced radioactivity in food products. International symposium on food irradiation. Karlsruhe. IAEA Vienne (1966)
- [ 97 ] KRASSIG H. Der Strahlenabbau der Cellulose und sein Einfluss auf die Festigkeit von Cellulosefasern - in : Das Papier, 21, H. 10 A (1967) 629-635
- [ 98 ] POLCIN J., VALLER F., FELCANOVA A., VARYOVA C. Influence des radiations ionisantes sur la structure supramoléculaire de la cellulose. Cellulose Chem. Technol., I - Bratislava (1967) 259-275
- [ 99 ] PASZNER L. Effect of inter and intra-crystalline swelling on cellulose degradation by gamma-rays - Svensk papperstidning 71, n° 22 (1968) 822-827
- [100] SORANTIN H., BARDON A. Verhalten von technischen Papieren im Strahlenfeld - Änderung der mechanischen Eigenschaften von Packpapier durch Bestrahlung - in : Das Papier - 21, H.3, 114-116

- [101] KUBAT J., MARTIN-LOF S., de RUVO A. Effect of gamma radiation on some paper properties - Svensk Papperstidning 71, n° 23 (1968) 851-856
- [102] PAVON-FLORES S. Contribution à l'étude des propriétés fongicides des rayonnements gamma et leurs effets sur des papiers de différentes qualités - Diplôme de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes - Paris (1974) 58 p.
- [103] FREIDIN A.S., MALINSKY J.M., KARPOV V.L. Radiation makes better woods and copolymers. Nucleonics 18, n° 3 (1960) 88-90
- [104] SEIFERT K. Die chemische Veränderung der Holzzellwand-Komponenten unter dem Einfluss pflanzlicher und tierischer Schädlinge - in : Mitt. Holzforch. Nr 3, und 4 (1962)
- [105] BECKER G., BURMESTER A. Veränderung von Holzeigenschaften durch Gamma-Strahlung. Materialprüfung, Bd 4 - H.11 (1962) 416-426
- [106] LOOS W.E. Effect of gamma radiation on the toughness of wood. Forest products journal 12 - n° 6 (1962) 261-264
- [107] BURMESTER A. Veränderung der Druck und Zugfestigkeit sowie der Sorption von Holz durch Gamma-Strahlung. Materialprüfung - 6 H.4 (1964) 95-99
- [108] POLCIN J., KARHANEK M. Einfluss der ionisierenden Strahlung auf Holz. Holzforschung, Bd 18 H.4 (1964) 102-108
- [109] PATON J.M., HEARMON R.F.S. Effect of exposure to gamma rays on the hygroscopicity of sitka spruce wood, Nature 180 - 4587 (1957) 651
- [110] MURAYAMA T. Studies on radiation treatment of wood and wood substance. Rep. n° 1 Wood Industry H.2 - TOKYO (1963) 19-25
- [111] KENAGA D.L., COWLING E.B. Effect of  $\gamma$  radiation on Ponderosa Pine hygroscopicity, swelling and decay susceptibility. FOR. Prod. J. 9 n° 3 (1959) 112-116
- [112] MIHAILOV A. Radiosterilisation of wooden articles of art and museum objects. ICOM committee on conservation Madrid Meeting (20 Octobre 1972) non publié.

- [113] BLETCHLEY J.D. The effect of gamma radiation on wood-boring insects. . Appl. Biol. 49 n°2 (1961) 362-370
- [114] BORS J., GLUBRECHT H. Untersuchungen über die Strahlenresistenz holzerstörender Pilze. Holzforschung, 21, H. 5 (1967) 129-135
- [115] SINGER K, VINTHER A., FORDOS Z. Irradiated concrete-polymer materials - on the influence of different polymers on strength properties - Third symposium on radiation chemistry - Tihany - Hongrie (Mai 1971)
- [116] de NADAILLAC L. Utilisation du rayonnement gamma dans la conservation des biens culturels. The treatment of stone - Centro per la conservazione delle sculture all'aperto - Bologna (1972) 73-79
- [117] de NADAILLAC L. Contribution au traitement de la pierre. ICOM committee on conservation Madrid Meeting (Octobre 1972) non publié
- [118] DETANGER B., RAMIERE R., de TASSIGNY C., EYMERY R., de NADAILLAC L. Application des techniques de polymérisation au traitement de la pierre. International Conference on Application of Nuclear Methods in the Field of Art - Venise (24-26 Mai 1973) à paraître.
- [119] MAMILLAN M. L'altération et la préservation des pierres dans les monuments historiques - in : Colloque sur l'altération de la pierre - Bruxelles 1966-1967 - ICOMOS - Paris (1968) 65-98
- [120] Rapports privés - Traitements de consolidation effectués au Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble - contrôles réalisés au Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) - Saint Rémy les Chevreuse - Paris
- [121] Contribution à cette publication - Travaux effectués au Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble - Service d'Application des Radioéléments et des Rayonnements
- [122] TARKOW H., FEIST W.C., SOUTHERLAND C.F. Interaction of wood with polymeric materials : penetration versus molecular size. Forest Products Journal 16 n° 10 (1966) 61-66

- [123] BECK M.W. L'emploi des radiations ionisantes pour l'assainissement du bois ancien. Colloque sur l'altération du bois. Ludwigsburg 1969 - International council of monuments and sites.
- [124] de GUICHEN G., GAUMANN T., MU HLETHALER B. Méthode de conservation du bois provenant de cités lacustres par diffusion d'un monomère et polymérisation par rayonnement gamma. Thèse - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Suisse (1966)
- [125] DETANGER B., RAMIERE R., de TASSIGNY C., EYMERY R., de NADAILLAC L. Application de techniques de polymérisation au traitement des objets en bois gorgés d'eau. International Conference on Application of Nuclear Methods in the Field of work of Art - Venise (24-26 Mai 1973) A paraître.